



КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

## ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XX Международной научно-технической  
КОНФЕРЕНЦИИ



ГНЦ РФ ОАО "ОНПП "Технология"

XX Международная  
научно-техническая конференция

**КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Тезисы докладов

Обнинск, 2013

Под общей редакцией канд. техн. наук, акад.РИА, члена SAMPE *О.Н.Комиссара*

Редакционная коллегия:

*М.Ю.Русин*, докт. техн. наук (председатель, научный редактор);

*Г.С.Шуль*, канд. техн. наук (научный редактор);

*Н.В.Выморков* (научный редактор);

*В.И.Самсонов*, канд. техн. наук (научный редактор);

*О.В.Коваль*, канд. эконом. наук (научный редактор)

*Л.В.Черфас*, *А.В.Соколова*, *Л.А.Климакова*; *Г.И.Куликова*, канд.техн.наук;

*А.М.Каплунова*, канд.хим. наук; *Н.Н.Лоскутова*

Сборник подготовили: *И.Ю.Келина* – ответственный за выпуск;

*Л.К.Ващенко* – редактор; *Д.А.Бубало*.

Компьютерный набор, верстка ОАО “ОНПП “Технология”.

© 249031, г. Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 15  
ОАО “ОНПП “Технология”.

# МЫ БЛАГОДАРИМ НАШИХ СПОНСОРОВ И ПАРТНЕРОВ ЗА ПОМОЩЬ В УСПЕШНОМ ПРОВЕДЕНИИ КОНФЕРЕНЦИИ:

➤ **ОАО “РТ-Химкомпозит”**



➤ **ОАО “Обнинское научно-производственное предприятие “Технология”**



➤ **STEVIC (Франция)**



➤ **МГТУ им. Н.Э.Баумана**



➤ **Airtech Europe Sarl (Люксембург)**



➤ **Композиты России**



## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- С.М.Сокол* – генеральный директор ОАО “РТ-Химкомпозит”, к.п.н.
- А.И.Богинский* – директор Департамента авиационной промышленности, к.э.н.
- А.И.Ляшенко* – заместитель директора Департамента авиационной промышленности Министерства промышленности и торговли РФ
- В.В.Карапетьянц* – первый заместитель генерального директора ОАО “РТ-Химкомпозит”
- Е.Н.Каблов* – генеральный директор ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ, д.т.н., профессор, академик РАН
- А.Г.Ромашин* – д.т.н., профессор, академик РИА и МИА, Всемирной академии керамики
- С.Л.Чернышев* – исполнительный директор ФГУП “ЦАГИ” ГНЦ РФ, д.ф-м.н., член-корр. РАН
- О.С.Сироткин* – генеральный директор ОАО “НИАТ”, д.т.н., профессор, академик МИА
- А.Е.Ушаков* – генеральный директор НПП “АпАТЭК”, д.т.н., профессор
- В.Ф.Солинов* – генеральный директор ОАО “НИТС”, д.т.н., академик АИН, АЕН, член-корр. АТН
- А.А.Александров* – ректор МГТУ им. Н.Э.Баумана, д.т.н., профессор
- Н.Г.Айрапетова* – и.о. директора ИАТЭ НИЯУ МИФИ, к.э.н.
- И.В.Горская* – генеральный директор АГНЦ “Наука”
- А.Н.Тимофеев* – первый заместитель генерального директора ОАО “Композит”, к.т.н.
- В.С.Боголюбов* – директор ОНЦ “Композит”, д.т.н., профессор, академик РИА и МИА
- К.А.Солнцев* – директор института Metallургии и Материаловедения им. А.А.Байкова, д.х.н., академик РАН
- Б.Л.Красный* – генеральный директор ЗАО “НТЦ “Бакор”, д.т.н., академик РИА и МИА, Всемирной Академии керамики

- Б.Б.Соколов* – директор Программ по научно-техническому сотрудничеству компании Boeing, к.т.н.
- Ф.Дюмель* – директор завода ООО “Порше Современные материалы”
- В.Руппель* – генеральный директор компании СТЕВИК
- Б.Самакоски* – президент компании “Mikrosam A.D”
- В.З.Дрогнев* – генеральный директор ЗАО “Хантсман-НМГ”
- А.А.Сотников* – генеральный директор ОАО “Агентство инновационного развития – центр кластерного развития Калужской области”, к.т.н., доцент
- А.А.Постников* – директор филиала ФГБУ “Институт профессионального администрирования и комплексной энергоэффективности”, к.ф-м.н., доцент
- С.И.Бредихин* – заместитель директора ИФТТ РАН, д.ф-м.н.
- В.Н.Сигаев* – заместитель руководителя центра оптического стекла РХТУ им. Д.И.Менделеева, д.х.н., профессор
- Т.Д.Каримбаев* – начальник отдела ФГУП “ЦИАМ им. П.И.Баранова”, д.т.н., профессор
- А.М.Думанский* – заведующий лабораторией ФГБУН ИМАШ им. А.А.Благоднарова РАН, д.ф-м.н., профессор
- П.В.Иванов* – профессор кафедры “Химии и технологии элементоорганических соединений” МИТХТ им. М.В.Ломоносова, д.х.н.
- И.Л.Тимошин* – заместитель министра - начальник Управления промышленности, транспорта и связи Министерства экономического развития Калужской области
- В.А.Нелюб* – директор Инжинирингового научно-образовательного центра “Новые материалы, композиты и нанотехнологии”
- О.Н.Комиссар* – генеральный директор ОАО “ОНПП “Технология”, к.т.н.

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ ПУБЛИКУЮТСЯ В ОРИГИНАЛАХ,  
ПРЕДСТАВЛЕННЫХ АВТОРАМИ**

**ОРГКОМИТЕТ НЕ НЕСЕТ ОТВЕТСТВЕННОСТИ  
ЗА СОДЕРЖАНИЕ ЭТИХ МАТЕРИАЛОВ**

Секретарь конференции  
И.Ю.Келина

## ВВЕДЕНИЕ

XX научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» традиционно проходила в Обнинске, первом в России наукограде - одном из ведущих научных и технологических центров страны. Государственный научный центр Российской Федерации ОАО «ОНПП «Технология», являясь признанным лидером в сфере разработки и производства наукоемкой продукции для высокотехнологичных отраслей промышленности, более сорока лет проводит конференции, позволяющие российским и зарубежным профессионалам обсудить современные тенденции развития науки и технологий создания изделий из неметаллических материалов.

За эти годы конференция значительно расширила географию своих участников. В работе нынешней, юбилейной конференции, приняли участие более четырехсот делегатов, представлявших около сотни ведущих предприятий и институтов России и зарубежья. В числе участников – ученые и специалисты ФГУП «ВИАМ», ОАО «Компания «Сухой», РКК «Энергия», ОАО «ОАК-Транспортные самолеты», ФГУП «ЦАГИ», ОАО «Авиадвигатель» и др., а также представители фирм «Mikrosam A.D.» (Македония), «SONIMAT», «STEVIK», «GMI-AERO», «HEXCEL» (Франция), «Airtech Europe Sarl» (Люксембург), ГП «Антонов» (Украина), «AAALaw» (Литва) и др.

В рамках конференции работали традиционные секции: полимерные композиционные материалы и конструкции; стекло и оптические покрытия; керамические материалы со специальными свойствами, а также две новые - ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов и управление инновационными процессами. Появление новых секций дало возможность участникам обменяться опытом по таким актуальным вопросам, как ремонт и послепродажное обслуживание изделий из композиционных материалов, и развитие инновационной составляющей на крупных предприятиях.

Кроме того, в этом году в программу конференции впервые включен профильный мастер-класс, на котором специалисты фирм «STEVIK» (Франция), «GMI-AERO» (Франция), «SONIMAT» (Франция) и «VIST COMPOSITE» (Россия) поделились опытом ремонта конструкций из полимерных композиционных материалов. Также было организовано проведение «Круглого стола» по вопросам перспектив создания центра превосходства – кластера аэрокосмических технологий и конструкций в Калужской области.

Торжественное собрание, посвященное открытию конференции, было приурочено к 25-летию полета первой советской многоразовой космической системы «Энергия-Буран», который подтвердил выдающиеся достижения нашей науки и техники, сумевшей реализовать самый масштабный и уникальный проект мирового значения.

Запуск отечественного космического челнока заложил основы современного композитного производства в России, а участие Обнинского НПП «Технология» в программе создания «Бурана» стало знаковым событием, определившим современный облик предприятия как центра компетенций международного уровня.

Как известно, из 100 тонн общей массы корабля, 10 тонн – изделия, произведенные на ОНПП «Технология». Это всемирно известная керамическая сверхлегкая теплозащита, крупногабаритные углепластиковые створки отсека полезного груза, высокопрочные термостойкие лобовые стекла корабля, керамические узлы крепления из нитрида кремния, различные уплотнители и многое другое.

Опыт работы ОНПП «Технология» и многих ведущих предприятий России при создании новых материалов и конструкций в рамках проекта «Энергия-Буран» явился прекрасным примером комплексной организации современного научного исследования, разработки на его основе уникальной технологии и как результат – организации серийного производства изделий и материалов с заданными свойствами.

В сборник трудов конференции вошли тексты приветствий генерального директора холдинга «РТ-Химкомпозит» С.М.Сокола, заместителя директора Департамента авиационной промышленности А.И.Ляшенко, главы городского самоуправления г.Обнинска В.Н.Савина, а также сделанные на пленарном заседании доклады исполнительного директора ФГУП «ЦАГИ» С.Л.Чернышева, генерального директора ФГУП «ВИАМ» Е.Н.Каблова, генерального директора ОАО «НИАТ» О.С.Сироткина, ректора МГТУ им. Н.Э.Баумана А.Александрова, генерального директора ОАО «ОНПП «Технология» О.Н.Комиссара.

Основное место в издании заняли тезисы 200 докладов, представленных на XX Международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», которая проходила с 1 по 3 октября 2013 года в городе Обнинск Калужской области.

## ПРИВЕТСТВИЯ

**С.М.Сокол**

Генеральный директор ОАО «РТ–Химкомпозит», г. Москва



**Уважаемые гости, делегаты конференции, коллеги!**

Большая честь для меня открывать мероприятие, посвященное такой дате. 25 лет со дня старта первого российского многоразового воздушно-космического самолета «Буран». Именно это событие заложило основы современного композитного производства в России.

Участие в создании «Бурана» можно считать одной из реперных точек, определивших профиль ОНПП «Технология». Общеизвестный факт: из 100 тонн общей массы корабля 10 тонн – изделия, произведенные в «Технологии».

Тогда для этой задачи в Обнинске был образован центр компетенции по технологиям и конструкциям из полимерных композиционных материалов, который был оснащен полным комплексом самого передового оборудования, технологиями и специалистами.

В тесном содружестве с ЦАГИ, ВИАМ и НИАТ была создана система менеджмента качества, принципы безбумажных технологий производства композитных конструкций и методы неразрушающего контроля качества и ремонта.

Создание новых материалов с заданными свойствами поставило перед учеными ряд задач, решения которых на тот момент просто не имелось.

Для корабля «Буран» впервые в стране были изготовлены крупногабаритные створки отсека полезного груза из ПКМ общей длиной до 18 метров.

Горд осознавать, что люди, сидящие рядом со мной в президиуме и в этом зале, участники этого легендарного события.

Холдинг «РТ-Химкомпозит», куда входит в том числе и Обнинская Технология, является одним из ведущих инновационных холдингов России, и определен центром компетенции Госкорпорации «Ростех» в области композиционных материалов и конструкций.

Хочу отметить, первый в России наукоград – город Обнинск, по праву можно считать одним из ведущих научных и технологических центров страны.

Именно поэтому, мы решили провести мероприятия в рамках XX Международной научно-технической конференции “Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов” именно здесь. В работе конференции примут участие более четырехсот делегатов, представляющих полсотни ведущих предприятий и институтов России и зарубежья. Подобные мероприятия, безусловно, являются не только дискуссионной площадкой, но и ключевым индикатором высочайшего уровня компетенций холдинга.

Не стану задерживать более Вашего внимания.

Делегатам конференции и уважаемым коллегам хочется пожелать плодотворной работы и новых открытий на благо России.

Торжественное собрание, посвященное 25-летию полета космического корабля «Буран», и научно-техническую конференцию предлагаю считать открытыми.

Спасибо.

### **А.И.Ляшенко**

Заместитель директора Департамента авиационной промышленности  
Министерства промышленности и торговли РФ



#### **Уважаемые коллеги!**

Сегодня мы присутствуем на знаменательном событии для Российской прикладной науки – XX Международной научно-технической конференции “Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов”, которая проходит в Юбилейную дату полета российского возвращаемого космического корабля «Буран», выдающегося достижения российских ученых, инженеров и специалистов.

Обнинское научно-производственное предприятие, организатор конференции, принимало непосредственное участие в разработке материалов, технологий и конструкций для российского челнока. Научные исследования в области полимерных композитов, стекла и керамики для корабля «Буран» нашли широкое развитие в последующих разработках и воплотились в обтекатели ракет ракетно-зенитных комплексов, космических ракет-носителей, остекление современных самолетов и в уникальном истребителе 5-го поколения ПАК ФА, углепластиковая обшивка и панели крыльев которого были изготовлены в «Технологии».

Успешному развитию предприятия способствовало Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, финансируя НИОКРы

и техническое перевооружение предприятия, выведя его на уровень аналогичных мировых фирм.

Желаю участникам конференции интересных докладов и дискуссий, а самое главное, воплощения ваших научных исследований и разработок в реальные результаты!

### **В.Н. Савин**

Глава городского самоуправления г. Обнинска, первого наукограда РФ



### **Дорогие обнинцы, уважаемые участники торжественного собрания!**

Позвольте поздравить вас со значимой для нашей страны датой – 25-летием со дня успешного полета космического корабля «Буран». Четверть века назад, 15 ноября, случилось событие, которое стало знаменательной вехой истории как отечественной, так и мировой космонавтики: корабль «Буран» совершил полет вокруг Земли.

До сих пор это событие не имеет аналогов во всем мире: летательный аппарат весом около 87 тонн осуществил в автоматическом режиме полет, приведение и посадку. Такой успех отечественной космонавтики - это итог трудоемкой и напряженной работы сотрудников более чем 1200 сотрудников советских предприятий и организаций, это более 1-го миллиона человек. Они создали более чем 600 технологий в процессе работы над конструированием орбитального корабля.

Хочется отметить заслуги всех, кто работал над проектом «Энергия-Буран» и выразить признательность за их труд. 25 лет назад полет «Бурана» обозначил мощь нашей страны и научно-технический потенциал отечественной космонавтики.

Этот событие важно как в целом для нашей страны, так и в частности для нашего города. Многим известно, что обнинское предприятие НПП «Технология» участвовало в создании корабля: 10 % «Бурана» было произведено на «Технологии». Считается, что профиль этого предприятия определился именно тогда, 25 лет назад.

Позвольте пожелать всем, кто работал над программой «Энергия-Буран», всем тем, кто сейчас работает в ракетно-космической отрасли и над производством изделий для этой отрасли крепкого здоровья, успехов, благополучия и новых высоких достижений!

## **Ю.С.Твердохлеб**

Заместитель главы Администрации г. Обнинска по экономическому развитию



Конференция посвящена 25-летию полета многоразового космического корабля «Буран», который стал ярчайшим воплощением достижений Советского Союза в развитии науки и технологий и убедительным примером высочайшего профессионального уровня и управленческой компетентности кадров предприятий и организаций, участвующих в проекте, в числе которых ОНПП «Технология» занимает достойное место;

Конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» проходит в юбилейный 20-й раз, и все эти годы она была уникальной площадкой, на которой ведущие учёные и специалисты делились своим опытом и достижениями в области новых неметаллических материалов, обменивались мнениями о путях дальнейшего развития отрасли, которые в последующем находили своё практическое воплощение.

ОАО «ОНПП «Технология» является не только лидером в своей отрасли, но и одним из лучших предприятий региона и первого наукограда России Обнинска, получившего этот высокий статус во многом благодаря достижениям именно этого предприятия, а высокая социальная ответственность и активная гражданская позиция его руководства помогает органам местного самоуправления эффективно решать задачи социально-экономического развития города.

## ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

Секция I	ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ
Секция II	РЕМОНТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
Секция III	КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ
Секция IV	СТЕКЛО И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ
Секция V	УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

В рамках конференции проведены:

Мастер – класс	РЕМОНТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
Круглый стол	ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЦЕНТРА ПРЕВОСХОДСТВА – КЛАСТЕРА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

***Чернышев С.Л.***

Многоразовый пилотируемый космический корабль «Буран» и современные тенденции в аэродинамике и прочности летательных аппаратов ..... 35

***Каблов Е.Н.***

Доспехи для Бурана ..... 38

***Сироткин О.С.***

Развитие промышленных авиационных технологий – от “Бурана” до наших дней ..... 45

***Комиссар О.Н.***

Наукоемкие технологии, неметаллические материалы и уникальные конструкции на их основе для космического корабля “Буран“ ..... 46

***Александров А.А.***

Материаловедческий опыт “Бурана“ и современные тенденции в МГТУ им. Н.Э.Баумана ..... 50

***Ромашин А.Г., Келина Р.П., Келина И.Ю.***

История научно-технических конференций ОАО «ОНПП «Технология»: 1967 – 2013 годы ..... 52

### **Секция 1. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ**

***Гуняев Г.М., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г.***

Полимерные композиционные материалы в конструкциях ВСК “Буран” ..... 65

***Раскутин А.Е., Соколов И.И., Шульдешова П.М., Куцевич К.Е.***

Конструкционные углепластики, стеклопластики и органопластики для высоко- и средненагруженных конструкций ..... 67

***Карпов Я.С.***

Анализ решений некоторых фундаментальных проблем инженерии композитов учеными Харьковского авиационного института ..... 69

***Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Яковлев А.Л.***

Слоистые металлополимерные композиционные материалы: преимущества, перспективы применения ..... 72

<b>Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Кириченко В.В., Коваленко В.А.</b> Оптимальное проектирование композитных конструкций ракетно-космической техники при многофакторном нагружении с учетом технологических ограничений.....	73
<b>Потапов А.М., Коваленко В.А., Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В.</b> Выбор эффективных конструктивно-технологических решений агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов и их реализации в производстве.....	75
<b>Климакова Л.А.</b> Практический инжиниринг прецизионных конструкций для высокоточных космических аппаратов (ка) .....	77
<b>Зельнев В.Н., Климакова Л.А., Половый А.О.</b> Исследование несущей способности болтового соединения в конструкции углепластикового каркаса с металлическими фланцами .....	79
<b>Чуднов И.В.</b> Прецизионный антенный рефлектор из углепластика: конструкция, технология изготовления, испытания .....	81
<b>Андреев П.В., Еремин А.Г., Федоров М.Ю.</b> Применение композиционных и керамических материалов в конструкции космических ядерных энергетических установок .....	82
<b>Хмельницкий Я.А., Ширина О.В., Гончаров К.А.</b> Разработка конструкции и технологии изготовления ультралёгких каркасов солнечных батарей для космических аппаратов .....	82
<b>Сливинский В.И., Санин А.Ф., Харченко М.Е., Кондратьев А.В.</b> Формирование физико-механических характеристик и прочностных свойств сотовых заполнителей для терморазмеростабильных конструкций космического назначения .....	84
<b>Волков В.С., Кулагина И.В., Гриценко М.В., Бабкина И.О., Шульц А.М., Денисова Е.В.</b> Способы повышения прочности стеклосотопластов .....	85
<b>Волков В.С., Денисова Е.В., Шульц Г.С., Корнейчук А.Н., Кулагина И.В., Шульц А.М.</b> Разработка термостойких стеклопластиковых сотовых заполнителей.....	86
<b>Булгаков Д.А., Горенберг А.Я., Куперман А.М.</b> Ориентация углеродных наночастиц в электрическом поле с целью повышения свойств армированных пластиков .....	88

**Дин Кай Цзянь, Салиенко Н.В.**

Разработка модели оценки структуры и свойств стеклопластиков на основе полиамидной матрицы, модифицированной наночастицами ..... 89

**Самакоски Б., Самак С.**

Что требуется для производства высокотехнологичных композитов на сегодняшний день? ..... 90

**Думанский А.М., Алимов М.А.**

Оценка характеристик упругости однонаправленного углепластика ..... 91

**Волков Д.А., Литицкая В.А., Ларькова А.М., Климакова Л.А., Половый А.О., Митякова А.В., Селина Л.С.**

Опыт внедрения высокопрочных материалов и разработка технологии изготовления панелей оперения изделия МС-21 ..... 93

**Бухаров С.В., Лебедев А.К.**

Анализ технологического процесса вакуум-термокомпрессионного формования интегральных конструкций из ПКМ ..... 94

**Гайдукова С.М., Козерацкая Е.П., Петропольский В.С.**

Влияние технологических свойств вспомогательных “жертвенных” тканей на физико-химические и физико-механические характеристики однонаправленных углепластиков ..... 95

**Обухова Н.С., Ширко А.А., Добрецова И.Н., Войлочников А.И., Лепикаш Е.Р.**

Влияние вспомогательных удаляемых материалов на свойства формируемых стеклопластиков ..... 98

**Чернявский А.Г., Романов А.А., Тюльменков В.А., Алямовский А.И., Копыл Н.И., Давыдов Д.Я., Аккуратов И.Л., Сеньковский А.Н., Запруднов Д.М.**

Разработка и изготовление корпусных элементов из композиционных материалов блока оптико-электронного модуля автоматического космического аппарата ..... 100

**Выморков Н.В., Полонская И.Р.**

Автоматизация процессов изготовления изделий и конструкций из ПКМ с использованием программного модуля “FiberSim” ..... 103

**Синенков А.Н., Викулин В.В., Волобуева Н.Б., Мазур В.В.**

Прогнозирование прочностных свойств углепластиков на основе структурных особенностей в межфазном слое ..... 105

<b>Якушкин П.Ю., Забейжайлов М.О., Rogov Д.А., Миронова Е.В.</b> Разработка методов исследования механических свойств полимерных и полимерных композиционных материалов в условиях высокоинтенсивного нагрева.....	106
<b>Лохов А.А., Сухов С.Г., Кривцова О.С.</b> Особенности изготовления углепластиковых стержневых элементов для ферменных конструкций космических летательных аппаратов из углеродной ленты с повышенным качеством прочности и жесткости.....	109
<b>Иванов В.Н., Никитин Б.М., Брыков С.И.</b> Использование высокочастотных электротехнологий при изготовлении конструкционных неметаллических материалов.....	111
<b>Захаров А.Г., Попова Д.А., Конышев И.А., Воинов Д.И.</b> Интеллектуальный ячеистый наполнитель для многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и способ его изготовления .....	112
<b>Баранов А.А., Обухова Н.С., Лепикаш Е.Р., Шуль Г.С.</b> Радиопрозрачное укрытие на основе эпоксистеклопластика для аппаратуры приема и обработки информации от космических спутников.....	113
<b>Михеев П.В., Берлин А.А.</b> Особенности разрушения при растяжении некоторых типов арамидных волокон в однонаправленных полимерных композитах.....	115
<b>Михеев П.В., Зайцев О.В., Артемьев А.В.</b> Подтверждение свойств монослоя по результатам испытаний конструкционного углепластика.....	117
<b>Мосиук В.Н., Томчани О.В., Сидоренко М.А., Ворзуль С.В., Портнова Я.М.</b> Исследование свойств бисмалеимидных и эпоксиимидных связующих и углепластиков на их основе .....	120
<b>Бухаров С.В., Гуняева А.Г., Губин С.Г., Осадчий Н.В.</b> Разработка и исследования углепластиков на основе термореактивных связующих, модифицированных графеном .....	122
<b>Долгова М.И., Станкой М.А., Мийченко И.П., Бухаров С.В.</b> Влияние ферритовых модификаторов на образование сетчатой матрицы АПИ.....	124
<b>Шкатов П.Н., Дидин Г.Н., Мякушев К.В., Михеев П.В.</b> Использование метода вихревых токов для дефектоскопии углепластиков .....	125
<b>Тайгин В.Б., Грудинин Г.Н., Болгов В.В.</b> К вопросу об изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов по вытравляемым оправкам.....	128
<b>Бородулин А.С.</b> Моделирование процессов течения полимерных связующих .....	130

<b>Рзянкин В.В., Бухаров С.В., Красенков Я.Н.</b> Исследование процессов отверждения эпоксидных связующих и технологии изготовления полуфабрикатов стоматологических штифтов методом пултрузии .....	131
<b>Мухин Н.В., Хмельницкий А.К., Александров Н.Г., Оленин И.Г., Телегин С.В.</b> Эффективность применения новых полимерных композиционных материалов в конструкции трехслойных оболочек корпусов головных обтекателей.....	134
<b>Осокин В.М.</b> Методы неразрушающего контроля изделий из полимерных композитных материалов .....	136
<b>Попов А.Г., Савельев Д.И.</b> Особенности экспериментального определения прочностных и упругих свойств при сжатии однонаправленных углепластиков .....	138
<b>Томчани О.В., Юдина Л.В., Ворвуль С.В., Бойко Л.И.</b> Исследования по созданию высокотемпературных герметизирующих материалов на основе кремнийорганических каучуков для клеевых соединений металлов с керамикой.....	140
<b>Томчани О.В., Маслова Е.И., Юдина Л.В., Бойко Л.И., Миронова Е.В.</b> Разработка нового теплостойкого клея-герметика для соединений металлов с керамикой.....	142
<b>Юдина Л.В., Иванова С.М., Хабенко А.В., Томчани О.В.</b> Исследование эпоксиуретанового компаунда методами термического анализа .....	143
<b>Бойко Л.И., Котухова А.М., Иваницкий А.С., Юдина Л.В.</b> Электрические свойства термостойкого эпоксиуретанового компаунда.....	145
<b>Попов А.Г., Матюшевский Н.В.</b> Анализ и выбор методов испытаний современных углепластиков на сдвиг в плоскости листа со схемой армирования $\pm 45^\circ$ .....	146
<b>Степанов П.А., Ролецкая Н.А., Кулиш В.Г., Василенко В.В.</b> Разработка композиционного синтактного материала .....	149
<b>Лазарев В.А., Пнёв А.Б., Журнов А.А., Степанов К.В., Михеев П.В., Нелюб В.А.</b> Квазираспределённая оптико-электронная измерительная система для контроля деформаций с повышенной чувствительностью и частотой опроса.....	150
<b>Думанский А.М.</b> Прогнозирование анизотропии нелинейных и временных свойств слоистых композиционных материалов.....	152

<b>Думанский А.М., Алимов М.А., Радченко А.А.</b> Исследование деформационного поведения слоя косоугольно-армированного углепластика в нелинейной области .....	154
<b>Зайцева Е.Ю., Асеева Т.П., Степанов Н.В., Иванов В.С., Серазединов М.В.</b> Особенности формования ферменной профилированной конструкции сверхлегкого летательного аппарата .....	157
<b>Волков В.С., Кулагина И.В., Денисова Е.В., Бабкина И.О., Шуль Г.С.</b> Сотовые наполнители на основе кварцевой стеклоткани.....	158
<b>Соколова А.В., Зельнев В.Н., Алексанян Р.А., Мазур В.В., Степанов Н.В.</b> Расчетная модель трехмерно-армированных композитов для оценки прочности материала .....	160
<b>Елисеев О.А.</b> Герметизирующие материалы, работоспособные в условиях тропического климата .....	161
<b>Черфас Л.В., Обухова Н.С., Морозова З.В., Лепикаш Е.Р.</b> Контроль структурных характеристик ПКМ методами гелиевой пикнометрии и гидростатического взвешивания.....	162
<b>Волков В.С., Денисова Е.В., Корнейчук А.Н., Ворзуль С.В., Юдаева Е.И.</b> Влияние температуры эксплуатации на свойства термостойких полиимидных стеклосотопластов.....	163
<b>Гаврилко В.В.</b> Особенности обработки вспененного наполнителя для изготовления беспилотных микролетательных аппаратов .....	164
<b>Дубкова В.И., Судник Л.В., Петушков Д.В., Нисс В.С.</b> Исследование влияния нанокристаллического моногидроксида алюминия на структуру и свойства эпоксидной композиции.....	166
<b>Гуламова Д.Д., Шевченко В.П., Токунов С.Г., Ким Р.Б.</b> Исследование возможности использования солнечной энергии для получения базальтового волокна.....	168
<b>Маркин О.В.</b> Анализ собственных форм и частот колебаний звукопоглощающей панели двигателя SAM146 в CAE системе MSC/NASTRAN .....	170
<b>Русланцев А.Н.</b> Анализ собственных чисел матриц, описывающих нелинейное деформирование слоистых углепластиков .....	170

<b>Нелюб В.А.</b> Методы повышения прочности полимерных композитов за счет управления адгезией.....	173
<b>Ворвуль С.В., Томчани О.В., Маслова Е.И., Портнова Я.М.</b> Исследования препрегов и композиционных материалов на их основе методом ДМА .....	174
<b>Желтова А.В., Иким М.И., Корнейчук С.А., Рындя С.М., Лакеев С.Г., Трахтенберг Л.И., Смолянский А.С.</b> Исследование закономерностей взаимодействия озон-кислородной смеси с поверхностью ядерных микрофильтров .....	176
<b>Иким М.И., Корнейчук С.А., Рындя С.М., Потапова Г.Ф., Трахтенберг Л.И., Смолянский А.С.</b> Исследование закономерностей старения углеволокнистых катодных материалов в процессе электрохимического синтеза озона .....	180
<b>Лепикаш Е.Р., Шкиркова Л.М., Обухова Н.С., Комиссарова И.Н., Морозова З.В.</b> Исследование термодформационных свойств стеклотекстолитов методом дилатометрии.....	182
<b>Хабенко А.В., Юдина Л.В., Шуль Г.С.</b> Исследование кинетики отверждения теплостойкого расплавного эпоксидного связующего методом дифференциальной сканирующей калориметрии .....	185
<b>Крюков А.М., Садикова Н.А., Волков В.С., Денисова Е.В.</b> Пути совершенствования технологии изготовления стеклосотопластов .....	187
<b>Потапова Г.Ф., Иким М.И., Козлова Н.В., Смолянский А.С.</b> Перспективы применения электрохимической технологии получения озона в экологии, материаловедении, синтезе органических соединений .....	188
<b>Демченко А.В., Зевако В.С., Карпикова О.А., Харченко В.В.</b> Основные методологические положения ресурсных испытаний в ускоренных режимах .....	190
<b>Злобин Н.Г., Катаева Е.Ю.</b> Применения ПО FiberSim в процессе проектирования и изготовления изделий из ПКМ.....	192
<b>Торопицина А.В., Лантев М.Ю.</b> Подходы к порядку проведения квалификации ПКМ в ОАО "Авиадвигатель" для обоснования соответствия материалов требованиям авиационных правил при сертификации .....	194

<b><i>Койтов С.А., Санников А.А.</i></b> Наномодификация эпоксиполиуретановых составов, соединяющих теплозащиту с корпусом ЛА .....	195
<b><i>Койтов С.А., Мельников В.Н.</i></b> Теплозащита летательного аппарата, наномодифицированная $Al_2O_3$ .....	198
<b><i>Койтов С.А., Санников А.А.</i></b> Консоли управления вариантных изделий методом склеивания дискретных элементов .....	200
<b><i>Бабин А.Д., Кузнецов Ю.В., Лимонов С.В.</i></b> Опыт ОАО «УНИИКМ» в проектировании и производстве сопел из углерод- углеродного карбидкремниевое композиционного материала.....	202
<b><i>Долматов С.А.</i></b> Эпоксиполиуретановые смолы, их смеси с бисмалеимидными и цианатными смолами – термостойкая и прочная основа полимерных компаундов и композитов.....	204

## **Секция 2. РЕМОНТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

<b><i>Руппель В., Леба С., Шемама Р.</i></b> Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов .....	206
<b><i>Бажеряну В.В., Басынина Е.А., Зайченко И.В.</i></b> Использование прибора HOT BONDER для ремонта деталей из ПКМ в составе изделия .....	209
<b><i>Постнов В.И., Стрельников С.В.</i></b> Опыт применения технологий восстановления эксплуатационной надежности агрегатов из ПКМ .....	210
<b><i>Бухаров С.В., Андросова Н.И., Комаров Г.В.</i></b> Ремонт изделий из ПКМ с применением бинарных препрегов.....	213
<b><i>Морозов Б.Б., Насонов Ф.А.</i></b> Особенности применения клеевых препрегов расплавленного типа при ремонте деталей из стеклопластика .....	214

## **Секция 3. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ**

<b><i>Солнцев С.С.</i></b> Эрозионностойкие терморегулирующие покрытия и трещиностойкие углеродкерамические композиты для авиационной техники .....	216
---	-----

**Щетанов Б.В.**

Возможности и перспектива применения волокнистой тепловой защиты ..... 217

**Красный Б.Л.**

Разработка и эффективное применение пористой проницаемой керамики  
в различных технологических процессах..... 224

**Овсиенко А.И., Дятлова Я.Г., Манина И.Н., Лужкова А.П.,  
Осмаков А.С., Орданьян С.С., Румянцев В.И., Бойков С.Ю.**

Сравнение структуры и свойств карбида бора, производимого в  
ООО “ВИРИАЛ”..... 225

**Бакланова Н.И., Морозова Н.Б., Лозанов В.В.**

Высокотемпературные защитные покрытия для углеродсодержащих  
материалов ..... 227

**Пахомов В.П., Волощенко Г.Н., Саванина Н.Н., Кораблёва Е.А.,  
Русин М.Ю., Фатеев В.Н.**

Высокотемпературные электрохимические устройства на основе диоксида  
циркония ..... 228

**Чевыкалова Л.А., Келина И.Ю., Михальчик И.Л., Плясункова Л.А.,  
Аракчеев А.В., Касимовский А.А., Матюшин К.С.**

Исследования по получению ультравысокотемпературного керамического  
материала на основе диборида циркония методом SPS ..... 230

**Румянцев В.И., Осмаков А.С., Радциг Н.М., Кравчик А.Е.**

Пиролитический нитрид бора: структура и технология ..... 233

**Балабанов С.С., Пермин Д.А.**

Керамика на основе оксидов магния, алюминия, иттрия для видимой и ИК  
областей спектра ..... 235

**Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б., Галганова А.Л.,  
Матюшин Я.Г.**

Анализ структуры корундовой керамики с использованием растровой  
электронной микроскопии и рентгеновской микротомографии..... 236

**Бизин И.Н., Шер Н.Е., Жуков А.А., Горчакова Л.И.**

Получение вакуумно-плотной керамики на основе оксида алюминия с  
применением способа квазиизостатического прессования ..... 239

**Русин М.Ю., Шер Н.Е., Бизин И.Н., Саванина Н.Н., Куликова Г.И.,  
Бабошин А.В.**

Разработка технологии изготовления вакуумно-плотных изоляторов из  
оксида алюминия для металлокерамических узлов ..... 240

<b><i>Рудыкина В.Н., Курская И.Н., Забейжайлов А.О., Келина И.Ю., Ганичев А.И., Метлева А.П.</i></b> Исследование по получению крупногабаритных изделий из реакционносвязанного нитрида кремния с использованием предварительного азотирования .....	242
<b><i>Кораблева Е.А.</i></b> Синтез и исследование наноструктурных материалов на основе диоксида циркония для ТОТЭ .....	243
<b><i>Кульков С.Н.</i></b> Керамика на основе «нанооксидов» – получение, свойства и биомедицинское применение .....	244
<b><i>Богачев Е.А., Ларионов Н.В., Лахин А.В., Тимофеев А.Н.</i></b> Особенности применения углерод-керамического материала C-SiC в сопловых трактах (насадки, камеры сгорания) ЖРД и ЖРДМТ .....	245
<b><i>Мионов Р.А., Забейжайлов М.О., Бородай С.П.</i></b> Определение температурной зависимости излучательной способности кварцевой керамики .....	247
<b><i>Филатов Е.Н., Дьяконов В.А., Арсланова Н.И., Камалов А.Д., Пронин Б.Ф.</i></b> Разработка и исследование теплозащитных материалов на основе модифицированных неорганических связующих и кварцевых наполнителей, обеспечивающих длительную работоспособность летательных аппаратов в условиях воздействия высокотемпературных газовых потоков .....	250
<b><i>Дьяконов В.А., Арсланова Н.И., Камалов А.Д., Пронин Б.Ф., Ступакова Н.П.</i></b> Современные высокотемпературные теплозащитные композиционные материалы радиотехнического назначения .....	251
<b><i>Афанасьев В.А., Кужель М.П., <u>Иванов Г.И.</u>, Шебалов А.В., Жабин А.П.</i></b> Разработка защитных конструкций с использованием керамических и композиционных материалов .....	252
<b><i>Задорожная О.Ю., Тиунова О.В., Богаев А.А., Непочатов Ю.К., Шкодкин А.В.</i></b> Физико-механические свойства композитной керамики на основе оксидов алюминия и циркония с добавлением нанопорошков .....	255
<b><i>Перевислов С.Н., Чупов В.Д.</i></b> Материалы на основе нитрида кремния, применяемые в качестве подшипников скольжения .....	257

<b>Суздальцев Е.И., Зайчук Т.В., Устинова Ю.С., Вандрай С.Н.</b> Высокоплотные литейные шликеры на основе стекла магнийалюмосиликатного состава .....	258
<b>Суздальцев Е.И., Зайчук Т.В., Орлов А.А., Устинова Ю.С.</b> Получение беспористого стеклокерамического материала магнийалюмосиликатного состава .....	260
<b>Бочегов А.А., Ермаков А.В., Никифоров С.В., Вандышева И.В.</b> Проницаемая корундовая плазموкерамика для электрохимических устройств. Особенности структуры .....	262
<b>Суздальцев Е.И., Горелова Е.В.</b> Высокотермостойкая радиопрозрачная кварцевая керамика с повышенной излучательной способностью .....	263
<b>Якушкина В.С., Кораблева Е.А., Саванина Н.Н., Ермолаев А.С., Плясункова Л.А., Осипова М.Е.</b> Получение керамики из диоксида циркония методом инъекционного формования.....	265
<b>Копылов Ю.Л., Кравченко В.Б.</b> Лазерная оксидная керамика из неагломерированных наноразмерных порошков.....	266
<b>Келина И.Ю., Рудыкина В.Н., Курская И.Н., Чевыкалова Л.А., Михальчик И.Л., Шаталин А.С., Крылов В.П.</b> Диэлектрические свойства керамических материалов на основе нитрида кремния .....	267
<b>Шамшетдинов К.Б., Келина И.Ю., Чевыкалова Л.А.</b> Разработка составов и исследование свойств теплозащитных покрытий для изделий из нитрида кремния, работающих в жестких теплонагруженных условиях .....	269
<b>Григорьев М.В., Кульков С.Н.</b> Влияние морфологии поровой структуры корундовой керамики на ее механические свойства.....	271
<b>Промахов В.В., Буякова С.П., Кульков С.Н.</b> Влияние циклических термоударных нагрузжений на структуру и фазовый состав керамики на основе $ZrO_2$ .....	273
<b>Промахов В.В., Буякова С.П., Кульков С.Н.</b> Кинетика структурно-фазовых превращений при циклическом спекании керамики на основе $ZrO_2$ .....	275

<b>Григорьев М.В., Буякова С.П., Кульков С.Н.</b> Структура и свойства порошков $ZrO_2$ и $TiC$ после механической активации .....	276
<b>Рожкова Т.И., Павлова В.П., Кашкарова Е.М., Томчани О.В., Шуль Г.С.</b> Исследование влияния состава теплоизоляционного материала со сверхнизкой теплопроводностью на его свойства .....	278
<b>Воробьев В.Н., Томчани О.В., Пляскина Л.А., Рожкова Т.И., Шугаев М.В.</b> Изготовление деталей и конструкций из высокотермостойких теплозащитных материалов .....	280
<b>Степанов П.А., Мельников Д.А., Атрощенко И.Г., Шуткина О.В., Сапарова А.А., Крылов В.П.</b> Разработка термостойких композиционных материалов и покрытий .....	282
<b>Резник С.В., Сапронов Д.В.</b> Проектирование замкового соединения керамических лопаток и металлического диска в рабочем колесе газовой турбины .....	284
<b>Полетаев М.Е., Колоколов Л.И., Воробьев С.Б., Степанов П.А., Рогов Д.А.</b> Оценка возможности создания конструкции керамического обтекателя летательного аппарата с применением в качестве материала шпангоута поликомпозиционного материала.....	286
<b>Курфтырев Р.Ю., Беляков А.В., Кузнецова И.Г.</b> Горячепрессованные композиционные керамические материалы в системе $AlN-BN$ .....	288
<b>Судальцев Е.И., Харитонов Д.В., Ермолаев А.С.</b> Исследование возможности использования закристаллизованного до $1000^{\circ}C$ литийалюмосиликатного стекла для изготовления изделий радиотехнического назначения.....	289
<b>Сафаралиев Г.К., Шабанов Ш.Ш., Билалов Б.А., Кардашова Г.Д., Шабанов С.Ш.</b> Получение и исследование керамики $SiC-NbC$ .....	290
<b>Сафаралиев Г.К., Шабанов Ш.Ш., Билалов Б.А., Кардашова Г.Д., Шабанов С.Ш.</b> Тепловые и электрические свойства керамических материалов в системе $SiC-AlN$ .....	293
<b>Неповинных В.И., Терехин А.В., Думанский А.М.</b> Исследование реологических свойств герметиков, используемых в клеевых соединениях летательных аппаратов .....	295

<b>Суздальцев Е.И., Миронова Е.В.</b> Влияние ряда технологических факторов на качество соединения керамики и металла герметиком типа ВИКСИНТ .....	296
<b>Райлян В.С., Алексеев Д.В., Фокин В.И., Храновская Т.М., Куликова Г.И., Гусев Р.М.</b> Определение термостойкости керамических материалов при одностороннем нагреве .....	299
<b>Райлян В.С., Алексеев Д.В., Фокин В.И.</b> Способ теплового нагружения конструкций летательных аппаратов из неметаллических материалов контактными нагревателями.....	299
<b>Васюков М.В., Rogov Д.А., Латыш С.И., Воробьев С.Б., Прасолов А.Н.</b> Определение оптимальных параметров доработки внутреннего соединительного шпангоута телескопического типа для радиопрозрачного обтекателя высокоскоростного ЛА .....	301
<b>Нечепуренко А.С., Гарипов О.Ф., Ласыченков Ю.Я.</b> Нитрид бора гексагональный и его применение в современной технике .....	303
<b>Дякина М.П.</b> Синтез алюмосиликатного наносорбент ионов тяжелых металлов на основе алюмосиликатов со слоистой структурой .....	306
<b>Шмурадко В.Т., Роман О.В., Судник Л.В., Петюшик Е.Е., Киришина Н.В.</b> Высокоэнергетическая обработка оксидных систем, схемы и механизмы ударно-волнового нагружения пористых сред.....	308
<b>Гончаренко Е.А., Шаяхметов У.Ш., Мурзакова А.Р., Халиков Р.М.</b> Технология производства трубчатых изделий из наноструктурированной керамики путем экструзии .....	311
<b>Майзик М.А., Кораблева Е.А., Русин М.Ю., Саванина Н.Н.</b> Получение нанокompозитного анода ТОТЭ в системе NiO - ZrO <sub>2</sub> .....	312
<b>Крылов В.П.</b> Моделирование задачи падения плоской волны на пластину диэлектрического материала с потерями.....	313
<b>Родиновский Ю.В., Пронин Б.Ф., Ступакова Н.П.</b> Разработка и исследование композиционных материалов радиотехнического назначения на основе полиорганосилоксановой смолы, обладающих улучшенным комплексом физико-механических и диэлектрических свойств .....	316

<b>Ларионов Н.В., Лахин А.В.</b> Статистическое распределение скоростей осаждения карбида кремния в объеме крупногабаритного CVD-реактора .....	317
<b>Горынин Г.Л.</b> Прогнозирование упругих свойств бетона во времени .....	318
<b>Дякин П.В., Пивинский Ю.Е., Орданьян С.С.</b> Керамические вяжущие – ВКВС и керамобетоны на основе боксита .....	321
<b>Алексеев М.К., Бизин И.Н., Жуков А.А.</b> Легковесный огнеупор для алюминиевой промышленности .....	322
<b>Алексеев М.К., Куликова Г.И., Русин М.Ю.</b> Синтез высокодисперсных порошков алюмомагниевои шпинели для получения оптически прозрачной керамики .....	323
<b>Бизин И.Н.</b> Керамическая оснастка из волластонита для литейного алюминиевого производства .....	325
<b>Келина И.Ю., Чевыкалова Л.А., Михальчик И.Л., Аракчеев А.В., Голубева Н.А., Горчакова Л.И., Беспалов И.А.</b> Повышение баллистической эффективности корундовой керамики .....	327
<b>Калатур Е.С., Буякова С.П., Кульков С.Н.</b> Влияние ячеистой структуры на деформационное поведение керамических материалов .....	330
<b>Григорьев М.В., Буякова С.П., Кульков С.Н.</b> Влияние карбида титана на твердость композитной керамики $ZrO_2$ -TiC .....	332
<b>Малова Н.Е., Кондрашов Э.К., Молотова В.А.</b> Терморегулирующие покрытия со специальными свойствами для аэрокосмической техники .....	333
<b>Чевыкалова Л.А., Келина И.Ю., Михальчик И.Л., Плясункова Л.А., Аракчеев А.В., Загоржевский В.В., Лорян В.Э.</b> Исследования по повышению высокотемпературной прочности керамических материалов на основе СВС нитрида кремния .....	334
<b>Шаронова Е.Ю., Дятлова Я.Г., Ковеленов Н.Ю., Кузнецова Н.В., Орданьян С.С., Осмаков А.С., Румянцев В.И.</b> Физико-механические и режущие свойства керамики на основе $Si_3N_4$ с наноразмерной составляющей .....	337
<b>Дякина А.П.</b> Композиционные жаростойкие материалы на основе интерметаллидов .....	339

<b>Саванина Н.Н., Бизин И.Н., Жуков А.А., Куликова Г.И.</b> Получение изделий из оксида алюминия методом термопластичного инжекционного литья .....	340
<b>Дедова Е.С., Губанов А.И., Шадрин В.С., Кульков С.Н.</b> Структурные исследования вольфрамата циркония .....	342
<b>Викулин В.В., Шкарупа И.Л., Rogov Д.А., Коваленко П.В.</b> Комбинированная броня.....	344
<b>Забейжайлов А.О., Ганичев А.И., Рудыкина В.Н., Курская И.Н.</b> Исследования по реакционному спеканию крупногабаритных заготовок нитрида кремния .....	345
<b>Овчинников В.И.</b> Метод испытания композиционных материалов, работающих в экстремальных условиях, в том числе космических .....	346
<b>Татарников О.В., Фетисов В.С., Rogov Д.А.</b> Метод контроля качества клеявого соединения “металл-керамика” при нагрузении модельных образцов плоского и телескопического типов .....	350
<b>Макаренко В.В., Семченко Г.Д.</b> Большемерные керамические корпуса подшипников с повышенной износостойкостью .....	352
<b>Верченко А.В.</b> Нефритованные керамические глазури на основе цеолитового туфа .....	353
<b>Прямилова Е.Н., Саитова А.Р.</b> Получение и свойства $\beta$ -сиалона.....	355
<b>Рожко И.Н., Семченко Г.Д., Вовк А.В., Товстокожая И.П.</b> Использование модифицированных наполнителей для синтеза SiC керамики и изделий из нее .....	356
<b>Мосин Ю.М., Першиков С.А.</b> Разработка режимов обжига керамики на основе пространственной модели спекания .....	357

#### Секция 4. СТЕКЛО И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

<b>Солинов В.Ф.</b> От явлений в стекле – к мировым катаклизмам.....	360
<b>Сигаев В.Н.</b> Модифицирование структуры стекла в нано- и микро-масштабе и новые функциональные возможности стекол.....	361

<b><i>Липатьев А.С., Лотарев С.В., Гельманова Т.О., Савинков В.И., Шахгильдян Г.Ю., Палеари А., Сигаев В.Н.</i></b> Локальная модификация оптического фосфатного стекла с наночастицами золота фемтосекундным излучением.....	363
<b><i>Петрачков Д.Н., Кузьмина Е.В., Пигалев А.Е.</i></b> Способ модификации поверхности отбракованных электрообогреваемых изделий остекления.....	366
<b><i>Ушеренко Ю.С., Шарифзянов В.Г., Ушеренко С.М.</i></b> Особенности поведения стекол и керамики в условиях соударения со сгустками частиц космической пыли .....	367
<b><i>Воропаева М.В., Алексеева Л.А., Келина Р.П., Строганова Е.Е., Орлова Л.А., Оглоблина Д.О.</i></b> Фазовые превращения в процессе кристаллизации стеклокордиеритового состава.....	369
<b><i>Гельманова Т.О., Лотарев С.В., Липатьев А.С., Сигаев В.Н.</i></b> Локальная кристаллизация лантаноборогерманатного стекла с помощью фемтосекундного лазера.....	371
<b><i>Орлова Л.А., Чайникова А.С., Попович Н.В., Лебедева Ю.Е., Степко А.А.</i></b> Композиционные материалы с нанодисперсными наполнителями .....	374
<b><i>Бондалетов Д.Н., Климашин А.В., Федорова В.А.</i></b> Кварцевое стекло, легированное хлором и самарием .....	376
<b><i>Каплунова А.М., Рябина О.В.</i></b> Разработка термостойкого сине-зеленого стекла с высоким коэффициентом светопропускания для изделий БАНО с покрытием .....	378
<b><i>Лопатина Е.В., Сигаев В.Н.</i></b> Формирование текстурированных пленок $\beta$ -BaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> на поверхности стекол методом градиентной кристаллизации .....	379
<b><i>Липатьев А.С., Плотникова А.С., Спиридонов Ю.А., Сигаев В.Н.</i></b> Ионообменное упрочнение стекла для терморегулирующих покрытий в калиевой селитре и хлориде алюминия.....	382
<b><i>Грачев В.П., Алдошин С.М., Барачевский В.А., Айт О.А.</i></b> Энергосберегающие многослойные пленочные покрытия с переменным светопропусканием для светоограждающих конструкций .....	385

<b>Просовский О.Ф., Гвоздев А.Б., Исамов А.Н., Просовская Г.Ю.</b> Современный подход к решению проблем создания сложных интерференционных светофильтров .....	387
<b>Гвоздев А.Б., Исамов А.Н., Просовский О.Ф., Просовская Г.Ю.</b> Метод получения пленок оксидов веществ с низким коэффициентом поглощения в видимом диапазоне длин волн .....	387
<b>Исамов А.Н., Гвоздев А.Б., Просовский О.Ф., Просовская Г.Ю.</b> Исследование влияния технологических параметров на величину оптических потерь в пленках оксидов веществ, получаемых методом доокисления тонких слоев .....	388
<b>Стороженко П.А., Поливанов А.Н., Федотова Т.И., Левчук А.В., Власова В.А., Тюрикова Н.В., Старостина Ю.А.</b> Получение кремнийорганических лаков на основе алкоксисиланов.....	389
<b>Стороженко П.А., Поливанов А.Н., Федотова Т.И., Левчук А.В., Власова В.А., Смирнова К.Е., Самсонов В.И., Овсянникова И.Ю.</b> Термоотверждаемый силоксановый лак, полученный золь-гель технологией для защиты поверхности изделий органического (ПММА) остекления авиационной техники .....	390
<b>Клименко Н. Н., Михайленко Н. Ю.</b> Разработка безобжигового строительного материала на основе кварцевого песка и доменного шлака .....	392
<b>Атрощенко Г.Н., Шахгильдян Г.Ю., Савинков В.И., Палеари А., Сигаев В.Н.</b> Разработка сфероидизованных стеклообразных материалов в системе $Y_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ для локальной лучевой терапии .....	394
<b>Игнатьева Е.С., Голубев Н.В., Малашкевич Г.Е., Сигаев В.Н.</b> Повышение эффективности люминесценции малощелочных галлиевосиликогерманатных стекол за счет условий термообработки .....	396
<b>Бочегов А.А., Ермаков А.В., Никифоров С.В., Вандышева И.В.</b> Композитные изделия $Pt-Al_2O_3$ для выработки высокотемпературных стекол.....	397
<b>Лотарев С.В., Липатьев А.С., Голубев Н.В., Игнатьева Е.С., Палеари А., Сигаев В.Н.</b> Наноструктурирование галлиевогерманосиликатного стекла лазерным пучком с активацией синей люминесценции .....	399
<b>Гербер Д.В., Коновалова Л.Д., Михайленко Н.Ю., Сигаев В.Н.</b> Использование кварцосодержащих природных минералов в стекольной промышленности .....	401

## Секция 5. УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

**Сотников А.А., Новикова И.И.**

Кластерная политика Калужской области и перспективы формирования кластера неметаллических материалов в регионе ..... 404

**Смолянский А.С., Хаханов С.Н., Шкловер В.Я., Ляшко Л.Ю., Лакеев С.Г.**

Взаимодействие ФГУП “НИФХИ им. Л.Я. Карпова” и лаборатории ООО “Системы для микроскопии и анализа” – сотрудничество во имя прогресса российских нанотехнологий и образования ..... 406

**Медведко В.С., Медведко О.В., Фихман М.И., Солоненко О.П., Фомин В.М.**

Опыт создания системы координации тематики исследований научных и образовательных учреждений с проблемами освоения производства высокотехнологичной композитной керамики с добавлением нано- и микроразмерных частиц ..... 411

**Коваль О.В.**

Ключевые вопросы коммерциализации инновационных разработок научно-производственного предприятия ..... 413

**Ершова Н.И.**

Правовая охрана инноваций как служебных объектов интеллектуальной собственности ..... 415

**Дудов И.А.**

Правовое регулирование вопросов распределения и закрепления прав на изобретения, создаваемые при финансировании из федерального бюджета ..... 416

**Кобзев М.В., Бубало Д.А.**

Современное состояние и перспективы развития информационной поддержки контроля качества материалов и продукции ..... 419

**Петров В.Б., Бубало Д.А.**

Организация процесса ведения электронных паспортов изделий на платформе PLM ..... 421

**H. Malinen, P. Raiskinmäki, R. Ahmaniemi, H. Pusa**

Сотрудничество между университетами и бизнес-структурами, пример: JYVÄSKYLÄ BUSINESS AND INNOVATION FACTORY (BIF) ..... 423

**АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ** ..... 425

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

**«Создание, запуск и автоматическая посадка МКС «Энергия–Буран» являются поистине национальным проектом, триумфом отечественной науки, техники и промышленности, воплотившим в себе выдающиеся достижения авиакосмической отрасли»**



**Исполнительный директор  
ФГУП «ЦАГИ» ГНЦ РФ  
д.ф-м.н., член-корр. РАН  
С.Л.Чернышев**



**Генеральный директор  
ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ  
д.т.н., профессор, академик  
РАН Е.Н.Каблов**



**Генеральный директор ОАО «НИАТ»,  
д.т.н., профессор, академик РАН  
О.С.Сироткин**



**Генеральный директор  
ОАО «ОНПП «Технология» ГНЦ РФ  
к.т.н. О.Н.Комиссар**



**Ректор МГТУ им. Н.Э.Баумана,  
д.т.н., профессор А.А.Александров**

# **МНОГОРАЗОВЫЙ ПИЛОТИРУЕМЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ «БУРАН» И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В АЭРОДИНАМИКЕ И ПРОЧНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*С.Л.Чернышев* (ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского», г. Жуковский, Россия)

В первой части доклада рассматриваются работы, которые проводились в ЦАГИ в рамках создания многоразового пилотируемого космического корабля «Буран». Исследования, в которых были задействованы практически все подразделения института, касались вопросов аэродинамики, прочности, системы управления, теплообмена, теплозащиты «Бурана», а также изучения проблем обтекания на этапах выведения и разделения компонентов системы «Энергия-Буран».

Исследования по аэродинамике «Бурана» выполнялись в ЦАГИ во всем возможном диапазоне чисел Рейнольдса. Для достижения максимальной достоверности аэродинамических характеристик были использованы все доступные аэродинамические установки ЦАГИ. При помощи теоретических методов учета реальных свойств газа при высоких температурах, возникающих в процессе движения, был осуществлен пересчет результатов трубных испытаний на натурные условия.

Многочисленные испытания моделей «Бурана» в аэродинамических трубах давали оценку разброса характеристик, а учет влияния изменения центровки, деформации конструкций, влияния двигателей стабилизации и других факторов давал возможность определить диапазон отклонения характеристик. В результате работ ЦАГИ и ОКБ был создан атлас характеристик «Бурана». Был установлен принцип определения детерминированных возмущений и нагрузок, которые должны быть гарантированно уравновешены органами управления при помощи системы управления.

Весьма сложные проблемы были решены при определении аэродинамических нагрузок системы «Энергия-Буран» в сборе на участке выведения, поскольку даже небольшие отклонения аэродинамических сил за счет интерференции вызывали многотонные увеличения сил, действующих на элементы конструкции.

Была решена задача определения аэродинамических сил и моментов системы «Энергия-Буран» на участке выведения при проходе трансзвуковых скоростей, соответствующих большим скоростным напорам. Применение различных экспериментальных методов (весовые испытания, визуализация обтекания, исследования распределения давления и пр.) в трубах на моделях нескольких масштабов позволило получить достоверные результаты.

Для изучения влияния двигателей на моделях была введена имитация струй двигателя. На участке разделения ступеней всей системы определялись силы и моменты при поэтапном относительном движении элементов системы на специальной установке в большой сверхзвуковой трубе Т-109.

Кроме того, в ЦАГИ проводились испытания по отработке аэродинамики самолетов «Атлант» ОКБ Мясищева и «Мрия» ОКБ Антонова, предназначенных для транспортировки ракеты «Энергия» и «Буран».

Ученые ЦАГИ приняли участие в разработке идеологии системы управления «Бурана». ЦАГИ были предложены алгоритмы, принципы совмещения автоматического и ручного управления. При этом режимы управления летчиком были особенно подробно отработаны на специальном пилотажном стенде ПСПК-102, созданном ЦАГИ и ОКБ «Молния». На этом стенде, в частности, отработывались все полеты для дозвукового пилотируемого аналога с ТРД, на котором затем в полете с летчиком была проведена отработка режимов последнего этапа планирования, посадки и движения по земле. Стенд позволил в полном объеме отработать программу летных испытаний «Бурана» в условиях, близких к реальным.

Большой комплекс исследований был проведен в ЦАГИ по вопросам прочности системы «Энергия-Буран». Он потребовал создания специальных стендов и значительного расширения экспериментальной базы. Для изучения прочности «Бурана», помимо традиционных статических испытаний, в ЦАГИ была создана теплопрочностная вакуумная камера (ТПВК), в которой возможно воспроизводить температуры и тепловые потоки, расчетные нагрузки, высоты полета. ТПВК имеет диаметр 14 метров и длину 30 метров.

Большое внимание было уделено акустической прочности системы «Энергия-Буран». Звуковая мощность, создаваемая двигателями, составляла 500-600 мВт, что в 40-50 раз больше, чем у сверхзвукового самолета «Конкорд». При старте и в полете уровни шума достигали 150-168 дБ. Для исследования акустической прочности в ЦАГИ была построена акустическая реверберационная камера РК-1500 длиной 14,6 м, шириной 9,2 м и высотой 11,5 м. Проблема акустических нагрузок, особенно при старте, требовала изучения акустического спектра ЖРД, а также разработки мер защиты. В этой связи ЦАГИ была предложена защита при помощи водяной завесы.

Непростой проблемой было обеспечение безопасности «Бурана» от флаттера и других опасных вибраций. Конструкция «Бурана» не имела аналогов в нашей стране и для нее расчетными оказались формы флаттера, не встречавшиеся на отечественных самолетах. Все формы флаттера были исследованы экспериментальным путем на специальных моделях в аэродинамических трубах. Кроме этого, в ЦАГИ были проведены частотные испытания «Бурана» с системой управления и расчетов по определению запасов устойчивости.

Вторая часть доклада посвящена перспективным исследованиям по совершенствованию летательных аппаратов, которые идут в ЦАГИ. Приводятся целевые показатели, касающиеся безопасности полетов и авиаэкологии. Рассматриваются основные положения Форсайта развития авиационной науки и технологий, который был разработан в 2012 ведущими авиационными научно-исследовательскими институтами под руководством ЦАГИ.

Дается характеристика научно-исследовательской работы по формированию технических концепций и облика перспективных ЛА (Самолет-2020), которую ЦАГИ в данный момент проводит совместно с ОАК. Даются инновационные технические решения для дальне-, средне-, ближнемагистральных самолетов, а также для регионального, сверхзвукового и транспортного самолетов, касающиеся несущей системы, силовой установки и ее интеграции, перспективных конструктивно-силовых схем, бортового оборудования.

В докладе подробно рассматриваются вопросы, связанные с использованием в авиастроении новых композиционных материалов (КМ) и конструкций из них. Дается обзор роста применения композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов за прошедшие 40 лет.

Отмечаются преимущества композиционных материалов, такие как:

- высокая удельная прочность и жесткость;
- повышенная сопротивляемость усталости и коррозии;
- управляемая анизотропия, функциональность;
- большая технологичность и перспективы развития.

А также проблемы, которые возникают на пути внедрения КМ в конструкцию ЛА, например:

- повышенный разброс прочностных характеристик;
- чувствительность к климатическим воздействиям и случайным повреждениям;
- склонность к расслоению и растрескиванию;
- высокие стоимость материала и требования к качеству производства и обслуживания.

Описываются основные требования к физико-механическим характеристикам современных и перспективных КМ.

Рассказывается об испытаниях в ЦАГИ образцов и конструкций из композиционных материалов, в том числе прототипа композитного крыла отечественного самолета нового поколения МС-21, у которого КМ будут составлять 37% веса планера.

#### Литература

1. На рубеже двух столетий / Г.С.Бюшгенс, Е.Л.Бедржицкий. – М.: ЦАГИ, 2008.
2. Авиационная наука и технологии 2030. Форсайт, Основные положения – М.: ЦАГИ, 2012.
3. Новый этап применения композиционных материалов в авиастроении / С.Л.Чернышев. – Проблемы машиностроения и автоматизации.– 2011.– №4.

## ДОСПЕХИ ДЛЯ БУРАНА

*Е.Н.Каблов* (ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия)

*Приводятся сведения по материалам ВИАМ, использованным для создания тепловой защиты изд. «Буран» - теплозащитным плиткам, эрозионно стойким эмалевым покрытиям, гидрофобизаторам, термостойким фетрам, клеям, ЛКП.*

17 февраля 1976 года вышло Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О создании многоразовой космической системы и перспективных космических комплексов».

В состав системы входили ракетоноситель «Энергия» и орбитальный корабль «Буран». Этим Постановлением были определены основные задачи создания МКС.

Основные задачи для обеспечения надежной эксплуатации орбитального корабля были поставлены в области разработки специальной теплозащиты и жаропрочных материалов, работоспособных от -130 до 1650 °С.

В феврале 1976 года Г.Е.Лозино-Лозинский на встрече с руководством ВИАМ определил как приоритет – создание многоразовой тепловой защиты, подчеркнув, что «... решение этой сложнейшей проблемы целиком и полностью ложится на институт».

В этом же году ВИАМ было поручено изготовить теплоизоляционные материалы и тугоплавкие материалы, элементы из теплозащитных и жаропрочных конструкционных материалов для установки на «Бор-4» – специальной крупномасштабной летающей модели, которая после запуска на орбиту ракетными комплексами совершала затем управляемый планирующий спуск в атмосфере.

Решением ВПК от 18.12.1976 года и Приказом МАП СССР от 17.01.1977 года ВИАМ был определен головным институтом, координирующим все работы в области создания материалов для обеспечения разработки и производства МКС «Энергия- Буран».

Ученые ВИАМ во главе с начальником института Р.Е.Шалиным успешно выполнили все обязательства - разработали материалы и технологии, которые полностью соответствовали техническим заданиям и впоследствии были применены на корабле «Буран».

В интересах реализации программы по созданию МКС «Буран» в ВИАМ было разработано 39 принципиально новых материалов и 230 технологий, усовершенствовано более 60 материалов и технологий.

Ключевой проблемой, исходя из условий эксплуатации корабля «Буран», явилось создание многоразовой комплексной плиточной теплозащиты, которая включала материалы и технологии получения специальных плиток с плотностью 0,12-0,25 г/см<sup>3</sup> из супертонкого кварцевого волокна. Сложность состояла в том, что к началу проектирования «Бурана» в стране не было необходимого сырья для производства волокна, и даже при такой ситуации сроки выполнения работ не были сорваны.

Впервые в СССР во ВНИИСПВ (Институт стеклопластиков и стекловолокна – в настоящее время НПО «Стеклопластик») группой ученых под руководством

профессора М.С.Аслановой была разработана технология получения сверхтонкого штапельного кварцевого волокна диаметром 1–3 мкм, производство которого освоено в городе Крюково Московской области.

Производство кварцевых штабиков диаметром 200 мкм для выпуска сверхтонких волокон было организовано на опытном заводе НИИ стекла в городе Гусь-Хрустальном.

Эта работа была удостоена Государственной премии. СССР. От ВИАМ в состав авторского коллектива был включен В.Н. Грибков.

Ученые ВИАМ разработали уникальную технологию изготовления теплозащитных плиток, которые по теплофизическим и физико-механическим характеристикам имели лучшие показатели, чем зарубежный аналог.

Итогом работы стали новые теплозащитные материалы (ТЗМ) на основе нитевидных кристаллов нитрида кремния, кварцевых волокон и волокон оксида алюминия (ТЗМК-10/2,5 и ТЗМК-25), работоспособные до температуры 1250 °С. При очень невысокой плотности (соответственно 0,15 и 0,25 г/см<sup>3</sup>) они обладают также очень низкой теплопроводностью.

Каждый этап технологического процесса контролировался, а на стадии выходного контроля блок ТЗП проходил 100 %-ный рентгеноконтроль с оценкой прочности каждого блока.

Впервые в нашей стране было создано уникальное неуносимое теплозащитное покрытие радиационного типа, которое выдерживает без разрушения более 100 циклов перепада температур от -150 до 1250 °С и при плотности менее 0,15 г/см<sup>3</sup> имеет прочность более 0,2 МПа. Теплозащитное покрытие изготавливалось в виде отдельных элементов – плиток, вырезанных из блоков, в которых только 10 % объема занимали супертонкие кварцевые волокна, а до 90 % – воздух (В.Н.Грибков, Б.В.Щетанов, Р.А.Яковлева и др.).

Приказом Министра авиационной промышленности СССР от 05.07.1977 г. «О проведении работ по созданию специальных теплозащитных и жаропрочных материалов» ВИАМ было поручено разработать и передать для промышленного освоения технологию изготовления теплозащитного кварцевого материала.

Во исполнение этого приказа в ВИАМ в 1977 году создан экспериментально-технологический сектор и разработана уникальная установка УДВ-1 для формования блоков материалов ТЗМК.

С ноября 1978 по апрель 1979 года ВИАМ совместно с НПО «Технология» проведен комплекс работ по отработке технологии получения блоков ТЗМК: разработана проектная документация, выполнены строительно-монтажные работы, отработаны технологические режимы формования, сушки и обжига блоков, разработаны и согласованы с НПО «Молния» и Тушинским машиностроительным заводом (ТМЗ) технические условия.

В 1978–1979 гг. в ОНПО «Технология» на созданном участке, оснащенном более чем 20 установками, аналогичными УДВ-1, освоено серийное производство блоков ТЗМК, а также изготовлены и поставлены на ТМЗ 662 блока.

Не менее сложной и ответственной задачей стало создание силикатных эрозионно стойких терморегулирующих влагозащитных покрытий черного и

белого цветов (Ст.С.Солнцев, В.А.Розененкова, М.Н.Трохина).

Разработана серия эрозионно стойких терморегулирующих покрытий:

- «черные» – ЭВЧ-4М1У-3 (для ТЗМК-10/2,5) и ЭВЧ-6 (для ТЗМК-25) с высокой излучательной способностью для защиты нижней части планера от наибольших тепловых нагрузок;

- «белые» – ЭВС-4 (для ТЗМК-10) и ЭВС-6 (для ТЗМК-25) ограничивают нагрев верхней части планера от солнечного излучения;

- ремонтные – ВРЧ и ВРС для оперативного ремонта механически поврежденного ТЗЭ без демонтажа;

- ЭВГС – для гибкой теплозащиты на основе материала АТМ-19ПКП;

- маркировочное – на основе лака ХВ-784 и шликера ЭВЧ.

Дополнительно на поверхность силикатных покрытий наносился влагозащитный сублимирующийся фторопластовый лак ФП-5182, который обеспечивал не только влагозащиту плитки, но и позволял в процессе сублимации, не влияя на силикатное покрытие, сбрасывать с поверхности все загрязнения, предотвращая возможность их взаимодействия с силикатным покрытием.

Не менее сложной задачей была защита плитки от насыщения ее водой. И эту задачу ВИАМ удалось решить. Были разработаны гидрофобизаторы К-21 и К-21ИТ и капиллярная установка для их нанесения на плитку.

Вторым этапом стала разработка гидрофобизатора и способа его нанесения на ТЗП непосредственно на изделии, без термообработки. Для объемной гидрофобизации плитки непосредственно на изделии была отработана технология с использованием паровой фазы химических соединений с невысокой температурой кипения, большой летучестью и упругостью паров.

Важнейшим этапом для обеспечения надежной работы плиточной теплозащиты явилось создание термостойких фетров и специальных клеев. Поскольку теплозащитный материал и обшивка изделия имеют сильно отличающиеся коэффициенты линейного расширения, крепление его непосредственно к обшивке привело бы к появлению в конструкции напряжений и разрушению плитки, поэтому плитку не устанавливали непосредственно к металлу корпуса, а крепили через демпфирующую подложку – фетр. Для его создания были разработаны термостойкие органические волокна типа фенилон, терлон, аримид и лола. Из этих волокон (в различных сочетаниях) специалисты ВИАМ создали несколько совершенно уникальных материалов. В качестве демпфирующей подложки использован фетр АТМ-15ПК- нетканый двухслойный иглопробивной материал на основе термостойких волокон фенилона и терлона, гидрофобизированный и калиброванный для вкладышей, обеспечивающих допустимую температуру в зазорах между элементами ТЗП-АТМ-16ПКП - нетканый двухслойный иглопробивной материал на основе терлона и аримида, гидрофобизированный и калиброванный, имеющий защитное термостойкое покрытие, а для зон планера, где температура не превышает 370 °С, гибкое теплозащитное покрытие АТМ-19ПКП- нетканый иглопробивной многослойный материал на основе терлона и аримида, гидрофобизированный, калиброванный и дополнительно прошитый. Разумеется, и для этих материалов разработана гидрофобизация, а для материала

АТМ-19 - эозионностойкое покрытие.

За короткие сроки учеными ВИАМ (А.П.Петрова, Л.П.Козлова, И.Г.Лурье) совместно с ГНИИХТЭОС (В.В.Северный и Г.М.Минасян) разработан клей-герметик Эластосил 137-175М, который использовался для склеивания термостойкого калиброванного фетра с плиткой и фетра с обшивкой, предварительно покрытой специально разработанной эпоксикаучуковой грунтовкой ЭП-0214 (Д.С.Лялюшко, В.В.Чеботаревский). Разработаны также специальный клей-герметик для производства ремонтных работ с сокращенным режимом отверждения – Эластосил 137-175М-2 и клей-герметик с повышенной жизнеспособностью Эластосил 137-175М-1.

Клей - герметик Эластосил 137-175М использован для склеивания широкой гаммы материалов, таких, как плиточная теплозащита и теплоизоляционные материалы; кремнийорганические резины, ткани с кремнийорганическим покрытием между собой, с алюминиевыми, титановыми сплавами, сталью и фетром; стеклоткани и текстильные застежки с алюминиевыми сплавами, стеклопластиком и углепластиком; пленки ПЭТФ-ДА со стеклотканью и стеклопластиком. Серийное производство клея организовано на Данковском химзаводе (опытный завод ГНИИХТЭОС, Липецкая. обл.). Не менее сложной задачей была разработка технологии применения клея. Были разработаны и внедрены технологические процессы с чрезвычайно высокой культурой производства и чистотой производственных участков в условиях завода.

Впервые на ТМЗ была отработана технология склеивания с применением вакуумных мешков, которые крепились непосредственно на обшивку изделия «Буран» с помощью герметизирующих жгутов. Особенностью технологии приклеивания плиточной теплозащиты являлось то, что впервые техпроцесс проводился по загрунтованной грунтовкой ЭП-0214 поверхности, а не к поверхности, подготовленной специально под склеивание. Гетерогенная эпоксикаучуковая грунтовка ЭП-0214 была разработана Д.С.Лялюшко и рекомендована в качестве защитно-адгезионного подслоя, сочетающегося с клеем Эластосил 137-175М.

В составе МКС «Энергия-Буран» использованы и другие клеи. Теплоустойчивый пленочный клей ВК-36 применен для склеивания трехслойных сотовых панелей, разнообразных габаритов и сложной конфигурации (панели РТО, СОПГ). В конструкциях радиотехнического назначения использован клей ВК-36РТ, клей ВК-54 М холодного отверждения. За решение вопросов, связанных с разработкой и применением клеев в изделии «Буран», начальник лаборатории В.П.Батизат был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Разработан также комплекс герметизирующих составов на рабочие температуры от -130 до +400 °С, в том числе: термостойкие герметики 2-х видов на основе кремнийорганического каучука (кистевой и пастообразный) для поверхностной герметизации жестких неразъемных соединений, пеногерметик ВПГ-2Л – для герметизации стрингерного набора, прозрачный ремонтпригодный компаунд ВИКСИНТ ПКФ-68. Особым достижением явилась разработка вулканизирующегося в вакууме герметика УФ-7-21Б для ремонта на орбите в условиях открытого космоса. В ВИАМ в 1986 году впервые в мире разработана

технология ремонта теплозащиты, позволяющая производить замену плиток непосредственно в космосе в случае возникновения такой необходимости. В США подобная технология была создана только после катастрофы корабля «Колумбия» в феврале 2003 года. Таким образом, с применением разработанных ВИАМ материалов создана тепловая защита изделия «Буран».

«По сочетанию массы, теплопроводности и теплопрочности внешняя многоразовая теплозащита в виде отдельных элементов-плиток явилась уникальным решением проблемы теплозащиты орбитального корабля», – так оценили работу генеральный директор НПО «Энергия» Ю.П.Семенов и генеральный директор НПО «Молния» Г.Е.Лозино-Лозинский.

Комплексная оценка работоспособности технических решений была выполнена на крупномасштабной модели «Бор-4» (искусственные спутники Земли: «Космос-1374», «Космос-1445», «Космос-1517», «Космос-1614»), которая подтвердила соответствие свойств разработанных материалов для плиточной теплозащиты реальным условиям эксплуатации.

Разработана целая гамма материалов для изделия «Буран», не входящих в систему внешней теплозащиты. Для защиты наружных поверхностей носового обтекателя и передних кромок крыльев планера от температурных нагрузок в интервале 1590-1780 °С в ВИАМ совместно с учеными НИИ «Графит», НПО «Молния», ВНИИВ и ИНЭОС АН СССР разработаны жаростойкие углерод-углеродные материалы Гравимол и Гравимол-В.

Из ПКМ были изготовлены створки грузового отсека и воздухопроводы системы вентиляции и охлаждения. Были использованы углепластик КМУ-4э0,08 – для обшивки (площадь створок 144 м<sup>2</sup>); углепластик КМУ-8 – для шпангоутов; органит-5Т (герметичный) – для воздухопроводов диаметром от 20 до 300 мм с толщиной стенки 0,3–0,4 мм. Применение ПКМ в конструкции «Бурана» позволило снизить массу орбитального корабля более чем на 1500 кг.

Для обеспечения теплового баланса МКС «Энергия-Буран» были разработаны и использованы терморегулирующие покрытия (ТРП). Класса «солнечные отражатели» – эмаль КО-5191А и бензоспиртостойкая эмаль КО-5258 (для комплекта оборудования космонавтов: шлем, ранец). Для элементов конструкции шасси и панели под экранно-вакуумную теплоизоляцию были применены ТРП класса «истинные отражатели» – эмаль ВЭ-30 серебристая и ВЭ-50Э.

В конструкции МКС «Буран» применены легкие сплавы, разработанные ВИАМ. Жаропрочный криогенный сплав 1201-Т1 на базе системы Al–Cu–Mn, работоспособный до -253 °С, применен для сварной герметичной кабины «Бурана», изготовленной из массивных плит толщиной до 100 мм и сложных пресованных профилей с использованием ААрДЭС и ЭЛС. В Институте электросварки (ИЭС) им. Е.О.Патона совместно с НИАТ и ВИАМ отработана технология сварки полуфабрикатов из сплава 1201. Разработана установка УПСФ-2 (НИАТ), на которой велись высокоточная разделка элементов и автоматическая электронно-лучевая сварка в защитной среде.

Для шпангоутов планера использованы массивные плиты из сплава 11Б3-Т1. Для применения в системе «Энергия - Буран» разработан универсальный

высокопрочный свариваемый титановый сплав ВТ23. В изделии «Энергия» общая масса всех деталей и конструкций из титановых сплавов составила 18 тонн, в том числе 14 тонн из высокопрочного сплава ВТ23. В изделии «Буран» общая масса всех деталей и конструкций из титановых сплавов составила 6,8 т, в т.ч. 6 тонн – из высокопрочного сплава ВТ23.

Проведены работы в ВЭТЦ ВИАМ по изготовлению из бериллия тормозных дисков и комплекта внешних рамок остекления для кабины, которые прошли комплекс стендовых испытаний.

15 ноября 1988 года с космодрома Байконур стартовала многоразовая космическая система «Энергия-Буран». Продолжительность полета составила 205 мин., корабль совершил 2 витка вокруг Земли, после чего произвел в автоматическом режиме посадку там же, на Байконуре, на аэродроме Юбилейный. Данный факт – полет космического аппарата в космос и спуск его на Землю в автоматическом режиме под управлением бортового компьютера – вошел в Книгу рекордов Гиннеса.

После первого полета «Бурана» из 38 800 плиток было потеряно 8 плиток жесткой теплозащиты и 2 мата гибкой. После первого полета «Спейс-Шаттла» из 24 192 плиток и 3254 гибких матов изоляции потребовалось заменить более 100 элементов.

Работа над проектом продолжалась 18 лет, и в ней участвовали более одного миллиона человек, общие расходы на программу превысили 16 млрд. рублей (напомню, курс рубля составлял тогда 1 USD – 60 копеек.  $16/06 = 26,7$  млрд. USD).

Создание, запуск и автоматическая посадка МКС «Энергия-Буран» – является поистине национальным проектом, триумфом отечественной науки, техники и промышленности, воплотившем в себе выдающиеся достижения авиакосмической отрасли.

#### Литература

1. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия-Буран» /Под общ. ред. акад. РАН Е.Н. Каблова.– М.: Фонд «Наука и жизнь», 2013.– 128 с.
2. Грибков В.Н., Щетанов Б.В., Кондратенко А.В. Непрерывные волокна окиси алюминия: методы получения, свойства и применение в композиционных материалах // В сб.: Композиционные материалы.– 1984.– С. 66–79.
3. Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г. Теплозащитные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV, №1. С. 12–19.
4. Солнцев Ст.С. Высокотемпературные композиционные материалы и покрытия на основе стекла и керамики для авиакосмической техники //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV, № 1. С. 25–33.
5. Муханова Е.Е., Виноградова Л.М., Королев А.Я. Термоокислительная стойкость гидрофобных пленок на стекле // В сб.: Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы.– М.: ВИАМ, 1985. № 4.– С. 74–78.
6. Кондрашов Э.К., Кузьмин В.В., Минаков В.Т., Пономарева Е.А. Нетканые материалы на основе термостойких полимерных волокон и межплиточные уплотнения

//Труды ВИАМ, 2013.– № 7. (электронный журнал).

7. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Применение клеев и герметиков в изделии «Буран» //Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №1. С. 27–32.

8. Грибков В.Н., Мизюрина Г.Т., Щетанов Б.В., Ляпин В.В. Возможности волокнистой тепловой защиты //Труды Первой междунар. авиакосмич. конф. «Человек–Земля–Космос». Т. 5. Материалы и технология производства авиакосмических систем.– М.: Военная акад. им. Ф.Э. Дзержинского, 1995.– С. 223–231.

9. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.

10. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 2–9.

11. 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.

12. Солнцев С.С., Гращенков Д.В., Исаева Н.В. Высокотемпературные композиционные материалы для перспективных изделий авиа- и машиностроения // Конверсия в машиностроении. 2004. № 4. С. 60–64.

## **РАЗВИТИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – ОТ «БУРАНА» ДО НАШИХ ДНЕЙ**

*О.С.Сироткин* (ОАО «НИАТ», г. Москва, Россия)

Первый шаг в технологии 21 века Россия сделала еще 25 лет назад при запуске системы «Энергия – Буран».

При создании космического самолета «Буран» было реализовано более 600 новых технологий. Многие из них актуальны и в настоящее время. Это цифровые технологии производства теплоизоляционных плиток, композитные технологии, «углерод–углеродные» материалы, алюминивно–литиевые свариваемые сплавы. Технология автоматизированной сборки – сварки кабины «Бурана». Полный цикл отработки элементов конструкций на стендах и натурных испытаний моделей. Был создан и уникальный комплекс автоматизированной системы управления.

Следует отметить, что параллельно с системой «Энергия – Буран» были созданы и модернизированы военно – транспортные самолеты «Мрия» (АН-225), ЗМ и другие носители для «Бурана»; топливных отсеков; двигательных систем для «Энергии». Это были уникальные и до сих пор не повторенные никем в мире решения.

В настоящее время авиакосмическая отрасль является авангардом развития машиностроения в РФ. Намечена и начата реализация крупных программ по научно– технологическому заделу и модернизации производства. Основное внимание уделяется переходу к технологиям пятого поколения. Это цифровые технологии и PLM–решения, виртуальное моделирование и оптимизация производства будущего, композитные и металло- композитные технологии, синтез деталей из супертонких порошков. Нанотехнологии, интегральные конструкции из новейших Ti и Al-Li сплавов. Создание интегрированных компьютеризированных производств (СІМ), позволяющих повысить эффективность новых самолетов, двигателей и вертолетов за счет существенного сокращения затрат циклов производства при одновременном повышении качества продукции.

Вот не полный перечень технологий, которыми занимаются ФГУП ЦАГИ, ФГУП ВИАМ, ОАО НИАТ, РТ–Химкомпозит и другие научные коллективы страны.

## **НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И УНИКАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ “БУРАН”**

*О.Н.Комиссар* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Практически с первых дней после выхода в феврале 1976 г. Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О создании многообразной космической системы» ОНПП «Технология» совместно с ведущими конструкторскими и материаловедческими организациями страны включилось в работу по созданию специальных материалов, технологий и конструкций для уникального проекта. Общеизвестный факт: из 100 тонн общей массы планера ВКС «Буран» 10 тонн – изделия, разработанные и произведенные ОНПП «Технология» в тесном сотрудничестве с ФГУП «ВИАМ», ОАО «НИАТ», ОАО «НИТС», НПО «Стеклопластик». Это всемирно известная керамическая сверхлегкая теплозащита, крупногабаритные (площадь поверхности 144 м<sup>2</sup>) углепластиковые створки отсека полезного груза, высокопрочные термостойкие лобовые стекла корабля, тонкостенные композитные трубы системы воздушного термостатирования (общий метраж около 200 м), керамические узлы крепления из нитрида кремния и многое другое.

Для производства створок отсека полезного груза (СОПГ) «Бурана» из композитных материалов на основе углеродных и арамидных волокон в ОНПП «Технология» были организованы участки выкладки панелей и шпангоутов СОПГ, а также участок автоматизированного автоклавного формования силовых углепластиковых конструкций (с использованием автоклавов «Шольц»). Совместно с ФГУП «ВИАМ» подобраны технологические режимы выкладки и автоклавного формования послойно гибридных композитных конструкций с сотовым наполнителем. В ходе работ предприятием был накоплен богатый опыт применения крупногабаритной формующей оснастки, изготовленной на Тушинском машиностроительном заводе.

Многие вопросы, связанные с разработкой технологии изготовления крупногабаритных трехслойных панелей и сложнопровильных шпангоутов переменного сечения из специально созданного для ВКС углепластика и органика, а также вопросы неразрушающего контроля и аттестации готовых деталей СОПГ впервые решались в отечественной практике. В сжатые сроки были отработаны и внедрены основные принципы и методология изготовления крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов, которые и сегодня отвечают современным требованиям. Специально созданной отраслевой бригадой из лучших специалистов ФГУП «ВИАМ», ОАО «НИАТ», НПО «Молния» и ОНПП «Технология» были разработаны комплексные методики неразрушающего контроля качества углепластиковых конструкций, проведены практические работы по контролю качества и ремонту композитных агрегатов в условиях сборочных цехов Тушинского машиностроительного завода и космодрома «Байконур».

Сложная конструкция СОПГ потребовала также разработки особых

жгутовых и ворсовых уплотнителей для обеспечения герметичности стыков и сотовых заполнителей на основе полимерной бумаги «фенилон», производство которых было налажено в одном из цехов предприятия.

Особого внимания заслуживает разработка уникальной теплозащиты корпуса «Бурана», обладающей редким сочетанием высоких теплофизических свойств и успешно выдержавшей температуру плазмы при автоматической посадке орбитального корабля. Оригинальные конструктивные и технологические решения, использованные при создании теплозащиты, до сих пор не имеют аналогов в мире. Белое теплозащитное покрытие, разработанное ФГУП «ВИАМ» совместно с ОНПП «Технология», состояло из 38800 плиток, изготовленных на обнинском предприятии из супертонкого кварцевого волокна диаметром 1 микрон, созданного и произведенного в НПО «Стеклопластик».

Каждое изделие теплозащиты обрабатывалось в НПО «Молния» на станках с числовым программным управлением с учетом места установки каждой плитки на корпусе орбитального корабля (ОК). Сжатые сроки поставки, высокие требования по качеству и стабильности свойств плиток теплозащиты вызвали необходимость автоматизации производства. Так, в 1981-1986 г.г. в ОНПП «Технология» была внедрена автоматизированная система управления разработкой и производством теплозащитного материала, получившая название «Блок». Впервые в истории отечественной техники был создан вычислительный центр сбора данных и управления, содержащий терминальную сеть для ручного ввода данных на рабочих местах, трехуровневую систему автоматического ввода данных с технологических и измерительных комплексов и прямого цифрового управления термическим оборудованием для сушки и обжига блоков.

Неразрушающий контроль качества отформованных изделий теплозащиты с помощью панорамной рентгеновской установки, созданной ОАО «НИАТ», и неразрушающий метод прогноза прочностных характеристик, разработанный специалистами ОНПП «Технология», позволили обеспечить требуемое качество и надежность изготовленных деталей.

По мнению генерального конструктора НПО «Молния», ведущего разработчика ОК «Буран» Г.Лозино-Лозинского: «Высочайшим достижением является разработка и освоение массового производства ультралегких теплозащитных плиток из супертонкого кварцевого волокна, успешно выдержавших испытание при полете орбитального корабля «Буран». Впервые в нашей стране было создано неуносимое теплозащитное покрытие радиационного типа многоразового использования».

В конце 1970-х годов старейшим научно-исследовательским направлением ОНПП «Технология» были начаты работы по созданию высокопрочного радиационно- и термостойкого остекления кабины пилотов ВКС «Буран», отвечающего комплексу требований:

- температура эксплуатации – до 1173°C;
- светопропускание – не менее 90%;
- радиационно-оптическая устойчивость при облучении дозой 105 рентген – 0,03;
- прочность – до 400 МПа.

Наличие теоретического задела и кропотливые исследовательские и технологические работы позволили специалистам предприятия и ОАО «НИТС» создать новое термостойкое радиационно-оптически устойчивое листовое стекло с повышенной способностью к упрочнению методом ионного обмена и разработать технологию ионообменного упрочнения крупногабаритных изделий толщиной до 20 мм. Это дало возможность в 10 раз увеличить прочность изделия с сохранением его оптических свойств. Созданное остекление с высокой степенью надежности выдерживало перепад давления между кабиной и открытым космосом и колоссальный напор раскаленной плазмы во время спуска корабля с орбиты. В рамках работы были разработаны технологии варки, прокатки и механической обработки листового стекла специального состава, методики контроля качества оптических свойств.

Из керамики на основе нитрида кремния были изготовлены «отсечные мосты» для носового обтекателя и закрылков ВКС «Буран». Они были использованы в качестве термобарьеров для частичной замены ниобиевых элементов крепления. С их помощью осуществляли крепления носового обтекателя и закрылков корабля. Такая керамика выдерживала большие тепловые и механические нагрузки при температурах от  $-273^{\circ}\text{C}$  до  $+1500^{\circ}\text{C}$ .

Участие предприятия в создании воздушно-космического корабля имело не только практический, но и научный итог. В ходе работ получено около 30 авторских свидетельств на изобретения материалов, технологий и конструкций для ВКС «Буран», половина из них - совместно с ФГУП «ВИАМ», в том числе на способ получения материала теплозащиты. Сегодня полученные результаты используются в новых, самых перспективных проектах создания авиационной и ракетно-космической техники.

В итоге реализации в ОНПП «Технология» проекта создания 1-й модификации ВКС «Буран» предприятием была обеспечена комплектация уникальной продукцией из неметаллических материалов всех наземных и 5-ти летных комплексов по программе «Буран». На основании постановления Правительства СССР и благодаря совместным усилиям лучших специалистов ведущих организаций в области композиционных материалов с 1976 по 1988 год в ОНПП «Технология» был создан конкурентоспособный на мировом уровне центр по разработке технологий и производству аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Высокое качество разрабатываемой и серийно выпускаемой продукции из ПКМ определяется наличием на предприятии современной системы менеджмента качества, соответствующей международным стандартам. На сегодняшний день ОНПП «Технология» - первое в России, и пока единственное композитное производство, качество разработок и продукции которого гарантировано системой менеджмента качества в соответствии с международным аэрокосмическим стандартом EN-9100, подтвержденной сертификатом Bureau Veritas (США).

Научно-технический задел, наработанный «Технологией» во имя успеха «Бурана», дал импульс новым идеям, а умение максимально уменьшать вес конструкций при выдающейся прочности позволило нашему предприятию в

свое время начать разработку технологий и организовать серийное производство углепластиковых оболочек головных обтекателей, гаргротов, деталей приборных отсеков ракет-носителей «Протон-М», «Рокот» и «Ангара».

Успешное сотрудничество предприятий в области аэрокосмических конструкций из ПКМ, сложившееся в период создания ВКС «Буран», нашло свое продолжение и в проекте создания перспективного авиационного комплекса фронтовой авиации пятого поколения (Т-50). Так, специалистами ОНПП «Технология» велась отработка технологий, конструкций, методов контроля качества, подготовка производства и поставка для истребителя высоконагруженных углепластиковых панелей крыла и фюзеляжа.

В целом опыт работы ОНПП «Технология» и многих ведущих предприятий России при создании новых материалов и конструкций в рамках проекта «Энергия-Буран» явился прекрасным примером комплексной организации современного научного исследования, разработки на его основе уникальной технологии и как результат – организации серийного производства изделий и материалов с заданными свойствами.

## **МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ОПЫТ «БУРАНА» И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В МГТУ ИМ. Н.Э.БАУМАНА**

*А.А.Александров* (МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва, Россия)

Композиционные материалы, в том числе и полимерные композиционные материалы (ПКМ), уже достаточно давно и совершенно справедливо называют материалами 21 века. Это не только очень перспективное, но и стратегическое направление, которое на протяжении последних 50 лет в нашем университете развивалось параллельно на нескольких кафедрах: МТ-8, РК-5, СМ-1, СМ-2, СМ-12. Десять лет назад в нашем университете была создана новая кафедра композитных конструкций СМ-13, которая так и называется «Ракетно-космические композитные конструкции». Однако круг проблем, которые приходится решать нашим композитчикам, постепенно расширялся и стал существенно шире, чем аэрокосмическая отрасль. Это и строительство, и медицина, и судостроение, и ветроэнергетика, и многое другое.

Для научно-технической интеграции кафедр и выстраивания единой стратегии развития МГТУ им. Н.Э. Баумана в области разработки новых материалов и конструкций на их основе, а также для реализации сложнейших современных материаловедческих задач под научным руководством академика РАН Е.Н. Каблова был создан Инжиниринговый научно - образовательный центр «Новые материалы, композиты и нанотехнологии» (НОЦ «НМКН»).

На сегодняшний день НОЦ «НМКН» – сплав науки и инженерии МГТУ им. Н.Э. Баумана и научно-исследовательских и производственных возможностей ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. Центр предлагает уникальную возможность выполнения работ по принципу «замкнутого цикла»: от разработки новых материалов и технологий их переработки до проектирования и производства изделий и конструкций на их основе. Такой инновационный путь развития НОЦ «НМКН» стал возможен благодаря сотрудничеству двух выдающихся научных школ: МГТУ им. Н.Э. Баумана и ВИАМ.

Центр занимается комплексом задач, связанных с разработкой, испытанием и организацией опытно-промышленных производств изделий из композиционных материалов. Основными направлениями деятельности являются:

- выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по различным тематикам;
- разработка специализированного оборудования для производства изделий из полимерных композиционных материалов;
- организация опытно-промышленного производства изделий из полимерных композиционных материалов для различных отраслей машиностроения, включая авиастроение, двигателестроение, энергетика, судостроение, автомобилестроение и прочие базовые отрасли машиностроения;
- локализация западных технологий для применения их в различных отраслях экономики.

Среди основных проектов центра можно выделить: «Разработка и организация

производства типовых строительных конструкций из наномодифицированных композиционных материалов», «Разработка и создание нового класса композитных обтекателей и отсеков перспективных ракет-носителей», «Создание системы встроенного непрерывного неразрушающего контроля агрегатов каркаса авиационной техники из ПКМ» и другие.

В настоящее время на базе Научно-образовательного центра «Новые материалы, композиты и нанотехнологии» (Инжиниринговый центр) планируется создание Межотраслевого инжинирингового центра композиционных материалов.

К работе над проектом инжинирингового центра привлекаются ведущие мировые ученые, реализующие масштабные международные проекты в области композиционных материалов, обладающие обширными научными и бизнес связями в аэрокосмической, автомобилестроительной и прочих областях.

Основными направлениями работы будущего Центра планируются:

- инжиниринг в области композитов в различных сегментах рынка (ЖКХ, городская инфраструктура, авиация, космос, судостроение, строительство, биомедицина, энергетика, двигателестроение, автомобилестроение, ЖД транспорт, сельхозтехника, дорожная инфраструктура);

- сертификация и квалификация материалов и технологий;
- образование и переподготовка кадров;
- стратегический консалтинг в области композитов;
- создание малых инновационных компаний (НИП).

Основными результатами развития и деятельности будущего Центра будут:

- реализация пилотных проектов по внедрению композиционных материалов и технологий на предприятиях промышленности;

- увеличение доли композиционных материалов в продукции, выпускаемой гражданскими отраслями промышленности РФ;

- освоение новых и перспективных технологий переработки композиционных материалов на мировом уровне и выше мирового уровня, создание научно-технического задела по композитам;

- увеличение и обновление нормативной базы по композиционным материалам и технологиям, позволяющей применять композиты в гражданских отраслях промышленности в объемах;

- увеличение числа предприятий малого и среднего бизнеса в области композитов.

## ИСТОРИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОНФЕРЕНЦИЙ

ОАО «ОНПП «ТЕХНОЛОГИЯ»: 1967 – 2013 ГОДЫ

д.т.н. А.Г.Ромашин, к.т.н. Р.П.Келина, к.т.н. И.Ю.Келина

Современное развитие науки и техники и в первую очередь таких отраслей, как космическая, ракетная, авиационная, ядерная, электронная и др. увеличивает спрос на материалы и изделия, работающие в экстремальных условиях воздействия высоких температур, термических и динамических нагрузок, ионизирующих излучений и др. Без преувеличения можно сказать, что успехи материаловедения в части создания перспективных материалов, технологий и конструкций, работающих в экстремальных условиях, в значительной степени определяют развитие целых отраслей промышленности. Интересно проследить как разработки новых наукоемких материалов, технологий, конструкций и их серийное производство находят отражение в трудах наших научно-технических конференций.

1-3 октября 2013 года в Обнинске состоялась XX Международная научно-техническая конференция по проблеме «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», в рамках которой было проведено торжественное собрание, посвященное 25-летию полета многоразового космического корабля «Буран».



Символ XX Международной научно-технической конференции

Идея проведения конференций зародилась уже с момента создания на базе стекольного завода Филиала научно-исследовательского института технического стекла (ФНИТС). Начальник головного института (НИТС), известный ученый, доктор технических наук, профессор С.М.Бреховских практически с первых дней создания всячески стимулировал развитие научно-производственного потенциала филиала: создавались научные лаборатории, укреплялась производственная база, открывались работы по синтезу новых материалов, разработке технологий изготовления изделий, оборудования и внедрения их в производство. При этом большое внимание уделялось поисковым работам, создающим научно-технический задел. Период становления научных подразделений и конструкторских отделов характеризовался большой творческой активностью. Основной кадровый состав лабораторий, да и всего предприятия, был очень молодым.

По инициативе начальника лаборатории исследований и паспортизации материалов А.Г.Ромашина во ФНИТС был создан Совет молодых ученых и специалистов (СМУС) и впоследствии принято решение о проведении научных конференций по тематике «Жаропрочные неорганические материалы».



С.М.Бреховских, д.т.н., профессор



Выступление С.М.Бреховских  
на X конференции (1986 год)

Первое научно-техническое совещание молодых ученых «Жаропрочные неорганические материалы» проходило в Обнинске на территории ФНИТС 18-22 июля 1967 года. На нем рассматривались вопросы получения кварцевой керамики, разработки термостойких стекол и методов их упрочнения, испытаний физико-химических свойств материалов. Было представлено 33 доклада, в т.ч. от ФНИТС 14 докладов. Следует отметить, что это были первые научные результаты молодых ученых и специалистов. Первая конференция сыграла положительную роль в налаживании контактов и обмене информацией, координировала и интенсифицировала проводимые работы. Сборник трудов этого научно-технического совещания был издан под редакцией С.М.Бреховских и В.М.Янишевского в 1969 году в типографии министерства авиационной промышленности.

Второе научно-техническое совещание молодых ученых по проблеме «Синтез, технология производства и методы испытаний жаропрочных неорганических материалов» состоялось 9-12 сентября 1969 года. На нем было сделано 44 доклада учеными из многих городов РСФСР, Украины, Белоруссии и др., в т.ч. 17 докладов от ФНИТС. Эти материалы заинтересовали многие КБ и НИИ страны.

В дальнейшем конференции молодых ученых стали проводиться регулярно через каждые два года вплоть до 1992 года под тем же названием. Особенностью этих конференций являлась тематическая направленность, выделяющая определенные классы материалов: оксидную керамику, стекло, стеклокерамику.

С каждым годом расширялись спектр исследуемых керамических материалов (кварцевая, нитридная, алюмооксидная керамика), номенклатура термостойких цветных и бесцветных стекол, стеклокристаллических материалов и изделий конструкционной оптики, появились доклады по технологии получения



Президиум научно-технического совещания молодых ученых (1967 год): секретарь комсомольской организации А.В.Пестов, начальник ФНИТС Ф.Т.Горобец, секретарь партийной организации М.Г.Комарков (слева направо); на трибуне – А.Г.Ромашин

крупногабаритных изделий и методологии исследований высокотемпературных свойств материалов в ИК- и СВЧ-диапазонах спектра.

Научные конференции молодых ученых ФНИТС в Обнинске привлекали внимание не только молодых специалистов, но и известных ученых. Среди них: д.т.н. С.М.Бреховских, Н.В.Соломин, В.М.Янишевский, В.И.Шелюбский, В.Ф.Солинов, И.А.Богуславский (НИТС, г. Москва); П.П.Будников, П.Д.Саркисов, Д.П.Полубояринов, Н.М.Павлушкин, Е.С.Лукин, А.С.Власов, Р.Я.Попильский, И.С.Кайнарский, Р.Я.Ходаковская (МХТИ им. Д.И.Менделеева); Ф.Я.Харитонов (ГИЭКИ, г. Москва); В.И.Трефилов (ИПМ, г. Киев); Г.А.Гогоци (ИПП, г. Киев); Г.Д.Семченко (ХПИ, г. Харьков); И.И.Немец (БПИ, г. Белгород) и др. Это придало ФНИТС авторитет серьезной научной организации.

После создания в 1978 году ОНПП «Технология» VII научно-технической конференции (24-26 ноября 1980 года) был придан статус всесоюзной и она получила название «Технология неметаллических конструкций». На ней были представлены уже две секции: «Технология получения жаропрочных неорганических материалов и изделий» и «Теоретические и экспериментальные методы исследования свойств материалов и изделий». Количество докладов возросло до 125. Материалы были изданы Всесоюзным научно-исследовательским институтом межотраслевой информации (ВИМИ) в целях обеспечения широкого и систематического обмена передовым научным и техническим опытом. В них были отражены исследования неметаллических конструкционных материалов, технологий изготовления изделий и показана необходимость создания новых методов расчета конструкций из неметаллических материалов (конференция проходила в конференц-зале института медицинской радиологии АМН СССР).



Сборники материалов конференций 1969-1977 годов

VIII научно-техническая конференция состоялась 25 – 27 октября в 1982 году, была названа «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» и была посвящена 60-летию образования СССР. Название конференции сохранилось до настоящего времени. Тематика конференции была расширена с учетом научных работ филиала ВИАМ. Работа конференции проводилась по трем секциям: 1. Жаропрочные керамические материалы; 2. Конструкционная оптика; 3. Композиционные материалы. В том же году появилась эмблема конференции «НМ-82», отражающий неметаллические материалы для авиационной промышленности.



Эмблема конференции

Количество ученых и специалистов, желающих принять участие в работе конференций, значительно увеличилось, их стали проводить в Доме политической и научно-технической пропаганды (ДПП). Для организации конференции был создан организационный комитет под председательством А.Г.Ромашина.

Известность и значение наших конференций росли из года в год. В работе VIII конференции приняли участие 136 организаций, среди участников 12 докторов и 122 кандидата наук. Было рассмотрено 225 докладов. Представленные доклады по разработке керамических нитридных конструкционных материалов для элементов газотурбинных двигателей (ГТД) и двигателей внутреннего сгорания (ДВС), термостойких стекол для изделий конструкционной оптики, технологии полимерных конструкционных материалов сыграли большую роль в повышении уровня разработок и в определении основных направлений дальнейшего их развития.



Выступление д.т.н., профессора С.М.Бреховских на VIII Всесоюзной научно-технической конференции (1982 год); в президиуме: председатель горисполкома г. Обнинска Н.С.Антоненко, к.т.н. А.Г.Ромашин, к.т.н. А.С.Шаталин, секретарь горкома КПСС В.Я.Киселев, д.т.н. Р.Я.Попильский

VIII Всесоюзная научно-техническая конференция (1982 год):



а - Пленарное заседание – д.т.н. Н.В.Соломин, д.т.н. Р.Я.Попильский, к.т.н. Ю.Е.Пивинский (слева направо);



б – выступление к.т.н. Р.П.Келиной

80-ые годы характеризуются пиком развития отечественной космонавтики. Создается многоразовый космический корабль «Буран». Это вызвало всплеск творческой активности научных работников в области материаловедения для космической техники. Научные разработки специалистов, освещающие их успехи и достижения, были представлены на IX - XII Всесоюзных научно-технических конференциях, проходивших в период 1984-1990 годов.



Президиум X Всесоюзной научно-технической конференции  
(29–31 октября 1986 года)

На X конференции были рассмотрены вопросы создания крупногабаритных деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов для космического корабля «Буран», включающие разработку принципиально новых конструктивно-технологических решений создания деталей створок отсека полезного груза; высокопрочных термостойких радиационно-оптически устойчивых стекол и

ионнообменной технологии упрочнения крупногабаритных изделий остекления с сохранением оптического качества; обработку материалов и разработку серийной технологии высокотемпературного теплозащитного материала ТЗМК; керамических термобарьерных отсечных мостов. Для успешного их решения было приобретено и создано новое технологическое, исследовательское и испытательное оборудование. Практически все разработки были защищены авторскими свидетельствами СССР на изобретения.

Творческая активность научных работников и значимость конференций подтверждается нарастающим количеством докладов. В 1980 было 125 докладов, в 1982 – 225, в 1984 – 360, в 1986 – 425, в 1988 – 527 и в 1990 – 400 докладов.

Доклады на конференциях 80-х годов представляли научный интерес не только для специалистов в области космонавтики, авиационной и ракетной техники, но и для разработчиков материалов и изделий судостроительной, автомобильной техники, металлургии и медицины, что обусловлено успешной реализацией конверсии с целью внедрения разработок в другие отрасли промышленности. Появилась рекламная составляющая научных результатов, конференции проходили при поддержке информационно-аналитического и рекламного журнала «Конверсия». На конференции 1990 года были представлены разработки керамических материалов на основе нитрида и карбида кремния и изделий из них для эксплуатации при температурах выше 1500 °С.

Коренные перемены в стране, связанные с изменениями в государственной и экономической жизни России, резкое снижение финансирования научных исследований, естественно, отразились и на характере проводимых в ОНПП «Технология» научных конференций. Существенно уменьшилось количество участников и докладов, после 1992 года конференции проводились с интервалом в три года. На XIII конференции 1992 года, проведенной на базе отдыха нашего предприятия «Полет», было сделано 110 докладов, на XIV (1995) – 137, на XV (1998) – 87, на XVI (2001) – 101.

Начиная с XV, конференции проводились в Центральном институте повышения квалификации (ЦИПК). Во время их проведения работал информационно-рекламный центр, были организованы выставки-продажи изделий из стекла, керамики и полимеров и экскурсионные поездки в рамках культурной программы.

Накопленный в 90-ые годы опыт для корабля «Буран» был использован для создания новых материалов и технологий получения изделий остекления железнодорожного транспорта, автоматизированной технологии получения термостойкой посуды, оптических элементов микрокинескопов, изделий для светосигнального и светоосветительного аэродромного оборудования; термопарных чехлов из нитрида кремния, чувствительных элементов I-датчиков ДВС из диоксида циркония, композиционных керамических бронезащитных элементов, сопел сварочных аппаратов, износостойких деталей штампов, фильер, керамических подшипников, а также товаров народного потребления. Поддержать и в дальнейшем развивать научно-технический потенциал предприятия помогло получение в 1994 году ОНПП «Технология» статуса Государственного научного центра Российской Федерации. Началось целевое финансирование по Федеральным целевым программам.



XV Всесоюзная научно-техническая конференция  
(ЦИПК, 15–18 сентября 1998 года)

Начиная с 2001 года, для организации работы конференций создается Программный комитет, в состав которого входят ведущие специалисты и известные ученые с мировым именем, расширяется тематика конференций. На XVI научно-технической конференции (16-18 октября 2001 года) были представлены доклады по исследованию и разработке:

- высокотемпературных керамических конструкционных материалов и технологий изготовления теплонапряженных элементов и узлов газотурбинных и поршневых двигателей, химически-, абразиво-, износостойких, электроизоляционных, теплозащитных изделий различного назначения;
- радиопрозрачных конструкций из керамических, стеклообразных и композиционных материалов для летательных аппаратов;
- термостойких бесцветных и цветных стекол для остекления транспортных средств, конструкционной оптики, систем навигации, информации, осветительной техники;
- технологий и конструктивно-технологических решений изготовления изделий из полимерных композиционных материалов для авиакосмической техники, наземного транспорта;
- термостойких электроизоляционных компаундов, герметиков и связующих.

В докладах XVII научно-технической конференции, которая проходила 12-14 октября 2004 года, были изложены совместные результаты керамического и стекольного производства по разработке радиопрозрачных материалов и технологий изготовления обтекателей, объединяющие технологические стадии ситаллообразующего стекла и стеклокерамики. Впервые были озвучены результаты разработки прецизионной технологии нанесения наноразмерных покрытий методом магнетронного напыления, что позволило создавать многофункциональные покрытия. Представлены исследования в области термостойких связующих теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна, трехслойных

стеклопластиковых сотовых конструкций для радиопрозрачных укрытий, многослойных композитных звукопоглощающих конструкций, технологии изготовления крупногабаритных стеклосотоблоков. Отмечался комплексный подход при создании новых изделий из термостойких высокопрочных стекол, полимерных композиционных материалов, высокотемпературной керамики, включающий материаловедческие, конструкторско-технологические исследования, производство и испытания изделий.

Такая же система научных исследований характерна и для докладов последующих XVIII (23–25 октября 2007 года) и XIX (5–7 октября 2010 года) Международных научно-технических конференций.



XIX Международная научно-техническая конференция (2010 год).  
Выступление д.т.н. В.В.Викулина на пленарном заседании.



Пленарное заседание



Заседание секций

На них были представлены исследования по созданию нового класса конструкционных материалов – керамоматричных композитов и технологии керамических наноматериалов. Отмечено, что полимерные композиционные материалы значительно повышают эксплуатационные характеристики новых образцов наземной, воздушной и ракетно-космической техники. Представлены доклады по термостойким связующим и композитам на их основе, крупногабаритным радиопрозрачным изделиям из стеклопластиков, а также результаты исследований по созданию авиационного остекления с учетом новых требований по весовым, прочностным и оптическим характеристикам. Показано, что перспективным является остекление на основе гетерогенных композиций с высокой прочностью и меньшим весом по сравнению с силикатными стеклами. Работы выполнялись с применением наноматериалов, повышающих свойства композитов, керамики, стекла, что позволило получать «умные материалы» с регулируемыми свойствами.

О важности и актуальности тематики, рассматриваемой на проводимых конференциях, свидетельствует тот факт, что в их работе представляли доклады ученые и специалисты ведущих организаций России и стран СНГ:

- академические институты: ИСМАН, ИПХВ РАН (г. Черноголовка); Научный центр волоконной оптики РАН, ИМАШ им.А.А.Благодирова РАН (г. Москва); ИХТТИМ СО РАН (г. Новосибирск); ИПМ, ИПП, ИСМ НАН Украины (г. Киев), ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН (г. С.-Петербург), ФТИ и ИТХ АН Латвии (г. Рига); ИХ ДВО РАН (г. Владивосток) и др.;

- ВУЗы: МГУ им.М.В.Ломоносова, МАИ, МГТУ им.Н.Э.Баумана, РХТУ им. Д.И.Менделеева (г. Москва); ХАИ им.Н.Е.Жуковского, ХГПУ (г. Харьков); Государственный и Политический университеты (г. Томск); УГТУ (г. Уфа); Рижский технический университет (г. Рига); Донецкий ФТИ (г. Донецк); БелГТАСМ (г. Белгород); Бельский технический университет (Молдова) и др.;

- отраслевые НИИ: ВИАМ, НИТС, ЦАГИ, ЦИАМ, НИАТ, ВНИИЭТО, ГНИИХТЭОС, ГИС (г. Москва); ЦНИИСМ (г. Хотьково); ГОИ им.С.И.Вавилова, ВНИИТВЧ, ОНЦ «Прикладная химия» (г. С.-Петербург); Саратовский институт стекла (г. Саратов); Укр НИИО (г. Киев); УкрГИС (г. Константиновка); НИКТИД (г. Владимир) и др.;

- предприятия: РКК «Энергия», НПО «Композит» (г. Королев); ОАО «Камов» (г. Люберцы); НПО им. С.А.Лавочкина (г. Химки); ГКНПЦ им.М.В.Хруничева (г. Москва); ОАО «Авангард» (г. Сафронovo); ГП ВНИИПВ (г. Мытищи); КМПО (г. Казань); АО «Лисма» (г. Саранск); НПФ «Керамбет» (г. С.-Петербург); АО «Комбинат Магнезит» (г. Сатка); БНПО порошковой металлургии (г. Минск); НПО «Физика-Солнце» (г. Ташкент); ОАО «Укр НИИ ТМ» (г. Днепропетровск); ГП «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье); ГП «Антонов» (г. Киев); ООО «ЗГМ» (г. Дзержинск); ООО «АПАТЭК-Дубна» (г. Дубна) и др.

Перечень организаций-участников показывает, что конференции ОАО «ОНПП «Технология» пользуются заслуженным авторитетом среди ученых – материаловедов, технологов и конструкторов в области конструкций и технологий получения изделий из неметаллических материалов и проходят на высоком научно-техническом уровне.

Уникальные разработки и высокий научно-технический потенциал ГНЦ РФ ОНПП «Технология» в области неметаллических материалов, представленные на 19-ти научно-технических конференциях (1967–2010), позволили создавать наукоемкую продукцию для перспективной авиационной, ракетно-космической, автомобильной, металлургической и других отраслей промышленности, в частности, крупногабаритные углепластиковые обтекатели РН «Протон», «Рокот», «Ангара», сложнопрофильные композитные детали ПАК ФА V поколения Т-50, авиалайнера МС-21, радиопрозрачные укрытия, авиационное и железнодорожное остекление с многофункциональными покрытиями и другие разработки. Новые результаты будут с успехом представлены на будущих конференциях в Обнинске.

## Перечень трудов конференций:

1. Жаропрочные неорганические материалы // Сб. докл. молодых ученых на I научно-техн. совещ. – М.: НИТС, 1969.
2. Жаропрочные неорганические материалы // Сб. докл. молодых ученых на 2 научно-техн. совещ. “Синтез, технология производства и методы испытаний жаропрочных неорганических материалов”. – М.: НИТС, 1971.
3. Жаропрочные неорганические материалы // Сб. докл. молодых ученых на 3 научно-техн. совещ. “Синтез, технология производства и методы испытаний жаропрочных неорганических материалов”. – М.: НИТС, 1974.
4. Жаропрочные неорганические материалы // Сб. докл. на 4 научно-техн. совещ. “Синтез, технология производства и методы испытаний жаропрочных неорганических материалов”. – М.: НИТС, 1975. – Вып. 4.
5. Жаропрочные неорганические материалы // Сб. мат. 5 Всес. конф. “Синтез, технология производства и методы испытаний жаропрочных неорганических материалов”. – М.: НИТС, 1977. – Вып. 5.
6. Синтез, технология производства и методы испытаний жаропрочных неорганических материалов и конструкций // Сб. VI Всес. конф. – М.: ВИМИ, 1980. – Ч.1.
7. Синтез, технология производства и методы испытаний жаропрочных неорганических материалов и конструкций // Сб. VI Всес. конф. – М.: ВИМИ, 1981. – Ч.2.
8. Технология неметаллических конструкций // Сб. тез. докл. VII Всес. конф. – М.: ВИМИ, 1980.
9. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Мат. VIII Всес. научно-техн. конф. – М.: ВИМИ, 1982. – Ч. 1: Жаропрочные керамические материалы.
10. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Мат. VIII Всес. научно-техн. конф. – М.: ВИМИ, 1982. – Ч. 2: Конструкционная оптика.
11. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Мат. VIII Всес.научно-техн. конф. . – М.: ВИМИ, 1982. – Ч. 3: Композиционные материалы.
12. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. IX Всес. научно-техн. конф. – Обнинск, 1984. – Ч. 1: Жаропрочные керамические материалы.
13. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. IX Всес. научно-техн. конф.– Обнинск, 1984. – Ч. 2: Изделия конструкционной оптики.
14. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. IX Всес.научно-техн. конф.– Обнинск, 1984. – Ч. 3: Полимерные композиционные материалы.
15. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. X Всес. научно-техн. конф. – М.: ВИМИ, 1986. – Ч.1: Жаропрочные керамические материалы.
16. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. X Всес. научно-техн. конф. – М.: ВИМИ, 1986. – Ч. 2: Конструкционная оптика.

17. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. X Всес. научно-техн. конф.– М.: ВИМИ, 1986. – Ч. 3: Полимерные композиционные материалы.
18. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XI Всес. научно-техн. конф.– М.: ВИМИ, 1988. – Ч.1: Жаропрочные керамические материалы.
19. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XI Всес. научно-техн. конф. – М.: ВИМИ, 1988. – Ч. 2: Конструкционная оптика.
20. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XI Всес. научно-техн. конф. – М.: ВИМИ, 1988. – Ч. 3: Полимерные композиционные материалы.
21. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XII Всес. научно-техн. конф.– М.: ВИМИ, 1990. – Ч. 1: Жаропрочные керамические материалы.
22. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XII Всес. научно-техн. конф. – М.: ВИМИ, 1990. – Ч. 2: Конструкционная оптика.
23. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XII Всес. научно-техн. конф. – М.: ВИМИ, 1990. – Ч. 3: Полимерные композиционные материалы.
24. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XIII научно-техн. конф. – Обнинск, 1992.
25. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XIV научно-техн. конф. – Обнинск: Конверсия, 1995.
26. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XV научно-техн. конф. – Обнинск, 1998.
27. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XVI научно-техн. конф. – Обнинск, 2001.
28. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XVII научно-техн. конф. – Обнинск, 2004.
29. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XVIII Междунар. научно-техн. конф. – Обнинск, 2007.
30. Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов // Тез. докл. XIX Междунар. научно-техн. конф. – Обнинск, 2010.

## Секция 1. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

### ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КОНСТРУКЦИЯХ ВСК «БУРАН»

*Г.М.Гуняев, А.Е.Раскутин, А.Г.Гуняева* (ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия)

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) – это новый класс конструкционных материалов, предназначенных для создания теплонагруженных деталей планера воздушно-космических и гиперзвуковых самолетов, газотурбинных двигателей, деталей сопловых блоков ракет, тормозов самолетов, оснастки для металлургической промышленности и др. Они обладают уникальной способностью сохранять высокую прочность и жесткость при температурах до 2500°C, а нанесение систем барьерных и антиокислительных покрытий обеспечивает работоспособность таких композитов и в окислительной среде.

УУКМ представляют собой армированные углеродными волокнами графитоподобные структуры. Обычно их получают в результате последовательно проводимых процессов: изготовление деталей из углепластика, карбонизация детали в инертной среде при 900–1000 °С, уплотнение структуры пироуглеродом или пеком с последующей карбонизацией, затем – высокотемпературная обработка или графитация при температурах до 2100–2400 °С, после чего нанесение системы защитных покрытий.

Создание корабля «Буран» потребовало разработки принципиально новых УУКМ для изготовления наиболее теплонагруженных деталей планера – носового обтекателя и передних кромок крыла. Эти крупногабаритные детали испытывают комплексное воздействие температур от –130 до +1650 °С в результате аэродинамического нагрева в сочетании с механическими, вибрационными и акустическими нагрузками. Особые требования связаны со стойкостью к окислению материала в условиях многоразового использования и необходимостью обеспечения исключительно высокой степени надежности работы конструкций. Из ТЗ следовало, материалы должны иметь прочность не менее 100 МПа, коэффициент излучения >0,8, рабочую температуру >1650 °С, не терять эти свойства после воздействия 100 циклов изменения температуры от –130 до +1650 °С, сохранять свои свойства в условиях космоса, под воздействием излучения естественных радиационных поясов Земли, солнечного излучения и вакуума. Свойства материалов должны сохраняться также после воздействия климатических факторов, микроорганизмов и плесневых грибов, молниевых разрядов, влаги, топлива и масел.

Были созданы уникальные по механическим и теплофизическим характеристикам УУКМ для ВКС «Буран» и им были присвоены марки «Гравимол» и «Гравимол-В» (по начальным буквам головных предприятий, участвовавших в их создании, – НИИГрафит, ВИАМ, «Молния», ВНИИВПроект).

Материал «Гравимол» использовался для изготовления носового кока, а

для изготовления секций носка крыла – «Гравимол-В». Применение двух марок материалов объясняется тем, что углеродная ткань марки ТНУ-4, являющаяся наполнителем углерод-углеродного материала «Гравимол-В», оказалась не технологичной для выкладки оболочек двойкой кривизны. В этой связи было принято решение об использовании материала «Гравимол-В» только в секциях носка крыла.

Носовой кок, изготовленный из УУКМ «Гравимол», имеет слоистую структуру, которая состоит из слоев углеродной ткани марки ТКК-2, связанных углеродной матрицей ЛБС-1. Наружные поверхности конструкции покрыты слоем материала марки ЭВЧ-2, который повышает жаростойкость основного материала и обеспечивает заданную величину уноса на уровне  $10^{-5}$  кг/(м<sup>2</sup>×с).

Другими «горячими точками» планера космического корабля «Буран» являются передние кромки крыльев, где температура может достигать 1590–1780°С. Как и в случае носового кока, на этих участках конструкции был применен углерод-углеродный материал, но другой марки – «Гравимол-В». Его отличие от материала «Гравимол» состоит в том, что в качестве наполнителя в нем используется углеродная ткань марки ТНУ-4 с фенолформальдегидным связующим ФН.

Створки грузового отсека ОК «Буран» являются самой крупной силовой конструкцией из композиционных материалов, изготовленной в России. Две симметричные створки, составляющие верхнюю поворачивающуюся и раскрывающуюся часть фюзеляжа, навешены на шарнирных узлах по бортам орбитального корабля и в закрытом положении смыкаются в его верхней части. Общая площадь конструкции створок составляет 144 м<sup>2</sup>. Теплостойкость гибридного композита, используемого в конструкции створки состоящего из углепластика КМУ-4 и «Органит-4» по рекомендации института, составляла 150 °С.

В лаборатории «Полимерные композиционные материалы» ВИАМа специально для ВСК «БУРАН» были разработаны, исследованы и паспортизованы такие уникальные в своем роде УУКМ «Гравимол» и «Гравимол-В», конструкционные углепластики КМУ-4, КМУ-8 и «Органит-4», материал для воздухопроводов, жгутовые термические уплотнители ШТКЛ-15 для секций кромок крыла.

ОК «Буран» успешно выдержал все летные испытания в беспилотном режиме – все жаропрочные материалы соответствовали техническому заданию и показали свою работоспособность в условиях эксплуатации корабля.

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ, СТЕКЛОПЛАСТИКИ И ОРГАНОПЛАСТИКИ ДЛЯ ВЫСОКО- И СРЕДНЕНАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*А.Е.Раскутин, И.И.Соколов, П.М.Шульдешов, К.Е.Куцевич, И.Н.Гуляев*  
(ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия)

Объем применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных, стеклянных и арамидных армирующих наполнителей для ответственных, средне и тяжело нагруженных деталей летательных аппаратов постоянно увеличивается, уже сейчас он составляет от 22 до 55 % от объема применяемых материалов.

В докладе приведены результаты работ, выполненные ФГУП «ВИАМ» по созданию ПКМ нового поколения, как в рамках федеральных целевых программ, так и в интересах российской авиационной промышленности.

Следует отметить, что сравнительный анализ основных характеристик новых российских ПКМ с зарубежными аналогами показал: материалы, разработанные в последние годы в ВИАМ, не уступают зарубежным аналогам по свойствам и при этом конкурентоспособны по стоимости. Учитывая, что производство материалов локализовано на территории России, отпадает необходимость в оформлении экспортной лицензии, а срок изготовления и поставки материалов существенно меньше, чем у зарубежных компаний.

В настоящее время угле- и стеклопластики на основе новых высокодеформативных эпоксидного и цианэфирного связующих проходят квалификационные испытания с целью дальнейшего применения в изделиях авиационной техники, например, из этих материалов планируется изготавливать элементы конструкции мотогондолы двигателя ПД-14 для самолёта МС-21, работы проводятся совместно с ОАО «Аваидвигатель». Для изготовления угле- и стеклопластиков используются углеродные и стеклянные ткани производства ООО «Порше современные материалы», которое в 2012 году открыло ткацкое производство в Калужской области. Основные характеристики разработанных ПКМ приведены в таблице.

Таблица

Основные характеристики разработанных угле- и стеклопластиков

Марка материала	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Монослой, мм	$\sigma_{в.}^0$ , МПа	$E_{в.}^0$ , МПа	$\sigma_{в.}^0$ , МПа	$E_{в.}^0$ , МПа	$\sigma_{-в.}^0$ , МПа	$E_{-в.}^0$ , МПа	$\sigma_{-в.}^0$ , МПа	$E_{-в.}^0$ , МПа	$\tau_{12}^0$ , МПа (±45)	$G_{12}^0$ , МПа (±45)
ВКУ-28	1530-1570	0,13-0,15	2550	160000	63	6800	1300	140000	250	8600	61	4000
ВКУ-29	1520-1560	0,19-0,24	1940	123000	58	8400	1200	112000	190	10300	88	4000
ВКУ-39	1500-1600	0,19-0,24	800	60000	750	60000	600	50	600	50	100	4700
ВПС-48П781	1750-1950	0,19-0,25	400	22000	-	-	-	-	400	-	-	-
ВКУ-27л	1520-1560	0,13-0,15	1840	125000	63	6400	1370	123	260	-	64	4200
ВКУ-27тр	1450-1500	0,25-0,27	850	60000	900	60000	720	59	720	-	100	4400
ВПС-47П781	1750-1950	0,19-0,25	400	22000	-	-	-	-	400	-	-	-

Показаны основные свойства композиционных материалов клеевых (КМК) на основе широкого ассортимента клеевых препрегов, изготавливаемых из клеевых связующих расплавного типа, отличающихся вязко-упругими, прочностными, деформационными и температурными характеристиками и различных отечественных, и различных наполнителей отечественного и зарубежного производства – углеродных тканей, лент (клеевые препреги марок КМКУ) и стеклотканей, в т.ч. на основе высокомодульных волокон (клеевые препреги марок КМКС) в диапазоне температур от –60 до +(80–175) °С. Клеевые препреги позволяют реализовать разработанную в ВИАМ высокоэффективную технологию сборки клееных высоконагруженных сотовых и слоистых конструкций из неметаллических материалов, отличительной особенностью которой является то, что формование обшивки и ее приклеивание к сотовому заполнителю происходит одновременно за одну технологическую операцию, при этом в процессе изготовления сотовой конструкции взамен пленочного клея используют клеевой препрег с увеличенным содержанием связующего. В результате применения клеевых препрегов достигается снижение цикла изготовления конструкций в 2 – 3 раза, трудоемкости изготовления сотовых конструкций на 40-50 % (за счет сокращения технологических операций по сравнению с обычными клееными панелями), количества оснастки в 1,5-2 раза, веса конструкции (особенно с сотовым наполнителем) на 30-50 %, количества выбросов вредных веществ в атмосферу в 10-15 раз за счет использования безрастворной технологии изготовления клеевых препрегов. Применение клеевых препрегов осуществлено для изготовления деталей и агрегатов из ПКМ в конструкции изделий авиакосмического комплекса изделий авиакосмического комплекса: ОАО «ОКБ Сухого», ОАО «ГСС» (самолет «Сухой-Суперджет-100»), ФГУП «РСК МиГ», ФГУП «ЭМЗ им. В.М. Мясищева», ОАО «АК им. С.В. Ильюшина», АНТК им. А.Н. Туполева, ОАО «Камов», ОАО «РКК «Энергия им. С.П. Королева» и других.

Представлен материал для многослойной конструкции с обшивками из стеклопластика и средним слоем из синтактного материала ВПЗ-17 – полимерного заполнителя – сферопластика, представляющий собой рулонный материал на основе высокодеформативного цианатэфирного связующего, включающего полые стеклянные микросферы и комбинацию порошкообразных наполнителей для применения в составе многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов. Позволяет обеспечить: формование конструкции за одну технологическую операцию; снижение толщины конструкций, что увеличивает внутренний полезный объем; высокую эксплуатационную живучесть; высокие удельные характеристики; сохранение высоких механических и радиотехнических характеристик в различных условиях эксплуатации.

Показаны конструкционные органопластики для тонкослойных обшивок сотовых панелей авиационного назначения и материалы устойчивые к ударному и баллистическому воздействию, для обеспечения безопасности авиационной техники в нештатных ситуациях, связанных с поражением фрагментами разрушенных механизмов и осколками взрывных устройств. Использование в конструкционных органопластиках пленочных клеев при изготовлении

авиационных конструкций позволяет увеличить их эксплуатационную надежность, а также реализовать высокие баллистические свойства арамидной ткани в составе композита.

Разработаны органопластики ВКО-19, ВКО-19Л на основе арамидных тканей из волокна Русар и клеевого пленочного связующего ВК-36РТ. Также разработана экологически безопасная технология безрастворного совмещения армирующей ткани Русар со связующим ВК-36РТ и технология формования органопластиков прессовым и автоклавным способами. Разработанные технологии позволили получить органопластики с минимальной пористостью и равномерным распределением связующего в объеме композита. Органопластики ВКО-19 и ВКО-19Л обеспечивают герметичность обшивок при толщине до  $0,44 \pm 0,04$  мм и обладают устойчивостью к воздействию эксплуатационных факторов (сохранение прочности при растяжении и статическом изгибе не менее 80% после тепловлажностного и климатического старения). Применяется для обшивок сотовых панелей, в конструкциях вертолетов Ка-50, Ка-62, Ми-28Н, Ми-34С и др. (обшивки панелей фюзеляжа, руля, стабилизатора, хвостовых секций лопасти несущего винта и т.д.).

Также разработан конструкционный органопластик ВКО-20 на основе ткани Русар и клеевого пленочного связующего ВК-3. Органопластик ВКО-20 имеет высокую стойкость к проникновению пуль легкого ручного оружия, уровень его конструкционной прочности и жесткости достаточен для изготовления слабо- и средненагруженных конструкций.

## **АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ НЕКОТОРЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ИНЖЕНЕРИИ КОМПОЗИТОВ УЧЕНЫМИ ХАРЬКОВСКОГО АВИАЦИОННОГО ИНСТИТУТА**

**Я.С.Карпов** (Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”, г. Харьков, Украина)

Инженерия композитных материалов (КМ) прошла путь от эйфории по поводу реальных возможностей решения проблем металлов через некоторое разочарование в связи с проявлением множества специфических чисто композитных проблем до понимания необходимости и развертывания систематических исследований в области композитов, в том числе компонентов и их взаимодействия в материале; статических, динамических, климатических и других свойств; механики, расчета на прочность, проектирования и изготовления конструкций из композитов и т.д. Большинство проблем инженерии КМ связано с их специфическими свойствами.

Изучением и решением множества проблем, связанных с этими и другими особенностями композитов, занимаются множество фирм, исследовательских центров и университетов во всем мире в целях обеспечения надежного и безопасного функционирования изделий при существенном снижении энергоемкости и затрат на обслуживание всего жизненного цикла. Среди учебных заведений заметное место занимает Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского

«Харьковский авиационный институт», в котором более 50 лет проводятся комплексные исследования различных аспектов создания авиакосмических и других конструкций из полимерных слоистых композитов. Впервые в СССР были изготовлены закрылки и фюзеляж самолета АН-2 из стеклопластиков под руководством профессора, д.т.н. В.Е. Гайдачука, одного из основоположников системного исследования и применения КМ в Украине. В целях информирования научной и инженерной общественности, обеспечения кооперирования различных организаций и исключения дублирования работ представляется актуальным и необходимым анализ решения некоторых фундаментальных проблем инженерии композитов в Харьковском авиационном институте.

Приводится анализ результатов решения ряда научно-технических задач комплексной проблемы инженерии полимерных композитных материалов в Харьковском авиационном институте. В первой части описано решение фундаментальной задачи оптимизации структуры композита – определение количества слоев, их толщины и угла армирования. При ограничениях на прочность, устойчивость и прогиб доказано, что оптимальную структуру необходимо искать в классе  $[\pm\varphi_1, \pm\varphi_2]$  (частные случаи -  $[\pm\varphi]$ ,  $[0, \pm\varphi]$ ,  $[90, \pm\varphi]$ ,  $[0, 90]$  при одном расчетном случае и  $[\pm\varphi_1, \pm\varphi_2]$  или  $[0, 90, \pm\varphi]$  - при произвольном спектре внешних нагрузок). Приводятся методика и результаты проектирования многолонжеронного крыла и показано, что исследуемые зависимости распределения площадей полок лонжеронов (пропорционально координате в произвольной степени и синусоидальное по хорде) и изгибающего момента приводят к конструкциям разной массы. Изложена методика выбора предельных деформаций в сечении крыла, при которых проектирование можно проводить по одному (базовому) расчетному случаю. Подробно описана и проанализирована методика определения рациональных параметров лонжеронов и балок минимальной массы при ограничениях на прочность, устойчивость и прогиб с учетом конструктивно-технологических ограничений и кромочных эффектов (появление дополнительных температурных и пуассоновых напряжений в элементах лонжерона). Отличительной особенностью рассматриваемых методик является возможность их применения для реального многовариантного спектра внешних нагрузок, а также учет основных конструктивно-технологических ограничений.

Описана методика определения рациональных параметров стрингерных панелей из композитных материалов, включающая в себя оптимизацию структуры КМ обшивки, параметров сечения, количества и расположения стрингеров, которые обеспечивают минимум массы панели при удовлетворении всего комплекса ограничений на несущую способность для эксплуатационного спектра внешних воздействий. При проектировании учитываются температурные и пуассоновы дополнительные напряжения. Приведена методика управления распределением усилий между обшивкой и стрингерами, основанная на введении двух новых параметров – проектного уровня напряжений в стрингерах и коэффициента запаса прочности обшивки. Предложено реализовать определение параметров подкрепляющих элементов по результатам нахождения потребной изгибной жесткости панели из условия общей устойчивости. Анализируются результаты

проектирования стрингеров с однородным и неоднородным поперечным сечением. Показана принципиальная возможность определения напряжений «отщелкивания» стрингеров при сжатии панели. Описана методика прогнозирования изгибно-крутильных деформаций профилей с неоднородным поперечным сечением при изменении температуры, построенная на основе внецентренного сжатия стержней В.З. Власова. Получены формулы для определения распределения самоуравновешенных температурных усилий между элементами профиля и уравнения для прогнозирования прогибов и узлов закручивания.

Приведены предложения по организации проектировочного и поверочного расчетов на прочность на основе единой экспериментальной базы взамен существующей методологии однонаправленного композита и поверочного расчета на прочность по свойствам пакета слоев. Показаны возможность и пределы применимости различных форм записи критериев прочности – для пакета в целом и послойно.

Харьковский авиационный институт является пионером в разработке принципиально новых конструктивно-технологических решений соединений на основе трансверсальных и продольных крепежных микроэлементов с характерными размерами 0,3...2,0 мм, заформовываемых в композит при изготовлении детали. На их базе предложены эффективные конструкции металлокомпозитных гетерогенных структур, позволяющие сохранить традиционные методы сборки агрегатов самолетов и ракет. Дан анализ разработанной унифицированной методики расчета соединений на базе физической дискретизации с учетом расположения крепежных элементов и слоистого характера композита. Описаны конструкции и техпроцессы реализации методом продольной намотки полупелевого модифицированного узла и соединительного профиля.

Описана система экспериментального обеспечения проектирования и расчета на прочность, которая включает в себя определение прочности композита на смятие и срез, коэффициентов податливости заформованных крепежных элементов и снижения прочности композита. Отличительными особенностями предложенных способов соединения является сохранение цельности волокон КМ, исключение операции сверления отверстий и установки крепежа и возможность интегрирования соединительной законцовки в конструкцию агрегата при его формовании.

Дан краткий обзор исследований по разработке энергосберегающих технологий для изготовления и ремонта композитных конструкций, а также некоторых проблем прогнозирования технологических напряжений в результате формования изделия и после его установки на жесткий каркас.

На основе проведенного анализа наиболее существенных результатов исследований, выполненных и продолжающихся в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» в области проектирования, производства и испытания конструкций из полимерных композитов сформулированы некоторые важные и остро необходимые направления будущих исследований.

## СЛОИСТЫЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ПРЕИМУЩЕСТВА, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

*В.В.Шестов, В.В.Антипов, О.Г.Сенаторова, В.В.Сидельников, А.Л.Яковлев*  
(ФГУП «ВИАМ», г. Москва. Россия)

Появление металлополимерных слоистых материалов на основе алюминия явилось логическим шагом в развитии идеи, технологии и опыта широкого применения клееных слоистых материалов и конструкций, обладающих повышенной живучестью и надежностью. Они являются новым семейством конструкционных гибридных листовых материалов, предназначенных, прежде всего, для использования в силовых элементах летательных аппаратов. Они включают тонкие металлические листы и промежуточные тонкие слои полимерных композитов, состоящих из терморезистивных или термопластичных связующих с высокопрочными армирующими волокнами (стеклянными, органическими).

Уникальный комплекс характеристик слоистых металлополимерных композиционных материалов на основе алюминия (высокая трещиностойкость и удельная статическая прочность, хорошие усталостные, коррозионные и ударные свойства, повышенная пожаростойкость) по сравнению с монолитными алюминиевыми листами делает этот материал перспективным для будущих поколений авиационных конструкций. Легкий ( $d = 2,59 \text{ г/см}^3$ ) и высокомодульный ( $E = 80 \text{ ГПа}$ ) Al-Li сплав 1441 обладает высокой технологичностью при холодной прокатке. Использование тонких плакированных и неплакированных 1441Т11 листов (до 0,4 мм) в составе слоистого металлополимерного материала вместо листов из традиционных алюминиевых сплавов серий 2xxx и 7xxx позволяет уменьшить плотность и повысить модуль упругости материала. Как результат, повышается весовая эффективность и жесткость конструкций. Специалистами ВИАМ разработана технология изготовления и формовки СИАЛов, реализованная в условиях ОАО «ВАСО», на базе СИАЛа изготовлен элемент обшивки со стрингерным набором из сплава 1163, который испытан в ЦАГИ. Сравнение результатов испытаний «классической» алюминиевой панели с панелью из СИАЛа показало повышенную живучесть композиционного материала при снижении веса на 5 %.

В настоящее время ведётся разработка нового класса металлополимерных слоистых материалов – титанполимерных материалов на базе тонколистовых титановых сплавов и углепластиков на основе препрегов, в т.ч. клеевых. За рубежом ведётся активная разработка такого рода материалов и имеются определённые успехи в этой области. Вышеуказанные материалы обладают высоким модулем упругости, при этом за счет слоистой структуры обладают повышенными характеристиками сопротивления развитию усталостной трещины в сравнении с титановыми листами. Титанполимерные слоистые материалы весьма перспективны: их возможно применять в силовых элементах планера в конструкциях перспективных самолётов.

# ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

*В.Е.Гайдачук<sup>1</sup>, А.В.Кондратьев<sup>1</sup>, В.В.Кириченко<sup>1</sup>, В.А.Коваленко<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, г. Харьков; <sup>2</sup>ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля”, г. Днепропетровск, Украина)

Одним из определяющих направлений процесса совершенствования объектов ракетно-космической техники (РКТ) является перманентный рост объемов применения в них полимерных композиционных материалов (ПКМ). Объективными предпосылками для более широкого применения ПКМ в агрегатах РКТ является не только уже реализованные и доказанные их преимущества, но и решение ряда проблем, связанных с повышением эффективности применяемых конструктивно-технологических решений. Известно, что одним из основных критериев эффективности для объектов РКТ является минимальная масса агрегата, позволяющая увеличить полезный груз, стоимость 1 кг которого может составлять от 10 до 100 тыс. долл. США. Поэтому проблема создания высокоэффективных агрегатов конструкций РКТ из ПКМ, открывающих новые широкие возможности снижения стоимости изделий этого класса при обеспечении их высокой несущей способности, в настоящее время является весьма актуальной во всем мире.

Проведенный нами целенаправленный анализ современного состояния данной проблемы позволил обрисовать контуры современной концепции оптимизации основных параметров конструкций РКТ из ПКМ, которая включает в себя ряд составляющих, содержащих взаимосвязанные группы факторов разного уровня, для каждой из которых имеют место критерии, определяющие оптимальное значение факторов данной группы (рис).

Известно, что не малозначимыми составляющими комплексной программы научного обеспечения создания высокоэффективных агрегатов РКТ из ПКМ являются разработка методов и способов оценивания качества реализации технологических процессов производства агрегатов из этих материалов путем выявления возникающих дефектов и анализа их влияния на эксплуатационные характеристики изделий. Для этого был разработан многоуровневый классификатор дефектов конструкций РКТ из ПКМ, включающий в себя 8 видов и 24 класса дефектов, возникающих на различных стадиях их производства, для которых синтезирован полный комплекс методов обеспечения соответствия допускам на отклонения типовых дефектов.

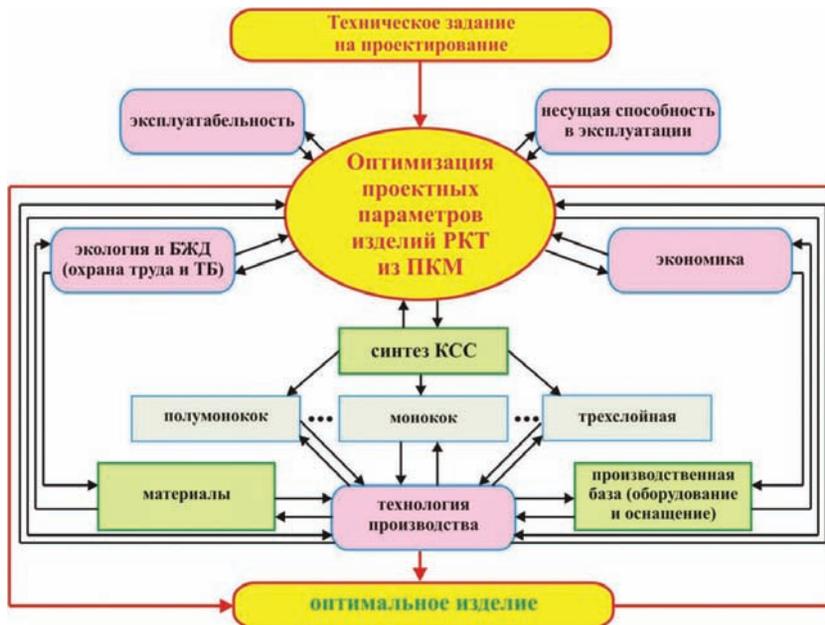


Рис. Концепция оптимизации основных параметров конструкций РКТ из ПКМ

Весь комплекс исследований и их основных результатов представлен в виде анализа типовых отечественных объектов РКТ, реализованных на ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», а также других предприятиях ракетно-космической отрасли Украины:

- несущие отсеки ракет-носителей (РН) – головные обтекатели (ГО), адаптеры, межступенные отсеки;
- прецизионные конструкции космических аппаратов (КА) – панели солнечных батарей (СБ), размеростабильные платформы, корпуса спутников.

Доклад посвящен изложению некоторых основных результатов, полученных к настоящему моменту времени в рамках реализации предложенной концепции.

В рамках предложенной концепции продолжает реализовываться комплексный подход к оптимизации по массе проектных параметров несущих отсеков РН при многофакторном (статическом, тепловом, динамическом) силовом нагружении. Так, минимизация массы головного блока РН «Циклон-4» обеспечила реализацию потенциальных возможностей ее снижения в конструктивных элементах при регламентированной несущей способности (прочности и устойчивости) с учетом практически всего спектра внешних воздействий. В докладе анализируются результаты проведенных при участии авторов исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) и оценки несущей способности межступенного отсека РН «Циклон-4» в регулярной зоне, а также фрагмента его стыка, состоящего из шпангоута и впервые разработанного соединительного композитного фитинга для всех нормированных случаев нагружения. Отмечается, что проведенные натурные статические испытания подтвердили рациональность принятых КТР.

Первым направлением сотрудничества с ГП «КБ «Южное»» по реализации предложенной концепции для ряда групп факторов, характеризующих несущую

способность прецизионных композитных изделий космического назначения, стал анализ НДС корпуса сканера высокой разрешающей способности для КА из углепластика. Проведенные исследования НДС объекта выявили соответствие его конструкции требованиям технического задания для всех регламентированных силовых и температурных воздействий среды эксплуатации агрегата.

Вторым направлением сотрудничества с ГП «КБ «Южное»», а также Украинским научно-исследовательским институтом технологии машиностроения (г. Днепропетровск) и Научно-исследовательским технологическим институтом приборостроения (г. Харьков) стал анализ схем армирования и рационального распределения материала для панелей СБ различных конструктивно-силовых схем (КСС). Приведенные результаты выбора рациональных параметров элементов рассматриваемых КСС панелей СБ обеспечили возможность реализации уровня их поверхностной массы, соответствующего мировым тенденциям для объектов данного класса.

В заключение доклада отмечается, что в настоящее время коллективом авторов в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» ведутся дальнейшие работы по научному обеспечению повышения эффективности конструкций из ПКМ, что позволит значительно расширить сферу применения этого класса конструкций в области РКТ.

## **ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АГРЕГАТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ РЕАЛИЗАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ**

*А.М.Потапов<sup>1</sup>, В.А.Коваленко<sup>1</sup>, В.Е.Гайдачук<sup>2</sup>, А.В.Кондратьев<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина; <sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина)

Известно, что от выбора конструктивно-технологических решений (КТР) узлов и агрегатов любых объектов, в особенности из полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе и конструкций ракетно-космической техники (РКТ), существенно зависят массовая эффективность, прочность и жесткость изделий, их квалитетические характеристики, а следовательно, время изготовления и производственные затраты. В то же время порядок выбора эффективных КТР агрегатов РКТ из ПКМ зависит от множества объективных и субъективных факторов и условий, в которых реализуется тот или иной проект. Однако можно выделить в известной мере идеализированную схему этого выбора, основанную на существующем опыте ряда предприятий отрасли, а также с учетом современных возможностей научного обеспечения рассматриваемого процесса.

В докладе проведен краткий обзор и анализ становления, развития и состояния технологии производства деталей, узлов и агрегатов изделий из ПКМ, позволившие установить основные факторы, определяющие и стимулирующие

создание теоретических основ технологии изготовления рассматриваемого класса конструкций в плане обеспечения их соответствия современным требованиям и критериям, предъявляемым к изделиям РКТ.

На основе классификаций предшествующих исследователей и зарубежного опыта разработки и использования типовых процессов производства изделий РКТ из ПКМ уточнена и расширена их номенклатура с учетом современных достижений в области технологии создания ответственных конструкций из ПКМ. Предложенная модифицированная классификация типовых технологических процессов производства изделий РКТ из ПКМ позволила научно обосновать порядок выбора эффективных КТР агрегатов исследуемого класса конструкций для реализации их в процессе проектирования и производства в условиях предприятий отечественной отрасли. Чтобы четко установить роль и место общих принципов проектирования технологических процессов, среди которых имеются принципы и правила, общие для машиностроения (в том числе РКТ), не зависящие от применяемых материалов, и общие принципы и правила, связанные со специфическими особенностями как природы ПКМ, так и способов их реализации в изделиях, синтезирована виртуальная (условная) блок-схема создания новых агрегатов РКТ (или существенной модификации ранее разработанных) в системе корпорации «проектирование – производство» (КБ – завод) (рис.). Данная блок-схема названа виртуальной (условной) в том смысле, что она не отражает в деталях реальную схему решения задач создания агрегатов РКТ (дисциплинирующих условий) конкретной структурой взаимодействия подразделений КБ и завода, на котором реализуется проект, в частности – ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» и ГП «Южный машиностроительный завод».

В докладе синтезированы основные общие принципы и правила проектирования технологических процессов и операций производства композитных изделий. Предлагаемые принципы и правила лишены недостатков, присущих условиям, выдвигаемых ранее другими исследователями в качестве принципов проектирования технологических процессов производства изделий РКТ из ПКМ, но включают в себя те из этих условий, которые не противоречат методологическим и иерархическим аспектам.

Разработанные принципы и правила сохраняют преемственность с общими для технологии авиастроения и машиностроения принципами, сформулированными ведущими отечественными учеными в области технологии, что позволяет рекомендовать эти принципы и правила ОКБ и предприятиям, занимающимся вопросами технологической подготовки производства изделий РКТ из ПКМ.

Весь комплекс исследований и их основных результатов представлен в виде описания и анализа наиболее типовых объектов конструкций РКТ из ПКМ разработки ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»:

- стержневых ферменных агрегатов;
- каркасов солнечных батарей;
- отсеков головного блока;
- межступенного отсека РН «Циклон-4».

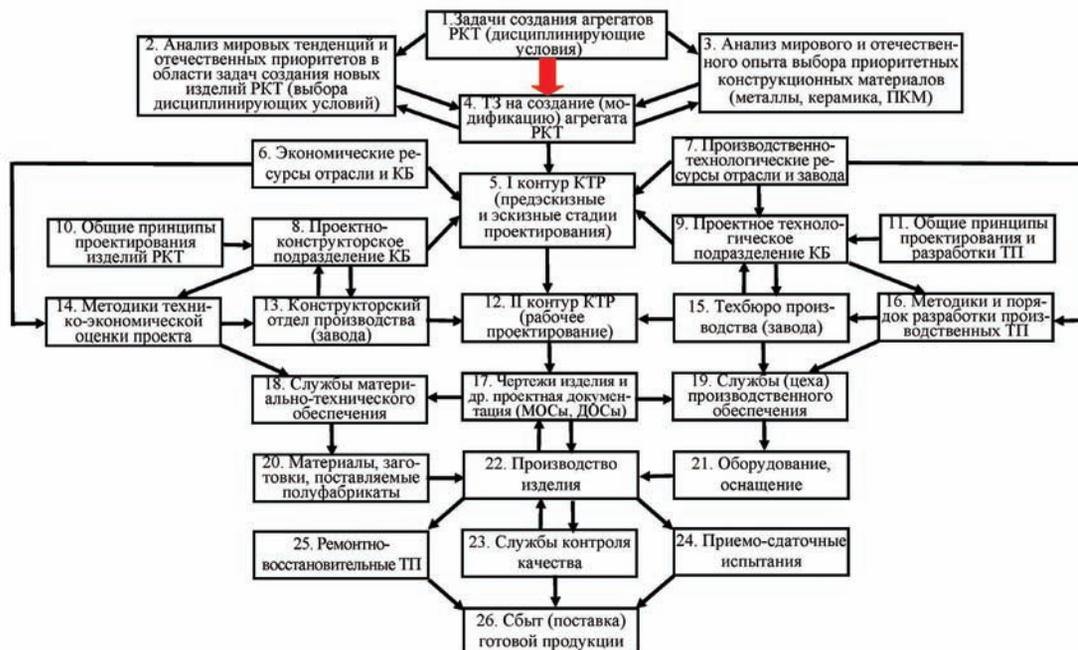


Рис. Виртуальная (условная) блок-схема создания новых агрегатов РКТ в системе корпорации «проектирование – производство» (КБ – завод)

Отмечается, что разработка новых КТР и технологии производства ряда агрегатов РКТ из ПКМ на ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» велась при активном участии университетов и отраслевых организаций Украины: Восточно-украинского технического университета им. В. Даля (г. Луганск), Днепропетровского национального университета им. О. Гончара, Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», ОАО «УкрНИИТМ» и др.

В заключение доклада отмечается, что в ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» накоплен большой практический опыт использования ПКМ, найден ряд оригинальных КТР, применены уникальные технологические процессы, позволившие создать конструкции, эффективность которых по функциональным характеристикам соответствует лучшим мировым аналогам.

## ПРАКТИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ ПРЕЦИЗИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Л.А.Климакова* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Практика инженерного проектирования геометрически прецизионных композитных конструкций в основе своей ограничивается определением структурно-технологических параметров материала, посредством которых достигается соответствие деформационных характеристик пластика заданным значениям. При этом, как правило, напрямую копируются схемные и конструктивно-технологические

решения традиционных силовых изделий, что не позволяет реализовать в полной мере прецизионную эффективность (размеростабильность) изделия.

Вместе с тем, размеростабильные представляют собой особый вид конструкций, несущая способность которых определяется характеристиками жесткости, а условием оптимальности является равенство нулю термических (для космических изделий) деформаций при эксплуатационных воздействиях. Объективная специфика задач прецизионности диктует необходимость проектирования таких конструкций с учетом особенностей обеспечения требуемых термоупругих свойств на каждой стадии жизненного цикла (проектирование, изготовление, эксплуатация).

В рамках комплексного подхода предложена структура проектного обеспечения размеростабильности композитной конструкции, разработанная на основе анализа и систематизации накопленного опыта и включающая следующие основные этапы:

- |  |  |
|--|--|
| Выбор схемных решений:                 | <ul style="list-style-type: none"><li>– по условию обеспечения конструктивной жесткости с учетом массовых ограничений;</li><li>– на основе термодформационного моделирования в части установления термоупругих свойств основных конструктивных элементов, анализа и минимизации факторов отрицательного термодформационного взаимовлияния.</li></ul> |
| Выбор материала:                       | <ul style="list-style-type: none"><li>– по критерию обеспечения проектных термоупругих свойств основных конструктивных элементов;</li><li>– на основе комплексной оценки свойств, установленных экспериментально.</li></ul>  |
| Поиск оптимальной структуры            | <ul style="list-style-type: none"><li>– по критерию обеспечения проектного значения термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с учетом ограничений на физико-механические свойства (упругие, прочностные и т.д.).</li></ul>  |
| Учет конструктивных особенностей       | <ul style="list-style-type: none"><li>– на основе принципа взаимной компенсации перемещений термически разнородных конструктивных элементов.</li></ul>   |
| Учет технологии изготовления           | <ul style="list-style-type: none"><li>– в части проектирования на основе экспериментальных данных, полученных для условий конкретного производства и конкретных конструктивных решений.</li></ul>  |
| Учет влияния эксплуатационных факторов | <ul style="list-style-type: none"><li>– введением «поправки» в проектное значение ТКЛР.</li></ul>  |

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИИ УГЛЕПЛАСТИКОВОГО КАРКАСА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ФЛАНЦАМИ

*В.Н.Зельнев, Л.А.Климакова, А.О.Половый*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Актуальность проблемы организации соединений в металл-композитных конструкциях, сложность которой обусловлена существенным отличием физико-механических свойств, структуры и напряженно-деформированного состояния (НДС) сопрягаемых разнородных элементов, требует особых подходов к проектированию таких изделий и корректных методов моделирования их поведения при эксплуатации.

Разработана, протестирована и внедрена в опытное производство методика моделирования болтового соединения комбинированной металлоуглепластиковой конструкции, реализованная на базе конечно-элементного (КЭ) метода в программной среде Nastran для подтверждения работоспособности несущей космической платформы при эксплуатационных нагрузках. Платформа представляет собой конструкцию коробчатого типа, состоящую из углепластикового каркаса и соединенными с ним посредством болтов торцевых металлических фланцев (рис. 1).

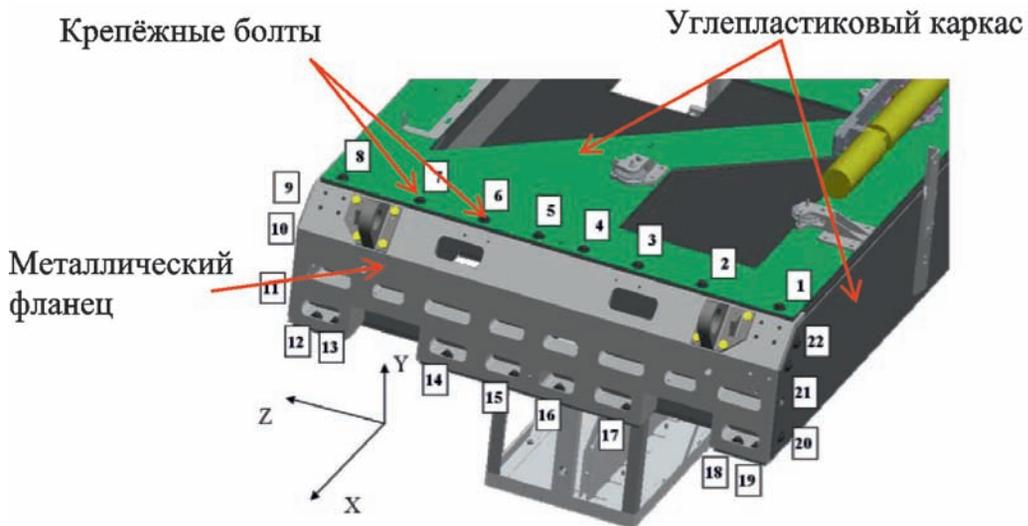


Рис.1. Несущая платформа

Ключевыми особенностями методики (рис. 2), реализованной применительно к металлоуглепластиковой платформе, являются:

- расчет болтового соединения на базе КЭ-модели фланца посредством приложения нагрузки в виде перемещений (согласно методу деформаций), полученной при моделировании НДС всей платформы для критического случая ее силового нагружения (с учетом статической и динамической составляющих);

- наложение контактных граничных условий на сопрягаемые поверхности соединения и моделирование преднатяга болта (что в значительной степени

является элементом новизны в сравнении с известными методиками решения подобных задач);

– проведение расчета на основе фактических свойств конструкции в условиях штатной эксплуатации, полученных экспериментально на натуральных фрагментах конструкции при имитации влияния эксплуатационных факторов;

– подтверждение достоверности и корректности расчетной методики на основе качественной корреляции теоретических данных с экспериментальными результатами, полученными применительно к характеру разрушения натуральных фрагментов соединения.

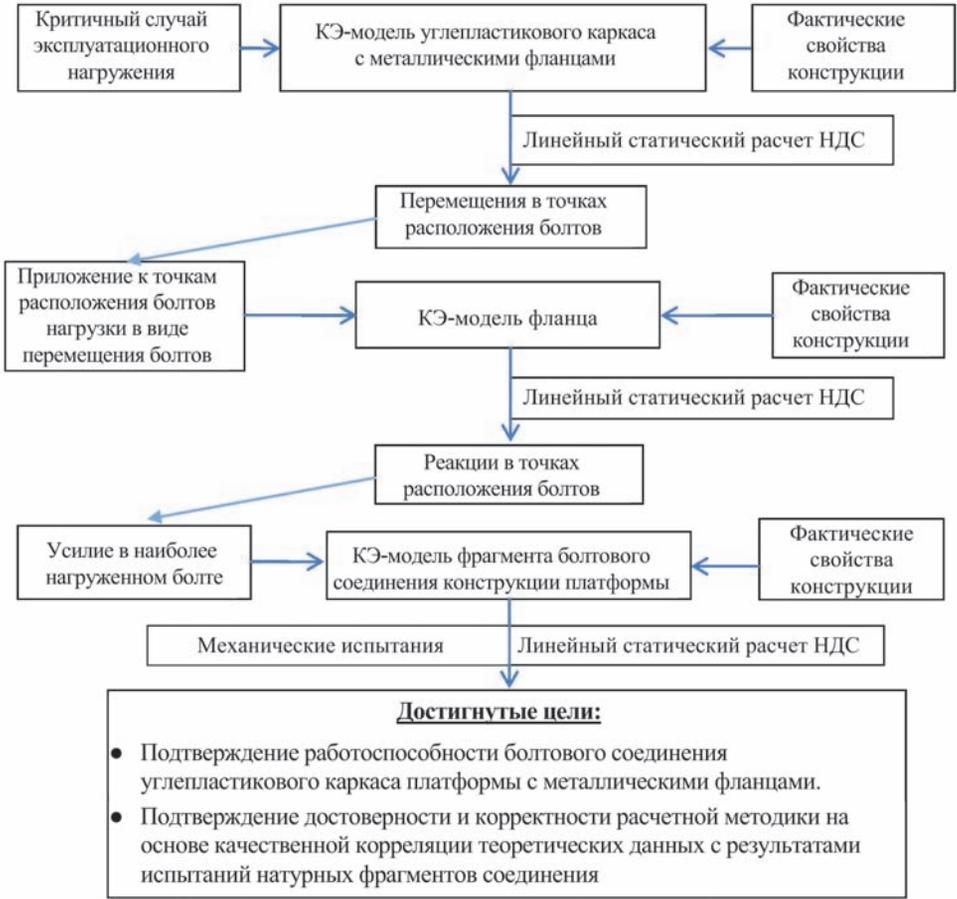


Рис.2. Алгоритм реализованной методики расчета

## **ПРЕЦИЗИОННЫЙ АНТЕННЫЙ РЕФЛЕКТОР ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА. КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ИСПЫТАНИЯ**

*И.В. Чуднов* (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)

Неотъемлемым компонентом современных транспортных систем, без которого невозможно их динамичное развитие, является обеспечение транспортных средств телерадиокоммуникационными системами – средствами связи, коммуникации, глобального позиционирования.

В связи с потребностью использования телекоммуникационных спутниковых систем и спутников-ретрансляторов возрос интерес к антенным рефлекторам, работающим в условиях открытого космоса.

Основными требованиями, предъявляемыми к таким конструкциям, помимо радиотехнических, являются:

- высокая точность изготовления, измеряемая отклонениями от теоретической формы зеркала долями миллиметра;
- высокая точность формы и размеров зеркала в космическом пространстве, обеспечиваемая термостабильностью конструкции и долговременной стабильностью термомеханических и теплофизических свойств материала;
- малая масса при одновременно высокой жесткости и прочности конструкции.

Сочетание вышеперечисленных характеристик в наибольшей степени обеспечивает применение неразвертываемого жесткого зеркала рефлектора, а в качестве конструкционного материала – полимерного композиционного материала на основе углеволокна и эпоксидного термостойкого связующего.

Целью данной работы являлась разработка новой конструкции экспериментального антенного рефлектора из углепластика и новой технологии его изготовления, обеспечивающей все возрастающие требования по применяемым радиочастотам, а следовательно, по точности изготовления.

Был спроектирован экспериментальный образец рефлектора с диаметром апертуры 1000 мм, проведены необходимые расчеты на прочность, термостабильность, собственные частоты в условиях воздействия космического пространства.

Были изготовлены и испытаны элементарные образцы материала для подтверждения расчетных характеристик материала.

Было изготовлено три полноразмерных экспериментальных образца антенного рефлектора и проведены испытания в термовакуумной камере с имитацией условий орбитального полета – охлаждение в вакууме до минус 160°С с последующим нагревом до плюс 140°С на поверхности рефлектора.

При воздействии различных температур были проведены измерения геометрических отклонений рефлектора с помощью измерительной лазерной системы и подтверждены расчетные данные.

В результате выполнения работы было показано, что предложенные новые конструктивно-технологические решения и метод испытаний перспективны для создания неразвертываемых размеростабильных антенных рефлекторов, сформулировано Техническое задание на проведение ОКР.

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ И КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

*П.В.Андреев, А.Г.Еремин, М.Ю.Федоров*  
(ОАО “Красная Звезда”, г. Москва, Россия)

В докладе обосновывается необходимость перехода от металлических материалов к композиционным и керамическим для изготовления элементов конструкции космических ядерных энергоустановок повышенной мощности. Цель такого перехода – максимальное снижение массы конструкции, способное обеспечить выполнение требований по массогабаритным характеристикам ЯЭУ, а также возможность обеспечить реализацию повышения верхней температуры цикла преобразования тепловой энергии в электрическую. Последнее обстоятельство стало особенно актуальным при создании установок мегаваттной мощности.

На примере установок второго поколения рассмотрены конструктивные элементы, которые могут быть выполнены из композиционных материалов, таких, как С-С, углепластики и др. В зависимости от температуры функционирования конструкции и действующих на нее нагрузок предложены те или иные материалы и показаны преимущества их внедрения.

В работе на основании информации, полученной от ведущих в этой области предприятий, приводится ряд возможных технических и технологических решений исполнения отдельных элементов конструкции. Также поставлены вопросы, требующие дополнительных исследований, позволивших бы наиболее оптимально применить композиционные и керамические материалы в конструкции космической ядерной энергетической установки.

## **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЛЬТРАЛЁГКИХ КАРКАСОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

*Я.А.Хмельницкий, О.В.Ширина* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия);  
*К.А.Гончаров* (ФГУП “НПО им.С.А.Лавочкина”, г. Химки, Россия)

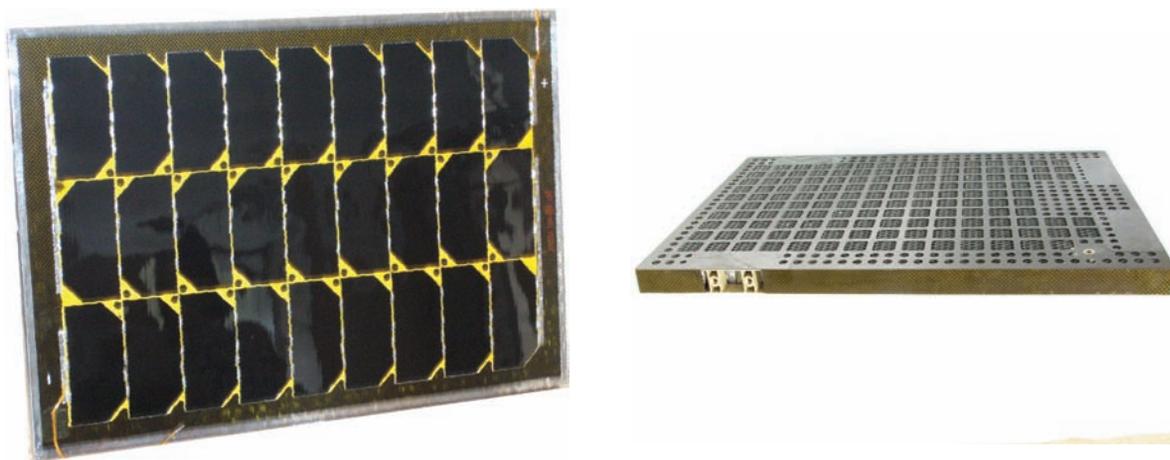
Во всех технически развитых странах реализуются космические программы создания новых систем спутниковой связи, систем зондирования, расширяются контакты и создаются совместные программы с промышленными программами США, Франции, Германии и других стран.

В создании и обеспечении работоспособности космических объектов видную роль играют источники электрической энергии – солнечные батареи, фотоэлектрические преобразователи которых приклеиваются к каркасам панелей, выполненных в виде суперлегких жестких трехслойных панелей из углепластика с сотозаполнителем.

Каркас предназначен для размещения на нём фотопреобразователей (ФП), восприятия и передачи нагрузок, действующих на панель, ориентации плоскости ФП в заданном положении и служит для защиты фотопреобразователей от радиации с тыльной стороны.

Важной задачей при создании каркасов солнечных батарей является уменьшение его удельного веса, что позволяет повысить энергомассовые характеристики космического аппарата.

Каркас панели БС представляет собой сотопанель прямоугольной формы с обшивками из ультралёгкого углепластика и алюминиевым сотовым наполнителем.



В результате решения ряда конструкторских и технологических задач были решены следующие позиции:

- разработана конструкция (совместно с НПО им.С.А.Лавочкина) и технология изготовления каркаса солнечной батареи из углепластика;
- изготовлены каркасы солнечной батареи из углепластика для проведения наземных и летных испытаний;
- проведен полный цикл наземных испытаний;
- разработан новый бесстапельный способ прецизионной сборки каркасов с требуемой точностью установки закладных элементов;
- разработан способ механической обработки углепластиковых элементов каркаса.

Результаты испытаний каркаса БС (климатические, термоциклические, прочностные) полностью удовлетворяют техническим требованиям. В настоящее время изделие проходит летные испытания в составе малого космического аппарата «АИСТ».

Полученные конструктивно-технологические решения позволили получить конструкцию с низкой удельной массой и высокой стойкостью к эксплуатационным факторам.

Достигнутые весовые показатели каркасов БС превышают по своим характеристикам мировые уровни разработок.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕРМОРАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*В.И.Сливинский<sup>1</sup>, А.Ф.Санин<sup>2</sup>, М.Е.Харченко<sup>2</sup>, А.В.Кондратьев<sup>3</sup>*

(<sup>1</sup> ПАО “Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, г. Днепропетровск, Украина; <sup>2</sup> Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, г. Днепропетровск, Украина; <sup>3</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”)

Специфической особенностью конструкций, эксплуатирующихся в условиях открытого космического пространства и предназначенных для прецизионного координирования взаимосвязи космических аппаратов (КА) с наземными объектами, является необходимость выполнения весьма жестких требований и обеспечения ими терморазмеростабильности. Появление полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных волокон и постоянное совершенствование их физико-механических характеристик (ФМХ) способствовали росту теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку методов проектирования изделий данного класса и создания опытных конструкций для эксплуатации в условиях открытого космоса.

Известно, что высокой стабильной жесткостью обладают трехслойные конструкции с заполнителями различных типов, среди которых наиболее широкое распространение в ракетно-космической технике нашли сотовые. Использование в качестве материала сотового заполнителя (СЗ) углепластика позволяет при надлежащем углубленном анализе схем его армирования решить обсуждаемую проблему терморазмеростабильности агрегатов для космической техники и рекомендовать конкретные объекты, в которых реализуются полученные результаты. Однако, как известно, для анализа термостабильности и несущей способности сотовых конструкций (СК) космического назначения из ПКМ на начальных стадиях их проектирования разработчик располагает далеко не полным комплексом ФМХ и прочностных свойств композита и может исходить только из отрывочных литературных данных, на основе которых им формируются исходные свойства ПКМ для СЗ.

В докладе для оценки эффективности конструктивно-технологических решений СК космического назначения разработан концептуальный подход к формированию ФМХ и прочностных свойств заполнителей. Разработана реализующая этот подход принципиальная схема многоуровневого синтеза СЗ из ПКМ оптимальной структуры армирования, обеспечивающая наиболее эффективные решения поставленной задачи при различных уровнях информации о свойствах используемого в проекте изделия ПКМ на основе их приближенных и точных взаимозависимостей. В результате проведенных исследований установлены приближенные зависимости между пределами прочности ПКМ при сжатии, растяжении и изгибе, позволяющие с приемлемой для начальных стадий проектирования композитных конструкций точностью определить предел

прочности материала на сжатие при известных пределах прочности на изгиб и растяжение.

В докладе дана оценка точности приближенных зависимостей ФМХ углесотопласта, описываемых формулами теории армирования, основанных на свойствах компонент ПКМ – волокон и связующего, в сравнении с зависимостями общей механики ПКМ и установлена применимость этих зависимостей на начальных стадиях проектирования СК космического назначения. Проведена оценка ФМХ углесотопласта различных схем армирования при помощи конечно-элементных моделей с последующим синтезом рациональной схемы его армирования.

В заключение доклада обсуждаются технологические аспекты совершенствования свойств углесотопласта.

## **СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОСОТОПЛАСТОВ**

*В.С.Волков, И.В.Кулагина, М.В.Гриценко, И.О. Бабкина, А.М.Шульц, Е.В.Денисова*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

ОАО «ОНПП «Технология» разработало широкую номенклатуру стеклопластиковых сотовых заполнителей или стеклосотопластов (ССП) и, начиная с 1998 года, производит их в опытно-промышленном масштабе. Эти соты изготавливают по клеевой технологии пропиткой связующим блока сотовой структуры из стеклоткани с последующим отверждением пропитанных сотоблоков. Разработанные стеклосотопласты внедрены в силовые, средненагруженные и интерьерные конструкции самолетов, такие, как носовые обтекатели, панели фюзеляжа, крыла и оперения, агрегаты механизации крыла, полы и интерьер. В то же время развитие авиационной техники требует повышения прочностных характеристик ССП для расширения областей их применения.

Для использования в авиации, где требуется минимизация весовых характеристик конструкций, предпочтение отдается сотовым заполнителям, обладающим высокими прочностными характеристиками при минимальном значении плотности.

Прочностные характеристики ССП зависят как от свойств применяемых стеклотканей и связующих, так и от технологических параметров процесса их изготовления. Соответственно этому для получения более прочных ССП можно применять более толстые стеклоткани, обладающие повышенной поверхностной плотностью. С другой стороны, известно, что с увеличением наноса связующего возрастает прочность ССП. Иными словами, применение более тонкой стеклоткани при увеличенном наносе связующего позволяет получить соты с повышенными прочностными характеристиками при заданных значениях плотности.

Этот подход использовался при проведении исследований по созданию ССП с повышенной прочностью на основе стеклоткани марки Э4-80, отличающейся более низкой, чем у стеклоткани Э3/1-100, поверхностной плотностью –  $(95 \pm 15)$  г/м<sup>2</sup>. Были определены режимы изготовления ССП, которые позволили за счет изменения технологии получить на основе стеклоткани Э4-80

стеклосотопласты с плотностью (95 – 110) кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии от 5,4 до 7,2 МПа, что существенно выше, чем у серийного стеклосотопласта той же плотности марки ССП-1-2,5 на основе стеклоткани ЭЗ/1-100 (от 3,5 до 4,6 МПа).

Другим способом повышения прочности ССП является модификация бакелитового лака ЛБС-1, применяемого при серийном производстве. В качестве модифицирующего агента использовали продукт 119-95 (ТУ 6-02-575-75), представляющий собой смесь мономерного и частично гидролизованного полимерного фениламинометил-метилдиэтоксисилана. В результате проведенных экспериментов по применению модифицированного связующего для изготовления ССП-1-3,5 были получены опытные образцы ССП, соответствующие требованиям ТУ 1-596-395-98, имеющие прочность при сжатии на 20-30 % выше по сравнению с серийно выпускаемыми сотами.

Кроме модифицирования связующего ЛБС-1, повышение прочности ССП возможно за счет применения других связующих. Исследование различных эпоксифенольных связующих для пропитки стеклосотоблоков показало, что наиболее приемлемым по совокупности технологических и эксплуатационных характеристик является новое фенолоформальдегидное связующее марки РС-Н (ТУ 1-595-12-896-2006). Экспериментальные исследования по изготовлению ССП с размером граней ячеек 3,5 мм на основе стеклоткани ЭЗ/1-100 и связующего РС-Н обеспечили получение ССП, соответствующих требованиям ТУ 1-596-395-98, имеющих прочность при сжатии на 20-25 % выше, чем у серийно выпускаемых ССП-1-3,5.

## **РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТОЙКИХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ**

*В.С.Волков, Е.В.Денисова, Г.С.Шуль, А.Н.Корнейчук, И.В.Кулагина, А.М.Шульц*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Благодаря своим свойствам стеклопластиковые сотовые наполнители – стеклосотопласты (ССП) нашли широкое применение в конструкциях самолетов Ту-204, Ту-334, Ил-96, а также в новейших самолетах типа Сухой-Суперджет 100 и Ан-148. В то же время развитие авиационной промышленности требует улучшения эксплуатационных свойств ССП.

Для трехслойных сотовых конструкций (ТСК), работающих при высоких температурах, необходимы такие материалы, которые обладали бы максимальной устойчивостью при воздействии повышенных температур. В настоящее время среди термоустойчивых матриц наиболее широко исследованы и применяются в ТСК сетчатые имидные матрицы на основе бисмалеимидов и полиимидов редкосетчатого строения (полиимидные матрицы СП).

В ОАО «ОНПП«Технология» разработаны термостойкие ССП на основе связующих СП-97С , ТУ 2224-415-00209349, и СП-97К, ТУ 1-595-10-1087-2009, которые обладают высокой термостойкостью. В докладе приводятся результаты последних исследований по разработке технологии изготовления 4 марок

стеклосотопластов: ССП-7-3,5, ССП-7-4,2, ССП-7П-3,5 и ССП-7-8Т на основе полиимидного связующего СП-97К. Связующее СП-97К представляет собой связующее СП-97С, модифицированное специальными добавками, позволяющими снизить температуру, обеспечивающую формостабильность ССП, с 300 °С до 170 °С. Материалы, полученные на основе связующих СП-97С и СП-97К работоспособны до температур 300 – 350 °С.

В качестве наполнителя в стеклосотопластах используются стеклоткани алюмоборосиликатного состава марок Э4-80П, Э3-100 и Т-10П.

При разработке стеклосотопластов марок ССП-7-3,5 и ССП-7-4,2 с размерами граней ячеек 3,5 и 4,2 мм, соответственно, в качестве наполнителя используется ткань марки Э3-100. Следует отметить, что стеклосотопласт марки ССП-7П-3,5, изготовленный на основе стеклоткани Э4-80, обладает пониженной на 10 – 20 % плотностью по сравнению с аналогичным ССП на основе стеклоткани Э3-100, сохраняя при этом требуемый уровень упруго-прочностных характеристик. Полиимидные соты с такими размерами граней ячеек могут быть опробованы в элементах антенных блоков радиолокационных станций.

Стеклосотопласт марки ССП-7-8Т с размером грани ячейки 8 мм, изготовленный на основе стеклоткани Т-10П и связующего СП-97К, планируется использовать в панелях шумоглушения ТРДД в зонах с повышенными температурами (зона газогенератора).

Во всех разработанных полиимидных ССП проведена замена клея БФ-2 на более термостойкий ВС-10Т, ГОСТ 22345-77. Показано преимущество клея ВС-10Т перед клеем БФ-2, традиционно используемым в производстве фенолоформальдегидных стеклосотопластов типа ССП-1 и ССП-1П.

Были проведены физико-механические испытания опытных образцов термостойких ССП с различными показателями плотности. Результаты проведенных испытаний подтвердили правильность выбора в качестве полимерной матрицы для термостойких ССП связующего СП-97К и термостойкого клея ВС-10Т, обеспечивающих получение требуемых прочностных характеристик при заданных значениях плотности.

Таким образом, выбранные материалы и разработанные технологии изготовления стеклосотопластов марок ССП-7-3,5, ССП-7-4,2, ССП-7П-3,5 и ССП-7-8Т на основе полиимидного связующего СП-97К, термостойкого клея ВС-10Т и стеклотканей Э4-80, Э3-100 и Т-10П позволяют получить ССП, работоспособные при температуре 300 °С.

## ОРИЕНТАЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ

*Д.А.Булгаков, А.Я.Горенберг, А.М.Куперман*

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, г. Москва, Россия)

В литературе известны работы, направленные на ориентацию углеродных нанотрубок (УНТ) в полимерной среде под действием электрического поля. Целью этих исследований является варьирование электрических свойств композиции. В настоящей работе предлагается ориентировать УНТ в армированных пластиках в направлении, перпендикулярном ориентации волокон, с целью повышения сдвиговых свойств и трещиностойкости материалов.

Исследования проводили на кольцевых образцах стеклопластиков, изготавливаемых методом намотки. Связующим служила композиция на основе эпоксидиановой смолы ЭД-20, наполнителями – многостенные УНТ диаметром 40-60 нм и длиной 3-5 мкм, а также наноразмерные графеновые частицы (НГЧ) диаметром 1 мкм и толщиной 3-5 нм. Диапазон степеней наполнения составлял от 0,005 до 3% по массе. Дисперсию наполнителя в ацетоне обрабатывали ультразвуком при различных режимах для дезагрегации и гомогенизации композиции. Затем её вводили в смолу и повторно обрабатывали ультразвуком. Ацетон удаляли из связующего в вакуумном шкафу при температуре 80°C. Перед намоткой в связующее добавляли отвердитель – триэтаноламинотитанат (ТЭАТ). Электрофорез проводили переменным током частотой 50 Гц при отверждении связующего в течение 3-х часов.

Как видно из таблицы, прочность при сдвиге стеклопластиков на основе матриц, модифицированных неориентированными частицами УНТ и НГЧ, остаётся практически неизменной по сравнению с контрольными образцами. При обработке электрофорезом при высоких концентрациях УНТ наблюдается заметный рост прочности при сдвиге (на 20% по сравнению с контрольными образцами). Воздействие электрофорезом на образцы на основе матриц, модифицированных НГЧ, приводит к более существенному эффекту: уже при содержании НГЧ 0,5% рост прочности при сдвиге составляет 30% по сравнению с контрольными образцами. Можно предположить, что наблюдаемый эффект обусловлен ориентацией УНТ и НГЧ под действием электрофореза. Предполагается в дальнейшем расширить исследования в направлении оптимизации условий воздействия электрического поля и свойств армированных пластиков.

Таблица

Прочность при сдвиге стеклопластиков при различных концентрациях модификатора

Состав связующего	Концентрация частиц, %		
	0,05	0,5	3
ЭД-20 + ТЭАТ	55	55	55
ЭД-20+УНТ + ТЭАТ	57	57	60
ЭД-20+УНТ (ориент.) + ТЭАТ	58	59	65
ЭД-20+НГЧ + ТЭАТ	-	56	-
ЭД-20+НГЧ (ориент.) + ТЭАТ	-	70	-

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДНОЙ МАТРИЦЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ НАНОЧАСТИЦАМИ**

*Дин Кай Цзянь, Н.В.Салиенко*

(ФГБОУ ВПО “МАТИ” – РГТУ им. К.Э.Циолковского, г. Москва, Россия)

В современном машиностроении, особенно в таких областях как авиа- и ракетостроении, важную роль играют неметаллические композиционные материалы (НКМ) на основе различных форм армирующих волокнистых наполнителей или дисперсных наполнителей и полимерных матриц (ПКМ), среди которых в последнее время наблюдается тенденция роста применения термопластичных полимеров (ТПКМ). Широкое применение ТПКМ обусловлено комплексом ценных технологических и эксплуатационных свойств, а также экологической чистотой их технологий производства и утилизации, возможностью вторичной переработки.

Основной проблемой ПКМ является высокая вязкость расплавов термопластичных связующих и низкая их концентрация в органических растворителях, не позволяющие использовать традиционные технологии совмещения компонентов, широко используемых для ПКМ с термореактивными связующими.

Для получения ТПКМ используются препреги, в которых термопласт наносится на поверхность волокнистых наполнителей в виде порошка, пленки, или вплетается в состав тканого наполнителя на стадии его производства.

В литературе приводятся результаты, подтверждающие возможность регулирования структуры и физико-механических свойств ПКМ введением наночастиц различной природы в состав матриц.

В коммерческих нанотехнологиях чаще всего применяются наполнители из наноразмерных силикатов. Такие наночастицы достаточно длинные, но при этом, по крайней мере, вдоль одной из осей их размер составляет около 1 нм. Поскольку обычные глины являются природным минералом, их свойства непостоянны. Чистота глины может влиять на свойства нанокompозитного материала. Контролируемыми параметрами нанокompозитов являются тип глины, чистота глины, тип полимера и метод введения полимера в нанокompозитный материал. Самым важным параметром является относительная длина наночастиц глины. Для использования оптимальны глины, имеющие пластинчатую структуру с толщиной менее 1 нм и относительную длину от 300 до 1500 нм.

В работе в качестве наномодификатора полиамидной матрицы был использован слоистый алюмосиликат монтмориллонит (ММТ). ММТ был под действием ультразвука расслоен и диспергирован на отдельные слои толщиной 1 нм и шириной от 70-150 нм. Расслаивание вызывает существенное увеличение отношения площади поверхности к объему, что повышает эффективность наномодифицирования.

В качестве базовой модели ТПКМ была выбрана модель Розена, которая представляет собой непрерывные волокна, окруженные блоком матрицы,

содержащими наночастицы. Стекланные волокна однонаправлено расположены в матрице. Для расчета модуля упругости полиамидных матриц был использован метод Халкина-Цая. С помощью пакета прикладных программ ANSYS изучены поля напряжений в ТПКМ в зависимости от их нагружения.

Из расчета анализа моделей напряженно-деформированного состояния полиамидных матриц установлено, что их низкие значения модуля упругости не позволяют реализовать в полной мере высокие физико-механические свойства армирующих наполнителей в КМ. Для улучшения механических свойств необходимо использовать модификацию матриц наночастицами. По результатам модельных исследований установлено увеличение значений модуля упругости для термопластов, соизмеримых с модулем упругости реактопластов; равномерное перераспределение напряжений с матрицы на волокна и одновременное эффективное поглощение энергии ударного разрушения; снижение уровня остаточных напряжений в зоне контакта, порожденных усадкой матрицы в процессе охлаждения и различием в модулях упругости.

Апробация модели показала ее адекватность при экспериментальных исследованиях и сравнении со справочными значениями.

Полученная модель может быть использована для дальнейшего усовершенствования путем уточнения начальных условий и исключения допущений, а также оптимизации путем варьирования параметров.

## **ЧТО ТРЕБУЕТСЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ?**

*Благоя Самакоски и Самоил Самак (Микросам А.О., г. Прилеп, Македония)*

В докладе рассматриваются современные состояние и проблемы в сфере производства композитов в России с кратким историческим обзором. Обращая внимание на необходимость модернизации существующих производственных площадок, формулируются актуальные на сегодняшний день задачи, целью которых является увеличение эффективности производителей. Предлагаются решения по технической модернизации существующих производственных цехов и указываются качественные преимущества при применении нового оборудования и новых технологий.

Представляются современные технологии, применяемые при производстве композиционных изделий, и промышленные сектора, в которых данные технологии применяются и в которых наиболее ярко выражены их преимущества.

Более подробно рассматривается технология автоматизированной выкладки волокон и лент, а также технология производства сырьевых материалов для автоматизированной выкладки. Приводится краткий обзор состояния рынка сырьевых материалов (препрегов) с целью аргументированно доказать преимущества создания закрытого цикла производства: производство однонаправленного препрега > производство препрег-лент, применяемых непосредственно при выкладке > производство композиционного изделия с применением технологии автоматизированной выкладки.

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА

*А.М.Думанский, М.А.Алимов*

(Федеральное государственное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия)

Характеристики упругости однонаправленного слоя являются первичной информацией, используемой при проектировании элементов конструкций из композитов. Определение характеристик упругости однонаправленного слоя, как правило, производится по результатам испытаний однонаправленных или слоистых, с перекрестно армированной укладкой волокон, образцов. Число соотношений упругости, связывающих напряжения и деформации, превышает число определяемых характеристик упругости. Например, для однонаправленного слоя, рассматриваемого как пластина число характеристик равно четырем: модули упругости в направлении главных осей ортотропии ( $E_1, E_2$ ), модуль сдвига в плоскости слоя ( $G_{12}$ ) и коэффициент Пуассона ( $\nu_{12}$ ). Для однонаправленного материала, рассматриваемого как трансверсально изотропное тело, необходимо определять шесть определяемых характеристик упругости. Оценка характеристик упругости слоя однонаправленного композитного материала может производиться по результатам испытаний однонаправленных образцов, нагружаемых под разными углами к направлению армирования.

Постановка задачи определения характеристик упругости однонаправленного слоя заключается в составлении и решении системы линейных уравнений. В общем случае количество уравнений в системе зависит от количества проведенных испытаний, углов укладки, а также количества измеряемых в эксперименте величин. В общем случае уравнения могут быть неравноценны, тогда возникает необходимость раздельного решения систем линейных уравнений и последующего определения искомых характеристик. Следует отметить, что характеристики упругости однонаправленного материала могут быть выражены в одной из трех систем величин податливостей, жесткостей или характеристиках упругости.

В качестве примера по результатам испытаний на растяжение под разными углами к направлению армирования образцов из однонаправленного углепластика Т700S/2592 проведено вычисление характеристик упругости. Испытания проведены под углами  $0^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 22,5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ <sup>1</sup>. Кривые деформирования с деформациями, измеренными в продольном и поперечном направлениях в осях симметрии образцов, приведены на рис. Анализ показывает существенную нелинейность деформирования при растяжении под углами, не равными  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . На этом основании делается вывод о том, что нелинейное поведение слоя определяется нелинейностью деформирования при сдвиге в плоскости слоя.

Оценка характеристик упругости слоя проводится в линейной области деформирования образцов и предположении линейной упругости в главных осях ортотропии слоя.

---

<sup>1</sup> Данные Ш Огихара, Университет науки, Токио

При одноосном нагружении однонаправленного слоя под углом к направлению армирования соотношения связи между деформациями и напряжениями в системе координат  $xu$  могут быть записаны в следующем виде [1]:

$$\{\varepsilon\}_x = [\bar{S}_{xy}] \{\sigma\}_x, \quad (1)$$

где  $[\bar{S}_x]$  - матрица податливости слоя. Поскольку вектор напряжений содержит только одну компоненту  $\sigma_x$ , систему (1) можно переписать следующим образом:  $[\bar{S}_{xy}] = \frac{\{\varepsilon\}_x}{\sigma_x}$ . Далее для каждого угла матрицу податливости представляем

в виде произведения матрицы, зависящей от углов, при которых были проведены испытания на вектор-столбец компонент податливости слоя, т.е.  $[\bar{S}_{xy}] = [M] \{\bar{s}_0\}$ . Таким образом, для определения вектор-столбца податливостей, получаем следующую систему линейных уравнений:

$$[M] \{\bar{s}_0\} = \frac{\{\bar{\varepsilon}\}_x}{\sigma_x}. \quad (2)$$

Порядок системы линейных уравнений определяется количеством углов, при которых были проведены испытания, а также количеством измеряемых в эксперименте величин.

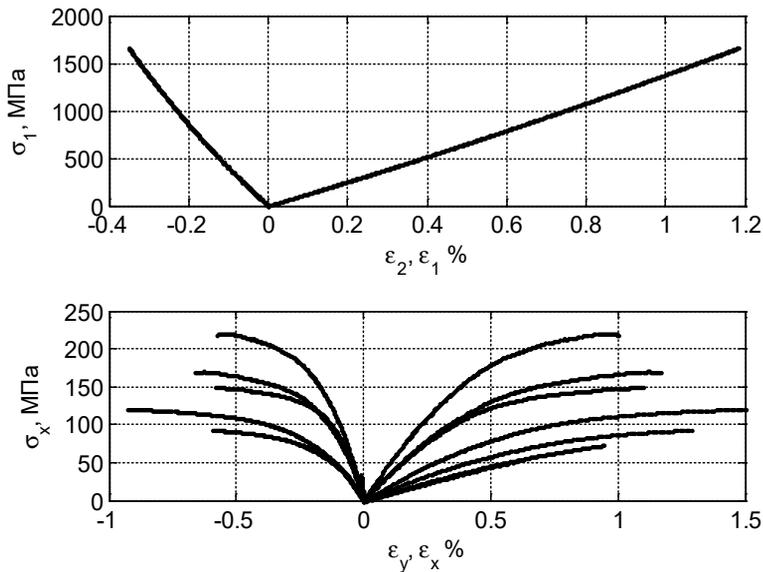


Рис. Экспериментальные кривые деформирования однонаправленного углепластика. Верхний рисунок для  $0^\circ$ , нижний -  $15^\circ, 20^\circ, 22,5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  последовательно сверху вниз

В силу отличия рангов матриц для продольных и поперечных деформаций системы уравнений для них необходимо решать отдельно. Поиск решения осуществляется методом наименьших квадратов как минимизация нормы вектора

невязки между расчетными и опытными данными. Сопоставление опытных и расчетных данных приведено в следующей таблице.

	$E_1$ , ГПа	$E_2$ , ГПа	$\nu_{12}$	$G_{12}$ , ГПа
Эксп.	128	9,8	0,307	4,8
Расчет	121,5	10,0	0,375	5,0
Погрешность, %	5	-2	-22	-4

Показана приемлемая погрешность оценки упругих характеристик однонаправленного углепластика. Предложенный метод позволяет также оценить погрешности определения характеристик упругости, связанных с изменением угла ориентации волокна.

#### Литература

1. Композиционные материалы. Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева и др.– М.: Машиностроение – 1990. – 512 с. (Гл. 8).

## **ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ ОПЕРЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ МС-21**

*Д.А.Волков, В.А.Литицкая, А.М.Ларькова, Л.А.Климакова, А.О.Половый, А.В.Митякова, Л.С.Селина* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

В настоящее время стремительно растет доля использования элементов из ПКМ в составе гражданской авиатехники. Объем применения ПКМ в планере современного авиалайнера находится в пределах 25-50% от веса конструкции. Использование новых высокопрочных углеродных композиционных материалов позволяет широко применять их в конструкциях высоконагруженных агрегатов, что обеспечивает существенный выигрыш в массе.

Работа с материалами, обеспечивающими конструктивные преимущества разработки, ставит серьезные вопросы перед технологами. И основной вопрос – обеспечение реализации прочностных характеристик материала в конструкции. Поэтому задача внедрения материала с высокими характеристиками в производство занимает одно из первых мест в технологической подготовке производства.

При внедрении высокопрочных материалов и разработке технологии изготовления панелей оперения изделия МС-21 была проведена большая работа. Она включала в себя три основных этапа.

Первый этап состоял в отработке технологии изготовления и получении стандартных образцов. В процессе выполнения этого этапа были опробованы технология выкладки, режимы формования и механической обработки углепластика, а также подтверждены параметры материалов на основе препрегов HexPly M21/34%/UD194/IMA-12K и HexPly M21/40%/285T2/AS4C-6K фирмы «Hexcel» по результатам испытаний входного контроля. В рамках работы

изготовлено около 4500 образцов 47-ми типов.

Второй этап включал в себя разработку конструктивно-технологических решений и вариантов исполнения подкрепленных конструкций и изготовление конструктивно-подобных образцов, в том числе и крупногабаритных (длина до 2,5 м). Для изготовления образцов предусматривалась разработка и изготовление специализированной оснастки и приспособлений. Изготовлено более 600 образцов, из которых около 250 крупногабаритных.

При отработке изготовления конструктивно-подобных образцов проводилась оценка возможности реализации свойств материала в элементах натурной конструкции, вариантов исполнения специализированного оснащения при изготовлении натурной конструкции. Результатом работы стало принятие решения по технологии изготовления и КД на технологическую оснастку.

Третьим этапом предусматривалось изготовление первого комплекта натуральных конструкций кессонов оперения, для чего выбрано и разработано принципиально возможное технологическое решение изготовления стрингерных панелей, наиболее подходящее под условия конкретного производства.

## **АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВАКУУМ-ТЕРМОКОМПРЕССИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ**

*С.В.Бухаров, А.К.Лебедев*

(“МАТИ - Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского”, г. Москва, Россия)

Задачи, выдвигаемые современным производством, могут быть решены на основе принципиально новых технологий, материалов и источников энергии. Вместе с этим, в процессе интенсификации разработки технологий изготовления ПКМ представляет значительный интерес обосновать такой режим изменения давления, который обеспечит снижение затрат и одновременно требуемый для эксплуатации изделия уровень объёмного содержания наполнителя как одного из важнейших показателей качества конструкций из ПКМ. Такая задача не является тривиальной, т.к. на изменение объёмного содержания наполнителя в процессе формования влияет множество факторов: технологические характеристики наполнителя, кинетика и реология процесса отверждения термореактивной полимерной системы наполнитель-связующее, режим изменения давления.

Применение процессов термического расширения помогает эффективно решать проблему создания изделий, имеющих форму замкнутых оболочек. В процессе формования изделие помещается между оснасткой, имеющей поверхность, соответствующую теоретическому контуру, с одной стороны, и упругим прижимом – с другой. Разница коэффициентов термического расширения обеих частей оснастки создаёт равномерное давление расчётной величины по поверхности формируемого изделия. При охлаждении формирующий элемент из кремнийорганической резины сжимается, что позволяет его

относительно просто извлечь.

Математическое моделирование этих процессов даёт результаты, близкие к тем, что получаются на практике, а это значит, что можно получать этим методом изделия из ПКМ качества, соответствующего изделиям, формуемым в автоклаве.

Для проведения опытно-конструкторских работ, освоения новых технологий, использования материалов со свойствами, превосходящими имеющиеся в новых конструкциях летательных аппаратов, сроки и стоимость технологической подготовки производства являются значимыми величинами. Стоимость такого оборудования, как автоклав, использование металлической оснастки, применение на предприятии полуфабрикатов собственного изготовления являются признаками крупного, развитого производства. Прототипирование и модернизация имеющихся образцов техники требует меньших временных затрат, нежели создание новых образцов техники на основании фундаментальных знаний и принципов.

Рассматриваемая технология позволяет малым предприятиям, которым в последнее время вновь образованные корпорации передают некоторые этапы ОКР, получать высококачественные изделия из ПКМ благодаря тому, что нет необходимости в аренде дорогостоящего оборудования.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ “ЖЕРТВЕННЫХ” ТКАНЕЙ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

*С.М.Гайдукова, Е.П.Козерацкая, В.С.Петропольский*  
(ГП “АНТОНОВ”, г. Киев, Украина)

Развернувшаяся в 70 – 80 г.г. прошлого века и продолжающаяся в настоящее время в авиастроении разработка конструктивно-технологических решений с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных лент и углеродных тканей позволяет создавать принципиально новые высокопрочные конструкции.

В производстве деталей и агрегатов летательных аппаратов из углепластика актуальным вопросом является обеспечение требуемого уровня прочности конструкций при растяжении и сжатии.

Обеспечение стабильности высоких характеристик углепластиков зачастую зависит не только от уровня механических характеристик исходных материалов и режимов их формования, но и от особенностей формирования технологического пакета, обеспечивающего реализацию выбранного режима формования.

Одним из составляющих технологического пакета является «жертвенный» слой (Peel ply, то есть «слой на отрыв»), полученный с использованием нейлона или полиэфира, применяемый в качестве финишного слоя. После вакуум-автоклавного отверждения «жертвенный» слой легко снимается, оставляя чистую, «текстурированную» поверхность пластика, сразу же готовую для дальнейшей работы. Также он позволяет проходить лишней смоле, которая содержится в армирующем слое, во впитывающий слой.

Более поздние исследования показали также влияние «жертвенных» слоев на физико-химические и физико-механические свойства формуемых пластиков.

В связи с этим возникает необходимость исследования влияния одной из составляющих технологического пакета – «жертвенной» ткани различных марок, на свойства получаемого углепластика.

Для проведения исследования было изготовлено 5 образцов из углеродной ленты УОЛ-300-2А, пропитанной связующим ЭДТ-69Н с применением различных «жертвенных» материалов и без них, а именно:

– 4 образца изготавливали, укладывая сухие «жертвенные» слои на заготовки с двух сторон по принятой на предприятии технологии, изложенной в ТР1.2.476-84 ВИАМ [1]:

- образец №1 с полиэфирной тканью ГОСТ 15.978-93, отечественного производства;

- образец №2 с полиамидной тканью Peel ply Ulmina 7849;

- образец №3 с тканью SK2PP180-1, разработанной для производства силовых и средненагруженных конструкций. Полиэфирный материал термообработан и стабилизирован с целью удаления всех возможных загрязнений и снижения усадки;

- образец №4 с Release Ease 236 TFNP - непористая жертвенная стеклоткань с большой толщиной и более толстым покрытием PTFE (политетрафторэтилена), применяется с целью минимизации отпечатка «жертвенной» ткани на поверхности ламината и удержания связующего в углепластике;

– образец №5 изготавливали без применения «жертвенного» слоя.

Формование заготовок образцов производилось вакуум-автоклавным способом по традиционному режиму формования для связующего ЭДТ-69Н: при температуре  $(135 \pm 5)^\circ\text{C}$ , вакуумном и избыточном давлении  $2,5 \text{ кг/см}^2$  в течение 3 час.

Отформованные заготовки разрезали на стандартные образцы для определения предела прочности при растяжении и сжатии, а также для определения физико-химических показателей.

#### **Результаты исследования и их анализ.**

На основании проведенных исследований установлено различное влияние «жертвенных» тканей представленных марок на свойства углепластиков.

Изучение свойств образцов выявило, что показатели образцов №5 (без применения «жертвенной» ткани) и №4 (с «жертвенным» материалом Release Ease 236 TFNP) находятся на недостаточно высоком уровне по сравнению с остальными образцами.

Так, образец №5 показал заниженное содержание смолы в пластике (31,04 % при норме 33-43%) и заниженные показатели прочности на сжатие ( $77,7 \text{ кг/мм}^2$  при норме  $105 \text{ кг/мм}^2$ ), а образец №4 выявил отклонения показателей прочности на растяжение ( $101,9 \text{ кг/мм}^2$  при норме  $140 \text{ кг/мм}^2$ ).

Большое влияние на прочностные характеристики оказывает отклонение направления ориентации волокон наполнителя. К примеру, в однонаправленном углепластике, отклонение направления волокон на  $5^\circ$  от направления действующих нагрузок снижает механические характеристики на величины до 20% от исходных.

Анализ поверхности углепластика позволил выявить наличие деформации

нитей наполнителя на поверхности образца №5, их разрежение в средней части образца и более плотное сжатие искривленных нитей по краям.

В то же время в образцах №2, №3, №4 и №1 деформации нитей основы не наблюдалось.

В исследованиях ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ отмечается [5]:

«Показано, что все связующие обладают так называемым «processing window» или «технологическим окном» - разницей между температурой плавления олигомера и началом его отверждения. Технологическое окно даёт необходимый временной интервал для растекания, смачивания и пропитки пакета с волокнистым наполнителем, что, в свою очередь, позволяет получать ПКМ высокого качества. Связующие в виде низковязких жидкостей сохраняют своё агрегатное состояние в течение времени, необходимого для полного смачивания и удаления пузырьков воздуха из пакета».

В нашем случае следует предположить, что в период действия «технологического окна» во время нахождения связующего в виде низковязкой жидкости волокна однонаправленных углеродных лент могут деформироваться, двигаться и скользить относительно друг друга.

В то же время наличие «жертвенных» материалов на поверхности пластика служит фиксирующим фактором, препятствующим таким изменениям, при этом искривление нитей уменьшается.

Полученные экспериментальные данные показали, что физико-механические и физико-химические характеристики отформованных образцов углепластика, полученных с применением «жертвенных» тканей различных марок, также существенно отличаются. Результаты исследований образцов углепластика представлены в таблице.

Таблица

Характеристики образцов углепластика с применением «жертвенных» тканей

№ пластины/ «жертвенный» слой	Содержание связующего в пластике, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность на растяжение, кг/мм <sup>2</sup>	Прочность на сжатие, кг/мм <sup>2</sup>
№1 – Полиэфирная ткань	43,5	1,5444	120,9	96,8
№2 – Peel ply Ulmina 7849	33,1	1,5745	156,8	101,5
№3 – SK2PP180-1	33,23	1,5781	143,9	101,9
Нормы ТУ	3-43	1,54-1,62	140	105

### Заключение

▪ Для улучшения структуры пластика, стабилизации его толщины, уменьшения искривления и деформации волокон углеродных лент целесообразно использовать «жертвенные» ткани, что позволит улучшить стабильность физико-механических и физико-химических характеристик пластика.

▪ Применение «жертвенных» тканей позволяет исключить абразивную обработку композитной углепластиковой детали и получить поверхность со

стабильной прогнозируемой шероховатостью.

- Проведенные исследования позволили установить важный для практического использования факт значительного воздействия «жертвенных» тканей различных марок на свойства углепластика, а именно, установлено, что «жертвенные» ткани SK2PP180-1и ткани Peel ply Ulmina 7849, примененные для формования углепластика, улучшили показатели прочности образцов

- Дальнейшее изучение свойств «жертвенных» тканей и закономерностей их влияния на процессы формирования композитов, позволит определить для каждого конкретного решения наиболее приемлемый тип жертвенной ткани.

## **ВЛИЯНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ УДАЛЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВОЙСТВА ФОРМУЕМЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ**

*Н.С.Обухова, А.А.Ширко, И.Н.Добрецова, А.И.Войлочников, Е.Р.Лепикаш*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

При изготовлении изделий различного назначения из полимерных композиционных материалов (ПКМ) методами вакуумного, вакуум-автоклавного формования, намотки, инфузии и др. используется широкий набор вспомогательных технологических расходуемых материалов. К ним относятся дренажные, разделительные и удаляемые «жертвенные» слои. Выполняя свои определенные функции, они оказывают существенное влияние на качество формуемых композитных изделий.

При формировании изделий из ПКМ, особенно крупногабаритных, в состав технологического пакета входят так называемые «жертвенные» слои, которые удаляются с поверхности изделия после формования. В процессе изготовления композитных, в том числе и стеклопластиковых, изделий они выполняют ряд функций.

Во-первых, «жертвенные» слои обеспечивают создание на поверхности формуемого композитного изделия после их удаления заданной шероховатости, необходимой для проведения последующих технологических операций, в том числе склейки и окраски.

Во-вторых, те «жертвенные» слои, которые предварительно не пропитываются, поглощают избыток отжимаемого при формировании связующего, что влияет на компонентный состав и соответственно на физико-механические свойства получаемых материалов.

В-третьих, «жертвенные» слои защищают поверхность изделия от загрязнения и повреждения в ходе реализации технологического цикла его изготовления до момента их удаления непосредственно перед склейкой (окраской).

Среди отечественных тканей, применяемых в качестве «жертвенных» слоев, широко используется полиэфирная (лавсановая) фильтровальная ткань (артикул 56208). Современное расширение рыночного ассортимента тканей указанного назначения по характеристикам, цене и их различному влиянию на свойства формуемых стеклопластиков ставит задачу сравнительного анализа и

обоснованного выбора тканей для применения в качестве “жертвенных” слоев при формировании стеклопластиков.

В данной работе было исследовано 9 видов тканей полиэфирной и полиамидной природы отечественного и импортного производства, отличающихся толщиной и поверхностной массой.

Образцы стеклопластика на основе эпоксифенольного связующего и конструкционной стеклоткани Т-10-14, сформованные с применением исследуемых “жертвенных” тканей, содержали от 2 до 8 слоев препрега и были получены методом вакуумного формования. Для оценки влияния вспомогательных удаляемых слоев на свойства формуемого стеклопластика были определены:

- поглощающая способность исследуемых тканей;
- содержание связующего, наполнителя и пористость полученных стеклопластиков;
- показатели шероховатости поверхности сформованных стеклопластиков после удаления “жертвенной” ткани;
- прочность при сдвиге клеевых соединений образцов стеклопластика с различной шероховатостью.

Результаты проведенных исследований показывают, что рассмотренные образцы удаляемых тканей, отличаясь по химической природе и физико-механическим свойствам, оказывают различное влияние на свойства формуемых стеклопластиков. Так, поглощающая

способность исследуемых тканей отличается более чем в 1,5 раза, что соответственно определяет различия в компонентном составе сформованных стеклопластиков: разброс содержания связующего и наполнителя в полученных образцах составляет 4 - 8% , а пористости – 2 - 5% по сравнению с применяемой ранее лавсановой фильтровальной тканью. Кроме того, ткани с низкой поверхностной плотностью разрушаются при удалении и нарушают целостность поверхностных слоев стеклопластика.

Изменение шероховатости ( $R_z$ ) для исследованных образцов более чем на 40% обуславливает аналогичные различия в сдвиговой прочности клеевых соединений. Экспериментально установлено, что увеличение толщины формуемых образцов также приводит к различиям исследуемых свойств композитов под действием “жертвенных” тканей. Учитывая полученные результаты, для формования стеклопластиков различных толщин были выбраны образцы удаляемых “жертвенных” тканей, обеспечивающие заданные свойства формуемых материалов.

Проведенные исследования показывают, что для получения изделий конструкционного назначения из стеклопластиков со стабильными воспроизводимыми свойствами необходим обоснованный выбор вспомогательных материалов для удаляемых слоев, учитывающий свойства формуемого композита и “жертвенной” ткани.

## РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ БЛОКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

*А.Г.Чернявский, А.А.Романов, В.А.Тюльменков, А.И.Алямовский, Н.И.Копыл, Д.Я.Давыдов, И.Л.Аккуратов, А.Н.Сеньковский, Д.М.Запруднов*  
(ОАО “РКК “Энергия”, г. Королев, Россия)

При создании автоматических космических аппаратов (АКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) особое внимание уделяется разработке системы оптико-электронного наблюдения (СОЭН). Один из вариантов компоновки СОЭН представлен на рис.

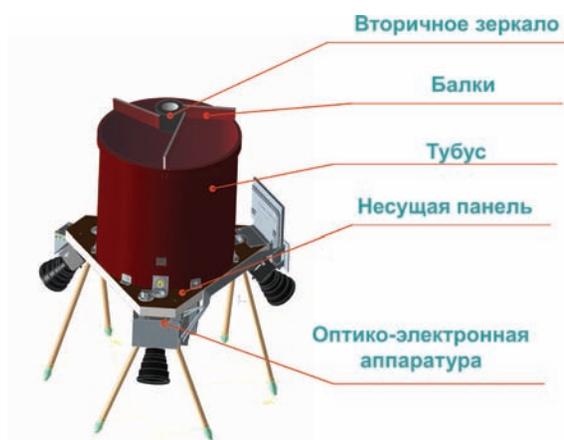


Рис. Конструктивная компоновка СОЭН АКА ДЗЗ

В настоящей работе рассмотрены вопросы выбора материалов, конструктивно-технологических вариантов и представлены основные этапы изготовления конструктивных элементов корпуса блока двухзеркального оптико-электронного модуля (ОЭМ) – несущей панели, тубуса, балок крепления вторичного зеркала.

При разработке корпуса блока двухзеркального учитывались следующие технические требования:

масса корпуса не более 30 кг;

температурная деформация вдоль продольной оси тубуса между первичным и вторичным зеркалами в процессе эксплуатации в условиях космического пространства (в интервале температур от плюс 10 до 30 °С), не более 0,02 мм;

перемещение вторичного зеркала относительно первичного в процессе наземной юстировки не должно превышать 0,02 мм вдоль продольной оси тубуса и 0,1 мм в радиальном направлении;

материалы, применяемые при изготовлении конструктивных элементов корпуса, должны быть радиационно-стойкими при эксплуатации на солнечно-асинхронной орбите не менее десяти лет и иметь общую потерю массы не более 1 %.

В процессе разработки корпуса ОЭМ было рассмотрено пять различных вариантов:

Изготовление элементов корпуса из металлических сплавов по традиционным технологиям (сварка, клепка и т.д.);

Элементы корпуса выполнены в виде трехслойных сотовых конструкций с несущими слоями (НС) из алюминиевого сплава Д16АТ;

Цельноформованный корпус (тубус) из углепластика с двумя силовыми шпангоутами;

Ферменная конструкция корпуса из стержневых углепластиковых элементов с законцовками (фитингами) из титанового сплава;

Конструктивные элементы корпуса выполнены в виде трехслойных сотовых конструкций с НС из листового углепластика.

Проведенный анализ рассмотренных вариантов исполнения конструктивных элементов корпуса блока двухзеркального показал, что:

из-за высоких значений коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) ( $\alpha \geq (8 \div 25) \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ ) и высокой плотности ( $\gamma = (2,7 - 7,8) \text{ г/см}^3$ ) металлических сплавов конструкции на их основе (варианты 1 и 2) не будут удовлетворять требованиям по температурным деформациям и допустимой массе;

из условий обеспечения высоких требований к жесткости конструкции тубуса из цельноформованного углепластика, его масса без учета фитингов крепления первичного зеркала и закладных элементов превышает заданную массу более чем в два раза;

ферменная конструкция требует трудоемких в изготовлении фитингов из титановых сплавов, а также дорогостоящей оснастки для точной фиксации (сборки) при склеивании углепластиковых стержней с фитингами, кроме этого, по предварительной оценке, масса ферменной конструкции в 1,5 раза будет превышать лимитную массу;

наиболее полно предъявленным требованиям соответствуют корпусные элементы ОЭМ (тубус, несущая панель и балки крепления вторичного зеркала) в виде трехслойных сотовых конструкций с НС из углепластика, имеющего минимальный КЛТР ( $\alpha \leq 0,5 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ ), низкую плотность ( $\gamma = (1,4 - 1,7) \text{ г/см}^3$ ) и максимальные характеристики удельной жесткости ( $E/\gamma \leq 22.000 \text{ км}$ ).

Трехслойные сотовые конструкции в сравнении с традиционными типами подкрепленных панелей и оболочек при одинаковых эксплуатационных нагрузках (изгиб, сжатие) имеют существенно меньшую массу благодаря высокому моменту инерции сечения. Массовая эффективность трехслойных сотовых конструкций тем выше, чем выше характеристики удельной прочности и жесткости НС.

Для изготовления НС были проанализированы характеристики удельной прочности и жесткости однонаправленных углепластиков серии КМУ-4 на основе различных углеродных наполнителей и связующего ЭНФБ, приведенные в табл.

Наименование материала	Плотность, $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная прочность, $\sigma/\gamma$ , км	Удельная жесткость, ( $E \times 10^{-3}$ )/ $\gamma$ , км
Углепластик КМУ-4Л-0,1 на основе углеродной ленты ЛУП-0,1	1500	43,3	10,7
Углепластик КМУ-4Э-0,08 на основе углеродной ленты Элур-0,08П	1500	53,3	8,0
Углепластик КМУ-4К на основе углеродной ленты Кулон-П	1700	41,2	15,9
Углепластик КМУ-4У на основе углеродной ткани УТ-900/2500 (схема армирования 0°/90°)	1500	40,0	4,0

Исходя из данных, представленных в табл., и учитывая изложенное выше, был выбран углепластик КМУ-4К на основе высокомодульной углеродной ленты Кулон-П как основной материал для изготовления НС тубуса, несущей панели и балок крепления вторичного зеркала.

Для производства П-образных окантовывающих торцевых профилей несущей панели, балок крепления вторичного зеркала и площадок под установку приборов был использован углепластик КМУ-4У на основе углеродной ткани УТ-900/2500.

Несущие слои тубуса изготавливались по интегральной схеме из предварительно отформованных листовых заготовок (0°/90°) с эффектом памяти формы. Соединение предварительно отформованных заготовок при склеивании тубуса проводили через высокомодульный углеродный клеевой препрег.

В качестве сотового заполнителя в несущей панели и балках крепления вторичного зеркала для обеспечения максимальной жесткости и минимальных термических деформаций использовали углесотопласт специального назначения на основе углеродной ленты Элур-П 0,08 и связующего ЭНФБ, а в конструкции тубуса – сотовый заполнитель марки АМг-2Н-2,5П. Склеивание несущих слоев с сотовым заполнителем проводили пленочным клеем ВК-41.

Сборку и склеивание тубуса осуществляли на стальной цилиндрической оправке. Во избежание коробления и разрушения НС из предварительно отформованных углепластиковых заготовок из-за существенной разницы КЛТР оправки и углепластиковых НС был разработан специальный многоступенчатый режим склеивания тубуса, обеспечивающий минимальные технологические напряжения в НС в процессе нагрева и охлаждения.

Заключение. Выбраны материалы и разработаны конструктивно-технологические решения для корпусных элементов ОЭМ, отвечающие предъявленным требованиям, включая массу изделия. Разработан и внедрен новый углеродный сотовый заполнитель, позволивший существенно повысить жесткостные характеристики конструкции ОЭМ. Показана возможность снижения

термических напряжений в НС за счет применения листовых углепластиковых заготовок с эффектом памяти формы и использования многоступенчатого режима склеивания в процессе воздействия избыточного давления, нагрева и охлаждения. Получены положительные результаты статических и наземных автономных испытаний ОЭМ, подтвердивших правильность выбранных конструктивно-технологических решений.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ “FIBERSIM”**

*Н.В.Выморков, И.Р.Полонская*

(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Одной из наиболее важных стадий жизненного цикла изделий для производителей композитных агрегатов является процесс проектирования и создания формы и содержания будущих изделий, с учетом использования и моделирования эффективных, высокопроизводительных технологий и оборудования, используемых для их производства. И проблема сегодняшнего дня в деле создания эффективных изделий из композитов для авиационной техники состоит в отсутствии взаимосвязанной цепочки «проектирование» – «производство», в отсутствии механизмов программирования производственных процессов на этапе разработки проекта, что приводит к ситуации, когда конструкцию разработанного изделия зачастую невозможно изготовить с использованием высокопроизводительных технологий и оборудования, а это приводит к созданию неконкурентоспособной продукции. Инструментом, позволяющим обеспечить возможность проектирования изделий из ПКМ с учетом эффективного их производства, является программный продукт FiberSim, который предназначен для обеспечения моделирования процесса выкладки композиционного материала, подготовки разверток слоев выкладки и данных для машин автоматического раскроя, подготовки данных для лазерных проекционных систем, подготовки управляющих программ для комплексов автоматизированной выкладки препрега и волокна.

FiberSim предоставляет широкий спектр инструментов для создания геометрии и компонентов, позволяющих сократить время проектирования. За счет уникальной технологии FiberSim, симулирующей выкладку материала на поверхность оснастки, которая заключается в создании волоконной сетки по поверхности оснастки, на стадии проектирования были определены проблемы, которые могут возникнуть в процессе производства. При проектировании детали были выявлены следующие проблемы: превышение ширины материала и наличие деформации материала.

Технология FiberSim по генерированию развертки заключается в создании 2D САД формы материала, необходимого для покрытия поверхности оснастки внутри 3D границы слоя. С применением FiberSim были созданы “оптимизированные”

развертки как для одного слоя, так и для всего пакета с учетом индивидуальных особенностей раскройных машин, различных настроек (с выводом или без вывода текста, точки приложения, направления выкладки).

Автоматизированный раскрой препрега проводится на промышленном плоттере Zund M-1600. Программа раскроя слоя представляет собой оптимальную раскладку всех элементов слоя по ширине и длине раскраиваемого материала. Пример раскроя слоя представлен на рис.1. FiberSim также создает данные в виде точек, необходимых для систем лазерного проецирования для каждого слоя и для всего пакета в целом, в зависимости от особенностей программного обеспечения лазерного проектора, учитывая индивидуальные особенности и различные настройки. Также FiberSim при экспорте данных учитывает толщину материала и смещает контур для проецирования на необходимое расстояние. Пример проецирования и выкладки элемента слоя представлен на рис.2.

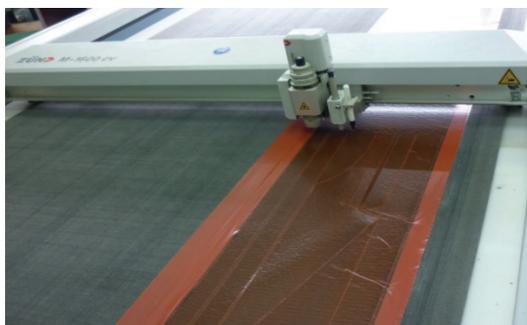


Рис.1. Раскрой слоя

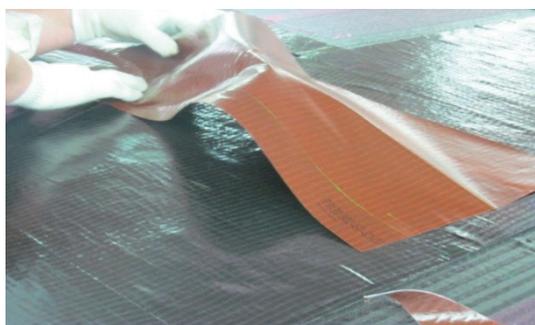


Рис. 2. Выкладка элемента слоя

Разработанные на основе программного обеспечения технологии изготовления деталей с помощью автоматизированного раскроя препрегов и лазерного проецирования и внедрение этих технологий в производство позволило:

- сократить время исходного проектирования;
- уменьшить время внесения изменений;
- повысить эффективность использования материала;
- улучшить прочностные характеристики изделий из ПКМ в среднем на 10%;
- снизить трудоемкость изготовления деталей из ПКМ на 50-70%;
- сократить технологический цикл процесса выкладки деталей из ПКМ на 40% за счет применения автоматизированных процессов;
- улучшить условия труда и экологию при изготовлении деталей из ПКМ.

FiberSim применяется при проектировании и изготовлении композиционной технологической оснастки панелей шумоглушения двигателей «Sam-146» (при формовании панели используются специальные стеклорезиновые цулаги со сложным профилем); конструктивных элементов гражданского самолета МС-21 (изготовление конструктивно-подобных образцов, подтверждающих свойства материалов), деталей из ПКМ двигателя

ПД-14.

В настоящее время все большее применение в новых авиационных программах находят автоматизированные процессы производства. Специальное проектирование подопределенный производственный процесс применялось и ранее.

Однако его использование в области производства изделий из композиционных материалов – современная тенденция, которая стремительно развивается. До недавнего времени специализированное программное обеспечение FiberSim использовалось в основном для ручного процесса производства. На сегодняшний день, проведена полная модернизация оборудования для автоматической укладки ленты компанией MIKROSAM, и программное обеспечение FiberSim применяется при проектировании изделий из ПКМ для автоматизированной выкладки.

FiberSim – это комплексное программное решение для проектирования и производства деталей из композиционных материалов, которое позволяет повысить производительность выкладки слоев за счет уменьшения времени на подготовку слоев, за счет высокой скорости раскройной машины и точного контура развертки и лазерного проецирования.

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ В МЕЖФАЗНОМ СЛОЕ**

*А.Н.Синенков, В.В.Викулин, Н.Б.Волобуева, В.В.Мазур*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Зависимость свойств пластиков, армированных волокнами, от состояния границы раздела между компонентами понимается исследователями вполне отчетливо. В частности, из-за вариабельности процессов, происходящих в межфазных слоях, реализация прочности и модуля упругости армирующих волокон в отвержденных пластиках колеблется в диапазонах 40-95 % и 90-95 %. Однако круг вопросов, связанных со взаимодействием на межфазной границе, остается одним из наименее изученных, а количественные характеристики границы раздела (особенно для вновь создаваемых волокон и матриц) часто отсутствуют. Определение количественных характеристик структурных компонент представляет собой важную задачу, без решения которой нельзя выполнить прогнозирование свойств полимерных композитов. Выполнение этой задачи связано с регулированием адгезионного взаимодействия компонентов и остаточных напряжений в межфазном слое, с выявлением влияния поверхности волокон на формирование матрицы и на ее свойства.

В данной работе объектами исследования служили – эпоксидное связующее КПП-150 и углеродные волокна HTS-40 и HTA-40. Методом ИК-спектроскопии исследовали структурные и химические изменения, происходящие в связующем при совмещении с углеродными волокнами. По изменению относительных интенсивностей полос 917 и 1600 см<sup>-1</sup> определяли степень отверждения и реакционную способность эпоксидного связующего.

Методом рентгеноструктурного анализа проводили исследования кристаллической структуры волокон. По дифракционным пикам определяли размеры областей когерентного рассеяния, т.е. кристаллитов, из которых состоят волокна. Структурные исследования композитов проводили методом электронной микроскопии. Согласно этим данным эпоксидное связующее относится к

коллоидно-дисперсным системам, фазовое разделение в котором наблюдается уже на стадиях приготовления и хранения связующего. Важным следствием этого процесса является изменение начального соотношения компонентов связующего в различных фазах, при этом значительная часть отвердителя и (или) катализатора, специальных добавок, отличающихся более низким порогом растворимости, концентрируется в дисперсных частицах. Это приводит к различной степени отверждения полимера в частицах дисперсной фазы и дисперсионной среде, которая отверждается не полностью. Армирующий наполнитель активно влияет на фазовое разделение в связующем, ускоряя (стекло-, полиарамидное волокна) либо ингибируя (углеродное волокно, металлы) процесс выделения дисперсных частиц.

Для эффективного регулирования межфазного взаимодействия в разрабатываемых углепластиках необходимо исходить из всестороннего анализа эксплуатационных условий нагружения. При решении задачи обеспечения необходимой прочности сцепления между фазами пластика использовали систему расчетных уравнений.

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО НАГРЕВА**

*П.Ю.Якушкин, М.О.Забезжайлов, Д.А.Рогов, Е.В.Миронова*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Из всего многообразия конструкционных материалов перспективным классом материалов для использования при создании ракетной и авиационной техники являются полимерные и полимерные композиционные материалы (ПКМ). Полимерные материалы в виде клеев-герметиков используются в качестве адгезива в соединении различных элементов конструкций ЛА. ПКМ на основе стеклопластиков широко используются для изготовления элементов несущих частей конструкции ЛА [1,2].

Создание элементов конструкций перспективных, высокоманевренных, высокоскоростных ЛА требует выбора материалов, стойких к воздействиям высоких температур и силового нагружения, реализуемых в широком диапазоне скоростей нагрева. Решение этой проблемы обуславливает необходимость проведения теплопрочностных испытаний материалов с целью определения их физико-механических характеристик при расчетных (ожидаемых или прогнозируемых) параметрах нагрева и силового нагружения.

Тепловые условия эксплуатации материалов, применяемых в конструкциях перспективных ЛА, могут характеризоваться высокими температурами (до 1000°C и выше) и высокой скоростью нагрева (10-100°C/с) до температур начала деструкции при общем времени нагрева от нескольких десятков секунд до нескольких минут.

Для реализации высокоинтенсивного нагрева экспериментального образца необходимо за короткое время достичь равномерного прогрева всей площади

рабочей зоны образца из ПКМ, что является достаточно сложной технической задачей. Наиболее простым и эффективным представляется метод индукционного нагрева. Индукционный нагреватель позволяет осуществлять быстрый нагрев металлической части образца или промежуточного нагревательного элемента с возможностью точного автоматического управления нагревом, что является существенным для реализации высокоинтенсивного нагрева полимерного материала и ПКМ по заданному режиму.

При разработке метода испытаний образцов клеевых соединений были проведены тепловые расчеты по выбору оптимальной конструкции образца, позволяющей осуществить равномерный нагрев клеевого слоя индукционным нагревателем.

При исследовании нахлесточных образцов металл-металл, составленных из двух тонких металлических пластин, склеенных внахлест, было установлено, что нагрев до температуры испытаний 500°C (скорость 50°C/с) происходит за 10 секунд, что в 100 раз быстрее нагрева традиционным способом в печи сопротивления, а разброс температуры в клеевом слое не превышает  $\pm 10^\circ\text{C}$  (рис.1). Таким образом, использование нахлесточных образцов металл-металл обеспечивает максимальную скорость и равномерность нагрева клеевого слоя при механических испытаниях клеевых соединений.

При разработке метода испытаний образцов ПКМ было предложено осуществлять нагрев рабочей зоны образца посредством индукционного нагрева промежуточных металлических нагревательных элементов. Из тепловых расчетов образца ПКМ следует, что рекомендуемым режимом нагрева является выход на температуру испытаний 1000 °C за 60 секунд с последующей выдержкой не менее 20 секунд (рис.2). При таком режиме рабочая зона образца прогревается полностью и равномерно, а термические напряжения, возникающие в образце при его быстром нагреве, не превышают 3% от разрушающей нагрузки.

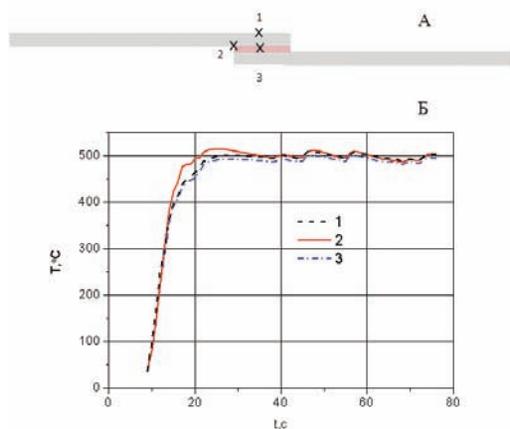


Рис.1. Термограммы, измеренные в процессе индукционного нагрева образца клеевых соединений

Эксперимент показал хорошее соответствие с результатами расчетов – время выхода на температуру испытания 1000°C составляет ~50 с. Таким образом, рассматриваемая конструкция образца и системы нагрева позволяет

реализовать температурный режим рабочей части образца из ПКМ, близкий к эксплуатационному и корректно провести испытания образца при осевом растяжении.

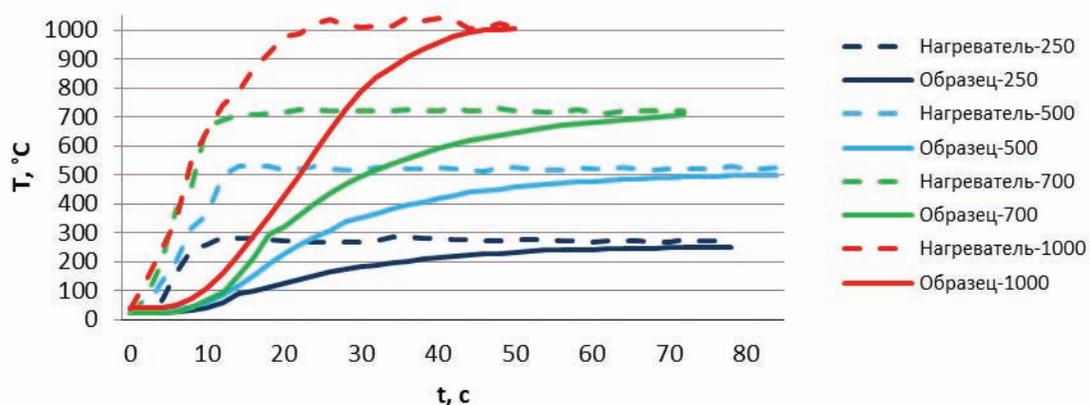


Рис. 2. Термограммы, измеренные в процессе индукционного нагрева образцов ПКМ

По результатам проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Предложены и обоснованы расчетным и экспериментальным путем методы определения прочности:

- при сдвиге и модуля сдвига клеевых соединений с использованием нахлесточных образцов «металл-металл», который позволяет определять механические характеристики клеевых соединений при нагреве клеевого слоя со скоростью до 50°C/c до температур 500°C посредством индукционного нагрева металлических пластин образца;

- при растяжении полимерных композиционных материалов, который позволяет определять прочность при нагреве рабочей зоны образца со скоростью до 20°C/c до температур 1000°C посредством индукционного нагрева промежуточных металлических нагревательных элементов.

#### Литература

1. Цвєрава В.Г., Русин М.Ю., Нєповинних В.И., Левшанов В.С. // Клеи. Герметики. Технологии.– 2004. № 5, с. 30
2. Карпинос Д.М. Композиционные материалы. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1985 – 588с.

# ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ УГЛЕРОДНОЙ ЛЕНТЫ С ПОВЫШЕННЫМ КАЧЕСТВОМ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ

*А.А.Лохов, С.Г.Сухов, О.С.Кривцова* (ОАО «УНИИКМ», г. Пермь, Россия)

Определяющим фактором создания углепластиковых стержневых элементов ферменных конструкций космических летательных аппаратов (КЛА) является разработка технологий формирования указанных элементов. Стержневые элементы для ферменных конструкций КЛА должны иметь высокие жесткость, прочность, размеро- и формостабильность, относительную низкую массу и приемлемую стоимость.

Основными углеродными наполнителями, которые применяются для производства стержневых элементов, используются следующие углеродные ленты: ЛУ-П-0,1/0,2, ЭЛУР-П, КУЛОН-500/0,11, ЛУВМ-350/0,12. Пропитка осуществляется эпоксидно-фенольным связующим ЭНФБ.

Характеристики наполнителей приведены в таблице.

Наименование показателя	ЛУ-П 0,1/0,2	ЭЛУР-П	КУЛОН- 500/0,11	ЛУВМ-350/0,12
Предел прочности при растяжении, ГПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	0,6(60)- 0,7(70)	0,9(90)	0,85(85)- 1,0(100)	0,8(80)
Предел прочность при сжатии, ГПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	0,7(70)	0,9(90)	-	0,6(60)
Модуль упругости при изгибе, ГПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	157±25	145±20(25)	250(25000)	190(19000)
Объемная доля углеродной ленты, %	62±4	63±4	62±3	-

На основе результатов научно-исследовательских работ (НИР) разработана техническая документация и освоен выпуск опытно-промышленных комплектов длинномерных тонкостенных трубчатых элементов (ТЭ) прямоугольного и квадратного сечений для ферменных каркасов солнечных батарей (СБ) космического аппарата (КА) связи «Купон» современных малоразмерных КА связи типа «Кондор». Длина ТЭ ≤ 3000, толщина стенки 1-2, высота граней 10-50 мм. Они изготавливаются из углепластика на основе лент углеродных ЛУВМ-350/0,12 и «Кулон», пропитанных связующим ЭНФБ.

При непосредственном участии авторов проведены НИР с целью минимизации термодформаций (удлинение, относительная закрутка торцов, прогиб) ТЭ ферменных каркасов и сплошных лепестков, развертываемых на орбите зеркальных антенн исследовательских КА типа «Спектр». Выбрана эффективная технологическая схема и разработана типовая технологическая

инструкция формования углепластиковых ТЭ круглого сечения высокой размерности и формостабильности. На ее основе разработана техническая документация и освоен выпуск опытно-промышленных комплектов ТЭ (длина  $\leq 1500$ , наружный диаметр  $\leq 50$ , толщина стенки 1,5-2,0 мм) из углепластика на основе ленты углеродной ЛУП-02, пропитанной связующим ЭНФБ, для ферменных конструкций зеркальных антенн КА связи «Купон», «Спектр» и нескольких КА специального назначения.

По техническому заданию «НПО им.С.А. Лавочкина», для реализации заданных характеристик космического аппарата нового поколения поставлены задачи на создание крупногабаритных ТЭ из углепластика, отвечающие следующим характеристикам:

- осевая сила при растяжении для труб  $\varnothing 100$  мм, кгс – 11000;
- осевая сила при растяжении для труб  $\varnothing 84$  мм, кгс – 4000;
- модуль упругости при растяжении и сжатии, ГПа, не менее – 180;
- толщина стенки для труб  $\varnothing 100$  мм, мм – 12,5;
- толщина стенки для труб  $\varnothing 84$  мм, мм – 4,5;
- длина для труб  $\varnothing 100$  мм, мм – 1000;
- длина для труб  $\varnothing 84$  мм, мм – 1500.

При этом трубчатые элементы должны обладать минимальной массой и работать в условиях воздействия факторов космического пространства (КП) не менее 10 лет.

После проведения сравнительного анализа углепластика для обеспечения заданных свойств была выбрана гибридная схема изготовления стержневых элементов.

Разработана технология ТЭ, которая включает следующие основные операции:

- подготовку оправки (очистка, сборка, нанесение антиадгезионного покрытия);
- выкладку, намотку заготовок препрега и укусов, совмещенную с выкладкой законцовки;
- опрессовку заготовки;
- демонтаж;
- слесарные работы;
- термоциклические и жесткостные испытания;
- контроль массы;
- контроль прочностных характеристик ТЭ.

По результатам испытаний на образцах  $\varnothing 75,47 \times \varnothing 97,56 \times H320$  и  $\varnothing 75,47 \times \varnothing 84,22 \times H320$  определен модуль упругости при сжатии –  $E_{сж}$  347 и 258 ГПа, это показывает, что предложенные материалы и разработанная технология позволяют изготавливать опытные образцы и элементы конструкций из углепластика заданных характеристик.

Наряду с авиакосмической техникой ТЭ могут применяться для изготовления различных изделий в других отраслях промышленности.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*В.Н.Иванов, Б.М.Никитин, С.И.Брыков*

(ФГУП «ВНИИТВЧ им. В.П.Володина», г. Санкт-Петербург, Россия)

Особенности влияния высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полей на различные материалы и среды позволили создать ряд эффективных технологических процессов для различных отраслей промышленности. Некоторые технологии могут быть эффективно использованы при получении конструкционных неметаллических материалов.

## **1. Изготовление композиционных материалов**

Во ФГУП «ВНИИТВЧ» разработаны технологии и оборудование для производства композиционных материалов из стекловолокна и смолы (например, эпоксидной). Стекловолокно пропитывается смолой, пропускается через специальную фильеру и затем в высокочастотном электромагнитном поле конденсатора заготовка быстро и равномерно нагревается и смола полимеризуется и затвердевает.

Во ФГУП «ВНИИТВЧ» создана и испытана в ОАО ОНПП «Технология» установка для склейки сотопакетов из бумаги номекс размером 914x600 мм и высотой 80 мм, мощностью 12,0 кВт 27 МГц. В отличие от нагрева диэлектрических пакетов от внешнего источника тепла (время нагрева 2-2,5 ч.) высокочастотный нагрев центральной части происходит за 20 минут. В настоящее время создаётся комбинированный метод нагрева, включающий высокочастотный метод для нагрева всего объёма пакета и нагрев внешними источниками пластин пресса-конденсатора и воздуха для исключения отвода тепла с поверхностных слоев.

Многие материалы, используемые для производства композиционных материалов, в т.ч. стекловолокно и базальтовое волокно, а также полимерная бумага номекс имеют низкую адгезию. Это снижает качество композиционных изделий, их прочностные свойства и ограничивает их использование. Для повышения адгезионных свойств таких материалов ФГУП «ВНИИТВЧ» разработал технологический процесс и оборудование для модификации (активации) поверхности.

Для изготовления композиционных, многослойных материалов из полимерных плёнок, в том числе армированных, широко применяется высокочастотная сварка.

Во ФГУП «ВНИИТВЧ» разработан и выпущен широкий спектр высокочастотных сварочных машин с технологической оснасткой для изготовления изделий различного назначения.

Для изготовления из композиционных материалов объёмных изделий сложной формы для военной техники, электротехники во ФГУП «ВНИИТВЧ» освоен выпуск установок для подогрева заготовок этих изделий перед прессованием.

## **2. Модификация поверхности полимерных материалов**

ФГУП «ВНИИТВЧ» разработал, изготовил, и внедрил 6 типов установок

для модификации поверхности полимерных плёнок, листов, проводов, объёмных изделий с помощью высокочастотных электрических разрядов – коронного и тлеющего (в вакууме).

Мощность установки от 0,4 до 4 кВт, рабочая частота 18-20 кГц. После обработки поверхности полимерного материала адгезионные свойства повышаются в десятки раз (для полиэтилена в 20-30 раз, фторопласта – в 30-40 раз и т.д.)

### **3. Сфероидизация микрочастиц для изготовления полимерных композиционных конструкций**

Во ФГУП «ВНИИТВЧ» разработаны технология и оборудование для сфероидизации микрогюрошков и ведутся работы по получению полых сфер из различных непроводящих материалов с использованием высокочастотных индукционных плазмотронов.

Получены ультрадисперсные порошки размером 1-20 мкм, имеющие формы полых сфер. Сфероидизированные порошки и полые сферы могут быть использованы для изготовления полимерных композиционных материалов.

#### **Графитизация углеродного волокна.**

В 80-х годах ВНИИТВЧ совместно с НПО «Лен НИИ Химволокно» и ГИПХ разработал, изготовил и ввёл в эксплуатацию несколько установок типа «Нить» для графитизации карбонизированного углеродного волокна. Нагрев производился с использованием контактно-ёмкостного метода подвода тока к волокнам в виде жгута, ленты полотна. Температура поднималась до 2000°С.

В настоящее время, наблюдается большая потребность в графитированном углеродном волокне, поэтому начата предварительная проработка комплекса оборудования для активирования пан-волокна, окисления, карбонизации, графитизации и активирования графитированного углеродного волокна.

Прорабатываются оптимальные методы нагрева на всех трёх этапах обработки волокна, оптимальные параметры высокочастотного оборудования.

Прорабатывается также возможность плазменного разрушения вредных для окружающей среды газов, образующихся при окислении пан-волокна.

Графитированные углеродные волокна могут служить важным элементом композиционных материалов, в том числе и полимерных.

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

*А.Г.Захаров, Д.А.Попова, И.А.Коньшев, Д.И.Вотинов*  
(ОАО «Пермский завод «Машиностроитель», г. Пермь, Россия)

Многослойные конструкции с наполнителем (сэндвич-панели) являются отдельным классом конструкций, которые применяются в различных отраслях промышленности, от мебельных дверей до крыльев реактивных самолетов.

Разработана новая конструкция интеллектуального ячеистого наполнителя

и способ его изготовления из полимерных композиционных материалов (стекло-, угле- и органопластик).

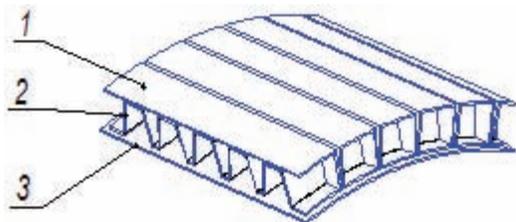


Рис. 1. Сэндвич-панель с ячеистым наполнителем из трикотажа

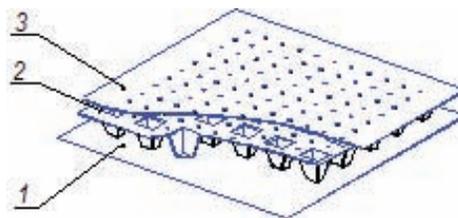


Рис. 2. Сэндвич-панель с ячеистым наполнителем из ткани

Отличительной особенностью новых панелей является то, что ячеистый наполнитель может принимать форму поверхности, на которую он выкладывается, в том числе поверхности второго порядка.

Сравнительные испытания однослойных и двухслойных панелей с ячеистым и серийно изготавливаемым трубчатым наполнителем показали более высокие механические характеристики панелей с ячеистым наполнителем.

Разработана технологическая схема, исключая ручные операции и обеспечивающая полную механизацию и автоматизацию процесса его производства.

#### Литература

1. Захаров А.Г. Технология изготовления ячеистых звукопоглощающих конструкций из полимерных композиционных материалов: сб. науч. статей «Механика и процессы управления». – Миасс: РАН, 2011. – С.38-43.
2. Аношкин А.Н., Захаров А.Г., Шустова Е.Н. Ячеистые наполнители звукопоглощающего контура авиационного двигателя // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. №3. С. 25-29.

## **РАДИОПРОЗРАЧНОЕ УКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИСТЕКЛОПЛАСТИКА ДЛЯ АППАРАТУРЫ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ**

*А.А.Баранов, Н.С.Обухова, Е.Р.Лепикаш, Г.С.Шуль*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Развитие средств связи и коммуникаций, радиолокационных комплексов требует разработки новых конструкций радиопрозрачных укрытий (РПУ), предназначенных для защиты аппаратуры данных систем от воздействия внешних факторов, таких, как атмосферные осадки, атмосферные конденсированные осадки (иней, лед, роса), солнечная радиация, пыль, механические повреждения. При этом конструкция радиопрозрачной стенки изделия, состав и структура стеклопластика должны обеспечить требуемый уровень радиотехнических характеристик (потерь

электромагнитной энергии в заданном частотном диапазоне) в течение всего срока эксплуатации наряду с сохранением высоких значений показателей физико-механических свойств.

В работе рассмотрены некоторые конструктивные и технологические решения, использованные при изготовлении радиопрозрачного укрытия, выполненного из стеклопластика на основе термореактивного связующего и предназначенного для защиты аппаратуры приема и обработки информации от метеорологических космических аппаратов. Укрытие условно может быть представлено в виде цилиндрического основания и верхней полусферы диаметром 1,4 метра, общая высота изделия 1,5 метра.

С учетом результатов комплексных исследований зависимости свойств стеклопластиков на основе эпоксидных связующих от воздействия заданных климатических факторов (повышенная температура и влажность, ультрафиолетовое воздействие и соляной туман) для изготовления РПУ был выбран стеклопластик на основе эпоксифенольного связующего и конструкционной стеклоткани. Использование данного материала позволило обеспечить высокий уровень диэлектрических свойств при низкой плотности и приемлемую цену укрытия, а разработанная конструкция изделия – требуемый уровень стойкости к воздействию механических нагрузок.

В результате радиотехнического расчета укрытия и учета ветровых нагрузок была выбрана конструкция с монолитной радиопрозрачной стенкой необходимой толщины. Анализ напряженно-деформированного состояния модели укрытия при его изготовлении без разделения на составные части выявил возможность появления поводак, коробления, деформации конструкции, не позволяющих добиться выполнения требований, предъявляемых к геометрии изделия. В итоге для формования была выбрана конструкция с разделением укрытия на две составные части по вертикальной плоскости с последующим их склеиванием.

Одним из основных элементов, обеспечивающих высокую размерную точность изготовления РПУ, является предъявление, как минимум, тех же требований и к геометрии оснастки. Укрытие изготавливалось путем вакуумного формования от внутреннего контура на композитной оснастке без изготовления полноценной мастер-модели.

Укрытие, изготовленное на основе разработанных конструкторско-технологических решений, соответствует требованиям технического задания, что подтверждено положительными результатами государственных испытаний.

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН В ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ

*П.В.Михеев*<sup>1</sup>, *А.А.Берлин*<sup>2</sup> (<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Институт химической физики им.Н.Н. Семенова, г. Москва, Россия)

За последнее десятилетие произошел резкий рост производства высокопрочных волокон на основе ароматических полиамидов и выросла область их применения. К традиционной аэрокосмической отрасли добавились ветроэнергетика, производство тросов, армирование оптических кабелей, и шинный корд. Рост объема применения арамидов требует предсказуемости их разрушения и знаний механизмов протекающих процессов.

Для оценки прочности волокнистых композитов широко применяется модель накопления повреждений [1,2,3]. Эта модель хорошо описывает разрушение хрупких волокон в композите, но применимость ее к анизотропным арамидным волокнам желательно исследовать.

В данной работе проведены фрактографические исследования образцов однонаправленного органопластика (микропластика) на основе арамидного ПАБИ – волокна. Образцы органопластика готовились путем пропитки отдельных нитей эпоксидным связующим ЭДТ-10 и последующим отверждением. Образцы микропластика исследовались после их разрушения при растяжении. Значение их разрывной нагрузки при делении на площадь сечения нити дает возможность оценить реализацию прочности волокна в композите. Для такой оценки прочность армирующих нитей определялась на разной длине до их пропитки и полимеризации. Затем значения сопоставлены с некоторыми теоретическими моделями, основанными на концепции накопления повреждений и статистическом распределении Вейбулла [4,5,6,8].

При длине образцов 100 мм, их прочность исследованных образцов микропластика в 1,5-1,7 раза превышала прочность пучка волокон в них.

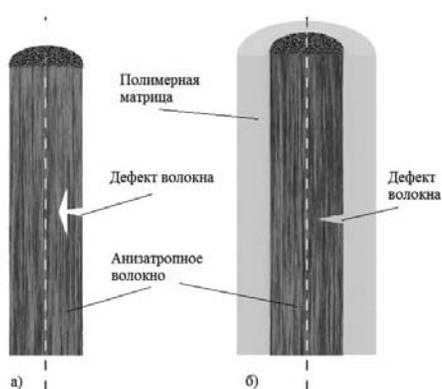


Рис. 2. Модель взаимодействия анизотропного волокна и матрицы:  
а) волокно на воздухе;  
б) волокно в полимерной матрице.

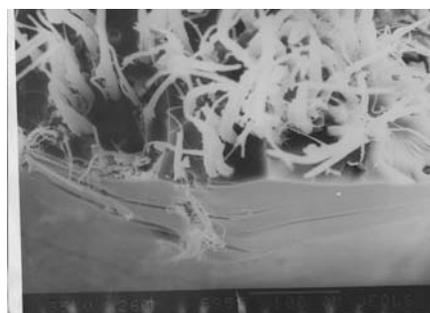


Рис. 1. Поверхность разрушения органопластика

При исследовании с помощью сканирующего электронного микроскопа обнаружено, что расстояние между отдельными разрывами волокон в образцах превышает 10 мм, а длина волокон, выступающих из зоны разрушения образца, превышает 400 мкм.

Эти величины значительно превышают необходимые для получения высокой прочности на использованных нитях.

Таким образом, значительное превышение прочности материала над прочностью пучка волокон нельзя объяснить только накоплением их разрывов в материале по модели Розена и Келли.

По нашему мнению, причиной увеличения прочности арамидных ПАБИ-волокон, имеющих сложную фибриллярную структуру, может стать взаимодействие со связующим, так как прочность при сдвиге и модуль упругости при сдвиге у волокон и матрицы близки, а основной формой разрушения самих волокон является их расслоение на отдельные фибриллы и рост отдельных трещин [9,10].

Таким образом, наличие связующего может практически в два раза повысить удельную энергию разрушения, необходимую для фибриллизации волокна [7], по нашему мнению, такая гипотеза лучше описывает экспериментальные данные.

Этот механизм разрушения высокопрочных арамидных волокон сильно отличается от других волокон, например, стеклянных или углеродных. Наличие полимерной матрицы, модуль сдвига которой близок по величине к модулю сдвига анизотропных волокон, эффективно препятствует развитию дефектов в волокне по типу расслоения и фибриллизации. И как следствие увеличивается деформация волокон, при которой начинается их расслоение и разрушение. Если для расслоения отдельного высокопрочного волокна использовать модель волокна в матрице, предложенную Вагнером, то чисто механическим влиянием матрицы можно объяснить увеличение прочности в 1,4-1,5 раза.

#### Литература

1. Tanner D., Pigliaka J.J. Aramid fiber composites for general engineering (Review)// Journal of m6tall.-1986.-V. 38.-ii.
2. Зеленский Э. С., Куперман А. М., Горбаткина Ю. А., Иванова-Мумжиева В. Г., Берлин А.А.. Армированные пластики - современные конструкционные материалы // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева).– 2001.– Т. XLV, № 2.
3. Перепелкин К.Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности // Рос.хим.журнал (Ж.Рос.хим об-ва им. Д.И. Менделеева). -2002.– Т.XLVI, № 1.- С.31-47.
4. Termonia Y. V. Maximum tensile strength of polymer fibres// Macromolecules.-1987.-V.18.-№ II.-P.2245-2251.
5. Wagner H.D., Phoenix S.L., Schwartz P.A. Study of statistical variability in the strength of single aramid filaments //Journal of composites materials. - 1984. -V.18, № 4.- P.312-338.
6. Компаниец Л.В. Прочность арамидных волокон и ее реализация в нити и микропластик: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. - М., 1984. - 21 с.
7. Wagner H.D. A model for longitudinal splitting from surface defects in anisotropic

filaments// Journal of mater.sci. letter. - 1986. - V.5, № 2. - P.229-230.

8. Mishnaevsky L. Jr., Brøndsted P, Micromechanisms of damage in unidirectional fiber reinforced composites with polymer matrix: 3D computational analysis, Composites Science and Technology, Accepted. DOI:10.1016/j.compscitech.2009.01.022.

9. Горенберг А.Я., Исследование деформации и разрушения полимерных матриц, волокон и композитов электронно-микроскопическими методами, Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук,- М., 2008. -24 с.

10. Михеев П.В., Горенберг, А.Я. Берлин А. А., Особенности разрушения высокопрочных органических волокон в однонаправленных композитах с эпоксидной матрицей: сборник тезисов докладов Московской международной конференции по композитам, 14-16 ноября 1990 г. Часть 1. – С.143.

## **ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СВОЙСТВ МОНОСЛОЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННОГО УГЛЕПЛАСТИКА**

*П.В.Михеев<sup>1</sup>, О.В.Зайцев<sup>1</sup>, А.В.Артемьев<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия; <sup>2</sup>Московский авиационный институт, г. Москва, Россия)

При производстве современных ПКМ армирующий наполнитель и связующее проходят несколько стадий переработки, подвергаясь воздействию высокой температуры и давления. Кроме того, прочность и модуль упругости – свойства полимерного связующего в тонких слоях между волокнами могут отличаться от его же свойств, измеренных в блоке или пленке [1-4]. Точно также не всегда можно предсказать, как взаимодействуют между собой слои волокон, расположенные под разными углами. Однако при разработке конкретного изделия количество укладок ограничивается несколькими типовыми.

В то же время свойства монослоев закладываются в компьютерный расчет полимерных композиционных материалов. Поэтому важно уметь измерять свойства монослоев волокон - модуль и прочность в утвержденном многослойном материале. Современные методы эксперимента и расчетов дают такую возможность.

В данной работе на основе испытаний образцов с разной долей слоев разной укладки в сочетании с вычислительными методами сделана попытка рассчитать E11, E22 и G 12 монослоя в уже готовом материале, для упрощения композиционный материал представляется состоящим из слоев разных материалов, но обладающих разными свойствами.

В настоящей работе для исследования указанных параметров был выбран углеродный наполнитель Porsher Industries, артикул 04510, с использованием связующего для инъекционных технологий марки SR 1710 фирмы “Sicomин”. Это двухкомпонентная эпоксидная система, специально разработанная для процесса инфузии.

Были исследованы углепластики с четырьмя типами укладок (табл.1).

Для проведения растяжения образца была использована электромеханическая машина Zwick 250, для определения деформации и последующего расчета модуля

упругости использовался автоматический экстензометр Масго производства фирмы “Zwick”. В табл.1 представлены результаты испытаний.

Таблица 1

Результаты испытаний

		Тип 1 (0 <sub>8</sub> /±45 <sub>2</sub> ×4/90 <sub>4</sub> )	Тип 2 (0 <sub>4</sub> /±45 <sub>2</sub> ×6/90 <sub>4</sub> )	Тип 3 (0 <sub>12</sub> /±45 <sub>2</sub> ×2/90 <sub>4</sub> )	Тип 4 (0 <sub>3</sub> /±45 <sub>2</sub> ×3/90 <sub>3</sub> ),
Объемная доля волокон	%	58,5%	59,7%	59,7%	45,4%
Прочность	МПа	779,57	523,69	1 207,25	543,18
Коэффициент вариации	%	14,16	3,04	9,93	5,23
Модуль упругости	GPa	65,46	43,64	84,12	42,50
Коэффициент вариации	%	4,89	3,96	5,00	3,08
Деформация разрушения	%	1,27	1,52	1,47	

Расчет:

В данной работе на основе испытаний образцов с разной долей слоев разной укладки в сочетании с вычислительными методами проведен расчет E11, E22 и G12 монослоя в уже готовом материале. На рисунке графически представлена зависимость модуля упругости пластика от доли слоев 0°.

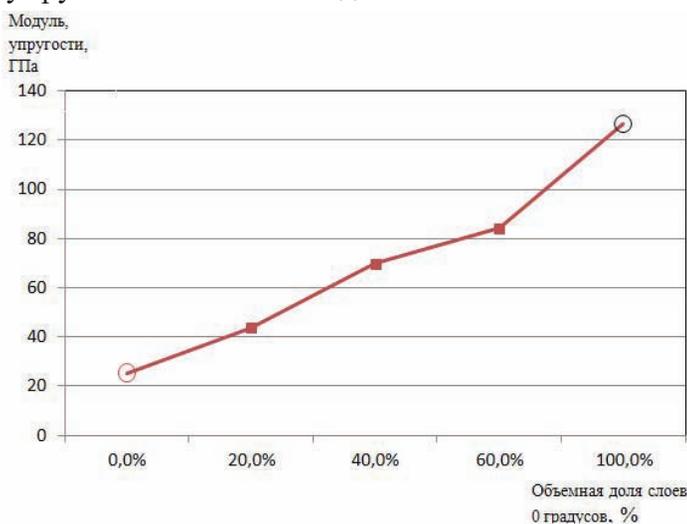


Рис. Зависимость модуля упругости от доли нулевых слоев:

- - экспериментальные данные;
- - прогнозные данные

Для более точного расчета значений E11, E22 и вычисления G12 был проведен вариационный расчет в программной системе КЭ анализа ANSYS, был проведен

параметрический анализ. Для образцов задавалось удлинение, а исходные значения E11, E22 и G12 и напряжения в модели являлись параметрами. Значения этих параметров непрерывно изменялись в пределах заданного диапазона.

В результате расчета получили влияние входных параметров E11, E22 и G12 на выходные параметры (нормальные напряжения) и их оптимальные значения, удовлетворяющие целевой функции (нормальные напряжения).

Расхождение в % между экспериментом и расчетом в значении модуля, полученного при вариации параметров, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Степень сходимости расчетных данных и эксперимента при оптимизации

	Укладка	Степень совпадения, %
Тип 1	$(0_8/\pm 45_2 \times 4/90_4)$	98,30558
Тип 2	$(0_4/\pm 45_2 \times 6/90_4)$	99,97479
Тип 3	$(0_{12}/\pm 45_2 \times 2/90_4)$	99,80187
Тип 4	$(0_3/\pm 45_2 \times 3/90_3)$	63,93381

Выводы:

В данной работе удалось на основании испытаний на растяжение образцов углепластика с различной укладкой вычислить упругие свойства E11, E22 и G12 монослоя композиционного материала. Таким образом, можно оценить теперь влияние выбранной технологии на свойства монослоя. Результаты работы, включая методологию расчета, могут быть использованы для паспортизации слоистых композитов, полученных по различным технологиям: автоклавной, технологии инфузии и технологии RTM.

Измерения могут быть проведены на образцах с укладками типовыми для разрабатываемого изделия.

#### Литература

1. Браутман Л. Механика композиционных материалов. 1978. Т. 2. 568 с.
2. Фудзии Т. Механика разрушения композиционных материалов. 1982, 232 с.
3. Любин Д. Справочник по композиционным материалам. Книга 2. 1988, 581 с.
4. Алфутов Н.А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. 1984. 264 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БИСМАЛЕИМИДНЫХ И ЭПОКСИИМИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ИХ ОСНОВЕ

*В.Н.Мосиук, О.В.Томчани, М.А.Сидоренко, С.В.Ворвуль, Я.М.Портнова*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

В условиях интенсивно развивающейся техники доля потребления полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях промышленности (авиакосмическая, ракетостроение, строительство, ветроэнергетика и др.) неуклонно растет. Одновременно возрастают и требования к свойствам ПКМ. Лимитирующим звеном в создании тепло- и термостойких ПКМ является полимерная матрица. Для ее изготовления используется широкий круг синтетических смол, однако традиционно термостойкие термореактивные связующие для высококачественных ПКМ создаются на основе фенолоформальдегидных, полифункциональных эпоксидных, цианатных и полиимидных смол. Наибольшей теплостойкостью обладают полиимидные связующие типа PMR, однако их применение ограничено высокой стоимостью. Повышенный интерес к бисмалеимидным материалам определяется доступностью исходных мономеров различного строения, хорошей технологичностью и относительно невысокой стоимостью.

В настоящей работе представлены исследования свойств бисмалеимидного и эпиксиимидного связующих, а также препрегов и углепластиков на их основе на примере разработанных в ОАО «ОНПП «Технология» связующих БМИ-3 и ТЭИС-33М.

Связующее ТЭИС-33М (ТУ 1-596-444-2007) представляет собой расплавную композицию полифункциональных эпоксидных и бисмалеимидной смол и ароматического амина в качестве отвердителя, связующее БМИ-3 (ТУ 1-5960489-2012) - эвтектическую смесь бисмалеимидов, модифицированную добавками на основе бензофенона и бисфенола А.

На рис. 1 представлено сравнение реологических свойств разработанных связующих, из которого видно, что для композиций на основе бисмалеимидных смол характерна достаточно широкая область вязкотекучего состояния и низкое значение минимальной вязкости. С одной стороны, высокая текучесть связующего способствует хорошей пропитке наполнителя, особенно при использовании инфузионных методов формования, а, с другой – может стать причиной высокой пористости композиционных материалов при автоклавном формовании. Поэтому во втором случае при выборе режимов формования ПКМ необходимо принимать меры для минимизации потерь связующего.

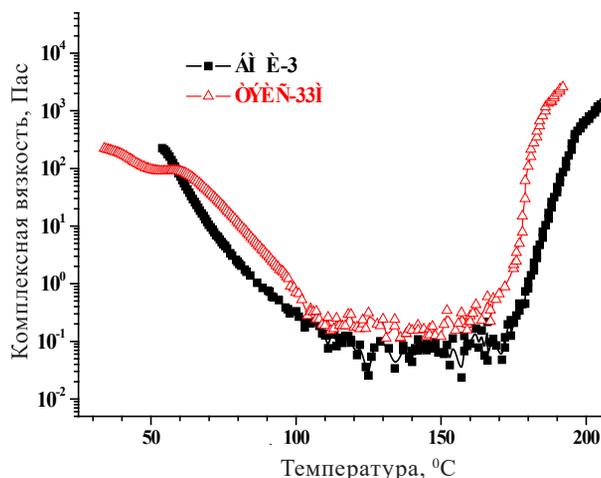


Рис. 1. Сравнение комплексной вязкости связующих

Для исследования свойств композиционных материалов на основе разработанных связующих были изготовлены углепластики с использованием углеродных наполнителей фирмы «Porcher Industries», Франция: ткани арт.03692 (связующее БМИ-3) и однонаправленной жгутовой ткани арт.04500 (связующее ТЭИС-33М). На рис. 2 представлены динамические механические свойства углепластиков, исследованных в режиме трехточечного изгиба при частоте приложения нагрузки 1 Гц.

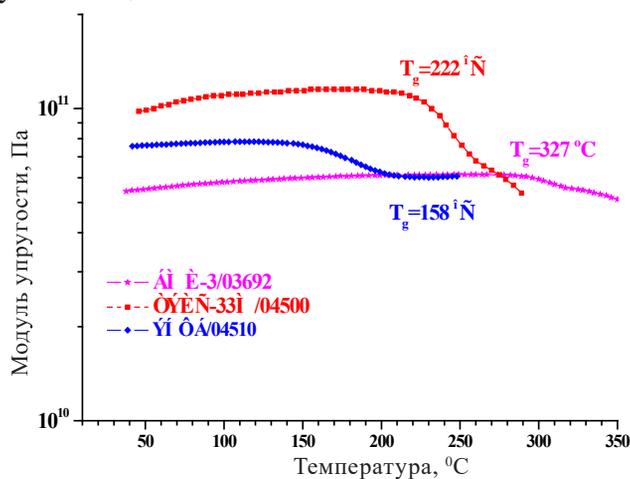


Рис. 2. Температурная зависимость модуля упругости углепластиков на основе связующих БМИ-3 и ТЭИС-33М

Матрицам на основе термостойких термореактивных смол свойственна повышенная хрупкость и разрушение при низких напряжениях и недостаточно большой пластической деформации. Величины критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1C}$  и критической скорости высвобождения упругой энергии  $G_{1C}$ , характеризующие вязкость разрушения (трещиностойкость), для таких материалов низкие и обычно составляют соответственно  $0,5-1,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  и  $20-200 \text{ Дж/м}^2$ . Для повышения ударной вязкости и трещиностойкости ПКМ термостойкие связующие, как правило, модифицируют термопластами и каучуками. Нужно

отметить, что разработанное расплавленное связующее ТЭИС-33М обладает повышенной трещиностойкостью даже без такой модификации:  $K_{IC}$  связующего ТЭИС-33М составляет  $1,7 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , а  $G_{IC}$  однонаправленного углепластика -  $1045 \text{ Дж/м}^2$ .

Отличительной особенностью углепластиков на основе связующего БМИ-3 являются высокие показатели предела прочности при межслоевом сдвиге: при комнатной температуре эта величина достигает 65 МПа.

Область применения связующего ТЭИС-33М - изготовление композитной оснастки, связующего БМИ-3 - конструкционные углепластики для применения в узлах мотогондолы и звукопоглощающих конструкциях перспективного двигателя нового поколения для ближне-среднемагистрального самолета.

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ СВЯЗУЮЩИХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГРАФЕНОМ**

*С.В.Бухаров, А.Г.Гуняева, С.Г.Губин, Н.В.Осадчий*

(“МАТИ - Российский государственный технологический университет им. К.Э.Циолковского”, г. Москва, Россия)

Конструкционные углепластики (УП) являются основным композиционным материалом, применяющимся в авиаракетной, атомной, гражданского назначения технике и изделиях.

Широкое применение конструкционных углепластиков в различных отраслях промышленности стало возможным вследствие присущего им комплекса конструкционных и специальных свойств, недостижимых в традиционных металлических материалах.

В авиационной промышленности конструкционные углепластики применяются взамен алюминиевых и титановых сплавов, что обеспечивает снижение массы планера летательных аппаратов до 20% масс, включая двигатели. К настоящему времени за рубежом объем применения конструкционных углепластиков в составе планера некоторых типов летательных аппаратов составляет 30 – 40% масс., что дает не только снижение массы всей конструкции, но и снижение трудоемкости и простоты обслуживания летательных аппаратов.

Важной проблемой, связанной с обеспечением надежности эксплуатации современной авиационной техники, является обеспечение молниезащищенности самолетных конструкций, особенно с учетом планов Европейского Содружества создать самолет, доля полимерных композиционных материалов в котором составит 60% масс., что позволит снизить стоимость его производства на 15 - 20%. Поскольку конструкционные углепластики являются слабыми проводниками (их сопротивление на 3-4 порядка выше, чем у металлов), незащищенные углепластиковые конструкции при поражении молнией получают повреждения, не допустимые по ресурсным и эксплуатационным требованиям. То есть применение конструкционных углепластиков в конструкции летальных аппаратов возможно

только при условии их молниезащищенности.

Одним из способов защиты УП от возможного поражения молнией является создание молниезащитного покрытия, состоящего из того же композиционного углепластика, но отличающегося по своей природе матрицы, составу и структуре от обычного конструкционного материала, применяемого для изготовления обшивок деталей летательного аппарата. Отличительной чертой такого покрытия является введение в его состав токопроводящих углеродных частиц, таких как графены. Находясь на поверхности углеродных волокон, они придают волокну повышенную поверхностную электропроводность, а введенные в состав матрицы увеличивают высокотемпературную тепло- и электропроводность в трансверсальном направлении (перпендикулярно расположению плоскости слоев композита), что позволяет включать в молниезащитное покрытие (МЗП) два и более поверхностных слоя.

Целью данной работы являлось исследование и установление зависимости физико-механических свойств углепластика, модифицированного наночастицами, от содержания в составе эпоксидных матриц и фенолоформальдегидных матриц молниезащитного слоя, равномерно распределенных по объему углеродных наночастиц графена и определение оптимальной концентрации их в ее составе, разработка технологии получения углепластиков молниезащитного покрытия.

Для молниезащитного покрытия на основе углеродных наполнителей и полимерных связующих, модифицированных наночастицами были выбраны: равнопрочная ткань саржевого плетения марки УТ-900-3к, термостойкое эпоксидное связующее ВС-2526к, и фенолофурфурольное – ОН; углеродный наномодификатор – графены. Покрытие состоит из 2-х слоев УП и вводится в состав детали при ее формовании или может напрессовываться через подслой клея на готовую деталь. Слои углеродной ткани укладываются под углами  $[0^\circ, 45^\circ]$  относительно направления основы.

Исследования молниестойкости углеродных материалов и МЗП: испытания проводились в лабораторных условиях при воздействии токов, имитирующих воздействие молнии в зоне смещающихся разрядов ( $I=200 \text{ кА} \pm 10\%$ ;  $Q=20 \text{ Кл} \pm 20\%$ ) на специальном устройстве с коаксиальным подводом тока молнии к образцу.

Была определена эффективность молниезащитного покрытия на основе углеродных наполнителей и полимерных связующих, модифицированных наночастицами, по сравнительной оценке экспериментальных данных. Введение модификаторов – графенов МЗП, минимизируются диэлектрические свойства матрицы и увеличиваются трансверсальные тепло- и электропроводящие характеристики композиции более чем в 2 раза, способствуя многовекторности рассеяния тока молнии за счет включения в работу нескольких слоев МЗП и разориентации электрической энергии одновременно в 8-ми и более направлениях, что в соответствии с законом Джоуля – Ленца снижает плотность тока в проводнике, а также тепловой эффект от второй электротермической составляющей и внутренние разрушения конструкции. МЗП с наномодификатором обладают повышенными упруго-прочностными свойствами материала в трансверсальном направлении на 10-15%, что увеличивает сопротивление электродинамической составляющей прямого молниевого удара и сокращает площадь расслоения

и глубину поражения. Использование термостойких связующих и внедрение в межслоевое пространство углеродных наночастиц значительно сокращает разрушения, возникшие в результате взрывоопасных последствий деструктивных процессов, что устраняет сквозной пробой, прогар и расщепления материала конструкции.

При использовании МЗП исключено протекание коррозионных процессов на границе конструктивная часть – молниезащитное покрытие, как в случае использования МЗП из бронзовой сетки.

## **ВЛИЯНИЕ ФЕРРИТОВЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ СЕТЧАТОЙ МАТРИЦЫ АПИ**

*М.И.Долгова, М.А.Станкой, И.П.Мийченко, С.В.Бухаров*

(ФГБОУ ВПО “МАТИ - Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского”, г. Москва, Россия)

Разработанные в настоящее время радиопоглощающие материалы на основе традиционных типов полимерных матриц обеспечивают уровень рабочих температур не выше 200°C. Однако имеются теплонагруженные детали и конструкции, требующие более высоких рабочих температур (плоть до 400-450°C). Таким требованиям соответствуют полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе сетчатых имидных матриц, например, матриц АПИ.

Для обеспечения радиопоглощающих свойств целесообразно использовать принцип целенаправленной модификации имидной матрицы. Известно, что высокие радиопоглощающие свойства можно обеспечить применением в качестве модификаторов ферритовых наночастиц, например, гексаферрит бария (ГФБ), обладающего магнитомягкими свойствами. Однако введение любых модификаторов в состав АПИ может изменить направление реакций синтеза сетчатого полиимида из смесей имидообразующих мономеров.

Исследовано влияние ферритовых частиц на процессы синтеза имидной матрицы АПИ-3 на поверхности углеродного наполнителя и термоустойчивость матрицы. По данным вязкоупругих свойств было определено, что введение даже 3% масс. ГФБ характеристические температуры образования полиимида смещаются в область более высоких температур на 50-70°C. Процесс имидизации проходит в том же температурном интервале, что и для АПИ-3, но интенсивность процесса по виду зависимости показателя механических потерь значительно ниже, чем для АПИ-3, так же, как и в случае использования в качестве наполнителя для АПИ-3 базальтоволоконистых наполнителей, содержащих ионы железа.

При исследовании кинетики отверждения и хемореологического поведения установлено, что процесс отверждения наиболее интенсивно начинает развиваться только после 370°C в отличие от 300°C для чистого АПИ-3. Установлено, что при отверждении при 340°C на кинетических зависимостях регистрируется стеклование системы и процесс отверждения останавливается, степень отверждения составляет всего 35,6%. Отверждение при 370°C проходит уже на большую глубину и

степень отверждения составляет 57,5%, в то время как для АПИ-3 уже при 300°C достигается степень отверждения 70%. Наиболее приемлемой температурой отверждения для АПИ-3/ГФБ является 390°C, при этом степень отверждения достигает значения 74% (для АПИ-3 уже после отверждения при 350°C степень отверждения составляет 83%). Время отверждения также увеличивается с 70 минут для АПИ-3 до 110 минут для АПИ-3/ГФБ при максимальных температурах отверждения. Присутствие ионов железа повышает термоустойчивость системы: термоокислительная деструкция по данным механической спектроскопии не развивается вплоть до 500°C.

Материалы считаются работоспособными, если при повышенных температурах они теряют не более 30% исходных прочностных свойств. С этой точки зрения модифицированный состав АПИ-3 с наночастицами гексаферрита бария (АПИ-3/ГФБ) можно отнести к термоустойчивым составам, которые могут обеспечить работоспособность вплоть до 500°C, так как степень падения жесткости составов, отвержденных даже при  $T_{отв}$  300°C, составляет 25%, а при 390°C всего 9%.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

*П.Н.Шкатов<sup>1</sup>, Г.А.Дидин<sup>1</sup>, К.В.Мякушев<sup>1</sup>, П.В.Мухеев<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup> ООО “Главдиагностика”; <sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)

Задача исследования состояла в оценке возможностей вихретокового метода неразрушающего контроля для выявления дефектов сплошности в углепластиковых материалах. Для слоистых углепластиковых материалов типичны и наиболее опасны дефекты типа расслоений, обусловленные потерей связи между слоями армирующего материала за счет недостатка связующего или под действием механических напряжений, а также под воздействием удара.

В работах [1-10] описаны результаты исследования применения вихретоковых преобразователей с ортогональными обмотками - возбуждающей и измерительной - для выявления механических повреждений углепластиковых пластин. Нами была предпринята попытка проверить возможность применения для этой цели вихретокового преобразователя (ВТП) другой традиционной конструкции (рис. 1).

Для оптимизации геометрических размеров ярма и обмоток была разработана математическая модель поля вокруг расслоения, как показано на рис. 2.

Для проверки полученных результатов была использована панель из углепластика с заранее вложенными дефектами из фторопласта (круглыми 10 мм и квадратными 20x20 мм) на разной глубине. Пластина была изготовлена методом вакуумной инфузии из углеродной ткани на связующем Этал-Инжект-SLM, производства ЗАО «ЭНПЦ Эпитал».

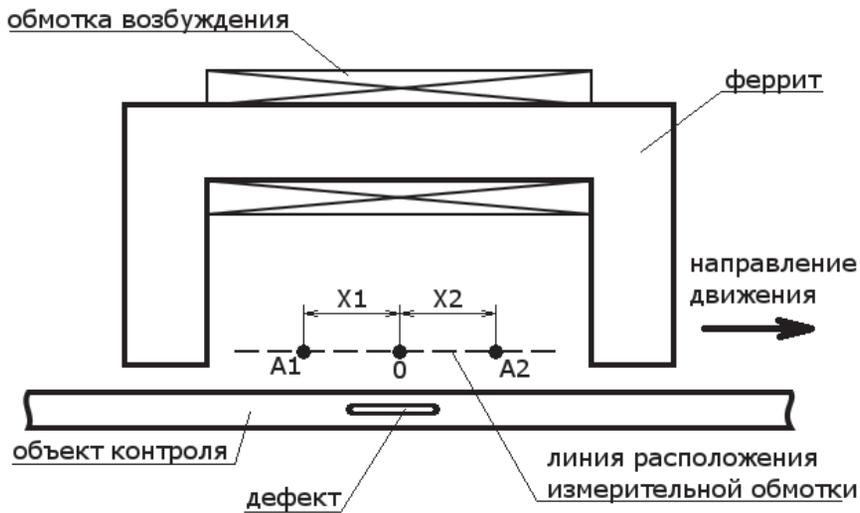


Рис. 1. Принцип действия датчика

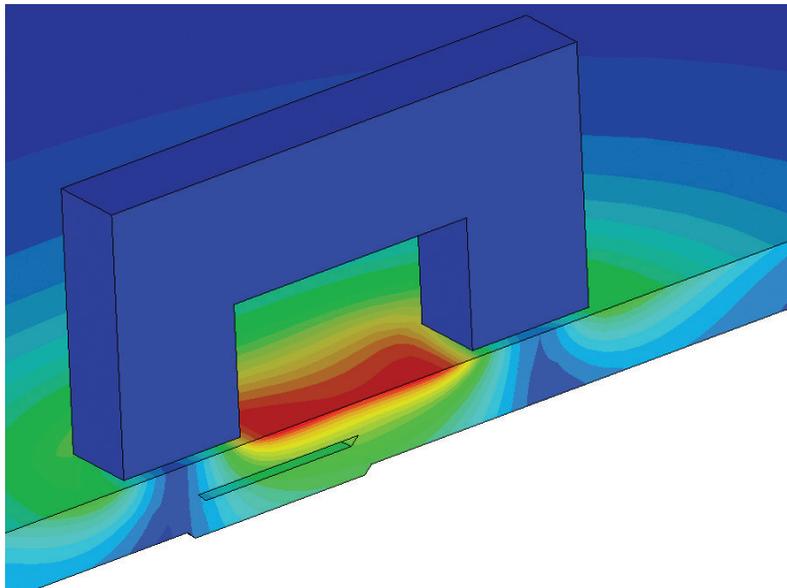


Рис. 2. Структура поля вокруг датчика в слоистом композите

Контроль осуществлялся путём сканирования ВТП над поверхностью объекта. Один из сканов на частоте 250 КГц представлен на рис 3. Края имитатора расслоения были надежно обнаружены.

Проведенные исследования показали, что вихретоковый метод может применяться для контроля качества углепластиков.

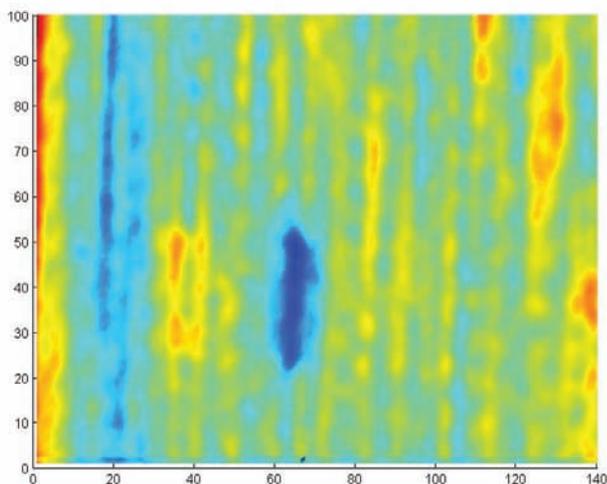


Рис. 3. Визуализация вложенного дефекта при сканировании

С помощью известных средств вихретоковым методом выявляются дефекты типа разрывов.

Проведенные исследования показали возможность выявления дефектов типа расслоений с помощью специализированных вихретоковых преобразователей.

#### Литература

1. Koyama K., Hoshikawa H., Hirano T. Investigation of impact damage carbon fiberrainforced plastic (CEPR) by eddy current non destructive testing//International Conference NDT in Canada 2011.– 2-4 November 2011, Montreal, Quebec, Canada.
2. A.R Valleau, “Eddy current nondestructive testing of graphite composite material”, Materials Evaluation 48-2, p.230- 1990.
3. M.Gvishi, A.H.Kahn, and M.L.Master, “Eddy current testing of carbon-carbon composite”, Review of Progress in QNDE, Plenum Press 11, p.289- 1992.
4. M.P. de Goeje and K.E.D. Wapenaar, “Non-destructive inspection of carbon fiber-reinforced plastics using eddy current methods”, Composites 23-3, pp.147-157 1992.
5. R.Lange and G.Mook, “Structural analysis of CFRP using eddy current methods”, NDT&E international 27-5. p.241- 1994.
6. X.E.Gros and W.Lowden, “Electromagnetic testing of composite materials”, Insight 37-4, pp.290-293 1995.
7. K.Koyama, K.Miki, and H.Hoshikawa, “Eddy Current Non-Destructive Testing for CFRP”
8. US-Japan Conference on Composite Materials 2008, SHM-1 1, pp. 1-6 2008
9. K.Koyama, H.Hoshikawa and G.Kojima, “Eddy current non-destructive testing for carbon fiber-reinforced composites (CFRP)”, Proceeding of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference 2010.
10. Сясько В.А., Чертов Д.Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей //В мире неразрушающего контроля.– 2012.– №2(56).– С. 9-21.

## К ВОПРОСУ ОБ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ВЫТРАВЛЯЕМЫМ ОПРАВКАМ

*В.Б. Тайгин, Г.Н.Грудинин, В.В.Болгов*

(ОАО “Информационные спутниковые системы” им. акад. М.Ф. Решетнева”,  
г. Железногорск, Россия)

Приоритетной задачей при разработке космических аппаратов (КА) является обеспечение высокой жесткости и прочности разрабатываемой конструкции при наименьшей ее массе. Наибольшие требования по жесткости и стабильности размеров предъявляются к зеркальным антеннам КА, поэтому при их разработке необходимо использовать материалы с высокими удельными механическими характеристиками и малым коэффициентом линейного температурного расширения (КЛТР). Этим требованиям соответствуют полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе высокомодульных углеродных волокон. Из ПКМ изготавливают различные части антенн, такие, как рефлекторы, опоры офсетных антенн, штанги, спицы и т.д.

Возможность изготовления той или иной детали из ПКМ зависит от ее формы, которая определяет возможность извлечения оправки для формования из этой детали. Изготовление элементов с замкнутым профилем с изгибами по длине, с полузакрытыми полостями, с переменным сечением невозможно по традиционной технологии, так как невозможно извлечь оправку. Вот почему в ОАО «ИСС» развитие получила технология изготовления деталей из ПКМ по вытравляемым оправкам. Способ включает следующие стадии: изготовление полой оправки с наружной формообразующей поверхностью предполагаемого изделия, укладку на нее препрега углеродного волокна, полимеризацию, механическую обработку (при необходимости) и удаление оправки путем химического травления. Рассмотрим несколько примеров изготовления в ОАО «ИСС» деталей по предлагаемой технологии.

На рис. 1 изображена зеркальная офсетная антенна. Опора антенны – 3 представляет собой интегральную оболочку из ПКМ, имеющую замкнутое прямоугольное сечение и изогнутую форму, адаптированную для закрепления на ней рефлектора – 2, облучателя – 1 и установку на КА. Фотография опоры представлена на рис. 2.

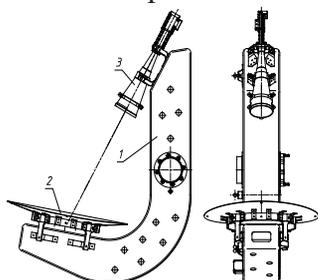


Рис.3. Офсетная антенна:

- 1 – опора;
- 2 – рефлектор;
- 3 – облучатель.



Рис.2. Опора антенны

Формование оболочки осуществляется в два этапа. Вначале, происходит предварительная полимеризация на оправке, при которой обеспечивается вакуумное давление, но температура и время выдержки меньше полной полимеризации связующего. После чего выполняется механическая обработка на оправке: выполняются отверстия сквозь ПКМ и оправку, таким образом, вскрывается внутренняя полость оправки для затекания в нее раствора при травлении. После травления проводят сушку и окончательную полимеризацию. Предварительная полимеризация проводится в связи со значительной разницей КЛТР материала оправки (алюминий) и оболочкой из ПКМ.

На рис. 3 показан процесс изготовления другой детали по предлагаемой технологии. Это стойка ферменной конструкции для установки датчиков системы ориентации КА.



Рис.3. Процесс изготовления фермы из ПКМ

Отличительной особенностью этой детали является сложное пространственное расположение ее элементов (стержней и узлов). Поэтому невозможно использовать вакуумную опрессовку при формовании. При изготовлении использован термокомпрессионный способ формования, основанный на термоупругом расширении резины. При таком способе поверх препрега укладывается формирующая многослойная оболочка по следующей схеме: 1) фторопластовая разделительная пленка; 2) первый слой «сырой» резины; 3) цулаги; 4) второй слой «сырой» резины; 5) стеклоткань. Такая оболочка в процессе формования обеспечивает достаточное давление на препрег для получения качественного ПКМ. Оправка для данной детали представляет собой ферму из алюминиевых труб квадратного сечения, соединенных при помощи сварки. В узлах, где угол между стержнями  $<90^\circ$ , устанавливают накладки, отформованные из листового металла, которые образуют более плавный переход. Процесс формования также состоит из двух этапов: предварительная полимеризация на оправке и окончательная без оправки.

Еще один тип деталей, изготавливаемых по вытравляемым оправкам, представлен на рис. 4а-4в. Это гофрированный рупорный излучатель, используемый в антеннах КА. Традиционно такие рупоры изготавливаются путем механической обработки из металла. Металлические рупоры имеют высокую массу (до 20 кг), что делает проблематичным их установку в антенну и на КА. Рупор из ПКМ имеет массу в 2,5 раза меньше по сравнению с металлическим.

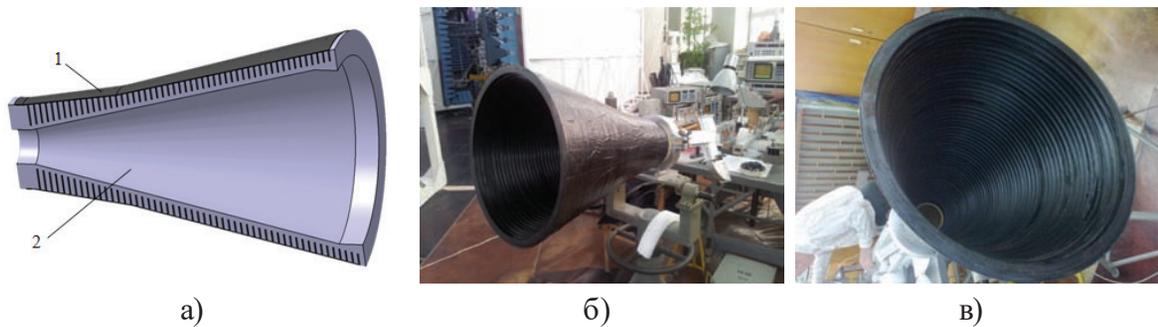


Рис.4. Гофрированный рупор из ПКМ:  
 а) рупор на оправке: 1 – ПКМ, 2 – оправка%;  
 б), в) – фотографии опытного образца

Изготавливается рупор на специальной оправке, повторяющей внутреннюю геометрию рупора. В проточки на оправке методом автоматизированной намотки укладывается углеродное волокно, пропитанное связующим, при этом обеспечивается натяжение волокна, необходимое для его опрессовки. После заполнения всех проточек укладывают материал оболочки, в данном случае ткань из углеродного волокна. Затем материал ребер и оболочки проходит совместную предварительную полимеризацию под вакуумным либо автоклавным давлением. Производится механическая обработка торцов оболочки на оправке, затем оправка удаляется методом химического травления, после чего проводится окончательная полимеризация.

Представленные конструкции представляют собой монолитные детали из ПКМ, без дополнительных соединений. Отсутствие элементов соединения позволяет снизить массу конструкции и достигнуть высоких механических характеристик, что подтверждается расчетами и испытаниями. Следующий этап развития этой технологии заключается в использовании оправок из вымываемого водой материала, что позволит снизить стоимость изготовления продукции.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

*А.С.Бородулин* (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) составляют заметную часть во вновь проектируемых или модернизируемых изделиях техники, в том числе и транспортной. Автомобилестроение по объемам и темпам применения ПКМ в течение долгого времени отставало от авиационной и ракетно-космической промышленности. Это отставание произошло не только в России, но и во всем мире и связано оно не только с высокой стоимостью ПКМ, но и с отсутствием технологий, позволяющих изготавливать детали массового производства. По мере снижения стоимости компонентов ПКМ и развития новых технологий, в первую очередь методов прямого формования, объемы применения ПКМ в конструкциях автомобилей стали расти очень высокими темпами.

Целью настоящей работы является исследование реологических свойств и кинетики процессов пропитывания волокнистых наполнителей различными связующими.

Традиционно, при изготовлении крупногабаритных деталей использовали метод выкладки и препреговые технологии, основным недостатком которых являются высокая трудоемкость и относительно низкое качество, что связано с высокой пористостью получаемых изделий. В последнее десятилетие разработаны методы прямого формования, для которых не требуется предварительное изготовление препрега и процессы пропитки связующим тканого наполнителя совмещены с процессами формования. Одним из таких новых методов является инфузионная пропитка под вакуумом –VARTM (VacuumInfusion).

Для изучения реологических свойств связующих, которые используются в технологиях VacuumInfusion, был спроектирован и изготовлен специальный стенд, на котором проведены экспериментальные исследования большой группы связующих, отличающихся различными значениями динамической вязкости. В качестве наполнителей использованы стеклянные и углеродные волокна.

В результате проведенных исследований были разработаны математические модели, описывающие процессы течения связующих, и комплексная методика оценки реологических характеристик системы связующее-волокнистый наполнитель, позволяющая изучать кинетику процессов пропитывания в режимах смачивания и фильтрации. Установлено, что наиболее высокое качество пропитки достигается в турбулентном режиме течения связующего, поскольку при этом обеспечивается полнота межкомпонентного взаимодействия и достигается максимальная адгезионная прочность между компонентами композита.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ШТИФТОВ МЕТОДОМ ПУЛТРУЗИИ**

*В.В.Рзянкин, С.В.Бухаров, Я.Н.Красенков*

(ГОУ ВПО “МАТИ” - Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского; ООО “Суперпласт”, г. Москва, Россия)

За последние десятилетия в связи с колоссальными темпами развития науки и техники наблюдается устойчивый рост применения композиционных материалов практически во всех областях жизнедеятельности человека. При этом значительную долю рынка таких материалов занимают полимерные волокнистые композиционные материалы (ПВКМ). С момента своего внедрения в такие сферы, как машиностроение и строительство, электро- и радиотехника, электроника и до настоящего времени разработка новых видов ПВКМ и оптимизация свойств существующих является одним из определяющих факторов, направленных как на разработку новых инновационных подходов в технологии, так и на уровень эксплуатационных свойств получаемых изделий. Активно происходит трансфер специальных машиностроительных технологий в другие отрасли экономики

страны. Не остается в стороне и такая социально значимая область, как медицина.

На сегодняшний день в стоматологической практике при восстановлении разрушенной коронки зуба для протезирования в качестве армирующего элемента конструкции широко применяются внутриканальные штифты на основе ПВКМ. После удаления всех кариозных тканей, обработки и пломбирования каналов, врач-стоматолог проводит подготовку зуба для дальнейшей его реставрации с использованием штифта: придается определенная форма остаткам коронковой части зуба, формируется канал точно под размер штифта. Далее при помощи специальных адгезивных «цементов» штифт фиксируется в канале зуба, и на него «наращивается» искусственная коронковая часть с соблюдением анатомических особенностей данного зуба.

Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день одним из наиболее оптимальных продуктов для укрепления поврежденного зуба среди внутриканальных штифтов являются штифты на основе ПВКМ, которые относятся к штифтам третьего поколения. Такие штифты представляют собой полимерные композиты с продольной схемой армирования, получаемые на основе терморезистивных связующих.

В качестве наполнителя, в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик, могут применяться жгуты из нитей на основе стеклянных, кварцевых или углеродных волокон. Штифты на основе стеклянных и кварцевых волокон больше рекомендованы для реставраций на фронтальных зубах, т.к. дают лучший эстетический результат, а углеродных - на жевательных, поскольку их механические характеристики выше, что в данной работе подтверждено компьютерным моделированием напряженно-деформированного состояния системы: «коронка зуба- штифт- челюстная кость».

Внедрение в стоматологическую практику стекловолоконных штифтов оказало огромное влияние на методики восстановления зубов. К преимуществам таких штифтов по сравнению со штифтами из «традиционных», например, титановых материалов относятся, во-первых, прочность стекловолоконных штифтов, которая практически не уступает металлическим. При этом модуль упругости таких штифтов сопоставим с модулем упругости тканей зуба, что исключает перелом корня при функциональных нагрузках. Во-вторых, особенностью таких штифтов является их биосовместимость и рентгеноконтрастность. В-третьих, возможна наномодификация и введение лечебных средств в состав таких штифтов. К достоинствам стекловолоконных штифтов следует также отнести их сравнительно низкую стоимость.

Технология получения штифтов включает две основные стадии - жидкофазную пултрузию непрерывного стержня на основе волокнистого полуфабриката выбранного состава и механическую обработку с целью получения штифта заданного размера (длина, диаметр) и формы (цилиндр, усеченный конус и др.).

Применение дополнительной термообработки обусловлено необходимостью доотверждения связующего (до механообработки) и снятия остаточных напряжений (после механообработки), а следовательно, повышения уровня эксплуатационных характеристик изделия.

Одним из важнейших факторов, определяющих уровень эксплуатационных

свойств стекловолоконных штифтов, является оптимальный состав и режим отверждения связующего.

Для получения матрицы обычно используют отверждающиеся эпоксидные смолы, в частности, диановые смолы на основе дифенилолпропана (марка ЭД-20) и отвердителей, как правило, аминных. Однако такие составы обладают существенным недостатком - использование аминных отвердителей не позволяет получать изделия необходимой цветовой гаммы и для полного отверждения требуется довольно длительное время (сутки или десятки суток), что является весьма не технологичным и практически не позволяет использовать традиционные составы для изготовления штифтов. Для обеспечения необходимого сочетания технологических и эксплуатационных свойств необходимо оценить возможность использования других типов смол и отвердителей: выбрать или разработать новые составы эпоксидных связующих, характеризующихся более высокими скоростями отверждения; исследовать кинетические закономерности процессов отверждения новых составов и определить оптимальные режимы пултрузии композитных заготовок для получения штифтов на основе новых составов эпоксидных связующих.

Были исследованы составы на основе бесцветной эпоксидной смолы «№ 128» (аналог марки ЭД-20). В качестве отвердителя предложено использовать аддукт триэтилентетрамина с эпоксидной смолой - «№ 620». Для регулирования вязкости на этапе пропитки наполнителя были опробованы активные разбавители ДЭГ-1 и DER 732P (продукт реакции эпихлоргидрина и полипропиленгликоля), представляющие собой низковязкие эпоксидные смолы.

В качестве волокнистого наполнителя были выбраны жгуты на основе аппретированных кварцевых и стеклянных волокон.

Было установлено, что введение разбавителя ДЭГ-1 не позволяет обеспечить получение изделий требуемой цветовой гаммы (белых или прозрачных), поэтому для дальнейших исследований выбран его импортный, более светлый аналог DER 732P.

Для проведения исследования выбран современный информативный метод - механическая спектрометрия, который позволяет получать комплекс данных об изменении реологических состояний исходных композиций в процессе формования полимерных матриц в присутствии наполнителей в широком интервале температур и в конечном итоге - диаграмму хемореологических состояний исследуемого связующего.

Исследования выполняли на прямом крутильном маятнике, позволяющем оценивать кинетику отверждения связующего по параметрам свободно затухающих крутильных колебаний пропитанной им нити. Через эти параметры легко определить показатели относительного изменения вязкоупругих свойств образца - относительный показатель жесткости ( $AG$ ) и тангенс угла механических потерь ( $tg\delta$ ). Колебания задавались через определенные промежутки времени в процессе изотермического отверждения связующего.

Получаемые результаты выражались в виде кинетических кривых в координатах  $IgAG - t$  и  $tg\delta - t$ , характеризующих вязкоупругое поведение связующего в процессе отверждения. По этим кривым в дальнейшем определялось

время гелеобразования и время отверждения связующего.

Установлено, что время гелеобразования состава «смола-отвердитель» варьируется от 16 до 24 мин., время полного отверждения - от 30 до 50 мин. (при 100°C и 60°C, соответственно).

Введение в состав связующего разбавителя DER 732P в количестве, рекомендуемом производителем (10-20%), позволяет снизить вязкость до уровня, необходимого для пропитки наполнителя, однако при этом жизнеспособность связующего, отверждаемого при 60°C, снижается до 12 мин., а общее время отверждения увеличивается до 77 мин.

По результатам стандартных испытаний показатель основных физико-механических свойств соответствует традиционным стеклопластикам с однонаправленной схемой армирования волокон. В настоящее время проводятся физико-механические исследования стойкости полученных образцов штифтов в различных органических средах, имитирующих натурные условия эксплуатации.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕК КОРПУСОВ ГОЛОВНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ**

*Н.В.Мухин, А.К.Хмельницкий* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия);

*Н.Г.Александров, И.Г.Оленин, С.В.Телегин*

(ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева», г. Москва, Россия)

ГКНПЦ им. М.В.Хруничева - КБ «Салют» - РКЗ, являясь одним из передовых предприятий Российской ракетно-космической отрасли, продолжает успешно развивать направление по внедрению композиционных материалов (КМ) в конструкциях разрабатываемых изделий. В мировой отрасли по созданию изделий авиационно-космической техники установилась устойчивая тенденция их модификаций, с целью повышения энергомассовых характеристик. Одним из направлений модификации является широкое внедрение композиционных материалов в силовые корпусные конструкции ракет-носителей (РН), разгонных блоков (РБ), космических аппаратов (КА). Аналогичные мероприятия не могли обойти стороной и головные обтекатели (ГО), в конструкции которых уже давно используются КМ.

В данной работе на примере головных обтекателей, эксплуатируемых на РН «Протон М», а таковых является четыре типа, прослеживается эволюция проводимых доработок, уменьшающих массу агрегата, при этом не снижающих эксплуатационные характеристики ГО.

С выходом ГКНПЦ им. М.В. Хруничева в 90-х годах прошлого столетия на мировой рынок космических услуг по выведению КА, для конфигурации средств выведения РН «Протон К»+РБ «ДМ2» потребовалось создание унифицированного головного обтекателя (УГО), обеспечивающего запуски большого спектра различных коммерческих КА. Учитывая сжатые сроки на разработку УГО, создание корпуса выполнялось с максимальным использованием задела предыдущих изделий

и привлечением предприятий, уже имевших опыт изготовления трехслойных конструкций из КМ. В новом проекте корпус состоял из двух стеклопластиковых и двух углепластиковых обечаек, изготовление стеклопластиковых обечаек было заимствовано из предыдущих изделий, а углепластиковые – разработаны вновь. В дальнейшем было принято решение о модификации УГО. Стеклопластиковые обечайки заменили на угольные на основе импортного наполнителя, что привело к снижению массы на 300 кг.

Создание конструкторским бюро «Салют» собственного разгонного блока «Бриз М» потребовало разработки новых типов ГО, из которых наиболее удачным является ГО Ø 4350 мм и длиной 15255 мм, имеющий также укороченный вариант длиной 13305 мм за счет удаления одной секции цилиндрической обечайки корпуса. За время их эксплуатации каждый из вариантов претерпел три вида модификаций, приведших к снижению массы по сравнению с первоначальным исполнением на 405 кг. Снижение массы оснащенного ГО было достигнуто за счет внедрения в конструкцию корпуса новых материалов с меньшим удельным весом и рядом конструктивных улучшений. При более подробном рассмотрении мероприятий по снижению массы необходимо отметить переход на использование импортного углеродного наполнителя; клеевой пленки с погонным весом 180 г/м<sup>2</sup> вместо 275 г/м<sup>2</sup>; полимерной заливочной композиции с удельным весом 450 кг/м<sup>3</sup> вместо 560 кг/м<sup>3</sup>; установки в ненагруженных местах трехслойных обечаек алюминиевого сотового заполнителя с размерами ячейки 2,75 мм вместо 2,5 мм. К конструкторским мероприятиям снижения массы надо отнести уменьшение высоты пакета корневой трехслойной обечайки за счет уменьшения высоты сотового заполнителя с 38 мм на 33 мм; замену в носке ГО стеклопластикового вкладыша на полимерную заливочную композицию ПЗ-2 и изменение конструкции корневого алюминиевого стыковочного шпангоута.

Представленный подход в решении задач по снижению массы ГО зарекомендовал себя экономически выгодным по следующим показателям:

- не требуется выпуска большого объема конструкторской документации, а только введение необходимых изменений, приводящих к появлению очередного исполнения в существующей;
- не требуется дорогостоящей стендовой отработки, а только испытания отдельных отсеков или фрагментов наиболее нагруженных элементов корпуса;
- некоторые внедрения могут подтверждаться достаточностью проведения испытаний образцов в рамках стандартов при сдаче готовой продукции заказчику;
- существенное сокращение времени от принятия решения до получения готовой продукции, что позволяет получать дополнительные контракты по выведению КА;
- использование внедренных материаловедческих и конструктивных инноваций при создании новых ГО для перспективных изделий.

Все перечисленные достижения были бы невозможны, если бы ГКНПЦ им. М.В. Хруничева не имел такого надежного партнера, как предприятие ОНПП «Технология». Вот уже двадцать лет нас связывает тесное сотрудничество в создании трехслойных и других конструкций из КМ. Благодаря высококвалифицированным специалистам, работающим на этом предприятии, ГКНПЦ получает качественную

продукцию в виде обечаек корпуса из КМ. Их постоянный поиск новых материалов с улучшенными параметрами позволяет конструкторам при совместной работе создавать лучшие образцы ракетно-космической техники.

## **МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**В.М.Осокин** (Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, г. Пермь, Россия)

В настоящее время использование полимерных композитных материалов находит все большее применение в различных отраслях промышленности. Определение качества продукции во многом зависит от качества производственных процессов, гарантирующих стабильное удовлетворение требований потребителей к выпускаемой продукции. Отсюда следует, что система контроля качества продукции должна охватывать все этапы жизненного цикла изделий. Одним из важнейших направлений контроля качества на этапе изготовления, испытаний и эксплуатации изделий являются неразрушающие методы контроля.

Существуют разные технологии изготовления изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), например, технология RTM (Resin Transfer Molding), вакуумная инфузия, технология автоклавного формования и др. В зависимости от конкретной конструкции изделия возможно образование различных технологических дефектов, таких, как: неприклеи, непроклеи, смещение сот, заполнение сот связующим веществом, отслоение сот трубчатого или сотового наполнителя от оболочки.

Кроме того, существуют дефекты, образовавшиеся в процессе эксплуатации изделий: расслоения, отслоения, трещины, и др.

В работе рассмотрены основные методы неразрушающего контроля, применяемые при контроле изделий из ПКМ.

### **1. Метод ширографии.**

Метод основан на принципе сравнения интерференционных образов двух состояний поверхности объекта: начального и измененного (смещенного или деформационного). Основным носителем информации – спеклграммы получаемые при освещении поверхности объекта контроля четырьмя когерентными лазерными диодами (поз. 3, рис. 1). Вид спекл – картины зависит от пространственных распределений и от случайной разности фаз интерферирующих волн. Затем поверхность объекта контроля под действием вакуумной или термической нагрузки смещается, и сигнал от измененной спекл – структуры, проходя через «сдвигающую оптику» (поз. 2, рис. 1), попадает на матрицу высокочувствительной CCD-камеры (поз. 1, рис. 1). Когда контролируемый объект деформируется под нагрузкой, отраженное лазерное излучение также изменяется. Эти изменения обнаруживаются системой, что дает представление о характере самого дефекта по его реакции на поверхность.

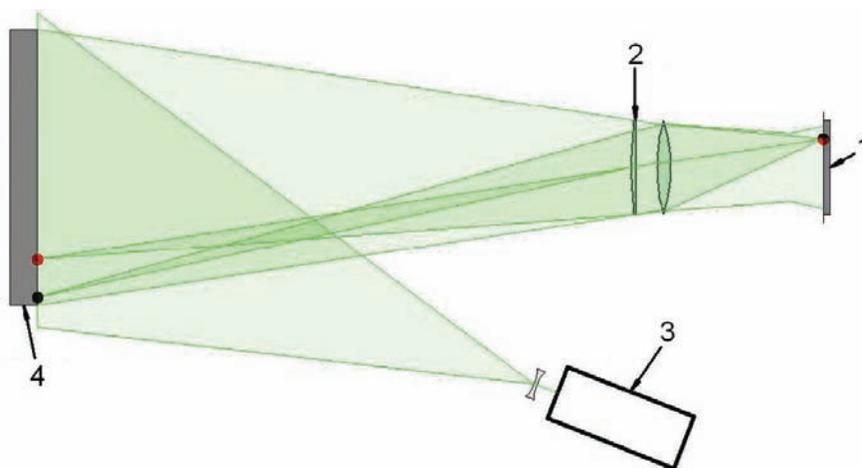


Рис. 1. Принципиальная схема работы системы широкографии:  
1 – матрица; 2 – «сдвигающая оптика»; 3 – лазерный диод; 4 – объект

Данный метод позволяет обнаруживать дефекты типа нарушение сплошности в многослойных конструкциях, отслоение оболочки от сотового или трубчатого заполнителя, расслоения, непрочности, непрочности и т.п. дефекты.

#### 2. Низкочастотный ультразвуковой (теневой) метод.

Метод основан на прохождении ультразвуковых волн через объект контроля (ОК) от излучающего к принимающему пьезоэлектрическому преобразователю. Данный метод используется для обнаружения зон нарушения соединений в многослойных конструкциях и выявления расслоений, пустот, зон повышенной пористости и т.п. дефектов в конструкциях из ПКМ.

#### 3. Вибрационный (волновой) метод.

Метод основан на возбуждении свободных колебаний на участке ОК. Метод реализован на сравнении спектров дефектных и бездефектных участков изделия.

Анализ формы колебаний является эффективным экспериментальным методом определения динамических характеристик конструкций на основе результатов измерений и анализа свободных затухающих колебаний. В результате обработки данных, осуществляемой спектроанализатором, можно получить информацию, необходимую для анализа амплитудно – частотных характеристик (АЧХ) ОК. По изменениям АЧХ можно судить о наличии дефектов в ОК.

#### 4. Акустический импедансный метод.

Акустический импедансный метод предназначен для контроля клеевых, сварных и паяных соединений, имеющих тонкую обшивку, приклеенную или припаянную к элементам жёсткости. Метод основан на оценке изменений механического импеданса ОК, обусловленного наличием дефектов. В бездефектной зоне импеданс определяется размерами, количеством, толщинами и материалами слоев конструкции. В зоне дефекта импеданс зависит от размеров, формы и глубины залегания дефекта.

#### 5. Ультразвуковой метод на фазированных решетках.

Ультразвуковой контроль с использованием фазированной решетки основан на генерации и приеме упругих колебаний. Фазированная антенная решетка

представляет собой преобразователь, состоящий из множества пьезоэлектрических элементов, расположенных в ряд. Этот метод позволяет фокусировать луч по глубине и изменять его относительно апертуры на любой угол. Программное обеспечение дефектоскопа позволяет в реальном времени управлять параметрами ультразвукового луча, фокусным расстоянием и размером фокусного пятна изменяя фазу импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов в многоэлементном преобразователе, а также обрабатывать полученные сигналы.

В результате проведенного анализа выявлены методы неразрушающего контроля, применимые для различных типов конструкций из ПКМ.

## **ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ ПРИ СЖАТИИ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

*А.Г.Попов, Д.И.Савельев* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Сжатие является одним из самых распространенных видов нагружения конструкций. В настоящее время по испытаниям слоистых композитов на сжатие, армированных высокопрочными и высокомодульными волокнами, выпущены несколько различных стандартов – в системах стандартов ASTM, EN, ГОСТ и других. При использовании соответствующих стандартов для однонаправленных и армированных углепластиков необходимо учитывать особенности испытаний образцов из этих материалов.

Главное требование к процессу проведения прочностных испытаний – создание однородного напряженно-деформированного состояния в рабочей части образца – часто является трудно выполнимой задачей. Анизотропия свойств и высокая чувствительность к концентраторам напряжений углепластиков порождают ряд принципиальных трудностей.

При испытаниях композиционных материалов их результаты существенно зависят от способа осуществления граничных условий, то есть от закрепления и нагружения образца. Это явление, характерное для конструкций из сильно анизотропных материалов, представляет собой специфическое проявление принципа Сен-Венана. Анизотропия упругих свойств предъявляет повышенные требования к форме и размерам образца, исключению краевых эффектов (выбору расстояния от захватов до рабочей части), способу передачи нагрузки и закрепления образца, ориентации арматуры, углу вырезания образца [1].

Эти трудности возрастают с повышением степени анизотропии материала, то есть в наибольшей степени они проявляются при испытаниях образцов из однонаправленных композитов.

В качестве альтернативы все чаще используются данные испытаний перекрестно-армированных слоистых материалов для непрямых вычислений свойств однонаправленного композита согласно классической теории композиционных материалов [2].

Можно указать несколько причин в пользу такого подхода. В первую очередь,

это более высокие значения прочности монослоя, что связано с отсутствием преждевременного продольного растрескивания связующего, характерного при нагружении однонаправленных композитов. Во-вторых, при испытании армированных пластиков наблюдается меньший разброс данных, обусловленный меньшей чувствительностью образцов к производственным дефектам при выкладке и порезке образцов. Наконец, слоистые композиты, применяемые в различных конструкциях, имеют сложную схему армирования, где слои, выложенные в одном направлении, соседствуют со слоями, расположенными под другими углами. В таком случае результаты испытаний армированных композитов более репрезентативны, поскольку деформированное состояние слоев, которые соседствуют со слоями, ориентированными под другими углами, отличается от слоев с одинаково ориентированными слоями.

В работе исследовалась прочность при сжатии углепластиков, изготовленных из различных современных тканых и однонаправленных препрегов. В частности, использовались препреги марки HexPly M21 фирмы «Hexcel», а также препреги П-4УТ-4510 и П-4УТ-3692 на основе углеродных тканей фирмы «Porcher Industries» и связующего ЭНФБ.

Определение прочностных и упругих характеристик углепластиков выполнялось в соответствии с различными, наиболее часто применяемыми в отечественной и зарубежной практике стандартами, в том числе ГОСТ 25.602, EN2850, ASTM D 3410 и ASTM D 6641.

Изготавливались и испытывались три типа образцов: из однонаправленных препрегов с укладкой всех слоев  $[0^\circ]_s$ ; из однонаправленных препрегов с укладкой слоев  $[90,0^\circ]_s$ ; из препрегов на основе равнопрочных тканей.

Для экспериментального определения прочности и модуля упругости изготавливалось не менее 10 образцов для каждого материала, схемы армирования и стандарта испытаний. Упругие характеристики определялись посредством тензометрирования.

На основании полученных экспериментальных данных образцов из однонаправленных препрегов с укладкой слоев  $[90,0^\circ]_s$  производился расчет прочности монослоя.

Согласно этому методу прочность однонаправленного слоя ( $\sigma_{-11}$ ) рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_{-11} = CPF \cdot \sigma_{-x},$$

где:  $CPF$  – коэффициент, называемый «фактором перекрестно-армированного слоистого материала»;  $\sigma_{-x}$  – прочность ортогонально-армированного материала при осевом сжатии.

В результате проведенной работы получены результаты прочностных и упругих характеристик различных углепластиков при сжатии образцов по различным стандартам. Показано, что выбор стандарта испытаний, то есть способа нагружения, геометрии образца и других факторов может оказывать существенное влияние на величину прочности и модуля упругости.

Результаты испытаний сравнивались с паспортными характеристиками материала образцов (рис.). Следует отметить, что прочность и модуль упругости однонаправленного композита, полученные на основе проведенных испытаний

ортогонально-армированных углепластиков, соответствовали паспортным значениям углепластиков. В то же время результаты испытаний при сжатии образцов с однонаправленной укладкой слоев далеко не всегда согласовывались с паспортными характеристиками.

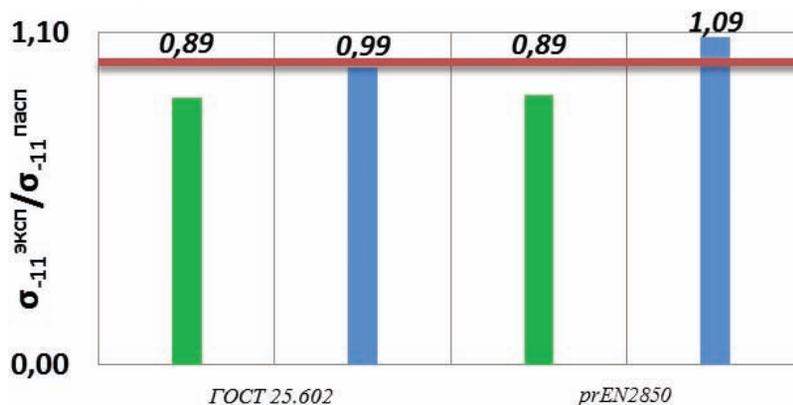


Рис. Степень реализации прочности относительно паспортного значения

- – относительная прочность по результатам испытаний однонаправленных образцов;
- – относительная прочность, вычисленная по результатам испытаний ортогонально-армированных образцов

#### Литература

1. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.:Химия, 1981. – 272 с.
2. Composite Materials Handbook – 17 (CMH-17). SAE International on behalf of CMH-17//Wichita State University, March, 2001.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ КАУЧУКОВ ДЛЯ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ С КЕРАМИКОЙ

*О.В.Томчани, Л.В.Юдина, С.В.Ворвуль, Л.И.Бойко*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Стремительное развитие современных технологий все в большей степени сталкивается с необходимостью разработки новых высокоэффективных эластомерных клеевых герметизирующих материалов для экстремальных условий эксплуатации. Эти материалы должны обладать хорошей технологичностью, термической устойчивостью и высокими механическими показателями при температурах до 500 °С, отверждаться и быть работоспособными без доступа воздуха в соединениях материалов с различным КЛТР и изготавливаться на основе промышленно доступного сырья.

В настоящей работе проведен анализ отечественного и зарубежного рынка

кремнийорганических герметизирующих материалов и исследования по разработке клея-герметика с вышеперечисленными свойствами на основе низкомолекулярных кремнийорганических олигомеров различного строения для клеевых соединений металлов и керамики.

Проведенные исследования показали, что однокомпонентные композиции на основе полиорганосилоксанов с концевыми гидроксильными группами, отверждающиеся по механизму поликонденсации, привлекательны для применения, так как исключают операции дозирования компонентов и их смешения. Однако им свойственна низкая жизнеспособность (до 5 минут), а также деполимеризация при высоких температурах в случае применения в соединениях без доступа воздуха. Последний недостаток свойственен также и большинству двухкомпонентных композиций на основе полиорганосилоксанов с концевыми гидроксильными группами. Однако применение в этом случае сшивающих агентов, не содержащих алкоксипроизводные кремния, позволяет применять композиции для внутришовной герметизации. Их положительной отличительной особенностью является достаточная жизнеспособность, которую можно регулировать содержанием или химической структурой отвердителя, а отрицательной - плохая адгезия даже в случае применения соответствующих подслоев, особенно к металлическим подложкам при высоких температурах.

Применение однокомпонентных герметиков на основе полиорганосилоксанов с винильными группами, отверждающихся перекисями по механизму свободнорадикальной полимеризации, привлекает своей технологичностью, однако их низкая адгезия к металлическим и керамическим подложкам не позволила получить клеевой материал с высокими прочностными показателями.

Наиболее перспективными для создания клеев-герметиков являются низкомолекулярные кремнийорганические каучуки на основе полиорганосилоксанов с гидридными и винильными группами, отверждающиеся по механизму полиприсоединения. Их положительным свойством является отсутствие побочных продуктов при отверждении, что позволяет улучшить размеростабильность изделий и избежать реакции деполимеризации в закрытых объемах, что особенно важно для внутришовного применения. На основе таких каучуков в ОАО «ОНПП «Технология» разработан клей-герметик, обеспечивающий возможность его применения в изделиях, длительно (до 15 ч) работающих при температуре 300 °С и кратковременно (до 1,5 мин.) при 500 °С, обеспечивая при этом прочность клеевого соединения при сдвиге не менее 1 МПа.

## РАЗРАБОТКА НОВОГО ТЕПЛОСТОЙКОГО КЛЕЯ-ГЕРМЕТИКА ДЛЯ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ С КЕРАМИКОЙ

*О.В.Томчани, Е.И.Маслова, Л.В.Юдина, Л.И.Бойко, Е.В.Миронова*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Возрастающие эксплуатационные требования к перспективным изделиям ракетостроения требуют создания новых высокотемпературных клеев-герметиков для склеивания материалов с разными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). По химической природе для этих целей наиболее пригодны материалы на основе кремнийорганических олигомеров. Им свойственны высокие тепло- и морозостойкость, эластичность, устойчивость к воздействию неблагоприятных климатических факторов.

В настоящей работе представлена разработка теплостойкого герметика для клеевых соединений металлов с керамикой, работоспособного в диапазоне температур от минус 60 до плюс 300 °С, кратковременно до плюс 500 °С, сохраняющего возможность демпфирования возникающих механических напряжений при нагреве разнородных по ТКЛР материалов, в том числе без доступа воздуха.

Проведенные исследования множества композиций позволили выбрать оптимальный состав клея-герметика ГПО-2, который создан на основе низкомолекулярных полиорганосилоксанов с гидридными и винильными группами, отверждаемых по механизму полиприсоединения с использованием катализаторов, содержащих соединения платины. Отличительной особенностью разработанного клея-герметика является отсутствие в процессе отверждения побочных продуктов реакции, что позволяет улучшить механические показатели клеевых соединений и избежать реакции деполимеризации в закрытых объемах.

На рисунке представлена температурная зависимость динамического модуля упругости при сдвиге разработанного материала в сравнении с герметиком ВИКСИНТ У-2-28, который в настоящее время используется для аналогичных изделий, работающих при более низких температурах. Из рис. видно, что, хотя у композиции ГПО-2 температура текучести ниже, чем у герметика ВИКСИНТ У-2-28, однако снижение модуля упругости при сдвиге при этом значительно меньше, что позволяет ожидать более высокие результаты прочностных испытаний клеевых соединений при повышенной температуре.

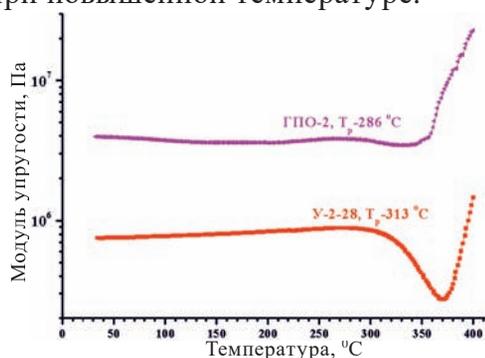


Рис. Температурная зависимость модуля упругости при сдвиге

Для оценки прочностных свойств разработанных композиций изготавливали клеевые соединения керамических образцов из стеклокерамики ОТМ-357 с металлическими пластинами из стали 3. Для улучшения адгезии к склеиваемым поверхностям использовали подслои П-15-90 (ООО «Пента», Россия) и G790 (“Wacker-Silicones”, Германия). Значения прочности клеевых соединений при использовании композиции ГПО-2 существенно выше (табл.) - при температуре 20 °С они достигают 7-8 МПа, разрушение клеевых соединений при этом когезионное, а при 400 и 500 °С превышает 1 МПа даже при адгезионном характере разрушения клеевого соединения. Необходимо также отметить, что прочность клеевых соединений после 6 месяцев хранения компонентов герметика ГПО-2 остается высокой и при температуре испытаний 500 °С не снижается ниже 1 МПа.

Таблица

Свойства клеев-герметиков ГПО-2 и ВИКСИНТ У-2-28НТ

Наименование показателя		Результат испытаний	
		ГПО-2	У-2-28НТ
Деструктивная устойчивость (твердость по Шору А, условные единицы)	исходная	81	40
	после выдержки при температуре 300 °С в течение 3 ч без доступа воздуха	72	-
Прочность клеевого соединения при сдвиге, МПа при температуре, °С	-60	8,6±0,3	-
	20	8,9±0,7	2,5-3,0*
	300	3,6±0,3	1,0-1,7*
	400	1,1±0,2	0,5-0,7*
	500	1,5±0,4	-
Прочность клеевого соединения при сдвиге после 6 месяцев хранения компонентов, МПа при температуре, °С	20	4,7±0,4	-
	500	1,4±0,2	-

\*Влияние технологических параметров на прочность клеевых соединений металлов и керамики при использовании герметика ВИКСИНТ У-2-28НТ. Технический отчет ТО 12-04. ОАО «ОНПП «Технология», 2012. 62 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПОКСИУРЕТАНОВОГО КОМПАУНДА МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

*Л.В.Юдина, С.М.Иванова, А.В.Хабенко, О.В.Томчани*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Для герметизации элементов электрооборудования в автомобильной, авиационной и других отраслях промышленности необходимо применять нагревостойкие полимерные материалы с высокими термическими характеристиками.

В настоящее время в качестве герметизирующих электроизоляционных материалов в электротехнике наиболее широкое применение находят компаунды на основе эпоксидных смол. Применение таких материалов приводит к существенному уменьшению габаритов и массы изделий, позволяет обеспечить работоспособность конструкций при высоких механических нагрузках, в условиях повышенной вибрации и в широком диапазоне температур вплоть до 150°C. Однако существенным недостатком эпоксидных компаундов является их пониженная трещиностойкость в условиях теплового удара. Увеличить эластичность материала можно введением в его состав полиуретановых структур.

В настоящей работе приведены результаты исследования разработанного в ОАО «ОНПП «Технология» эластичного эпоксипуриданового компаунда холодного отверждения методами термомеханического (ТМА) и термогравиметрического (ТГА) анализов. Показано, что разработанный компаунд обладает хорошими термическими характеристиками: теплостойкостью, термостойкостью, коэффициентом линейного термического расширения (КЛТР). В табл. 1 приведены данные ТМА и ТГА.

Таблица 1

Наименование показателя	Значение показателя
Температура 5 % потери массы, °С	320
Температура 10 % потери массы, °С	359
КЛТР, $1/^\circ\text{C}\cdot 10^{-6}$	182,6
Теплостойкость, °С	180

С целью определения диапазона рабочих температур компаунда исследовали влияние длительной (100 часов) выдержки при отрицательных (-60 и -40°C) и повышенных (+150 и +170°C) температурах на его эксплуатационные свойства: теплостойкость, коэффициент линейного термического расширения, а также диэлектрические характеристики. Как видно из табл. 2, длительная выдержка компаунда при отрицательных и повышенных температурах приводит к улучшению его термических и диэлектрических показателей. Таким образом установлено, что компаунд работоспособен в диапазоне температур от -70 до 170 °С.

Таблица 2

Температура выдержки, °С	Потеря массы, %	Теплостойкость, °С	КЛТР, $10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$\rho_v$ , Ом·м при Т	
				25 °С	150 °С
исходные	-	180,0	182,6	$4\cdot 10^{12}$	$2\cdot 10^8$
-60	0,17	183,2	193,3	$2\cdot 10^{12}$	$2\cdot 10^8$
-40	0,19	182,0	177,9	$3\cdot 10^{12}$	$4\cdot 10^8$
150	1,45	253,8	144,9	$1\cdot 10^{13}$	$5\cdot 10^8$
170	2,77	245,6	147,5	$1\cdot 10^{13}$	$2\cdot 10^8$

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОСТОЙКОГО ЭПОКСИУРЕТАНОВОГО КОМПАУНДА

*Л.И.Бойко, А.М.Котухова, А.С.Иваницкий, Л.В.Юдина*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Для создания более совершенных электрических двигателей и аппаратов с высоким КПД, длительным ресурсом работы и возможно минимальными размерами необходимо применять в системах изоляции высоконагревостойкие полимерные материалы с высокими электрическими характеристиками, обладающими термической стабильностью.

Среди применяемых в электротехнике материалов значительную долю составляют электроизоляционные заливочные полимерные компаунды, которые служат для заполнения относительно больших полостей, промежутков между деталями в электрических машинах и аппаратах, для получения сравнительно толстого покрытия на тех или иных электро- и радиотехнических деталях, узлах, блоках. Применение заливочных компаундов должно обеспечивать надежную электрическую изоляцию в процессе длительной работы в различных эксплуатационных условиях.

Анализ литературы и собственные исследования показали, что удовлетворить вышеизложенным требованиям могут композиции на основе эпоксиуретанов, сочетающие хорошие электроизоляционные характеристики с эластичностью, прочностью и хорошей адгезией к разнородным материалам. В ОАО «ОНПП «Технология» был разработан ряд композиций холодного отверждения на основе эпоксидных и полиуретановых смол и их отвердителей.

Исследования этих композиций электрическими методами позволили:

- определить оптимальную по составу композицию для создания заливочного компаунда;
- определить время полного отверждения компаунда при комнатной температуре;
- определить влияние эксплуатационных температур (минус 40 °С, плюс 150 °С) и время их воздействия на электрические свойства компаунда;
- оценить диапазон рабочих температур композиции;
- оценить влияние длительного хранения компонентов на электрические свойства.

По результатам экспериментальных исследований было установлено:

- разработанная эпоксиуретановая композиция КЭУ-1 с соотношением компонентов смоляная часть : отвердитель = 5 : 1 наиболее удовлетворяет требованиям, предъявляемым к эксплуатационным характеристикам компаунда;
- при отверждении компаунда при комнатной температуре значение удельного объемного электрического сопротивления улучшается и стабилизируется в течение ~35 суток;
- компаунд выдерживает воздействие высоких (плюс 150 °С) и низких температур (минус 40 °С) в течение 100 часов;
- компаунд сохраняет удовлетворительные электроизоляционные свойства вплоть до 200 °С;
- длительное хранение компонентов (до 0,5 года) не ухудшает электрические характеристики компаунда.

## **АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА СДВИГ В ПЛОСКОСТИ ЛИСТА СО СХЕМОЙ АРМИРОВАНИЯ $\pm 45^\circ$**

*А.Г.Попов, Н.В.Матюшевский* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Для многих изделий авиационной и космической техники сдвиговые напряжения, могут оказывать существенное влияние на несущую способность и быть причиной разрушения конструкций. Не случайно в технические требования к процессу изготовления современных композиционных конструкций все чаще включаются показатели прочности и модуля сдвига. Поэтому корректное определение характеристик сдвига в плоскости листа представляет собой важное прикладное значение.

Механические испытания на сдвиг образцов из полимерных композиционных материалов (ПКМ), в частности, высокомодульных и высокопрочных углепластиков имеют ряд особенностей, которые влияют на выбор метода испытаний, способа приложения нагрузки формы и размеров образцов. В первую очередь это связано с существенной анизотропией свойств материала и наличием межслойных напряжений. Анизотропия свойств и особенности строения слоистых пластиков обуславливают увеличение числа прочностных и упругих характеристик и приводят к повышенной чувствительности материала образцов к различного рода концентрациям напряжений.

Для определения модулей и прочности при сдвиге в плоскости пластины слоистых композитов, армированных высокопрочными и высокомодульными волокнами, существует гораздо больше стандартов (ASTM, EN, ГОСТ и других), чем для испытаний при других видах нагружения. Одной из причин такого разнообразия является наличие большого числа различных типов сдвигового нагружения. Только при испытаниях образцов на сдвиг в плоскости листа известны следующие виды нагружения: диагональный сдвиг пластины в шарнирном четырехзвеннике, перекашивание пластины относительно узкой полосы, сдвиг образца с V-образной канавкой, растяжение анизотропной полосы и другие. Опыт экспериментального определения характеристик ПКМ при сдвиге показывает, что разнообразие методов и стандартов не всегда является положительным фактором. Результаты испытаний, выполненных по различным стандартам, на практике далеко не всегда соответствуют друг другу, что затрудняет анализ свойств материала и вызывает проблемы при проектировании и прочностных расчетах композитных конструкций. В то же время практически отсутствуют работы, в которых комплексно оцениваются достоинства и недостатки различных методов испытаний на сдвиг образцов из углепластиков и соотносятся результаты испытаний, выполненных по различным стандартам.

Одна из главных трудностей в разработке методов испытаний армированных пластиков на сдвиг — обеспечение в образцах состояния чистого сдвига, для которого достаточно точно применимы методы обработки результатов эксперимента. Методика испытаний на сдвиг слоистых, существенно анизотропных, пластиков и ориентации действующих усилий относительно осей симметрии материала

и геометрических размеров образцов, прежде всего, толщины. Кроме того, в работе [1] отмечается отсутствие универсальных методов экспериментального одновременного определения упругих постоянных и прочности при сдвиге.

В ряде исследований, в том числе [2], отмечается, что существующие на сегодняшний день методы испытаний слоистых композитов не всегда способны обеспечить достоверность результатов определения прочностных и упругих сдвиговых характеристик материалов для образцов, армированных перемежающимися элементарными слоями под углами  $\pm 45^\circ$  в плоскости сдвига.

При проведении испытаний образцов из углепластиков со схемой армирования  $\pm 45^\circ$  при сдвиге в плоскости листа даже с использованием стандартов необходима особенно тщательная проработка возможности и обоснованности применения стандартизованного метода для данного типа материала, схемы армирования и толщины композиционного пакета.

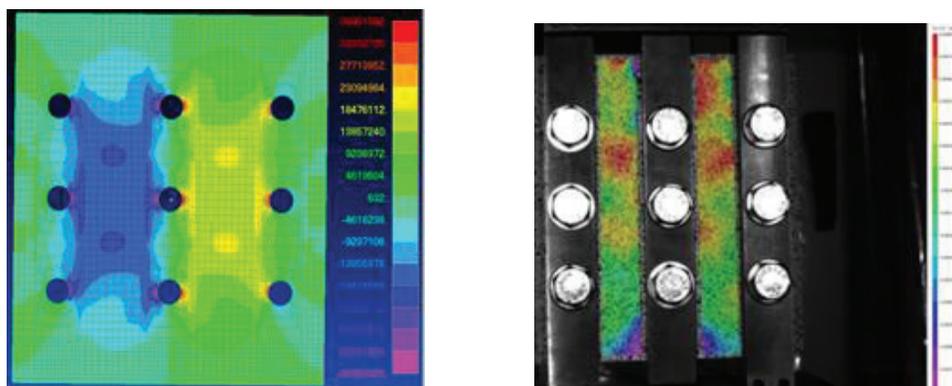
Образцы были изготовлены из препрегов на основе углеродных волокон фирмы “Porcher Industries” арт. 03692 и арт. 03750 и связующего ЭНФБ. Геометрические размеры соответствовали рекомендациям как отечественных, так и зарубежных стандартов, толщина образцов изменялась в диапазоне от 1,3 до 4,1 мм.

Анализ прочностных и упругих сдвиговых характеристик углепластиков со схемой армирования  $\pm 45^\circ$  выполнялся по результатам испытаний, проведенных в соответствии с наиболее распространенными стандартами:

- диагональный сдвиг пластины в шарнирном четырехзвеннике — ГОСТ 24778-81;
- перекашивания пластины относительно узкой полосы — ГОСТ Р 50578-93 и ASTM 4255M;
- сдвиг образца с V-образной канавкой (метод Иосипеску) — ASTM 5379;
- растяжение анизотропной полосы со схемой армирования  $\pm 45^\circ$  — ASTM 5318 и EN 6031.

Проведен расчетный анализ напряженно-деформированного состояния образцов при нагружении в соответствии с указанными выше методами и стандартами различных видов образцов со схемой армирования материала  $\pm 45^\circ$ . Расчёт проводился методом конечных элементов с использованием MSC Nastran и сравнивался с результатами определения напряженно-деформированного состояния образцов, полученными в процессе испытаний. Распределение деформаций измеряли при помощи тензодатчиков, наклеенных на поверхность образцов, а также с использованием оптической системы для измерения 3D - деформаций – Vic 3D (рис.).

Анализ результатов испытаний показал, что прочность и модуль при сдвиге в плоскости листа зависят от толщины образца и выбранного метода испытаний.



а)

б)

Рис. Распределение сдвиговых деформаций в образце по ASTM 4255:

а) – расчетные значения; б) – экспериментальные данные

Следует отметить, что в процессе нагружения образцов, изготовленных по различным отечественным и зарубежным стандартам, не удавалось добиться стабильного равномерного напряженно-деформированного состояния чистого сдвига, при котором достаточно надежно можно было бы оценивать прочность и тем более модуль сдвига. Все известные методы и стандарты при проведении испытаний высокомодульных и высокопрочных углепластиков со схемой армирования  $\pm 45^\circ$  не устраняют в достаточной степени влияние зон краевого эффекта от воздействия испытательной оснастки. Наиболее высокие и стабильные значения прочности и модуля сдвига были получены при проведении испытаний методом перекашивания пластины относительно узкой полосы по ГОСТ Р 50578-93.

Таким образом, испытания высокомодульных и высокопрочных армированных углепластиков со схемой армирования  $\pm 45^\circ$  на сдвиг в плоскости требуют особенно тщательного планирования, подготовки и анализа результатов.

#### Литература

1. Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1981. — 272 с.
2. Bert, C. W., and Guess, T. R. Mechanical Behavior of Carbon/Carbon Filamentary Composite. In Conf. Compos. Mater. Testing Design, 2nd Amer. Soc. Testing Mater., Spec. Tech. Publ. 497, 1972. pp. 89—106.

## РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОГО СИНТАКТНОГО МАТЕРИАЛА

*П.А.Степанов, Н.А.Ролецкая, В.Г.Кулиш, В.В.Василенко*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Композиционные материалы на основе клеевых препрегов являются наиболее предпочтительным материалом для изготовления летательных аппаратов. В настоящей работе проводилась технологическая отработка получения композиционного материала на основе клеевой композиции, модифицированной микросферами, представлены структурные, физико-механические, теплофизические и диэлектрические характеристики синтактного полуфабриката и материала.

Для получения полуфабриката синтактного стеклопрепрега с низкой диэлектрической проницаемостью применялась клеевая композиция ВК-36БН. Композиция получена по технологии изготовления клеевой плёнки ВК-36Р с добавкой стеклянных микросфер с различным процентным содержанием. Были опробованы различные способы нанесения клеевой плёнки в зависимости от количества введённых микросфер.

Процесс получения синтактного стеклопрепрега (ССПР) заключался в предварительной формовке листов заготовок. На вакуумный стол выкладывался по определённой схеме пакет, состоящий из одного или двух слоёв кварцевой ткани марки ТС 8/3-К-ТО и клеевой плёнки с увеличенным содержанием микросфер. Полуфабрикат получали вакуумным формованием при температуре  $(130 \pm 5)^\circ \text{C}$ . Полученный синтактный стеклопрепрег обладал неоспоримыми технологическими преимуществами: мог перерабатываться в рулоны, имел время жизнеспособности до одного года, мог храниться в холодильнике не теряя эластичности, был технологичен при выкладке стеклопластика. На основе полуфабриката ССПР был получен синтактный композиционный материал. Режим предварительного формования  $(130 \pm 5)^\circ \text{C}$  в течение 0,5 часа был выбран на основе исследований комплексной вязкости модифицированной клеевой композиции. Окончательный режим формования составлял  $(180 \pm 5)^\circ \text{C}$  два часа. По этому режиму были изготовлены вакуумным способом образцы синтактного композиционного материала. Определены структурные, физико-механические, теплофизические и диэлектрические характеристики полученного материала.

Так, механическая прочность образцов СТС (стеклотекстолита синтактного) составляет при изгибе около 560 МПа, при растяжении -  $\sim 172$  МПа, что превышает прочность аналога микросферотекстолита МСТ-6П в 2-2,5 раза. При сопоставимой удельной прочности СТС по диэлектрическим свойствам ( $\epsilon \sim 2,4$ ;  $\text{tg} \delta \sim 0,012$ ) превосходит стеклотекстолит СТ-69Н (без микросфер) в 1,5-2,0 раза и сопоставим с МСТ-6П, но характеризуется более высокими свойствами по гигроскопичности и водопоглощению. При введении облегченных микросфер диэлектрические характеристики СТС достигают значений  $\epsilon \sim 2,0-2,1$ ;  $\text{tg} \delta \sim 0,0130$ .

Полученные характеристики позволяют прогнозировать применение полученного синтактного материала в крупногабаритных широкополосных радиопрозрачных обтекателях.

# КВАЗИРАСПРЕДЕЛЁННАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ И ЧАСТОТОЙ ОПРОСА

*В.А.Лазарев, А.Б.Пнёв, А.А.Жирнов, К.В.Степанов, П.В.Михеев, В.А.Нелюб*  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)

В авиации сейчас весьма актуальна проблема контроля поврежденности полимерных композиционных материалов, возникающая из-за ударных воздействий. Одним из методов решения данной проблемы является создание композитных конструкций со встроенной системой непрерывного мониторинга на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД), первичным преобразователем которых являются брэгговские решетки (ВБР), представляющие собой структуру с периодической модуляцией показателя преломления сердцевины световода.

Продольная деформация оптоволокна приводит к изменению периода ВБР и пропорциональному изменению длины волны отражаемого излучения.

Типичный коэффициент чувствительности по деформации ВБР составляет 12 нм/% [1]. Современные спектральные приборы способны измерять длину волны с погрешностью менее 10 пм [1], что дает возможность получать погрешность измерения деформации 0,0008%. ВОД великолепно показали себя при измерении статических деформаций, однако для измерения ударных деформаций чувствительность ВОД на основе полихроматора оказалась недостаточна.

В настоящее время реализовано множество типов опτικο-электронных измерительных приборов для регистрации сигналов, формируемых ВБР, среди которых можно отметить системы на основе перестраиваемого интерферометра Фабри-Перо [2], полихроматора (рис.1а) [3], дискретно перестраиваемого лазера (рис. 1б) [4].

Перечисленные типы сенсорных систем, к сожалению, существенно ограничены по частоте опроса, величина которой не превышает 5 кГц [1]. В вышеописанных системах быстродействие и чувствительность ограничено низкой спектральной плотностью, используемых источников излучения, а в приборах с дискретно перестраиваемым лазером - скоростью перестройки длины волны, но для повышения скорости опроса датчиков и чувствительности было предложено использовать перестраиваемый SWEPT лазер, позволяющий осуществить перестройку длины волны в интервале более 100 нм за  $2 \cdot 10^{-6}$  с. Этого достаточно для регистрации акустических колебаний с частотой до кГц. Недостатком SWEPT лазера является большая погрешность, вызванная нелинейностью перестройки длины волны [2]. В разработанной системе предложен способ уменьшения такой погрешности.

Структурная схема измерительной системы представлена на рис. 2. Принцип действия заключается в следующем. Источник (SWEPT лазер (ПЛ)) непрерывно перестраивается и излучает в диапазоне 1250 – 1360 нм. Это излучение попадает на разветвитель (ОР), в котором один из пучков идёт к датчикам. Отраженное от ВБР излучение, в оптических циркуляторах будет перенаправлено на пять фотоприемных устройств (ФП), далее поступит на обработку в ЭВМ. Чтобы

привязать этот массив распределения интенсивностей в зависимости от времени к шкале длин волн, используется дополнительный шестой канал, в котором размещен калибратор (КБ), состоящий из эталона Фабри-Перо (ЭФП) и эталонной ВБР (ЭВБР) задающей длину волны пика отражения.

Это дает возможность получать опорную точку и затем восстановить истинное значение длины волны в данный момент времени.

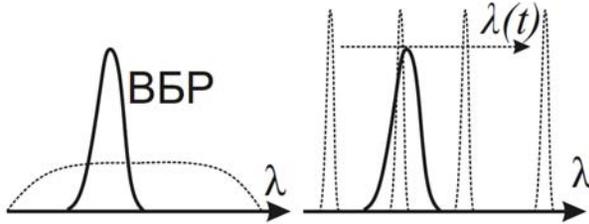


Рис. 1. Иллюстрация работы системы на:  
а) полихроматоре;  
б) перестраиваемом лазере;  
---- - спектр источника излучения

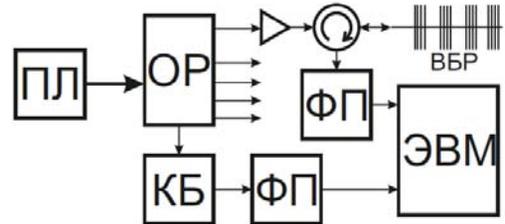


Рис. 2. Структурная схема разработанной системы

Компьютерно-математическая модель системы показала, что разработанная система обеспечивает частоту опроса 50 кГц и при дискретности регистрации 20 пм и отношении сигнал/шум 18 дБ достигается погрешность измерения резонансных длин ВБР 2 пм. Это эквивалентно погрешности измерения деформации 0,0017%. Расчетный допустимый диапазон вносимых потерь составил 25 дБ, что существенно больше, чем у систем на основе полихроматора (типичное значение 15 дБ), обладающих меньшими чувствительностью и частотой опроса (5 кГц) и большим значением среднеквадратического отклонения результатов.

Таким образом, предложена система, обладающая частотой опроса и динамическим диапазоном существенно большими, чем у существующих аналогов, и позволяющая надежно регистрировать акустические колебания, в то же время обладающая существенно меньшим значением среднеквадратического отклонения результатов измерения. Кроме того, показано, как сочетание предложенной системы и падающих на материал звуковых волн дает возможность регистрировать расслоения в полимерных композитах.

#### Литература

1. Пнев А.Б. Оптико-электронные измерительные системы на основе квази-распределенных волоконно-оптических брэгговских датчиков: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / ГОУВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана». – М., 2008.

2. Хатырев Григорьев В. В., Лазарев В. А., Митюрёв А. К., Пнев А. Б., Тихомиров С. В., Н. П. Измерение деформации и температуры датчиками на основе брегговских решеток // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 15–19.

3. Григорьев В. В., Лазарев В. А., Неверова Н. А., Митюрёв А. К., Пнев А. Б., Тихомиров С. В. Многоканальная квазираспределенная информационно-измерительная система на основе наноразмерных волоконно-оптических структур

датчиков механических напряжений // Заводская лаборатория. 2008. Т. 74, спец. вып. С. 70–75.

4. Григорьев В. В., Лазарев В. А., Неверова Н. А., Митюрев А. К., Пнев А. Б., Тихомиров С. В. Квазирапределенная измерительная система на основе брэгговских датчиков механических напряжений с повышенной частотой опроса // Автоматизация в промышленности. 2008. № 11. С. 58–62.

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ НЕЛИНЕЙНЫХ И ВРЕМЕННЫХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*А.М.Думанский* (Федеральное государственное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия)

Для обеспечения надежности, ресурса и долговечности элементов конструкций из композиционных материалов на полимерной основе необходима разработка моделей материалов и конструкций, основанных на фундаментальных закономерностях механического поведения. Проводится анализ моделей нелинейного деформирования и моделей сопротивления композиционных материалов при переменных во времени нагрузках. На основе модифицированных соотношений теории слоистых пластин и матричных алгоритмов описана структурно-феноменологическая модель построения определяющих соотношений, позволяющая проводить учет нелинейного деформирования слоистых композиционных материалов. В качестве исходных используются упругие характеристики слоя, которые оптимально могут быть определены методом наименьших квадратов по результатам испытаний однонаправленных или косоугольно армированных образцов. Показано, что для углепластиков нелинейные свойства слоя и пакета определяются нелинейными свойствами при сдвиге в плоскости слоя, которые могут быть аппроксимированы различными аналитическими зависимостями. Аппроксимация кривых деформирования производится склейкой кусочно-непрерывных кривых, имеющих начальный линейный участок. На рисунке приведены кривые деформирования при сдвиге в плоскости слоя однонаправленных композиционных материалов.

Используя матричные алгоритмы для представления определяющих соотношений слоя и пакета, получены удобные для практического использования выражения для матриц податливости и технических характеристик упругости, представляющие собой произведения матриц податливости и жесткости на соответствующие корректирующие матрицы, характеризующие нелинейные свойства. Следует отметить, что аппроксимирующая сдвиг функция характеризует физико-механические свойства матрицы и связи волокна и матрицы, а числовые значения корректирующих матриц определяют нелинейные свойства, вызванные схемой армирования укладкой слоев в пакете. Приведены примеры расчета и прогнозирования нелинейного деформирования слоистых углепластиков.

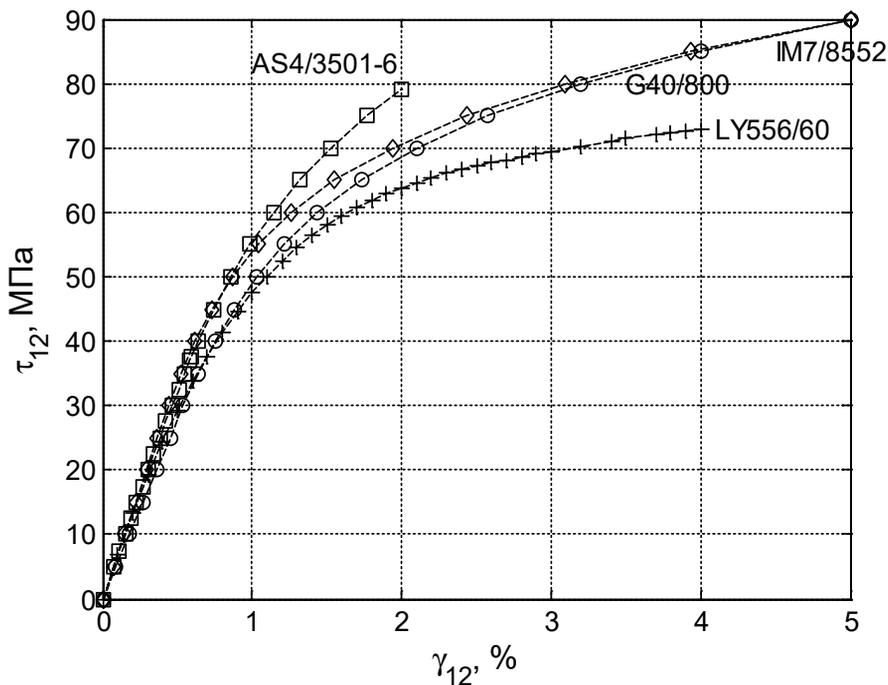


Рис. AS4/3501-6, IM7/8552, G40/800 – углепластики, LY556/60 – стеклопластик<sup>2</sup>

Проведен анализ некоторых моделей сопротивления слоистым композиционным материалам переменным во времени нагрузкам. Анализ опытных данных показывает, что наиболее общий учет временных свойств композиционных материалов может быть выполнен на основе фундаментальных положений механики упруго-наследственных сред, позволяющих учитывать реакцию материала на переменное нагружение. Использование соотношений наследственной упругости даёт возможность получения ряда взаимосвязанных материальных функций, характеризующих материал [1]. Такого рода подходы позволяют идентифицировать материал и могут быть полезны при его стандартизации. Наличие математического аппарата, включая алгебру резольвентных операторов, теории обобщенных функций, позволяет существенно упростить получение определяющих соотношений функций, пригодных для практического употребления. Показаны способы представления нагрузок и деформаций, охватывающих широкий спектр условий эксплуатации элементов конструкций из композиционных материалов, включая ползучесть, циклическое, регулярное и нерегулярное нагружения. Для описания временных свойств анизотропных композиционных материалов развиты матричные подходы, позволяющие получать материальные функции материала с учетом анизотропии механических свойств. При первом приближении предполагается, что временные свойства слоя определяются реологией при сдвиге в плоскости слоя. Используя алгебру резольвентных операторов и матричные алгоритмы классической теории слоистых пластин, разработан метод построения определяющих соотношений наследственного типа, позволяющих описывать анизотропию временных свойств слоистых композиционных материалов.

<sup>2</sup> Instructions to contributors of the third World-Wide Failure Exercise (WWFE-III) Part(A)

Используемый выше матричный анализ позволяет не только описывать анизотропию нелинейных и временных свойств слоистых композиционных материалов, но и интегрально оценивать долю указанных свойств при их сравнении с упругими характеристиками жесткости и податливости, а также оценивать погрешность и устойчивость решений. Такого рода анализ представляется важным в связи с исследованием характеристик трещиностойкости, энергопоглощения, сопротивления ударным нагрузкам слоистых композиционных материалов на полимерной основе.

В последнее время в связи с внедрением композиционных материалов в конструкции самолетов военного и гражданского назначения проводятся интенсивные исследования влияния динамических и ударных нагрузок на деформирование и разрушение углепластиков. В области нелинейного деформирования важен анализ влияния последовательности укладки слоев, концентрации напряжений на деформирование и разрушение. Имеют место масштабный и конструктивный факторы. Для оценки надежности и остаточного ресурса проводится разработка вероятностных методов оценки предельного состояния элементов из ПКМ. Обобщение разработанных подходов позволяет учесть влияние вышеуказанных факторов и может служить основой для начального расчета и прогнозирования механических свойств элементов конструкций из композиционных материалов.

#### Литература

1. Gross B. Mathematical structure of the theories of viscoelasticity.–Paris: Hermann, 1968. - 71 p.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СЛОЯ КОСОУГОЛЬНО-АРМИРОВАННОГО УГЛЕПЛАСТИКА В НЕЛИНЕЙНОЙ ОБЛАСТИ**

*А.М.Думанский, М.А.Алимов, А.А.Радченко*

(Федеральное государственное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия)

При проектировании конструкций из композитных материалов, которые могут подвергаться деформациям, выходящим за пределы упругости, существенно важной является адекватная оценка напряженно-деформированного состояния однонаправленного слоя. Для такой оценки используются подходы, основанные на различных допущениях и предположениях, в частности, рассматриваются различные ассоциированные законы пластического течения, поверхности предельного состояния, энергетические критерии. Поскольку в таких подходах неизбежно введение различных ограничений и схематических упрощений, то важно свести их к минимуму для адекватного прогнозирования нелинейного деформационного поведения однонаправленного слоя, и один из таких подходов предлагается ниже. Прежде всего, предполагается, что между напряжением

и деформацией однонаправленного слоя вдоль волокна существует линейная зависимость на протяжении всего процесса деформирования, т.е. считаем нелинейные эффекты в этом направлении минимальными. Это широко используемое допущение, и его применение (как в случае одноосного растяжения образца из косоугольно-армированного углепластика, рассматриваемого ниже) позволяет в нелинейной области деформирования получить деформации и напряжения в осях слоя через деформации вдоль оси нагружения  $\varepsilon_x$  и перпендикулярно к ней  $\varepsilon_y$ , что, в свою очередь, позволяет исследовать изменение податливости материала в процессе нагружения. Для этого в предположении о линейной зависимости приращений деформаций и напряжений предлагается процедура определения мгновенных значений податливости слоя.

Для пластины из композитного материала с симметричной структурой  $[\pm\theta]_S$  под действием растягивающего напряжения  $\sigma_x$  вдоль оси симметрии  $Ox$  деформации в осях однонаправленного слоя (1, 2) связаны с деформациями в осях пластины следующим образом:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_x \sin^2 \theta + \varepsilon_y \cos^2 \theta \\ \gamma_{12} &= 2(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \cos \theta \sin \theta\end{aligned}\quad (1)$$

Рассматривая два прилегающих слоя с волокнами, расположенными под углами  $\theta$  и  $-\theta$  к оси  $Ox$ , можно выразить напряжения в осях слоя через уже известные компоненты напряженно-деформированного состояния следующим образом [1]:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta - S_{12} \sigma_x}{S_{11} - S_{12}} \\ \sigma_2 &= \sigma_x - \sigma_1 \\ \tau_{12} &= -\frac{\sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_1 (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)}{2 \sin \theta \cos \theta}\end{aligned}\quad (2)$$

где компоненты матрицы податливости  $S_{11}$  и  $S_{12}$  считаются постоянными на протяжении всего процесса деформирования, исходя из предположения, что неупругие эффекты вдоль волокон (в направлении оси 1) не велики, и ими можно пренебречь, и эти компоненты определяются через технические характеристики упругости слоя  $S_{11} = 1/E_1$ ,  $S_{12} = -\nu_{12}/E_1$ .

Таким образом, при наличии экспериментально определенных значений продольной  $\varepsilon_x(\sigma_x)$  и поперечной  $\varepsilon_y(\sigma_x)$  деформаций формулы (1) и (2) позволяют описать все компоненты напряженно-деформированного состояния однонаправленного слоя как в линейной, так и в нелинейной области деформирования. Эти формулы верны при любых нелинейных эффектах, включая разгрузку и вязкоупругость.

В соответствии с инкрементальной теорией нелинейности [2] считаем, что приращения деформаций и напряжений связаны линейно:

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & 0 \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\bar{S}_{ij}$  - компоненты локальной матрицы податливости (касательные модули податливости).

Из сделанного предположения о незначительности нелинейных эффектов в направлении вдоль волокна следует, что  $\bar{S}_{11} = S_{11}$  и  $\bar{S}_{12} = S_{12}$ , т.е. равны соответствующим компонентам матрицы податливости в упругой области деформирования, тогда из следует

$$\bar{S}_{22} = \frac{d\varepsilon_2}{d\sigma_2} - S_{12} \frac{d\sigma_1}{d\sigma_2}; \quad \bar{S}_{66} = \frac{d\gamma_{12}}{d\tau_{12}} \quad (4)$$

Для иллюстрации данного подхода на рис. приводятся зависимости компонентов матрицы податливости от растягивающего напряжения, построенные по экспериментальным данным [3], полученным на плоских образцах из косоугольно-армированного углепластика с укладками  $\theta = \pm 40^\circ, \pm 50^\circ$  и  $\pm 70^\circ$  при одноосном растяжении.

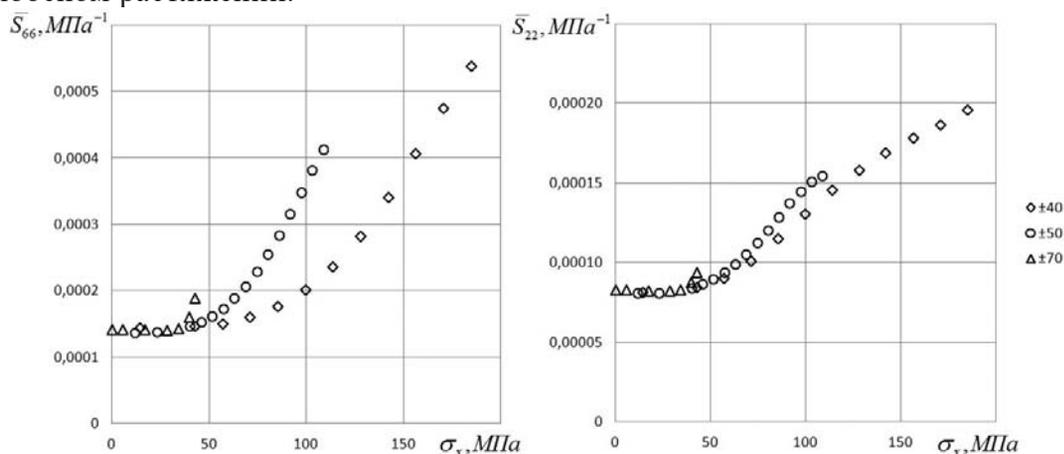


Рис. 1. Зависимости компонентов матрицы податливости слоя  $\bar{S}_{22}$  и  $\bar{S}_{66}$  от растягивающего напряжения  $\sigma_x$

#### Литература

1. Думанский А.М., Алимов М.А., Радченко А.А. Анализ нелинейного поведения композитного материала при одноосном растяжении // Информатизация и связь.–2013. № 1. С.67-70.
2. Rowlands R.E. Analytical-experimental correlation of polyaxial states of stress in thornel-epoxy laminates // Experimental Mechanics.– 1978. V.18, N 7. P.253-260.
3. Думанский А.М., Таирова Л.П., Смердов А.А. Экспериментальное исследование деформативных и прочностных характеристик углепластика на плоских и трехслойных образцах: научные мат. Второй международной научно-практической конференции «Аэрокосмические технологии» - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009.– С.245-246.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМОВАНИЯ ФЕРМЕННОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ СВЕРХЛЕГКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Е.Ю.Зайцева, Т.П.Асеева, Н.В.Степанов*

(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия);

*В.С.Иванов, М.В.Серазединов*

(ФГУП “НПО им. С.А.Лавочкина”, г. Химки, Россия)

Первостепенной задачей при создании сверхлегких летательных аппаратов является снижение массы элементов конструкции. Частично эта задача решается за счет использования перспективных материалов. Обладающие повышенными характеристиками по удельной прочности, полимерные композиционные материалы (ПКМ) позволяют снизить массу изделий на 20-40%. Однако эффективность деталей из ПКМ падает с увеличением количества зон соединений в изделии. На рис. 1 представлена нервюра для сверхлегкого летательного аппарата, состоящая из обода 1 сечением 3х3мм и стоек 2 сечением 3х2мм, гнезд под стрингера 3, усиления в зоне хвостика 4, усилений обода 5 в зоне соединения со стойками.

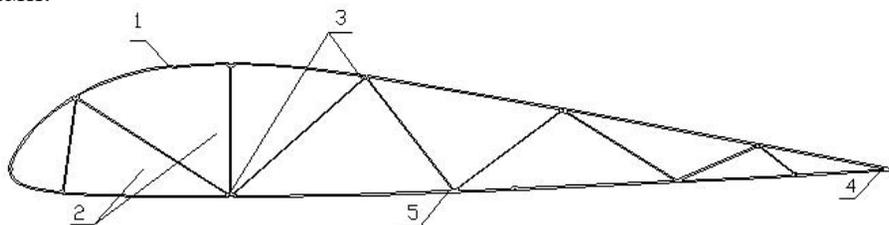


Рис. 1. Нервюра сверхлегкого летательного аппарата

Представленная ферменная конструкция, элементы которой работают на изгиб, и должны иметь армирование вдоль длины элемента, изготавливается из волокнистого композиционного материала на основе углеродных волокон. Из-за малых габаритов сечения элементов нервюры, традиционные методы формования оказались неприемлемы: технологические припуска с последующей их механической обработкой в данной конструкции недопустимы.

Геометрия нервюры обеспечивается в процессе выкладки волокнистого материала в канавки металлической оснастки рис. 2.

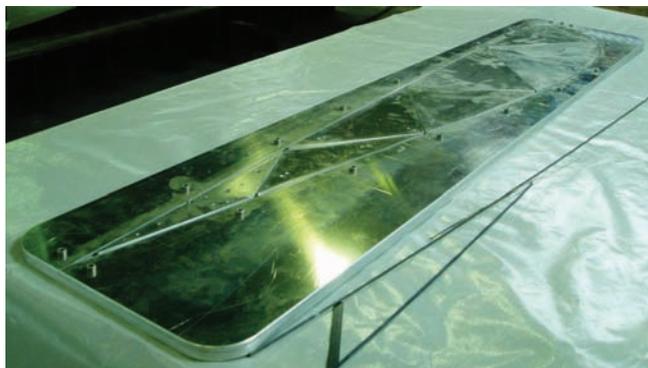


Рис. 2. Формообразующая оснастка нервюры

В процессе изготовления с учетом особенностей материала и размеров элементов нервюры были разработаны маршруты выкладки углеродного волокна таким образом, чтобы добиться максимальной реализации свойств материала как в отдельно взятых элементах, так и в зонах их соединения. При разработке маршрутов были учтены основные требования, а именно - исключение перегибов жгута под острым углом, минимальное количество стыков углеродного волокна и размещение стыков в зонах максимальных усилений. Толщина жгута подбиралась, исходя из размеров сечения основных элементов конструкции нервюры, стоек и обода.

В связи со стесненной зоной формования элементов конструкции (6x2мм – размер канавки для стоек, 6x3мм – для обода) пришлось отказаться от пуансона в качестве формирующего элемента из-за сложности изготовления. В короткий срок требовалось найти серийно-способный метод формования нервюры.

В ходе работы были опробованы несколько технологических способов изготовления нервюры, включающие различные методы уплотнения материала при выкладке и отверждении в сочетании с использованием разных температурных режимов формования. Проведены исследования по определению прочностных характеристик элементов нервюры. Определен технологический способ, при котором для элементов нервюры получены следующие результаты: пористость материала составила 0,8%, прочность при изгибе 135 кг/мм<sup>2</sup>, модуль упругости при изгибе 13100 кг/мм<sup>2</sup>.

По разработанной технологии был изготовлен комплект нервюр крыла сверхлегкого летательного аппарата. В настоящее время в НПО им.Лавочкина производится сборка летного макета.

## **СОТОВЫЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОЙ СТЕКЛОТКАНИ**

*В.С.Волков, И.В.Кулагина, Е.В.Денисова, И.О.Бабкина, Г.С.Шуль*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Стеглосотопласты ( ССП ) – это уникальный и перспективный материал, позволяющий существенно снизить массу и одновременно повысить физико-механические характеристики изделия. Такие материалы обладают высокими упруго-прочностными, тепло- и звукоизоляционными свойствами, радиотехническими характеристиками и нашли широкое применение в изделиях авиакосмического назначения. Однако постоянно растущие требования к характеристикам ССП ставят перед разработчиками ряд новых задач по улучшению их свойств.

В настоящее время актуальной задачей является повышение прочности ССП, обладающих высокими электрофизическими характеристиками. Данная работа направлена на получение сотового заполнителя на основе кварцевой стеклоткани.

Прочностные характеристики ССП зависят как от свойств применяемых связующих, так и от свойств выбранных стеклотканей. Для получения сотового заполнителя с повышенными радиотехническими и прочностными характеристиками была выбрана кварцевая ткань ТК-3 (ТУ 6-19-062-100-88).

Кварцевые ткани обладают превосходной комбинацией физических и химических свойств: высокой механической прочностью, высокой стойкостью к воде, пару, кислотам, низкими диэлектрическими свойствами, низкой проводимостью при высокой температуре и влажности, низким коэффициентом теплового расширения, низкой теплопроводностью, высокой температурой плавления. В качестве пропиточного состава был использован бакелитовый лак ЛБС-1, ГОСТ 901-78. Технологический процесс изготовления сотового наполнителя на основе кварцевой ткани аналогичен технологии изготовления серийно выпускаемых стеклосотопластов на основе алюмоборосиликатной ткани и включает следующие операции: нанесение продольных клеевых полос на рулон ткани, раскрой стеклоткани с нанесенными клеевыми полосами, сборка листов в сотопакеты, склеивание сотопакетов в прессе, растяжение сотопакетов (формование сотоблоков), пропитку сотоблоков лаком и сушку их на воздухе, термообработку пропитанных сотоблоков.

В результате проведенных исследований были определены оптимальные технологические параметры на стадиях пропитки сотоблоков лаком и их последующей термообработки, обеспечивающие высокие прочностные свойства сотопласта на основе кварцевой ткани (ССПК-1). Разработана технологическая инструкция ТИ 596.25000.1409 на процессы изготовления двух марок сотового наполнителя: ССПК-1-3,5 с размером граней ячеек 3,5 мм и ССПК-1-4,2 с размером граней ячеек 4,2 мм.

Кварцевый сотопласт обладает повышенными прочностными свойствами по сравнению с серийно выпускаемым стеклосотопластом типа ССП-1.

В докладе приводится сравнительный анализ упруго-прочностных характеристик разработанных ССПК-1 и серийно выпускаемых ССП-1. Показано, что замена стеклоткани ЭЗ/1-100 на кварцевую ткань ТК-3 приводит к существенному повышению физико-механических характеристик.

В результате электрофизических испытаний установлено, что сотопласты на основе стеклоткани из кварцевого волокна имеют диэлектрическую проницаемость на частоте  $10^{10}$  Гц в интервале 1,004-1,008, что несколько меньше, чем диэлектрическая проницаемость сотопластов на основе стеклоткани из алюмоборосиликатного волокна.

Таким образом, полученные результаты показывают, что кварцевые сотопласты на 20-25 % превосходят серийно выпускаемые стеклосотопласты по значениям модуля упругости и прочности при сжатии, обладают низким влаго-и водопоглощением, а также по классу горючести (ОСТ 1 90094-79) относятся к трудносгораемым материалам.

## **РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХМЕРНО-АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА**

*А.В.Соколова, В.Н.Зельнев, Р.А.Алексянн, В.В.Мазур, Н.В.Степанов*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

В настоящее время развитие авиационной и космической техники невозможно представить без использования композиционных материалов (КМ), массовая доля которых в конструкции летательных аппаратов (ЛА) растет из года в год. Последние достижения науки и техники в данной отрасли представлены материалами на основе мультиаксиальных тканей и трехмерно-армированных наполнителей. Их применение в изделиях не только снижает трудоемкость изготовления деталей из КМ, но и значительно повышает межслоевую прочность материала.

Одним из способов создания трехмерно-армированных композитов является прошивка нитями или жгутами пакета слоев композиционного материала. При этом использование текстильных тканей в качестве наполнителя является предпочтительным за счет их меньшей повреждаемости при прошивке.

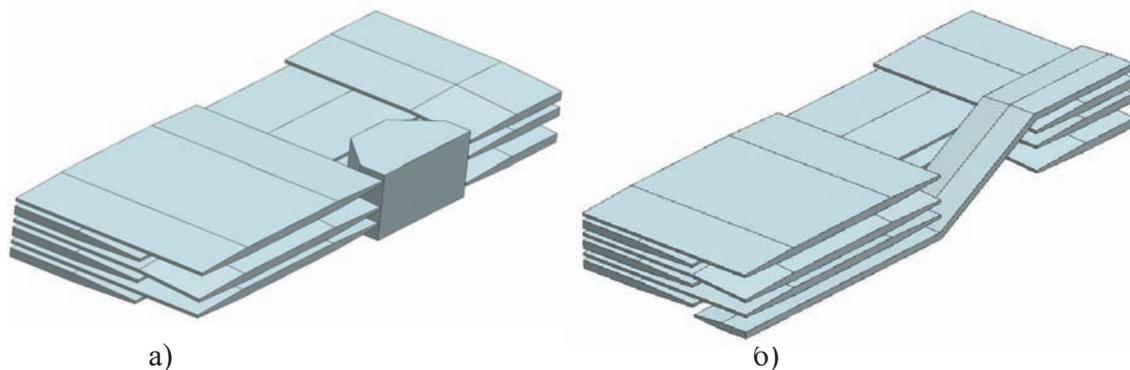
В рамках данной работы была разработана расчетная модель для определения физико-механических характеристик (ФМХ) композитов на основе углеродной ткани саржевого плетения с использованием прошивки. Анализ проводился методами конечных элементов (МКЭ).

Прогнозирование механических свойств текстильного композита с использованием МКЭ основывается на разделении структуры материала на элементарные ячейки и расчете их свойств, исходя из свойств ячейки.

В работе рассмотрено два способа прошивки тканых слоев:

- прошивка нитью с шагом 4 мм;
- прошивка жгутами с шагом 4 мм.

Расчетная модель представительного элемента трехмерно-армированного композита должна учитывать свойства компонентов материала, объемное содержание наполнителя, архитектуру пространственного каркаса, которая определяется технологическими параметрами прошивки (шаг прошивки, толщина нити и т.п.) и пакета (количество слоев, плотность укладки нитей и т.п.). Помимо этого в представительном элементе композита должны быть отражены все особенности структуры материала, определяющие его деформативные свойства в целом. Исходя из этого, была выбрана элементарная ячейка трехмерно-армированного материала, геометрическая модель которой представлена на рис.



а)

б)

Рис. Геометрические модели ячеек тканых слоев, прошитых:

а) жгутами; б) нитьями

Расчеты были произведены, исходя из того, что выбранная ячейка композита представляет собой неоднородное твердое тело, ФМХ которого определяются ФМХ образующих его компонентов: пропитанных связующим слоев ткани, нитей или жгутов прошивки и связующего.

Экспериментальные исследования полностью подтвердили правильность выбранной модели для качественного анализа прочности материала.

## ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ, РАБОТОСПОСОБНЫЕ В УСЛОВИЯХ ТРОПИЧЕСКОГО КЛИМАТА

*О.А.Елисеев* (ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия)

Неметаллические материалы при эксплуатации в изделиях АТ подвергаются климатическому старению, в результате чего происходит изменение их прочностных и эксплуатационных свойств. Герметики для авиационной и специальной техники должны быть стойки к воздействию факторов климатического старения.

При эксплуатации изделий АТ в различных климатических зонах возникает острая необходимость защиты герметиков от микробиологического воздействия, влекущего за собой отказы авиационной техники.

В работах ВИАМ, были исследованы микроорганизмы, разрушающие неметаллические материалы и топлива. Был исследован механизм разрушения герметиков в топливах и разработан способ защиты герметиков путем введения в их состав антисептиков. В результате чего были разработаны грибостойкие модификации серийных топливостойких герметиков: полисульфидный герметик ВИТЭФ-1Б и фторсилоксановый герметик ВГФ-2М.

Помимо модификаций ранее разработанных герметиков, в ВИАМ были разработаны новые материалы с учетом высоких требований по грибостойкости: герметики У-30МЭС-5МА (ВГМ-5), ВГМ-5А.

## **КОНТРОЛЬ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПКМ МЕТОДАМИ ГЕЛИЕВОЙ ПИКНОМЕТРИИ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ**

*Л.В.Черфас, Н.С.Обухова, З.В.Морозова, Е.Р.Леникаш*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Качественные характеристики изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), а также их эксплуатационный ресурс во многом определяются такими структурными параметрами, как компонентный состав, плотность и пористость сформованного композита. Соответственно контроль компонентного состава материала и связанных с ним характеристик является важным фактором оценки качества изготовленного материала при запуске в эксплуатацию изделий из ПКМ. В особенности это касается изделий аэрокосмического и радиотехнического назначения, где цена ошибки бывает слишком высока.

На предприятии уже более двадцати лет проводится определение структурных характеристик композитов экспресс-методом, основанном на использовании методов гелиевой пикнометрии и гидростатического взвешивания.

Преимущество гелиевой пикнометрии при определении плотности ПКМ по сравнению с другими пикнометрическими методами заключается в том, что пикнометрическое вещество – инертный газ гелий, атомы которого обладают наименьшим размером ( $d=0,25\text{нм}$ ), максимально заполняет все доступные поры материала. Это позволяет с высокой точностью определять объем образцов без пор и соответственно эффективную плотность материала (практически теоретическую).

Кажущуюся плотность образца пористого тела определяли методом гидростатического взвешивания с учетом общего объема образца, включающего все поры. Вследствие наличия пор в ПКМ эффективная и кажущаяся плотности материала различны, что позволяет рассчитывать объемное содержание открытых и закрытых пор, а также соотношение компонентов (волоконный наполнитель и матрица) в ПКМ.

Данный метод был разработан и широко использовался, главным образом, на углепластиках типа КМУ (КМУ-4Э, КМУ-8, КМУ-12, КМУ-13). Было проведено множество исследований, получено большое количество экспериментальных данных с использованием статистических методов обработки, показана результативность рассматриваемого косвенного метода определения структурных характеристик. Введение данного экспресс-метода позволило сократить время испытаний в 3-5 раз и повысить точность определения этих параметров по сравнению с существующими на тот момент.

В данной работе приводятся результаты сравнительного анализа прямого весового метода выжигания и косвенного экспресс-метода, полученные на некоторых используемых сегодня композитах. Эти данные свидетельствуют о тесной связи значений, полученных прямым и косвенным методами испытаний, что позволяет использовать экспресс-метод для аттестации качества изделий из ПКМ конструкционного назначения.

В настоящее время экспресс-метод широко применяется для получения данных о структурных характеристиках стекло- и углепластиков, используемых

при аттестации, разработке и изготовлении большей части изделий конструкционного назначения, изготовленных различными методами, на основе совершенно различных отечественных и зарубежных материалов. Полученные значения плотностей, пористости и содержания компонентов дают возможность получить информацию о влиянии технологии на целый ряд физико-механических и эксплуатационных характеристик ПКМ, оценить и выбрать условия формования изделия (температура, время, давление). В случае необходимости возможно проведение коррекции режимов еще на стадии производства изделия.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА СВОЙСТВА ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИИМИДНЫХ СТЕКЛОСОТОПЛАСТОВ**

*В.С.Волков, Е.В.Денисова, А.Н.Корнейчук, С.В.Ворвуль, Е.И.Юдаева*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Отсутствие сотовых наполнителей, длительно работающих в воздушных средах при температурах до 300 – 350 °С, свидетельствует об актуальности работы по созданию стеклосотопластов (ССП) на основе полиимидных матриц и традиционных стеклотканей.

В ходе разработки технологии изготовления термостойких стеклосотопластов на основе связующего СП-97К, ТУ 1-595-10-1087-2009, представляющего собой спиртовой раствор диэтилового эфира бензофенонтетракарбоновой кислоты и диаминодифенилметана с технологическими добавками, были проведены работы по определению влияния термостарения при повышенной температуре эксплуатации на физико-механические свойства стеклосотопластов марок ССП-7-3,5 и ССП-7П-3,5.

В результате исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии характера тепловых эффектов при непрерывном нагреве образцов связующего СП-97К были оптимизированы технологические режимы изготовления сотопласта. Практически при температуре 170 °С происходит образование стабильной формы сотоблоков. Химическая структура связующего в этот момент представляет собой линейный полиимид, который обеспечивает формостабильность сотоблоков и получение ССП с необходимыми прочностными характеристиками. Предел прочности при сжатии сотопласта ССП-7П-3,5 составляет (2,2 – 2,6) МПа, а ССП-7-3,5 – (2,4 – 3,2) МПа. При температуре испытаний 300 °С сохраняется 50 % исходной прочности.

Исследовали работоспособность ССП при высоких температурах. Для этого проводили термостарение отвержденных образцов сотопластов при температуре 300 и 350 °С. Повышение температуры воздействия до 300 °С приводит к завершению образования линейного полиимида и его сшивке в трехмерную структуру. При этом значение температуры стеклования по данным динамического механического анализа (ДМА) вырастает с 212 до 348 °С.

После выдержки при повышенных температурах 300 и 350 °С образцы ССП испытывали на определение предела прочности и модуля упругости при сжатии

при температуре 20 °С. Установлено, что после выдержки при температуре 300 °С в течение 30 часов наблюдается сохранение 70 % значения предела прочности при сжатии и 85% модуля упругости. Дальнейшая выдержка при температуре 300 °С до 300 часов не приводит к изменению этих значений. При повышении температуры до 350 °С также наблюдается снижение этих значений. Выдержка образцов ССП при температуре 350 °С в течение 100 часов приводит к сохранению 60% от исходных значений предела прочности при сжатии и 70% - от исходных значений модуля упругости.

Таким образом, выдержка полиимидных стеклосотопластов при температуре (300 – 350) °С на начальной стадии приводит к некоторому снижению прочностных характеристик, которые стабилизируются при дальнейшей выдержке. Наблюдаемое снижение предела прочности и модуля упругости при сжатии на начальной стадии термостарения, вероятно, связано с порообразованием на стенках ячеек сот за счет выделения летучих, образующихся в процессе сшивки полиимида, а образовавшаяся при этом трехмерная структура полиимида в дальнейшем обеспечивает длительную устойчивость полученных ССП при температуре эксплуатации.

## **ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ВСПЕНЕННОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ МИКРОЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**В.В.Гаврилко** (Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”, Харьков, Украина)

Применение трехслойных конструкций с различными типами наполнителей в летательных аппаратах (ЛА), прежде всего, обусловлено возможностью повысить жесткость конструкции без значительного увеличения массы. При выборе наполнителя для трехслойной конструкции микролетательного аппарата (МкЛА) основным критерием является минимум массы, а поскольку нагрузки на элементы конструкции данного ЛА не высокие, то вторым по значимости критерием становится технологичность. Из достаточно широкого спектра материалов в качестве наполнителя



Рис.1. Приспособление для обработки заготовки

для данного класса ЛА наиболее предпочтительным является пенопласт с закрытой ячеистой структурой. Однако применение данного типа материала в конструкциях МкЛА сопряжено с рядом особенностей. Во-первых, получение точного и тонкого профиля, во-вторых, сохранение закрытой ячеистой структуры наполнителя перед сборкой.

Для решения первой задачи был предложен метод ручной доводки профиля. Технологический процесс,

которого заключается в следующем. На первом этапе вырезается черновая заготовка на фрезерном станке заданной геометрии с заданными технологическими припусками на механообработку. После чего заготовка устанавливается в специальное приспособление (рис. 1), которое представляет собой плиту, изготовленную из алюминиевого сплава, с высверленными отверстиями в рабочей зоне. Фиксация заготовки в заданном положении осуществляется потоком воздуха. Через отверстия в приспособлении создается поток воздуха, который прижимает заготовку к поверхности приспособления, тем самым фиксируется положение заготовки.

После чего вручную обрабатываются поверхности и скругляются кромки. Высокая точность поверхности обеспечивается путем специальных направляющих на поверхности приспособления. Полученная таким образом заготовка для трехслойной конструкции имеет необходимую геометрию с заданным припуском. Процесс механообработки достаточно прост и не требует высоких затрат времени и средств. Необходимость припуска обусловлена следующим этапом обработки заготовки.

Однако при механической обработке пенопласта ячейки открываются. При склейке наполнителя с несущими слоями происходит заполнение открытых ячеек пенопласта избытком клея, а это в свою очередь приводит к увеличению массы конструкции. Следовательно, возникает задача разработать технологический процесс обработки пенопласта, в результате которого можно было бы при минимальных затратах времени, средств получить заготовку для трехслойной конструкции на основе пенопласта заданной геометрии и имеющую поверхность с закрытой ячеистой структурой.

Данная задача была решена путем разработки технологического процесса термической обработки заготовки пенопласта (пенополиамид). Для этого была разработана и сконструирована специальная оснастка (матрица постформинга) (рис. 2), в которую помещается заготовка (заготовка имеет регламентированный припуск после механообработки), после чего оснастка при помощи термоэлементов нагревается, и происходит термообработка заготовки (оплавление наружной поверхности пеноматериала).



Рис. 2. Установка постформинга: 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – система охлаждения; 4 – блок управления

После окончания термообработки заготовка имеет заданные геометрические параметры с погрешностью не более 0,1мм.

Предложенный метод, при своей простоте, позволяет за короткое время получить изделия на основе пеноматериалов с требуемой точностью, кроме того, поверхность изделия после изготовления имеет закрытую ячеистую структуру (рис. 3), а также места для установки силового набора.



Рис. 3. Заготовки до термообработки (внизу) и после термообработки (вверху)

Данный метод не требует дополнительного вложения материальных средств на покупку высокоточного, но дорогостоящего оборудования, кроме того, предложенный метод не требует высокой квалификации рабочего персонала и/или владением специальными знаниями и навыками.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МОНОГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ КОМПОЗИЦИИ

*В.И.Дубкова* (ИОНХ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь),

*Л.В.Судник* (ОХП НИИ ИП с ОП, г. Минск, Беларусь),

*Д.В.Петушков* (ООО “Композиционные материалы и технологии”, г. Солигорск, Беларусь), *В.С.Нисс* (БНТУ, г. Минск, Беларусь)

Эпоксидные смолы и композиции на их основе находят применение практически во всех отраслях промышленности и народного хозяйства, в том числе и при производстве полимерной композитной арматуры. Традиционные разновидности арматуры давно уже не способны составить достойную конкуренцию более эффективной по своим функциональным свойствам и долговечности полимерной арматуре, которая как нельзя лучше подходит для осуществления всех типов работ в промышленном и гражданском строительстве, в дорожных работах, при усилении мостов, причалов и других конструкций, эксплуатация которых проходит в условиях общей или ускоренной коррозии и динамических нагрузок. Структура композитной полимерной арматуры складывается из двух частей – ствола и оболочки. Ствол обеспечивает прочность изделия и состоит из параллельных волокон, связанных композитным материалом на основе эпоксидной смолы. Оболочка отвечает за надежное сцепление с бетоном и выполняется в виде волокон, навитых спиралью

вокруг ствола или в виде песчаного напыления. Полимерная арматура, созданная в настоящее время с использованием нанотехнологий на основе стекловолокна и базальтового волокна, отвечает самым современным стандартам качества. Однако стремительно развивающиеся отрасли индустрии и современное развитие техники требуют постоянное совершенствование имеющейся или разработку новой, всё более качественной неметаллической арматуры. Технические характеристики полимерной композитной арматуры в значительной степени определяются свойствами применяемого для её изготовления эпоксидного связующего.

Целью работы является исследование влияния нанокристаллического моногидроксида алюминия (бемита) на физико-механические и термические свойства эпоксидной композиции и стеклопластиковой арматуры на её основе.

***Использование твердых наночастиц разной формы или химической природы в качестве наполнителей полимеров открывает новые возможности модифицирования последних, так как поверхностные свойства наноразмерного вещества преобладают над объемными, отличаясь высокой энергией (следовательно, высокой адсорбционной способностью) и зачастую появлением химической активности.***

Поэтому для обеспечения наиболее благоприятных условий взаимодействия полимера с поверхностью наполнителя, обеспечивающего заданный комплекс свойств для конкретно решаемой задачи, был выбран наполнитель с развитой поверхностью. Нанокристаллический моногидроксид алюминия (бемит), получаемый методом гидротермального синтеза, обладал удельной поверхностью до 400 м<sup>2</sup>/г, степенью дисперсности <100 нм. Полимерной матрицей служило эпоксидное связующее на основе эпоксидиановой смолы ЭД-20 и ангидридного отвердителя. Для исследований использовали электрофизический, акустический и термомеханический методы анализов и стандартные методы испытаний физико-механических свойств композитов.

Установлено, что введение бемита в эпоксидно-ангидридное связующее приводит к понижению сегментальной подвижности молекулярных цепей вследствие образования жестко связанной структуры полимера, что проявляется в увеличении времён диэлектрической релаксации, смещении в сторону повышения температуры стеклования композиции на 30–65 °С. При содержании бемита в композиции 52,4 мас. % (рис. 1, кр. 5) температура стеклования достигает 137 °С, что даёт возможность расширить температурный диапазон эксплуатации изделий, формируемых из композиции. При нагревании отверждённой эпоксидной композиции в условиях одноосного сжатия наблюдается также значительное снижение относительной деформации, прогрессирующее с увеличением концентрации бемита в композиции (рис. 1, кр. 2–5). При этом прочность при сжатии эпоксидных композитов увеличивается в 1,36–2,78 раз, модуль упругости возрастает в 1,2 раз. Полученные результаты свидетельствуют об активном влиянии моногидроксида алюминия (бемита) на структурирование эпоксиполимера в граничном и межфазном слоях.

При введении бемита в стекловолокнистую эпоксидную композицию также наблюдаются изменения её термических и деформационных свойств и сдвиг температуры стеклования в сторону повышения (рис. 2). На кривых

термомеханического анализа образцов стекловолоконного композита, включающего нанодисперсную добавку, отчетливо проявляются несколько точек перегибов, обусловленных образованием структур с различной степенью подвижности при формировании композиционного материала. Это можно объяснить сложным составом композиции и поверхностными явлениями, протекающими на границе раздела фаз, вносящими свой вклад в структурирование, на что указывают и данные электрофизических измерений: изменяются времена диэлектрической релаксации, тангенс угла диэлектрических потерь, увеличивается удельное объемное электрическое сопротивление.

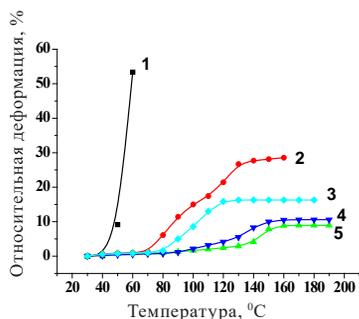


Рис.1. Термомеханические кривые эпоксидной композиции без наполнителя (1) и включающей 21,6 мас % (2); 35,5 (3); 45,2 (4) и 52,4 мас. % (5) бемита

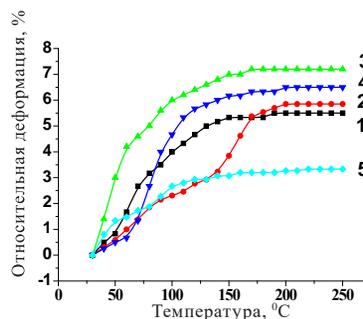


Рис.2. Термомеханические кривые стекловолоконного эпоксидного композита без дисперсного наполнителя (1) и включающего 1 мас. % (2); 5 (3); 10 (4) и 20 мас. % (5) бемита

Выявлено, что при использовании в эпоксидно-ангидридной композиции при получении полимерной арматуры бинарного наполнителя (стекловолокон и нанодисперсного бемита) и скоростного высокотемпературного режима отверждения прочность при сжатии получаемого полимерного композита возрастает на 95-150 %, пределы прочности при изгибе – на 10,6 %, при растяжении – на 11%, динамический модуль упругости увеличивается на 17 %, температура стеклования сдвигается в сторону повышения температур на 25 °С. Наблюдаемое при этом улучшение диэлектрических характеристик материала позволяет рассматривать нанокристаллический моногидроксид алюминия (бемит) как перспективную нанодобавку при производстве композитной стеклопластиковой арматуры.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА

*Д.Д.Гуламова<sup>1</sup>, В.П.Шевченко<sup>2</sup>, С.Г.Токунов<sup>2</sup>, Р.Б.Ким<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>Институт материаловедения Академии наук; <sup>2</sup>ОАО “Электроизолит”, г. Ташкент, Узбекистан)

Проблемы, связанные с ограниченностью запасов газа, нефти и других природных источников энергии определяют необходимость изыскания возобновляемых энергоресурсов. Развитие технологий на основе использования

энергии ветра, солнца и др. не только энергоэкономично, но и сохраняет экологию окружающей среды.

В технологических процессах производства минерального волокна для получения и обработки расплава преимущественно используют электрическую энергию и газ. С целью возможной замены этих источников энергии были исследованы процессы получения базальтового волокна с использованием энергии солнца в качестве источника нагрева. В [1-8] сообщается о разработках технологий получения оксидных соединений, карбида кремния в солнечной печи мощностью 1000 кВт. Различные способы обработки расплава позволили получить ультрадисперсные частицы, полые сферолиты, иглы-вискеры, нити субмикронного диапазона в аморфном и стеклокристаллическом состояниях. Опираясь на эти результаты были осуществлены исследования, направленные на разработку технологии получения базальтового волокна.

В качестве исходных сырьевых пород были использованы базальты Османсайского и Акчинского месторождений Узбекистана. Масса одновременно выплавляемого материала в Большой солнечной печи при плотности лучистого потока 680-780 Вт/см<sup>2</sup> составляла не менее 20 кг. Для гомогенизации и перегрева расплава увеличивали плотность лучистого потока до 800 Вт/см<sup>2</sup>. Процесс плавки длился в среднем 15-26 минут, после чего осуществляли слив расплава и получение базальтового волокна центробежным способом.

Целевой продукт представлял корольки неправильной формы размером менее 128 мм, пластинки толщиной ≤ 120 мкм, волокна толщиной 0,3-34 мкм. Длина волокон находилась в диапазоне 25-180 мм. На размерные параметры волокон основное влияние оказывали температура перегрева расплава и скорость вращения центробежного аппарата, используемого для распыления струй расплава. Свойства базальтового волокна, полученного центробежным способом путем использования солнечной энергии в качестве источника нагрева, представлены в табл.

Таблица

Свойства базальтового волокна, полученного в солнечной печи

№ п/п	СВОЙСТВО			
	Диаметр волокна, мкм	Длина волокна, мкм	Фазовый состав	Прочность на изгиб. кг/мм <sup>2</sup>
1	≤10	65-168	Аморфная	218
2	92	45	Аморф.+авгит, гематит, магнетит	98

#### Литература

1. Trombe F., Gion L., Royere C., Traitement d'oxides refractaire au four solair de 1000kW du Centre National de Recherche Scientifique.– C.R.Acad.Sc. Paris, 1971. V.272. PP.1971-1973.
2. Baum V.A., Solar Furnaces.–1960, P.256.
3. Anthonie A.M., Collongue R., Les metodes preparatife pour les sistems solid.– M.:Mir, 1976. P.616.
4. Albert P., Traverse J.P., Etude par diffraction neutronique les structures de haute

temperature de  $\text{Ln}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  // Mater. Res. Bull. – 1979. V.14. PP.303-323.

5. Fantozzi G., Gonon M., Gulamova D.D., Synthesis of alumina based grain from solar energy // Key engineering materials. 2002. V 206-213. PP.933-936. G.

6. S. Kh. Suleimanov, V.G. Dyskin, M.U. Dzhanklych and N.A. Kulagina Effective Antireflection Coating Based on  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  Mixture Solar Cells // Technical Physics Letters. 2013. V. 39, N 3. PP. 305-307.

7. Proprieties des compositions avec alumina: conf. "Haute temperatures materiaux 8-12 sept.2001.Brussel, Belgium.

8. Gulamova D.D. "Usage of the Big solar furnace for high temperature oxides melts treatment" // Applied Solar Energy (Gheliotekhnika, Russian Journal of Solar Engeneering). 1996. №6. PP.12-15.

## **АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ФОРМ И ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПАНЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ SAM146 В САЕ СИСТЕМЕ MSC/NASTRAN**

*О.В.Маркин* (ОАО "ОНПП "Технология", г. Обнинск, Россия)

Задачи, связанные с моделированием конструкций, имеющих сотовый наполнитель, встречаются все чаще, однако описания подходов к их решению не так много.

Сложность расчета заключается в огромной размерности решаемой задачи, что выливается в продолжительное время счета и высокие требования к вычислительной технике. В связи с этим конструкции с сотовым наполнителем обычно моделируются по упрощенной методике, в которой создается эквивалентная модель, имеющая свойства трехслойной оболочки.

Целью данной работы является рассмотрение методик, которые могут быть использованы при создании подробной модели структуры сотового наполнителя для динамического анализа трехслойных конструкций.

Данная работа рассчитана на пользователей, которые уже имеют опыт работы в системах MSC и для которых подробные объяснения по построению моделей не требуются.

## **АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ МАТРИЦ, ОПИСЫВАЮЩИХ НЕЛИНЕЙНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

*А.Н.Русланцев* (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благодрава РАН, г. Москва, Россия)

Полимерные композитные материалы получают все более широкое распространение в авиационной и ракетной технике. В связи с этим актуальна разработка методов, позволяющих описывать свойства материалов.

В данной работе анализируются собственные числа матриц, описывающих нелинейные деформационные свойства слоистых углепластиков.

Рассмотрим модель, описывающую нелинейные свойства слоистых углепластиков, приведенную в [1]. Для примера возьмем углепластик AS4/3501-6. Упругие характеристики слоя следующие:  $E_1 = 126$  ГПа,  $E_2 = 1$  ГПа,  $G_2 = 6,6$  ГПа,  $\nu_2 = 0,8$  [2].

Матрицу жесткости слоя представим в следующей форме:  $[G_2] = [G_2^0] - [G_0]f$ , где  $[G_2^0]$  – матрица жесткости слоя;  $[G_0]$  – матрица, у которой все элементы, кроме правого нижнего, равны 0, а правый нижний равен 1;  $f$  – аппроксимирующая функция.

Переход к матрице жесткости пакета осуществляется следующим образом:  $[G_y] = \Sigma [T_1] [G_2^0] [T_1]^T \bar{h}_i$ , где  $T_1$  – матрица поворота;  $\bar{h}_i$  – относительная толщина  $i$ -го слоя. При этом  $[G_x^0] = \Sigma [T_1] [G_2] [T_1]^T \bar{h}_i$ ,  $[G] = \Sigma [T_1] [G_0] [T_1]^T \bar{h}_i$ .

Матрица податливости вычисляется как обратная матрице жесткости:  $[S_y] = [G_y]^{-1} = [G_x^0] [I] - [G]f^{-1} = [I] - [G_x^0]^{-1} [G]f^{-1} [G_x^0]^{-1}$ ,  $I$  – единичная матрица.

Пусть  $[A] = [G_x^0]^{-1} [G]$ , а  $[S_x^0] = [G_x^0]^{-1}$ . Представим матрицу  $A$  в виде:  $[A] = [R] [D] [R]^{-1}$ , где  $R$  – матрица, составленная из нормированных собственных векторов, а  $D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  – диагональная матрица собственных значений. Раскладывая в ряд, получим

$$[I] - [A]f^{-1} = 1 + \mathcal{A} + (\mathcal{A})^2 + \dots = R(1 + \mathcal{D} + (\mathcal{D})^2 + \dots)R^{-1},$$

$$1 + \mathcal{D} + (\mathcal{D})^2 + \dots = \text{diag}(1 + \lambda_i f + (\lambda_i f)^2 + \dots) = \text{diag}\left(\frac{1}{1 - \lambda_i f}\right).$$

Таким образом, матрицу податливости пакета можно представить в следующем виде:

$$[S_x] = [R] \text{diag}\left(\frac{1}{1 - \lambda_i f}\right) [R]^{-1} [S_x^0].$$

Рассмотрим изменение собственных чисел  $\lambda_i$  в зависимости от укладки и свойств материала.

Характер изменения собственных чисел для различных укладок показан на рис. 1. Можно предположить, что максимум  $\lambda_1$  зависит от относительной толщины слоя  $\pm \theta$  и показывает степень возникновения нелинейности при приложении продольной нагрузки, т.е. пакет со схемой укладки  $\pm 45^\circ$  имеет наиболее выраженную нелинейность деформирования. Максимальное значение  $\lambda_1$  не может превышать максимальное значение  $\lambda_2$ .

Рассмотрим также для укладки  $\pm \theta$  зависимость собственных чисел от упругих характеристик материала (рис. 2).

Можно сделать вывод, что максимальное значение  $\lambda_2$  обратно зависит только от величины  $G_2$ . Изменение  $\nu_2$  очень слабо влияет на собственные числа.  $E_1$  и  $E_2$ . Третье собственное число всегда равно 0.

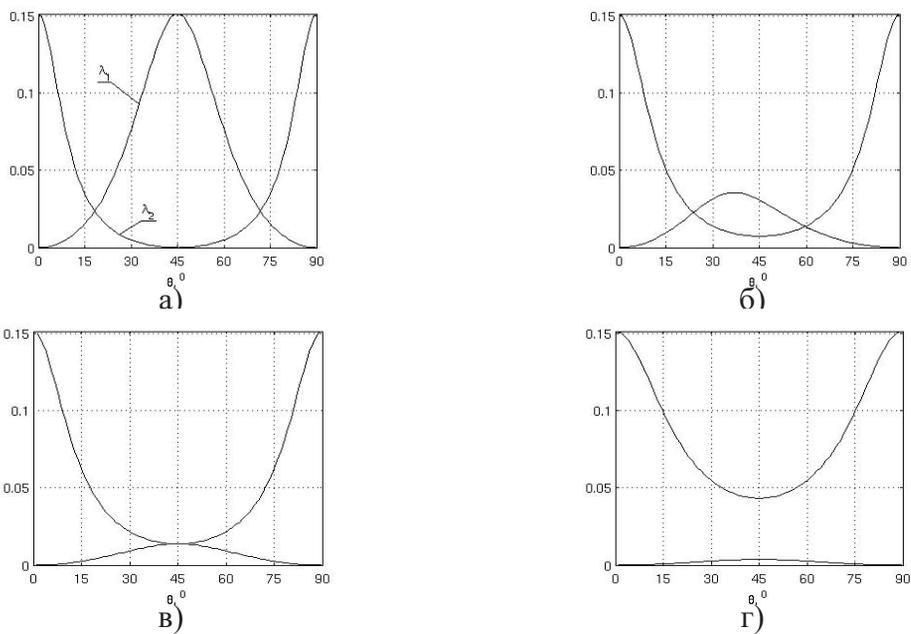


Рис.1. Зависимость собственных чисел от схемы укладки:  
 а)  $[\pm\theta]$ ; б)  $[0/\pm\theta]$ ; в)  $[0/\pm\theta/90]$ ; г)  $[0_4/\pm\theta/90_4]$

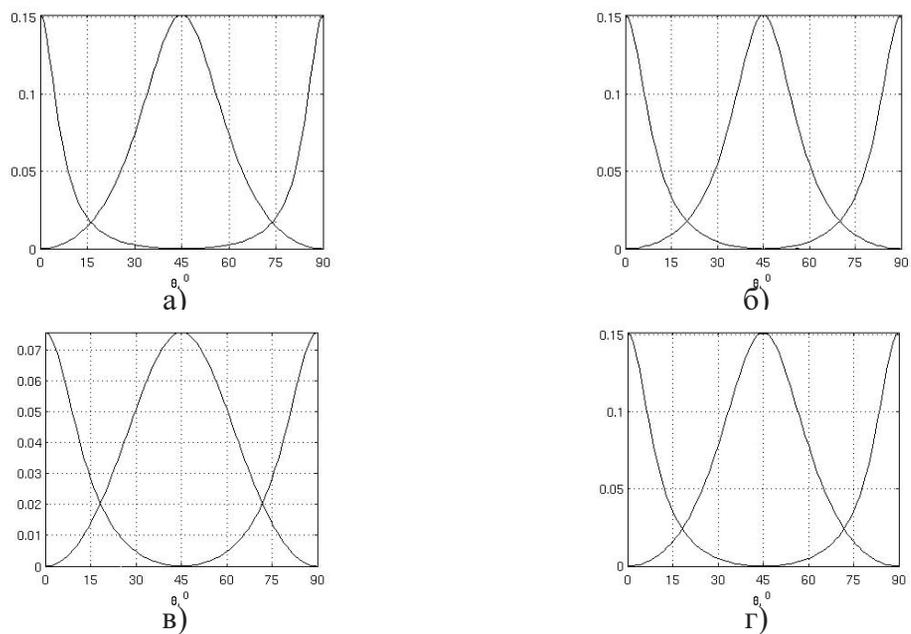


Рис. 2. Зависимость собственных чисел от упругих характеристик:  
 а) значение  $E_1$  увеличено в 2 раза по сравнению с исходным (рис. 1, а);  
 б)  $E_2$  увеличено в 2 раза; в)  $G_2$  увеличено в 2 раза;  
 г)  $\nu_2$  увеличено в 2 раза

Необходимо отметить, что для ортотропного материала определитель матрицы  $A$  равен 0 во всех случаях.

Данный анализ показал, что  $\lambda_1$  показывает степень возникающей нелинейности при деформировании, а  $\lambda_2$  зависит только от величины  $G_p$ , однако данные предположения требуют более детальной проверки.

#### Литература

1. Думанский А.М., Русланцев А.Н., Карасева А.А. Расчет нелинейного деформирования перекрестно-армированных углепластиков // Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012), 25-31 мая 2012 г., Алушта.– М.: МАИ, 2012. – 656с.: ил.
2. Kaddour A.S., Hinton M.J., Li S., Smith P.A. Damage prediction in polymeric composites up-date of part (A) of the third world-wide failure exercise (WWFE-III) // 18th Int-l conference on composite materials. QinetiQ Ltd, 2011. – 48 p.

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ АДГЕЗИЕЙ

*В.А.Нелюб* (МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва, Россия)

Современные углепластики относятся к одним из наиболее перспективных полимерных композиционных материалов (ПКМ), что связано с высокими значениями их термомеханических свойств. Наибольшие прочностные и жесткостные характеристики изделий достигаются при использовании в качестве наполнителя высокомодульных углеродных волокон, а в качестве полимерной матрицы эпоксидных связующих.

Сокращение сроков разработки новых материалов, создание новых конструкторско-технологических решений и изделий современной техники в самых различных отраслях требует разработки углепластиков нового поколения, обладающих повышенной прочностью и долговечностью, в том числе и к деламации. Решение этой задачи требует совершенствования методов повышения адгезионной прочности.

Целью настоящей работы является разработка методики оценки адгезии и ее роли в обеспечении прочности и управление их механическими свойствами за счет селекции их компонентов и активирования поверхности волокна.

В настоящее время в механике композитов выделился самостоятельный раздел – адгезионная механика, который рассматривает взаимодействия на межкомпонентной границе «волокно-матрица» и предлагает методы оценки прочности полимерных композиционных материалов. Однако существующие методики проектирования изделий из углепластиков не учитывают специфики физико-химического взаимодействия между высокомодульными углеродными волокнами и олигомерными связующими, которые происходят на границе раздела фаз. Такая ситуация сложилась потому, что отсутствуют методики и средства, позволяющие идентифицировать и управлять процессами межкомпонентного взаимодействия, недостаточно сведений о характеристиках межкомпонентного

взаимодействия и причинах возникновения деламации. Все это приводит к большим погрешностям при расчетах напряженно-деформированного состояния композита и последующей разработке новых конструкторско-технологических решений.

В результате проведенных исследований были разработаны инженерные методики оценки толщин межфазных слоев, модуля и предела прочности адгезионного взаимодействия матрица-волокно, методики селекции углеродных волокон, обеспечивающих наилучшее физико-химическое взаимодействие на межфазной границе высокомодульное углеродное волокно-эпоксидное связующее, по критериям: количество парамагнитных центров; характеристикам шероховатости и показателям добротности.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕПРЕГОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ МЕТОДОМ ДМА**

*С.В.Ворвуль, О.В.Томчани, Е.И.Маслова, Я.М.Портнова*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Для изготовления композиционных материалов, используемых в аэрокосмических объектах, широко используются препреги, представляющие собой углеродный наполнитель, пропитанный органическим связующим. Выбор режимов формования изделий из препрегов определяется, в основном, реокинетическим поведением связующего.

Для определения реокинетики поведения препрегов и свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) на их основе используются динамические методы исследований. Динамические испытания позволяют в условиях малоамплитудного периодического деформирования определять важнейшие характеристики препрегов и композиционных материалов на их основе в широком диапазоне частот (скоростей сдвига) и температур, одновременно изучать упругие и диссипативные характеристики отверждающихся систем - модуль упругости, модуль потерь, комплексную вязкость, тангенс угла механических потерь.

Полученная методом ДМА информация о температуре/времени гелеобразования препрегов, области минимальной вязкости используются для выбора режимов формования изделий, а информация о динамических механических характеристиках ПКМ позволяет определить диапазон рабочих температур.

Объектами настоящего исследования являлись препреги, изготовленные на основе растворных и расплавных эпоксидных и эпоксиимидных связующих.

В качестве растворных связующих были использованы связующее ЭНФБ (ТУ 1-596-36-2005), представляющее собой раствор эпоксидных и фенолформальдегидных смол в спиртоацетоновой смеси, и связующее АпАТЭК-КПР-150 (далее КПР-150, ТУ 2225-012-93660864-2009), представляющее собой раствор эпоксидных смол и отвердителя в ацетоне. В качестве расплавного связующего использовали эпоксиимидное связующее ТЭИС-33М (ТУ 1-596-443-2007). Препреги изготавливали на основе углеродной ткани

арт.04510 фирмы “Porcher”, Франция.

На рис. 1 и в таблице представлены изменения комплексной вязкости препрегов в зависимости от температуры и их технологические свойства. Из представленных данных видно, что препрег на основе связующего ЭНФБ обладает узкой областью минимальной вязкости, что может затруднить выбор времени подачи автоклавного давления при формовании, особенно крупногабаритных изделий сложной конфигурации. Напротив, для препрега на основе связующего КПП-150 характерна очень широкая область минимальной вязкости, что может вызвать сильный отток связующего, и, как следствие, высокую пористость изделий. Поэтому при формовании изделий из препрега на основе КПП-150 необходимо предпринимать меры для уменьшения потерь связующего.

Таблица

Препреги	Область минимальной вязкости, °С	Температура начала отверждения, °С	Температура гелеобразования*, °С
ЭНФБ/04510	115 - 130	130	132
КПП-150/04510	120 - 180	180	186
ТЭИС-33М/04510	120 - 160	166	169

\*Температуру гелеобразования определяли по точке пересечения модуля упругости и модуля потерь.

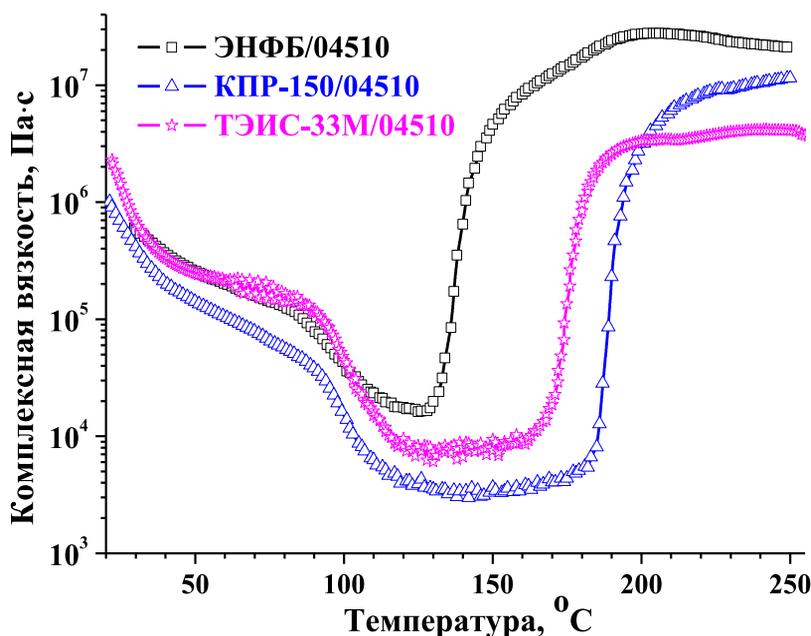


Рис. 1. Температурная зависимость комплексной вязкости препрегов

На рис. 2 представлены температурные зависимости модулей упругости углепластиков, отформованных на основе исследованных препрегов. Температуру стеклования  $T_g$  определяли по началу падения модуля упругости. Температуры стеклования углепластиков на основе растворных связующих ЭНФБ и КПП-150

мало отличаются друг от друга, этот показатель для углепластика на основе расплавленного связующего ТЭИС-33М существенно выше.

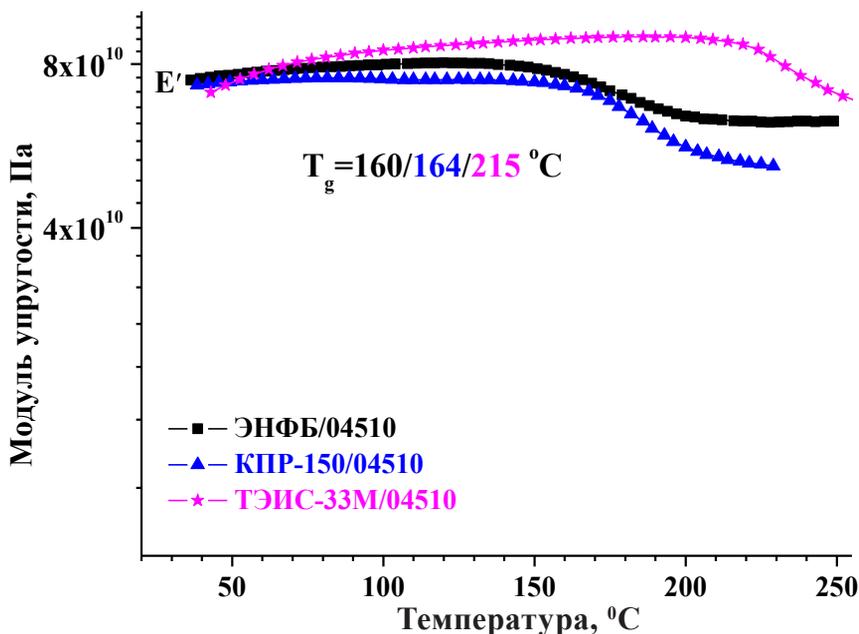


Рис. 2. Температурная зависимость модулей упругости углепластиков

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности динамических методов для исследования препрегов и ПКМ на их основе. Анализ вязкоупругих свойств материалов позволяет выбрать режимы, контролировать процесс формования и прогнозировать свойства получаемых материалов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОЗОН-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЯДЕРНЫХ МИКРОФИЛЬТРОВ

*А.В.Желтова<sup>1</sup>, М.И.Иким<sup>2,3</sup>, С.А.Корнейчук<sup>4</sup>, С.М.Рындя<sup>2,3</sup>, С.Г.Лакеев<sup>2</sup>, Л.И.Трахтенберг<sup>2,5</sup>, А.С.Смолянский<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>СУНЦ МГУ, г. Москва, Россия; <sup>2</sup>ФГУП “НИФХИ им. Л.Я. Карпова”, г. Москва, Россия; <sup>3</sup>НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; <sup>4</sup>ООО “СМА”, г. Москва, Россия; <sup>5</sup>ИХФ им. Н.Н. Семёнова РАН, г. Москва, Россия)

Озон относится к числу химических агентов, применяемых для получения и модификации перспективного класса нано-/микроматериалов – ядерных микрофильтров (ЯМ), изготавливаемых путём облучения потоком тяжёлых ионов тонких полимерных плёнок, в частности, из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) [1, 2]. Однако кинетические закономерности взаимодействия озона с ПЭТФ установлены только для необлученной плёнки [3, 4].

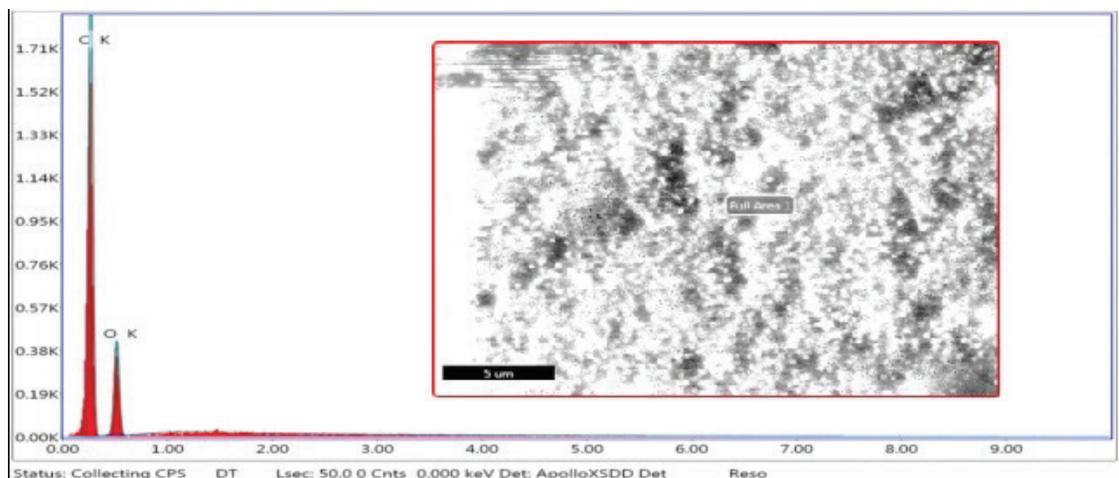


Рис. 1. Элементный состав поверхности образца ядерного микрофилтра на основе полиэтилентерефталатной плёнки, погруженного в дистиллированную воду и обработанного озоном в течение 5 минут, установленный методом рентгено-энергодисперсионного анализа (развёртка по энергии – до 10 кэВ)

В настоящем исследовании впервые проведено изучение закономерностей взаимодействия ЯМ на основе ПЭТФ плёнок (ЯМ-ПЭТФ) с озон-кислородной смесью, выделяющейся на аноде электрохимического генератора озона [5] (содержание озона в смеси – до 20% (объём.)). В качестве объекта исследований использовали образцы ЯМ, изготовленных из двухосно-ориентированных ПЭТФ плёнок толщиной  $10 \pm 1$  мкм (ГОСТ 24234-80); степень вытяжки 3, степень кристалличности - не выше 50%, плотность -  $1400 \text{ кг/м}^3$ , молекулярная масса 31000. В качестве наполнителя материал содержал каолин; его массовая доля - 0,2. Облучение потоком тяжёлых ионов ( ${}_{54}\text{Xe}^{129}$ , энергия  $\sim 1 \text{ МэВ/нуклон}$ , флюенс  $\sim 3 \times 10^8 - 3 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ ) проводили в Лаборатории Ядерных Реакций им. Г.Н. Флерова (ОИЯИ, г. Дубна) на ускорителе тяжёлых ионов У-300 в условиях вакуума, при комнатной температуре. Химическую обработку облученных ионами плёнок ПЭТФ осуществляли в водных растворах 0,5-5 N NaOH в области температур 303-353 К. В результате в плёнке ПЭТФ возникал массив открытых микропор цилиндрической формы со средним диаметром  $\sim 0,2$  мкм. Образцы ЯМ-ПЭТФ помещали в колбу Тищенко, куда подавали отходящую от анода озон-кислородную смесь.

При обработке ЯМ-ПЭТФ озон-кислородной смесью в течение часа наблюдали разрушение полимерных образцов. Однако, когда осуществляли барботаж смеси газов в дистиллированной воде, куда помещали образцы ЯМ-ПЭТФ, то разрушения образцов не происходило. Исследование поверхности ЯМ-ПЭТФ, обработанных озоном в водной среде, методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), позволило обнаружить тенденцию к увеличению размеров микропор с увеличением продолжительности озонолиза. При этом не наблюдали образования дефектов на поверхности плёнки типа трещин разрушения и проч.

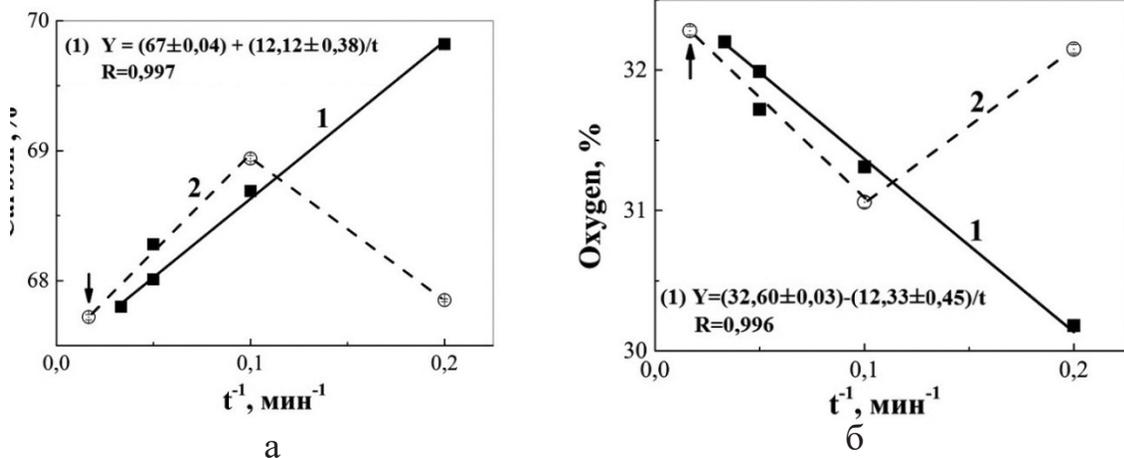


Рис.2. Изменение содержания атомов углерода (а) и кислорода (б) на поверхности ядерных микрофильтров на основе полиэтилентерефталатной плёнки в зависимости от времени пропускания озон-кислородной смеси: 1 – образец помещён в дистиллированную воду; 2 – образец находится в потоке газовой смеси. Стрелкой отмечен момент разрушения образца при газофазной обработке. Прямая 1 построена методом наименьших квадратов; уравнение регрессии и значение коэффициента корреляции приведены на рис. а, б

Параллельно с измерениями РЭМ проводили анализ участков поверхности исследуемых образцов ЯМ-ПЭТФ методом рентгено-энергодисперсионного анализа (РЭА) (рис. 1). Как следует из рис. 1, элементный состав поверхности ЯМ-ПЭТФ определяется содержанием атомов углерода и кислорода. Обнаружено, что с увеличением продолжительности обработки происходит снижение содержания углерода и увеличение концентрации атомов кислорода (рис. 2, а, б). При этом изменение поверхностной концентрации атомов углерода и кислорода удовлетворительно может быть аппроксимировано линейной функцией от обратной величины времени обработки образца ЯМ-ПЭТФ в дистиллированной воде (рис. 2, а, б, зависимость 1). В случае газофазной обработки не удалось сделать однозначные выводы о характере взаимодействия ЯМ-ПЭТФ с потоком озон-кислородной смеси (рис.2, а, б, зависимость 2).

Природа обнаруженного эффекта может быть связана с образованием ионов гидроксила при барботаже озон-кислородной смеси в водной среде [6]. Как известно [7], появление ионов гидроксила резко ускоряет процессы разрыва С-О связей в главной полимерной цепи ПЭТФ и приводит к развитию деструкционных процессов на поверхности полимера. Одновременно с деструкцией ЯМ-ПЭТФ происходит окисление поверхности и боковых стенок микропор (вероятно, преимущественно окисляются двойные связи и полиеновые структуры, образованные при облучении ПЭТФ потоком тяжёлых ионов). Следует отметить, что реакция щелочного гидролиза ПЭТФ имеет нулевой порядок [7], в то время как полученные в настоящем исследовании данные указывают, что изменение содержания углерода и кислорода на поверхности в результате взаимодействия озон-кислородной смеси с ЯМ-ПЭТФ, помещёнными в дистиллированную воду,

может быть описано кинетическим уравнением второго порядка. Возможно, изменение кинетики процесса связано с наличием системы микропор в плёнке ЯМ-ПЭТФ. Кроме того, симбатное снижение концентрации атомов углерода и рост содержания атомов кислорода (рисунок 2, а, б) позволяют предположить, что наблюдаемые процессы реализуются в рамках одного механизма, для установления которого необходимы дополнительные исследования.

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные контракты № 11.519.11.6032, 14.513.11.0077) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-00437), с использованием оборудования Центра коллективного пользования (ЦКП) «Микроанализ» Технопарка Сколково.

#### Литература

1. Burks E., Flores C., Gilbert D., Liu K., Felter T., Charnvanichborikarn S., Kucheyev S., Colvin J. // Synthesis of low density metallic nanowire network // Bulletin of the American Physical Society. – V. 58, N 1 (APS March Meeting 2013, Abstract: U20.00007).
2. Debusschere B.J., Hickner M.A., Zendejas F.J., Adalsteinsson H., Tran H.M., Long K.R., Najm H.N., Chinn D.A., Kent M.S., Simmons B.A. Computational and experimental study of nanoporous membranes for water desalination and decontamination // SANDIA Report. SAND2008-7603.–Sandia National Laboratories, United States Department of Energy, 2008.– 60 p.
3. Hong Bin Gu. Surface modification of selected polymer films by ozonation // A thesis presented to Ryerson University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science in the program of chemical engineering.–Toronto, Ontario, Canada, 2008.– 137 p.
4. Рыбкин В.В., Кувалдина Е.В., Иванов А.Н., Смирнов С.А., Титов В.А. Кинетические закономерности инициирования процессов окислительной деструкции полиэтилентерефталата в плазме кислорода // Химия высоких энергий. – 2001. – Т. 35, № 1.– С. 42 – 45.
5. Пат. 2285061 РФ МПК С25 В 1/13 (2006.01). Электролизёр для получения озона / Потапова Г. Ф., Блинов А. В., Касаткин Э. В., Клочихин В. Л., Путилов А. В.; ФГУП «Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова».– Заявка 2004137009/15 от 2004.12.17. Опубл. 2006.05.27.
6. Wabner D., Grambow C. Reactive intermediates during oxidation of water at lead dioxide and platinum electrodes // J. Electroanal. Chem. – 1985.– V. 195. – С. 95 - 108.
7. Моисеев Ю.В., Маркин В.С., Заиков Г.Е. Химическая деструкция полимеров в агрессивных жидких средах // Успехи химии. – 1976. – Т. 45, № 3. – С. 510 – 547.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СТАРЕНИЯ УГЛЕВОЛОКНИСТЫХ КАТОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОЗОНА

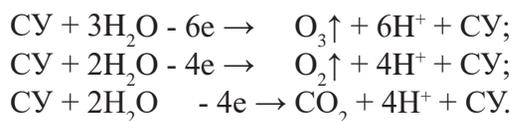
*М.И.Иким<sup>1,2</sup>, С.А.Корнейчук<sup>3</sup>, С.М.Рындя<sup>1,2</sup>, Г.Ф.Потапова<sup>2</sup>, Л.И.Трахтенберг<sup>2,4</sup>,  
А.С.Смолянский<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; <sup>2</sup>ФГУП “НИФХИ им. Л.Я. Карпова”, г. Москва, Россия; <sup>3</sup>ООО “СМА”, г. Москва, Россия; <sup>4</sup>ИХФ им. Н.Н. Семёнова РАН, г. Москва, Россия)

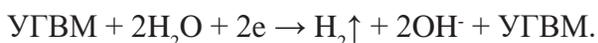
Одной из ключевых проблем при создании электрохимических генераторов озона (ЭХГО) является выбор катодных материалов, обладающих высокой стойкостью к одновременному воздействию комплекса повреждающих факторов: а) возникающих в ходе электродных реакций озона, кислорода, водорода; б) активных частиц (прежде всего, ионов гидроксила), образующихся в процессах электролитической диссоциации и протекания электрохимических реакций в электролите.

Перспективными материалами для использования в качестве катодов ЭХГО следует считать углеволокнистые материалы (УГВМ). Поэтому представляется актуальным исследование механизма и закономерностей старения катодных материалов на основе УГВМ в процессе эксплуатации ЭХГО и установления взаимосвязи между производительностью аппарата и изменением нано-/микроструктуры поверхности катода.

В процессе эксплуатации электролизёра на аноде протекают реакции образования и выделения озона и кислорода:



В то же время на катоде протекает реакция образования водорода:



Цель настоящего исследования состояла в изучении нано-/микроструктурных изменений поверхности катодных материалов на основе УГВМ «Вискум» (ТУ 6-06-31-638-88) и «Бусофит» (ТУ РБ 00204056-108-95) (производство - Светлогорское производственное объединение «Химволокно», г. Светлогорск Гомельской области, Республика Беларусь), при воздействии выделяемой на аноде ЭХГО озон-кислородной смеси (содержание озона – до 20%) в режимах (1) – (3) (условия обработки приведены в таблице).

В экспериментах использовали лабораторный электролизёр, выполненный из стекла. Анодное и катодное пространства электролизера разделены катионообменной мембраной МФ-СК. В качестве анода использовали стеклоуглерод (СУ), катодом служил исследуемый образец УГВМ «Вискум» и/или «Бусофит», армированный в Ni сетку.

Перед началом эксперимента электролит (табл.) заливали в катодное пространство электролизера. Сюда же инжестировали озон-кислородную смесь,

получаемую на аноде (при проведении опыта в режиме (3) (табл.)). В качестве анолита использовали водный раствор 30-40%  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ .

С помощью тефлоновых или силиконовых шлангов подсоединяли уравнительную склянку (баростат), служащую для стабилизации разности давлений выделяющихся газов (озон, кислород, водород) над растворами в камерах электролизера и на диафрагме. К баростату подсоединяют дополнительные нагрузочные ловушки – барботеры, которые служат как ёмкостями для сбора газов, так и местами для размещения исследуемых образцов УГВМ «Вискум» и/или «Бусофит». Электропитание устройства осуществляли с помощью источника постоянного тока Б5-71.

Таблица

Изменение величины сорбционной ёмкости по йоду  $S_e$ , г/г (или в относительных единицах) углеволокнистых материалов марки «Вискум» и «Бусофит» по йоду в зависимости от режима обработки материала

Режим обработки	УГВМ «Вискум»		УГВМ «Бусофит»	
	$S_e$ , г/г	$S_e$ , отн. ед.	$S_e$ , г/г	$S_e$ , отн. ед.
Исходный образец	0,0058	1,0	0,259	1,0
(1) Образец УГВМ помещён в поток озон-кислородной газовой смеси	0,0135	2,33	0,146	0,564
(1) Озонирование образца УГВМ в водной среде в течение одного часа	0,014	2,41	0,17	0,656
(1) Озонирование образца УГВМ в водном растворе 1% NaOH	0,068	11,72	0,203	0,784
(1) Озонирование образца УГВМ в 1% $\text{H}_2\text{O}_2$	0,0159	2,74	0,144	0,556
(1) Озонирование образца УГВМ в $1 \cdot 10^{-5}\%$ $\text{H}_2\text{O}_2$	0,019	3,28	0,193	0,745
(2) Озонирование катода на основе УГВМ в водном растворе 1 М $\text{H}_4\text{HF}_2$ , в течение: - одного часа - трёх часов	0,0063	1,09	0,0063	0,024
	0,008	1,38	0,0080	0,031
(3) Озонирование катода на основе УГВМ в водном растворе 10% NaOH, ток – 10 мА	0,357	61,56	-	-
(3) Озонирование катода на основе УГВМ в водном растворе 10% NaOH, ток – 1 мА	0,179	30,86	-	-
(3) Пропитка образца УГВМ в водном растворе 1 М NaF в течение 24 часов, затем озонирование катода на основе пропитанного УГВМ в водном растворе 10% NaOH, ток – 1,0 мА	0,248	42,76	-	-

Как следует из табл., обработка рассматриваемых материалов в режимах (1) и (2) приводит к противоположному изменению сорбционной ёмкости поверхности УГВМ «Вискум» и «Бусофит», соответственно: если сорбционная ёмкость

УГВМ «Вискум» возрастает, то для УГВМ «Бусофит» величина  $S_e$  уменьшается. При этом следует отметить, что  $S_e$  для исходных образцов УГВМ «Вискум» и «Бусофит» различается на два порядка. Сопоставление с результатами электронно-микроскопического анализа, данными, полученными методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), позволяет сделать вывод о том, что различное химическое строение и разная структура поверхности УГВМ «Вискум» и «Бусофит» служат причиной обнаруженных отличий в изменении сорбционной ёмкости в результате озон-кислородной обработки. УГВМ «Вискум» и «Бусофит» изготовлены на основе вискозного волокна, пропитанного кремнийорганическими соединениями или подвергнутого карбонизации, соответственно. Гетероцепная природа вискозного волокна обуславливает высокую чувствительность УГВМ «Вискум» к озонолузу в присутствии щелочных электролитов. В то же время термоокисление материала и формирование графитоподобной структуры на поверхности УГВМ «Бусофит» после карбонизации оказывают защитное действие при обработке озон-кислородной смесью: по-видимому, уменьшение  $S_e$  можно связать с деструкцией поверхностных слоёв катода, что приводит к снижению содержания окисленных групп.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ МЕТОДОМ ДИЛАТОМЕТРИИ**

*Е.Р.Лепикаш, Л.М.Шкиркова, Н.С.Обухова, И.Н.Комиссарова, З.В.Морозова*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Стеклотекстолиты радиотехнического назначения широко применяются в составе антенных блоков приемно-передающих радиолокационных комплексов гражданского и специального назначения. Для ряда изделий, особенно крупногабаритных, при оценке качества указанных материалов проводятся испытания по определению термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) в заданном диапазоне температур методом дилатометрии.

Учитывая отсутствие экспериментальных данных, целью данной работы явилось исследование влияния дополнительной термообработки (термостабилизации), размеров образцов и направления испытания стеклотекстолитов на их термодформационные свойства.

В качестве объектов исследования использованы образцы фольгированного и нефольгированного стеклотекстолитов на основе эпоксидного связующего, электроизоляционной стеклоткани с дополнительной термообработкой и без нее, имеющие различную длину и толщину. Образцы для испытаний были вырезаны по направлению основы ( $0^\circ$ ) и утка ( $90^\circ$ ) армирующей стеклоткани.

Для определения значений ТКЛР использован дилатометр типа DIL 801 фирмы «ВАНР Thermoanalyse».

Сравнение термодформационного поведения образцов стеклотекстолитов, отличающихся наличием термостабилизации после формования, показывает, что ход кривых изменения относительной термической деформации от температуры для

них различен. Особенно ярко это наблюдается при первом цикле нагревания (рис. 1). Отличие в ходе термодформационных кривых связано, как с доотверждением связующего в композите, так и с реализацией релаксационных процессов.

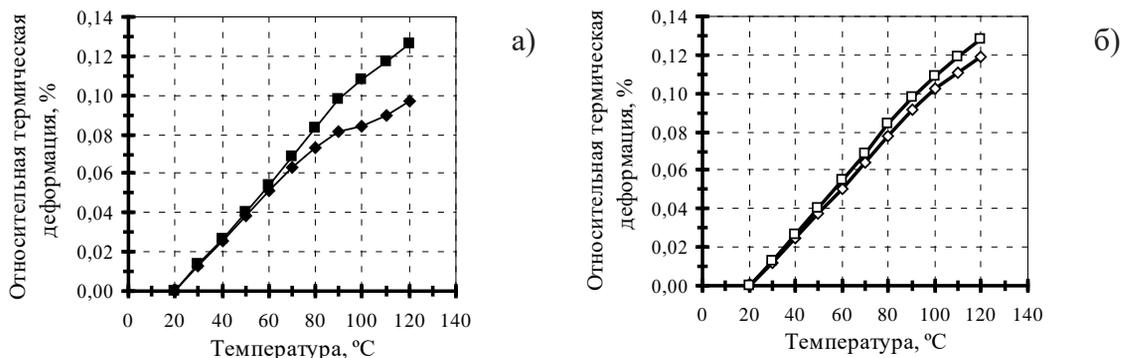


Рис. 1. Температурная зависимость относительной термической деформации образцов фольгированного стеклотекстолита при первом (а) и втором (б) циклах нагревания: (—◆—, —◇— — нетермоста-билизированный образец; —■—, —□— — термостабилизированный образец)

По разности значений относительной термической деформации образцов при первом и втором циклах нагревания dilatометрических испытаний построены релаксационные кривые, характеризующие процесс реализации остаточных напряжений, возникающих в стеклотекстолитах при формовании (рис. 2). Можно отметить, что термостабилизация практически устраняет различие в ходе термодформационных кривых для образцов при первом и втором циклах нагревания, а также для образцов, вырезанных в разных направлениях (основа-уток), что свидетельствует о минимизации остаточных напряжений в термообработанном материале.

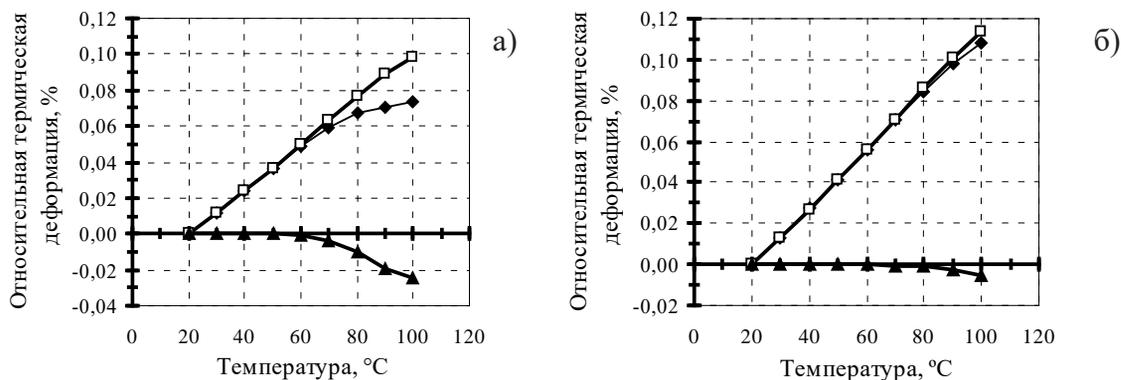


Рис. 2. Зависимость термодформационных свойств фольгированного стеклотекстолита от температуры для образцов без (а) и с термостабилизацией (б). Направление испытания — 0°; —◆— — 1-й цикл нагревания; —□— — 2-й цикл нагревания; —▲— — релаксационная кривая

Полученные данные, обладая иллюстративной наглядностью, позволяют оценивать влияние технологических факторов, в том числе термостабилизации, на термодформационное поведение и уровень остаточных напряжений в исследуемых композитах.

Включение медного фольгированного слоя в состав стеклотекстолита также изменяет ход термодформационных кривых и уровень значений ТКЛР по сравнению с данными для нефольгированного материала (рис. 2а, 3а).

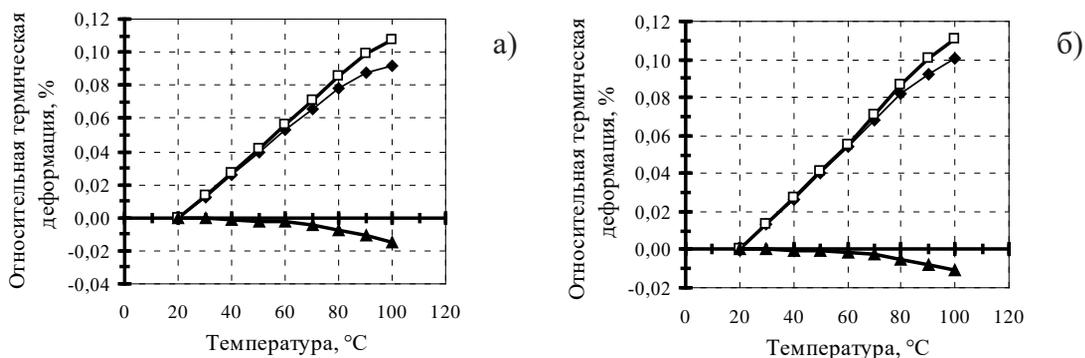


Рис. 3. Влияние направления испытания на термодформационные свойства образцов нефольгированного стеклотекстолита. Направление испытания: а) – 0°; б) – 90°; –◆– 1-й цикл нагревания; –□– 2-й цикл нагревания; –▲– релаксационная кривая

Образцы, вырезанные в направлении утка, имеют более высокие значения ТКЛР для обоих типов стеклотекстолитов. Изменение толщины от 1,0 до 1,5 мм и размеров от 20 до 50 мм не оказывает существенного влияния на уровень значений ТКЛР и характер термодформационных кривых.

Полученные dilatометрические данные хорошо согласуются с результатами оценки компонентного состава стеклотекстолитов. Так, введение фольгированного слоя приводит к снижению объемного содержания связующего в композите и соответственно уровня значений ТКЛР у фольгированного стеклотекстолита.

Высокая чувствительность dilatометрических экспериментальных данных к изменениям технологии и соотношения компонентов в материале позволяет использовать результаты dilatометрических испытаний для оценки влияния состава и технологических факторов на термодформационные свойства стеклотекстолитов, в том числе, уровень значений термического коэффициента линейного расширения.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ТЕПЛОСТОЙКОГО РАСПЛАВНОГО ЭПОКСИИМИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ

*А.В.Хабенко, Л.В.Юдина, Г.С.Шуль*

(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Современное развитие аэрокосмической техники требует применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), способных длительно работать при температурах от 150 до 300 °С и выше. Создание таких материалов возможно только на основе теплостойких матриц.

В качестве связующих для изготовления ПКМ в основном используют термореактивные смолы, наиболее распространенными среди которых являются эпоксиды. Однако их применение ограничено температурами 150-180 °С. Для создания более теплостойкой матрицы нами был выбран способ модификации полифункциональных эпоксидных смол бисмалеимидами.

Это позволило нам разработать эпоксибисмалеимидное расплавленное связующее ТЭИС-33М с теплостойкостью выше 200°С на основе полифункциональных эпоксидных и бисмалеимидных смол.

Процесс отверждения связующего был исследован методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при разных скоростях нагрева (рис.). Это позволило определить кинетические параметры реакции отверждения нового теплостойкого эпоксибисмалеимидного связующего (энергию активации, предэкспоненциальный множитель, порядок реакции), на основании которых сделаны прогнозы времени отверждения до заданных степеней отверждения при семи температурах от минус 18 до плюс 200 °С (табл.).

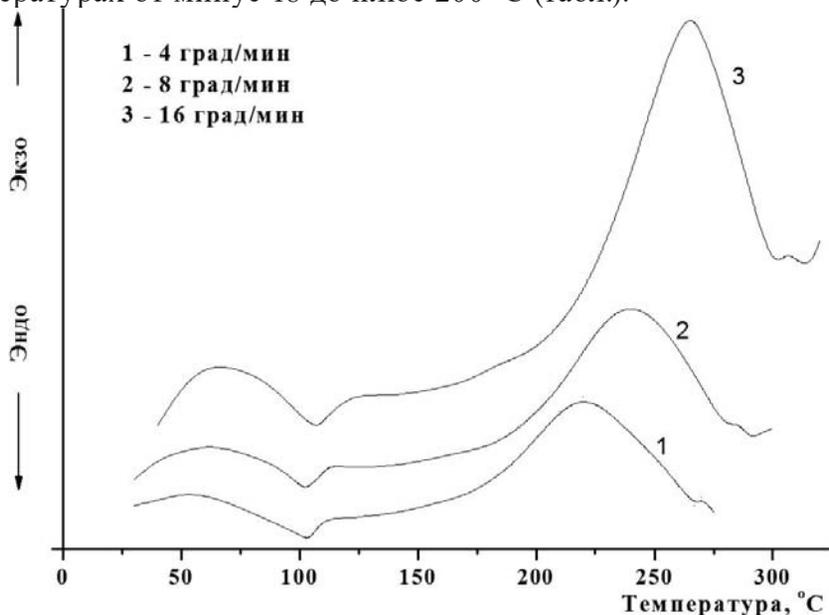


Рис. Кривые ДСК связующего ТЭИС-33 при различных скоростях нагрева

Как видно из рис., процесс отверждения при скорости нагрева 4 град/мин начинается при 120° С, а максимальная скорость реакции достигается при 220 °С. При увеличении скорости нагрева в два раза вершины пиков сдвигаются в сторону более высоких температур примерно на 20°С в полном соответствии с принципом температурно-временной эквивалентности скорости химических реакций. Плавление связующего происходит в узком интервале температур (103-107 °С) и практически не зависит от скорости нагрева.

Таблица

Прогноз времени превращения связующего ТЭИС-33М

Степень превращения, %	Энергия активации, ккал/моль	Время превращения (мин) для заданных температур (°С)						
		-18	4	20	30	90	170	200
5	16,1	543000	185000	61700	24800	298	5,29	1,66
10	16,1	889000	303000	101000	40600	492	8,78	2,76
15	16,1	1260000	429000	143000	57300	687	12,2	3,81
20	16,1	1630000	555000	185000	73900	878	15,4	4,81
25	16,2	2010000	684000	228000	91000	1070	18,7	5,82
30	16,2		816000	272000	109000	1270	21,9	6,83
35	16,2		963000	321000	128000	1480	25,4	7,87
40	16,3		1120000	372000	148000	1700	28,9	8,94
45	16,3		1290000	431000	171000	1940	32,7	10,1
50	16,4		1500000	499000	197000	2210	36,8	11,3
55	16,4			575000	227000	2500	41,1	12,6
60	16,5			664000	261000	2830	45,8	14,0
65	16,5			773000	303000	3220	51,2	15,5
70	16,6			911000	355000	3700	57,6	17,4
75	16,7			1080000	418000	4250	64,7	19,4
80	16,8			1320000	508000	5000	74,0	22,0
85	17,0			1650000	632000	6020	86,3	25,4
90	17,1			2170000	823000	7480	103	30,0
95	17,3			2980000	1120000	9720	128	36,9

Для растворных связующих принято, что при степени превращения до 5 % связующее технологически пригодно к использованию. Как видно из данных, приведенных в таблице, при –18 °С связующее может храниться не менее года, при 4 °С – 128 суток, а при 20 °С – не менее 40 суток. Эти показатели по времени хранения не уступают аналогичным показателям для теплостойких связующих, производимых ведущими мировыми фирмами.

Экспериментальная проверка прогнозов времени отверждения исследованного эпоксибисмалеимидного связующего показала хорошее совпадение предсказанного времени отверждения с полученным при отверждении в изотермических режимах при таких же температурах. Эти прогнозы позволили существенно сократить время на начальной стадии при выборе состава связующего, а также температурных режимов получения препрегов и изделий на основе разработанного связующего.

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОСОТОПЛАСТОВ

*А.М.Крюков, Н.А.Садикова, В.С.Волков, Е.В.Денисова*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Возросшая потребность в сотах, и, в частности, стеклосотопластах (ССП), значительное расширение области их применения сделали актуальной задачу совершенствования производства и увеличения объёмов их выпуска.

В представленной работе рассмотрены три пути совершенствования производства стеклопластиковых сотовых заполнителей, изготавливаемых на основе фенолоформальдегидного связующего и различных стеклотканей (размер граней ячеек: 2,5; 3,5 и 4,2 мм).

Повышение габаритов изготавливаемых сотоблоков является основным способом решения этой задачи. Увеличение размеров сотоблоков достигается за счёт возрастания числа листов стеклоткани в сотопакете. С целью снижения вероятности появления недоотверждённых клеевых полос в сотоблоках разработан двустадийный режим формования пакетов. При этом на первой стадии происходит основное отверждение клеевых полос при прессовании сотопакетов в обогреваемом прессе, а на второй – доотверждение их в термостате в свободно подвешенном состоянии.

Для минимизации времени воздействия растворителя связующего на клеевые полосы пропитанных сотоблоков была внедрена продувка каналов ячеек воздухом с помощью специально организованного потока за счёт вытяжной вентиляции. В результате уменьшилось количество выделяемых в помещение вредных веществ при сушке пропитанных сотоблоков на воздухе, длительность операции сушки сократилась в 10 раз по сравнению с обычной сушкой на воздухе, а случаи разрывов сотоблоков прекратились.

Другим направлением интенсификации описанного производства является совершенствование отдельных технологических операций. В качестве примера можно привести операцию нанесения клеевых полос на стеклоткань. На стадии приготовления клея БФ-2 в него добавляется ксантеновый краситель Родамин Ж для придания контрастности клеевым полосам при нанесении их на стеклоткань. Вместе с тем, исследования методами ДСК и ДМА показали, что Родамин Ж ускоряет отверждение клея БФ-2, и для достижения нужной степени отверждения требуется времени на 1-1,5 ч меньше, чем для чистого БФ-2.

Наряду с этим для интенсификации изготовления СПП представляет интерес снижение температуры и времени отверждения пропитанных сотоблоков. Уменьшение степени отверждения связующего в сотовом заполнителе будет способствовать увеличению гибкости сотовых панелей при формовании криволинейных изделий. Указанный технологический подход позволяет при изготовлении трёхслойных конструкций применять недоотверждённые СПП, которые впоследствии доотверждаются в конструкциях при склеивании с обшивками.

В результате проведённых исследований разработана высокопроизводительная технология изготовления крупногабаритных стеклосотоблоков размером 1200×650×330 мм стеклосотопластов типа СПП-1 и СПП-1П, которая позволила сократить на 20% общий цикл производства данных изделий, внедренных в самолёты семейства Ту, SSJ 100, Ан-148, Ил-96-400 и др.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОЗОНА В ЭКОЛОГИИ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ, СИНТЕЗЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

*Г.Ф.Потапова<sup>1</sup>, М.И.Иким<sup>1,2</sup>, Н.В.Козлова<sup>1</sup>, А.С.Смолянский<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup>ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», г. Москва, Россия; <sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия)

Создание высокоэффективных электрохимических генераторов высококонцентрированного озона [1] стимулирует разработку нового поколения озонных технологий. В настоящее время можно отметить три основных направления развития озонных технологий (которые, впрочем, часто пересекаются друг с другом) [2 – 4]:

а) исследования в области применения озона для очистки природных и сточных вод;

б) организация и проведение испытаний различных материалов и изделий на стойкость к воздействию озона, изучение механизмов озонного старения твёрдых тел (металлы и сплавы, керамика, полимерные и композиционные материалы и т.д.);

в) проведение исследований в области синтеза органических соединений различных классов при взаимодействии с озоном.

В настоящее время наибольшее внимание привлекают возможности использования озона для очистки природных и сточных вод. Решение проблем подготовки и очистки природных и сточных вод для использования в промышленности и в быту приобретают ключевой характер в связи с истощением запасов пресной воды. Около 30% всего объёма сточных вод не подвергается очистке перед сбросом в водоёмы. Вода является одним из важнейших компонентов системы жизнеобеспечения различных технических устройств, поэтому в настоящее время приобретает особое значение разработка высокоэффективных, экономичных, обладающих пониженным энергопотреблением технологий очистки природных и сточных вод.

Наиболее распространёнными загрязнениями техногенного происхождения в источниках хозяйственно-питьевого водоснабжения являются:

- нефтепродукты с концентрацией 1 – 2 мг/л (в 3 – 8 раз выше ПДК);
- фенолы, образующие хлорфенольные соединения в концентрации 0,2-0,3 мг/л (в 200 – 300 раз выше ПДК);
- поверхностно-активные вещества в концентрации 4 – 5 мг/л (в 8 – 10 раз выше ПДК);
- пестициды в концентрации 4 – 5 мг/л (в 8 – 15 раз выше ПДК);
- соединения тяжёлых металлов в концентрации 0,15 – 0,3 мг/л (в 2 – 6 раз выше ПДК).

Традиционные технологии очистки воды, как правило, являются энергозатратными, малопродуктивными, и, следовательно, не могут справиться с повышенной антропогенной нагрузкой.

В ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» разработана электрохимическая технология озон-пероксидной очистки природных и сточных вод и создана

лабораторная установка для реализации рассматриваемой технологии. Научная новизна предлагаемой технологии состоит в применении высокоэффективных электродов нового типа, представляющих собой композитные наноматериалы, состоящие из углеродных волокнистых материалов, армированных никелем, и состоит в *in-situ* синергетическом эффекте воздействия пероксикатализа, электровосстановления, электрохимически регулируемой сорбции при жидкофазном окислении загрязнений активным кислородом, образующимся при разложении озона и пероксида водорода.

Новизна и преимущества технических решений заключаются в возможности в момент обработки осуществлять:

- интенсивное озон-пероксидное окисление и деструкцию органических соединений различных классов;
- катодное дегалогенирование хлорорганических соединений;
- нитрификацию и денитрификацию;
- осаждение тяжёлых металлов, гидроксидов, оксидов;
- отсутствие дополнительной стадии получения расходуемых газов и реагентов;
- электрокаталитический синтез озона и пероксида водорода на электродах-катализаторах из углеродных материалов;
- регенерацию поверхности углеродных волокнистых материалов в процессе глубокой, комплексной очистки природных и сточных вод.

Таблица

Результаты испытаний по обезжелезиванию водных растворов  $\text{FeSO}_4$  в электрохимическом генераторе озона с использованием в качестве катода углеволоконных материалов «Вискум» и «Бусофит» (производство - Светлогорское производственное объединение «Химволокно», г. Светлогорск Гомельской области, Республика Беларусь)

Материал катода	Время обработки, минуты	Степень обезжелезивания $K_{\text{Fe}}^{+2}$	Сорбционная емкость по $\text{Fe}^{+2}$ , г/г
«Вискум»	30	5,88	$6 \cdot 10^{-4}$
«Бусофит»	30	8,2	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Преимущества электрохимической озон-пероксидной технологии очистки природных и сточных вод:

- снижение массогабаритных характеристик относительно газоразрядных озонаторов;
- снижение энергопотребления;
- снижение себестоимости очистки воды на 12% за счёт исключения применения хлора и гипохлорида натрия;
- снижение капитальных и эксплуатационных расходов;
- многофункциональность;
- снижение материалоёмкости;
- простота конструкции и управления;
- экологическая и техническая безопасность.

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные контракты № 11.519.11.6032, 14.513.11.0077) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-00437).

#### Литература

1. Пат. 2285061 РФ МПК С25 В 1/13 (2006.01). Электролизёр для получения озона / Потапова Г. Ф., Блинов А. В., Касаткин Э. В., Ключихин В. Л., Путилов А. В.; ФГУП «Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова». – Заявка 2004137009/15 от 2004.12.17. Опубл. 2006.05.27.

2. Разумовский С.Д., Заиков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями. – М.: Наука, 1974. – 322 с.

3. Hong Bin Gu. Surface modification of selected polymer films by ozonation // A thesis presented to Ryerson University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science in the program of chemical engineering. – Toronto, Ontario, Canada, 2008. – 137p.

4. Пат. № 21004960 (РФ) МПК С 02 F 1/46. Способы очистки сточных вод/ Г.Ф. Потапова, А.В. Путилов, А.И. Сорокин, В.П. Никитин, Н.Н. Шипков, О.В. Шестакова, О.П. Френкель; ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». – Опубл. 20.02.1998.

## ОСНОВНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ В УСКОРЕННЫХ РЕЖИМАХ

*А.В.Демченко, В.С.Зевако, О.А.Карникова, В.В.Харченко*

(ПАО “Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, г. Днепропетровск, Украина)

Сотовые конструкции (СК) из композиционных материалов (КМ) широко распространены во многих отраслях промышленности. Диапазон их применения постоянно расширяется и сегодня охватывает широкий спектр изделий, начиная от конструкций авиа- и ракетно-космической техники до строительной и мебельной промышленности.

Одним из основных свойств конструкций из КМ являются показатели надежности и долговечности, при которых сохраняется заданный уровень физико-механических, теплофизических и других характеристик изделий, подтверждающийся экспериментальными методами. Для сокращения времени и затрат на проведение испытаний целесообразно применять различные ускоренные методы.

Все режимы разделяются на номинальный (эксплуатационный)  $\xi_{\dot{y}}$  и форсированный (ускоренный)  $\xi_{\dot{e}}$ . Каждому режиму испытаний  $\xi_{\dot{e}}$  соответствует значение коэффициента ускорения  $k$  такое, что  $k=1$  только при  $\xi_{\dot{e}} = \xi_{\dot{y}}$ .

Предполагается, что каждая конструкция характеризуется набором параметров  $\omega = \omega(t)$ , которые определяют длительность  $\tau = \tau(\xi, \omega)$  ее функционирования до

отказа. Функциональная зависимость между значениями  $\tau(\xi_{\dot{Y}}, \omega_0)$  и  $\tau(\xi_{\dot{E}}, \omega_0)$  имеет вид:

$$\tau(\xi_{\dot{Y}}, \omega_0) = g(\tau(\xi_{\dot{E}}, \omega_0)). \quad (1)$$

При некоторых допущениях [3], касающихся непрерывности и монотонности функции  $g$ , из выражения (1) получена зависимость для расчета длительности испытаний  $t_{\dot{E}}$  в форсированном режиме  $\xi_{\dot{E}}$ :

$$t_{\dot{E}} = g^{-1}(t_{\dot{Y}}), \quad (2)$$

где  $t_{\dot{Y}}$  – время проведения испытаний в режиме  $\xi_{\dot{Y}}$  (эксплуатационном).

Пересчет результатов ускоренных (форсированных) испытаний к нормальным эксплуатационным условиям производится в соответствии с принципами расходования ресурсов, в основу которых положены принципы эквивалентности различных режимов нагружения.

При комплексном воздействии факторов и действии нескольких механизмов отказов нельзя оценить уровень накопленных повреждений по изменению одного конкретного параметра. При этом вводятся обобщенные критерии, являющиеся функциями параметров окружающей среды, режимов нагружения, внутренних свойств элементов и основанные на линейном принципе накопления повреждения, методе равных вероятностей Седякина, термодинамических критериях, в частности, энтропийном и др. [1, 2, 3].

Одним из важнейших параметров при назначении режимов форсированных испытаний является коэффициент ускорения. В теории испытаний коэффициент ускорения  $k$  представляет собой отношение длительности испытаний  $t_{\dot{Y}}$  при эксплуатационных условиях  $\xi_{\dot{Y}}$  к длительности  $t_{\dot{E}}$  в форсированном режиме  $\xi_{\dot{E}}$  для приведения конструкции в одно и то же состояние в смысле накопленных повреждений:

$$k = t_{\dot{Y}}(\xi_{\dot{Y}}) / t_{\dot{E}}(\xi_{\dot{E}}), \quad (3)$$

где  $t_{\dot{Y}}(\xi_{\dot{Y}})$  – время приведения конструкции в заданное состояние в режиме  $\xi_{\dot{Y}}$ ;  $t_{\dot{E}}(\xi_{\dot{E}})$  – время приведения устройства в то же состояние в форсированном режиме  $\xi_{\dot{E}}$ .

В теории испытаний существуют и другие определения коэффициента ускорения. Однако в большинстве случаев для определения значения коэффициента ускорения применяют линейные модели накопления повреждений. При этом скорость накопления повреждения считается постоянной, а коэффициент ускорения представляет собой отношение скоростей накопления повреждений в форсированном  $V(\xi_{\dot{E}})$  и эксплуатационном  $V(\xi_{\dot{Y}})$  режимах:

$$k = V(\xi_{\dot{E}}) / V(\xi_{\dot{Y}}). \quad (4)$$

Обозначим  $\Omega_{\dot{Y}}, \Omega_{\dot{E}}$  нагрузки при эксплуатации и испытаниях, тогда, учитывая зависимость скорости накопления повреждений от нагрузок, представим зависимость (4) в виде

$$k = \varphi \left( \frac{\Omega_{\dot{E}}}{\Omega_{\dot{Y}}} \right). \quad (5)$$

Выбор значения нагрузки  $\Omega_{\dot{E}}$  проводится при условии неизменности механизмов накопления повреждений.

Для конструкции, состоящей из  $m$  независимых элементов, коэффициент ускорения принимают равным соответствующему минимальному значению для составляющих элементов, либо вычисляют по формуле:

$$k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_{ji} k_j, \quad (6)$$

где  $n$  – количество различных механизмов отказов для  $j$ -го элемента;

$\alpha_{ji}$  – весовой коэффициент, характеризующий относительную долю вероятности отказов  $j$ -го элемента вследствие развития  $i$ -го механизма ( $i = \overline{1, n}$ );

$k_j$  – коэффициент ускорения по  $i$ -му механизму отказа.

При одновременном форсировании по  $s$  факторам коэффициент ускорения может приближенно рассчитываться по зависимости:

$$k = \prod_{i=1}^s k_i, \quad (7)$$

где  $k_i$  – коэффициент ускорения по  $i$ -му фактору.

#### Литература

1. Демченко А.В., Переверзев Е.С. Основные методические положения ускоренных ресурсных испытаний // Техническая механика.–Днепропетровск, 1998. – Вып.7. – С. 155-159.
2. Карташов Г.Д. О методе Майера и принципе Седякина. // Техническая кибернетика. – 1970. – №3. – С. 71-78.
3. Переверзев Е.С. Проблемы подтверждения ресурсных характеристик комплектующих систем космических аппаратов с длительными сроками функционирования // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т.3, № 1-2. – С. 87-91.

## ПРИМЕНЕНИЯ ПО “FIBERSIM” В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

*Н.Г.Злобин, Е.Ю.Катаева* (ОАО “Авиадвигатель”, г. Пермь, Россия)

Конструкция современной авиационной техники немыслима без применения полимерных композиционных материалов (ПКМ). ПКМ применяются как в самолето-, так и в двигателестроении.

При проектировании изделий из ПКМ неизбежно встает вопрос корректной подготовки как конструкторской документации, так и технологических данных. В

отличие от металлических узлов и деталей при проектировании деталей из ПКМ очень важно четко представлять месторасположение каждого слоя материала с учетом его характерных особенностей. В связи с этим большое значение приобретают специализированные программные продукты для проектирования изделий из ПКМ. Одним из таких продуктов является ПО FiberSim от компании Siemens PLM. Данное ПО используется на всех этапах разработки изделия из ПКМ – от проектирования до изготовления.

В рамках работ по созданию авиационного двигателя нового поколения ПД-14, головным разработчиком которого является ОАО «Авиадвигатель», было принято решение о применении ПО FiberSim при проектировании узлов мотогондолы из ПКМ.

Внедрение данного ПО внесло изменения в традиционный порядок проектирования и изготовления изделий из ПКМ, сложившийся на предприятии. На основе анализа опыта создания изделий из ПКМ и изучения возможностей ПО FiberSim была разработана новая процедура проектирования изделий из ПКМ.

Разработанная процедура была проверена на практике путем проведения пилотного проекта по применению ПО FiberSim при проектировании и изготовлении изделий из ПКМ. В рамках проекта были отработаны схемы взаимодействия между предприятием-разработчиком изделия и предприятием-изготовителем. В работе принимали участие специалисты ОАО «Авиадвигатель», НОЦ АКТ ПНИПУ, ОАО «ПЗ «Машиностроитель».

Созданная процедура регламентирует последовательность действий, от начала проектирования изделия до импорта технологических данных (шаблоны выкроек, развертки для лазерных проекторов и т.д.) на производственное оборудование. Процедура учитывает компетенции предприятий кооперации в области применения ПО FiberSim. В случае если предприятие кооперации обладает необходимыми компетенциями для подготовки технологических данных в ПО FiberSim, то ОАО «Авиадвигатель» выполняет в ПО FiberSim только конструкторскую часть. Создание технологических данных осуществляется на предприятии-изготовителе. В ином случае, если предприятие кооперации не обладает данной компетенцией, разработчик изделия может самостоятельно подготовить в ПО FiberSim необходимые технологические данные и передать заводу-изготовителю.

Следующим этапом работ будет организация совместной работы с серийными предприятиями-изготовителями узлов мотогондолы из ПКМ в рамках разработанной процедуры.

## **ПОДХОДЫ К ПОРЯДКУ ПРОВЕДЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПКМ В ОАО «АВИАДВИГАТЕЛЬ» ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ СООТВЕТСТВИЯ МАТЕРИАЛОВ ТРЕБОВАНИЯМ АВИАЦИОННЫХ ПРАВИЛ ПРИ СЕРТИФИКАЦИИ**

*А.В.Торопицина, М.Ю.Лантев* (ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь, Россия)

В настоящее время в России существуют только общие требования к порядку проведения квалификации ПКМ при сертификации силовой установки воздушного судна (ВС): Руководство 23-29-М и проект Положения о порядке подготовки доказательной документации для деталей ВС и Руководство 33-ВД-М для деталей Авиационных двигателей.

Особенности разрабатываемых конструкций из ПКМ и применяемых материалов для их изготовления в ОАО «Авиадвигатель»:

1. ПКМ, подлежащие квалификации в соответствии с Руководством 23-29-М, используются при изготовлении деталей двигателя и мотогондолы, не относящихся к основным силовым и особо ответственным элементам конструкции, но относящихся к элементам, повреждение которых может повлиять на летную годность.

При изготовлении деталей двигателя и мотогондолы используются КМ:

- с отечественными компонентами;
- новые.

С учетом этого в ОАО «Авиадвигатель» разработаны стандарты предприятия по порядку подготовки доказательной документации и проведения квалификации ПКМ (рис.), по общей квалификации и специальной квалификации. Стандартами определены минимальные объемы требуемых выполняемых работ для обоснования соответствия требованиям Авиационных правил. Прописан порядок работ при отработке технологии изготовления узлов из ПКМ до начала серийного производства и перечень определяемых характеристик на каждом этапе.

Российские стандарты (ГОСТы) по проведению испытаний полимерных ПКМ не позволяют выполнить специальную квалификацию применяемых материалов в деталях двигателя и мотогондолы в объеме, достаточном для сертификации в EASA с целью поставки на европейские рынки. Существуют риски при валидации методик испытаний в EASA при использовании ГОСТов. Поэтому в ОАО «Авиадвигатель» принято решение проводить квалификацию материалов по стандартам ASTM. Решение оформлено и подписано в ОАО «Корпорация «Иркут», ФГУП «ЦИАМ», ФГУП «ВИАМ», ООО СЦ «Материал», ФГУП «НИИСУ».

На сегодняшний момент в соответствии с Решением в ОАО «Авиадвигатель» оформлен договор с ФГУП «НИИСУ» по разработке Авиационных справочников, основанных на стандартах ASTM, а также разрабатываются методики проведения испытаний и конструкторская документация на изготовление образцов, основанные на ASTM.

Для отработки методик испытаний, а также проведения испытаний в рамках квалификации ПКМ и завершению работ 2015 г. в ОАО «Авиадвигатель»:

- закуплено и продолжает закупаться оборудование для лаборатории, которая

имеет аккредитацию АР МАК;

- проанализировано имеющееся оборудование и возможность проведения квалификационных испытаний в других организациях РФ.

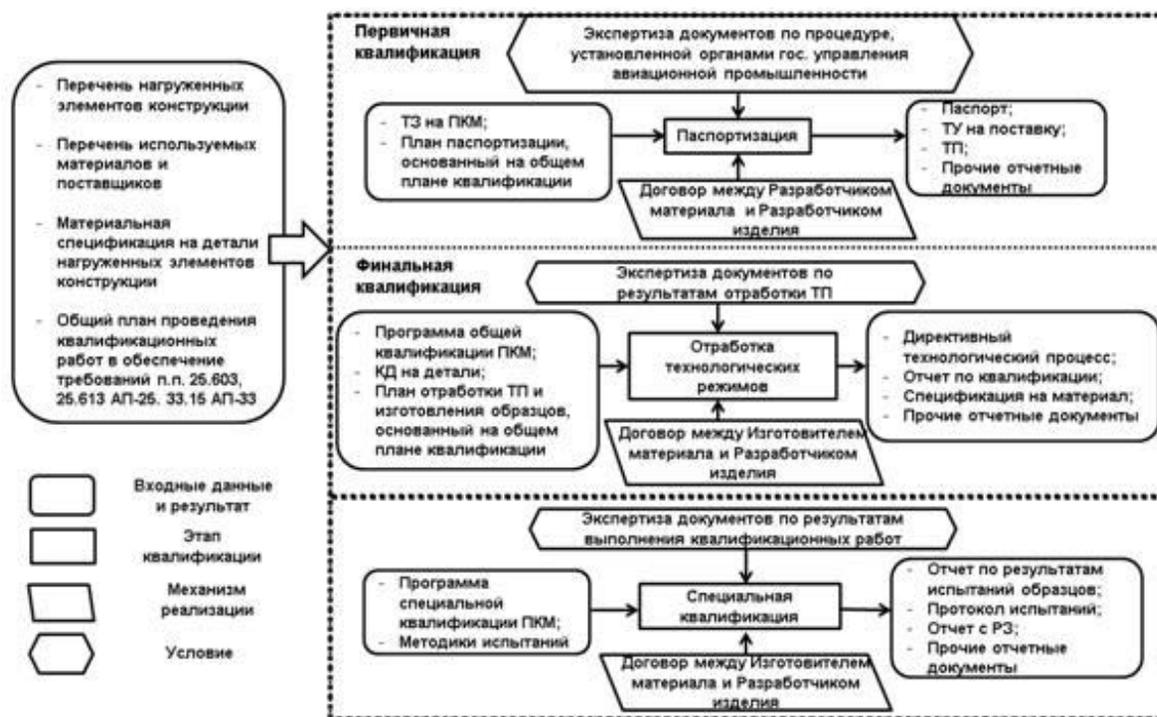


Рис. Порядок проведения финальной квалификации ПКМ в ОАО «Авиадвигатель»

## НАНОМОДИФИКАЦИЯ ЭПОКСИПОЛИУРЕТАНОВЫХ СОСТАВОВ, СОЕДИНЯЮЩИХ ТЕПЛОЗАЩИТУ С КОРПУСОМ ЛА

*С.А.Койтов, А.А.Санников*

(Опытное конструкторское бюро «Новатор», г. Екатеринбург, Россия)

Согласно требованиям технического задания (ТЗ) на разработку теплозащитной системы (абляционное покрытие – клеевой состав – металлический корпус), клеевые составы должны обеспечить адгезионную прочность соединения при сдвиге и отрыве при температуре 20°C не менее 4,0 МПа. Клеевые соединения сб. единиц изделий должны обеспечить монолитность теплозащитной системы за 15-летний период эксплуатации без проведения дополнительных регламентных работ, клеи не должны вызывать коррозию металлических сплавов корпусов.

Первоначально рекомендованный клеевой состав ВК-32-200 не может гарантировать сплошность клеевого соединения «ТЗП - металлический корпус» в течение срока эксплуатации изделий. Стал актуальным вопрос по подбору адгезива, который бы обеспечивал сохранность клеевого слоя между субстратами за весь период эксплуатации изделий, полученных при малом давлении вакуумным формованием. Клеевая система находится в напряжённом состоянии и варьирование

технологических параметров, влияющих на сохранность монолитности клеевых конструкций сб. единиц изделий, позволяет уменьшать эти напряжения. Для снижения концентрации напряжений в клеевом слое сб. единиц рекомендовано использование клея с умеренной температурой отверждения и не требующего создания высокого давления формующего инструмента.

При нанесении теплозащитного материала на металлические корпуса изделий важно, чтобы применяемый клей и связующее, используемое в ТЗП, были молекулярно однородны. При использовании клеев (по химической природе близких к склеиваемому материалу) для соединения отвержденного реактопласта и металлического корпуса следует ожидать участия в реакции отверждения функциональных групп, имеющих на соединяемых поверхностях, и образования химических связей на границе клеевая прослойка – соединяемый полимерный материал.

Клеи для соединения реактопластов необходимо выбирать, прежде всего, из группы отверждающихся составов – эпоксидный, фенолоацетальный, полиуретановый, акрилатный. В нашем случае эпоксидное связующее ЭДТ-10, применяемое в субстрате, и фенольнокаучуковый клей ВК-32-200 имеют разную химическую природу, что не способствует хорошему адгезионному взаимодействию между ними. Соединения, выполненные эпоксидными и полиуретановыми клеями, отвержденные при повышенных температурах приводят к получению более теплостойкого и водостойкого соединения с лучшими теплофизическими свойствами. Эпоксиполиуретановый клеевой состав 51-2150 выбран для исследования в качестве адгезива клеевой системы. Основой состава является олигоэфируретанэпоксид ПЭФ-3А с добавлением эпоксианилиновой смолы «ЭА» и асбеста. Для отверждения состава ароматическим диамином – метафенилендиамином (МФД) достаточно умеренной температуры от 75 до 85°C и давления склеивания от 0,03 до 0,05 МПа в течение не менее 24 часов.

Исследования величины приложенного технологического давления склеивания и продолжительности приложения давления при температурном режиме склеивания двух разнородных оболочек показали, что оптимальные результаты получены на составе 51-2150 при давлении склеивания, равном 0,03 МПа. Продолжительность приложения давления склеивания определяется жизнеспособностью клея.

В клеевых системах «теплозащитный материал – металл» на серийных изделиях ОКБ «Новатор» наилучшие показатели по эксплуатационной надежности имеют клеевые составы на основе низкомолекулярного каучука ПЭФ-3А.

В качестве объектов исследования влияния нанопорошка оксида алюминия на адгезионные свойства клеев были выбраны составы 51-2150, 51-2153-6 и 51-2156-2, удовлетворяющие требованиям технологии вакуумного формования ТЗП.

Для модифицирования ПЭФ-3А был использован нанопорошок оксида алюминия сферической формы, изготовленный методом электрического взрыва в ИЭФ УрО РАН.

Основная задача предварительного диспергирования в среде ПЭФ-3А состоит в дезагрегации частиц воздушно-сухого порошка и обеспечении их диспергирования, которое в последствии обеспечит распределение частиц в

клеевом составе. Диспергирование частиц предпочтительнее реализовывать в устройстве интенсивного механического перемешивания, таком как диссольвер. Состав модифицировали при температуре смеси +60°C со скоростью 2000 об/мин по разработанной технологии.

Таблица 1

Режимы отверждения материалов

Материал	Температура, °C	Время, ч	Давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )
51-2150	80±5	24±0,5	0,03 (0,3)
51-2153-6	80±5	2	0,05 (0,5)
	120±5	4	
	80±5	2	
51-2156-2	80±5	24±2	0,03 (0,3)
51-2150-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80±5	24±0,5	0,03 (0,3)
51-2153-6-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80±5	2	0,05 (0,5)
	120±5	4	
	80±5	2	
51-2156-2-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80±5	24±2	0,03 (0,3)

Поверхность образцов-грибков из сплава АМг6 обработана электрокорундом.

Испытания адгезионной прочности при отрыве соединений «АМг6-клей-АМг6» проводились на универсальной разрывной машине «Instron», со скоростью движения подвижной траверсы – 10 мм/мин при 20, 100 и 200 °C. Результаты полученные при 20°C приведены в табл.2.

Таблица 2

Прочность при отрыве, МПа

Клей	20 °C	Характер разрушения	100 °C	Характер разрушения	200 °C	Характер разрушения
	51-2150	14,62	когезионный	2,39	адгезионный	1,42
51-2150-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,66	2,96		1,39		
51-2153-6	18,05	3,31		0,24		
51-2153-6-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,32	3,65		1,28		
51-2156-2	12,80	1,64		1,43		
51-2156-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,98	2,64		1,44		

Оценка изменения адгезионной прочности при отрыве испытанных составов выделяет материал 51-2150-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> как наиболее приемлемый с точки зрения дальнейшего исследования. Квота преимущества клеевого состава 51-2150-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> относительно базового составляет при 20 °C 41,29%, при 100 °C 26,99% и при 200 °C 11,74%. Для более полного изучения свойств наномодифицированного клеевого состава и конкретизации применения планируется проведение термогравиметрического анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, ускоренных климатических испытаний теплозащитной системы с клеевой прослойкой 51-2150-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## ТЕПЛОЗАЩИТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, НАНОМОДИФИЦИРОВАННАЯ $Al_2O_3$

*С.А.Койтов, В.Н.Мельников*

(Опытное конструкторское бюро “Новатор”, г. Екатеринбург, Россия)

Цель проекта – разработка механически прочного, эрозионно-стойкого, обладающего повышенной термоокислительной стойкостью наноструктурированного композита, для применения его в высокотемпературных средах в качестве теплозащитного покрытия.

Проведено комплексное исследование процесса смешения, прочностных и термических свойств композита на основе эпоксидной смолы, наполненной нанопорошком оксида алюминия, и установлена взаимосвязь этих свойств с межфазным взаимодействием на границе эпоксидной смолы с частицами наполнителя. Нанопорошок  $Al_2O_3$  с удельной поверхностью  $38 \text{ м}^2/\text{г}$ , состоящий из сферических частиц с узким распределением по размерам и средним диаметром  $44 \text{ нм}$ , при диспергировании в жидких средах, в том числе в средах, содержащих эпоксидное связующее, образует как отдельные сольватированные наночастицы, так и их первичные агрегаты размером около  $300 \text{ нм}$ .

Наиболее однородное распределение нанопорошка в композите достигается при механическом смешении с использованием высокоскоростного диссольвера, что предотвращает разогрев композиции. Применение ультразвуковой обработки (УЗО) для приготовления композиции не эффективно, поскольку в процессе обработки происходит быстрый разогрев системы, что не позволяет проводить смешение в течение времени, необходимом для полной гомогенизации, а также ведет к увеличению вязкости связующего в результате механохимических реакций.

Применение разбавителей для снижения вязкости композиции при ее приготовлении целесообразно только при высокой степени наполнения, превышающей  $50\%$  (массовых) наполнителя. Межфазное взаимодействие нанопорошка  $Al_2O_3$  с эпоксидным связующим КДА характеризуется выделением тепла. Энтальпия взаимодействия в насыщенном слое составляет  $-0,19 \text{ Дж}/\text{м}^2$ . Толщина насыщенного межфазного слоя составляет  $\sim 5,5 \text{ нм}$ . Насыщение достигается при сравнительно небольшом содержании наночастиц в связующем – около  $20\%$ . При увеличении содержания наночастиц в связующем энтальпия межфазного взаимодействия находится на уровне насыщенного значения. Введение нанопорошка повышает плотность композита, однако в меньшей степени, чем это следует из аддитивной схемы, то есть образование композита сопровождается некоторым увеличением объема системы (расширением). Введение нанопорошка существенно улучшает механические свойства отвержденных, не армированных тканями, композитов (рис. 1): при степени наполнения от  $20$  до  $40\%$  разрывная прочность увеличивается в  $1,5$  раза в расчете на объем композита и в  $2$  раза в расчете на объем полимера.

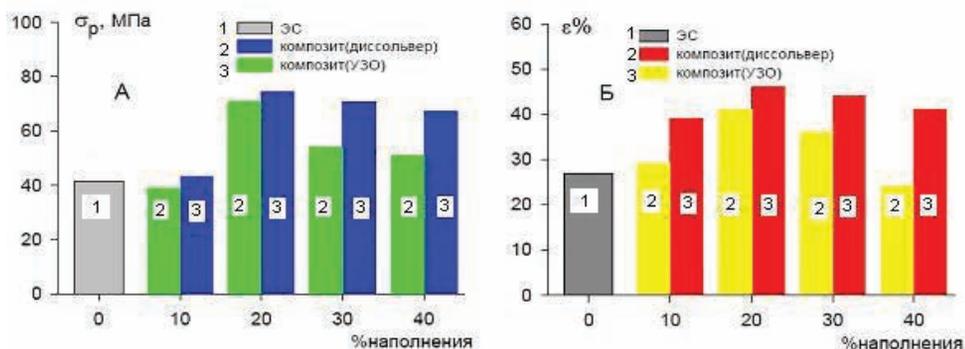


Рис. Прочность (А) и удлинение (Б) при разрыве композитов из эпоксидной смолы (ЭС) с нанопорошком  $Al_2O_3$

Помимо увеличения прочности композита благоприятным следствием применения нанопорошка  $Al_2O_3$  является повышение эластичности матрицы. Наблюдается четкая корреляция механических свойств с межфазным взаимодействием на поверхности наночастиц: максимальная разрывная прочность композита и максимальное удлинение при разрыве обеспечиваются при формировании насыщенного слоя адсорбированного полимера на поверхности частиц.

Свойства композита зависят от свойств составляющих его компонентов, их относительного содержания и геометрии дисперсной фазы. Под «геометрией дисперсной фазы» понимается форма частиц, их размер, распределение в объеме и ориентация в пространстве. Исследование рельефа поверхности армированного композита ТЗМКТ-8КН- $Al_2O_3$ , наполненного нанопорошком оксида алюминия, проводилось при помощи атомной силовой микроскопии. Исследование рельефа поверхности проводилось в зондовой нанолaborатории NTEGRA Aura (НТ-МДТ, Россия). Характерный размер особенностей рельефа поверхности армированного нанокомпозита ТЗМКТ-8КН- $Al_2O_3$ , наполненного нанопорошком оксида алюминия, составляет 50-100 нм. В то же время характерный размер особенностей рельефа поверхности в образце ТЗМКТ-8К существенно больше 200 – 400 нм.

Спектроскопия комбинационного рассеяния реализована на образце материала ТЗМКТ-8КН- $Al_2O_3$ . В спектре можно выделить следующие области: область 1000 – 4000  $cm^{-1}$  – наложение большего количества пиков, что может быть следствием как аморфной природы вещества, так и его сложного химического состава. Картирование по этой области может определять неоднородность состава самой эпоксидной смолы; пик  $\sim 4500 cm^{-1}$  соответствует  $Al_2O_3$ . Картирование по этой области может показать распределение  $Al_2O_3$  по площади образца.

Из сравнения конфокального изображения поверхности, которое в общем случае отображает рельеф поверхности, и карты распределения области спектра комбинационного рассеяния 1000 – 4000  $cm^{-1}$  видно, что эпоксидная смола в действительности имеет существенную неоднородность химического состава (вкрапления темного и светлого оттенков, перепады интенсивности). Характер распределения частиц  $Al_2O_3$  в армированном композите соответствует

распределению в композите без армирующего наполнителя: при степени наполнения 20% частицы в структуре реактопласта распределяются равномерно.

Проведен рентгенофазовый анализ термообработанного при температуре 1800 °С нанокompозита, армированного кремнеземной тканью. Материал содержит 71% аморфной (вероятнее всего, оксид кремния) компоненты и 29% – кристаллической.

Кристаллическая составляющая содержит 2 фазы:

$\alpha$  -  $Al_2O_3$ -corundum S.G: R-3c, содержание 51%, ОКР= 110нм, периоды (в гексагональных осях)  $a = 4,770\text{\AA}$ ,  $c = 13,020\text{\AA}$ ,  $\rho = 3,959 \text{ г/см}^3$ ;

Sillimanite (орторомбическая) S.G: Pnma, содержание 49%, ОКР = 150нм, периоды  $a = 7,696\text{\AA}$ ,  $b = 5,793\text{\AA}$ ,  $c = 7,550\text{\AA}$ ,  $\rho = 3,197 \text{ г/см}^3$ .

Проведены сравнительные испытания теплозащитных покрытий на аэродинамическом стенде с разогревом газа в высокочастотном дуговом плазмотроне. Эрозионная стойкость армированного нанокompозита, выраженная во времени до прогара материала до металлической подложки, в зависимости от заданных режимов плазмотрона, на 50-200% превосходит аналогичный композит без наночастиц  $Al_2O_3$ , применяемый в настоящее время на серийных изделиях.

Полученные в ходе выполнения работы данные, позволяют утверждать, что армированный нанокompозит приобретает механические и абляционные свойства, превосходящие свойства базового теплозащитного материала. В зависимости от условий работы изделия показана перспективность применения его в высокотемпературных средах взамен базового однослойного материала, а также в качестве наружного слоя двухслойного теплозащитного покрытия.

## **КОНСОЛИ УПРАВЛЕНИЯ ВАРИАНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СКЛЕИВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*С.А.Койтов, А.А.Санников*

(Опытное конструкторское бюро “Новатор”, г. Екатеринбург, Россия)

В связи с проектированием новых летательных аппаратов (ЛА) и соответствующим увеличением объемов работ и нагрузки на производство поставлена задача сокращения себестоимости изготовления макетов и опытных образцов как отдельных узлов и систем, так и вариантных изделий в целом. В частности, в работе рассматривается технология (склеивание дискретных элементов) изготовления консоли управления вариантного ЛА. Ранее для аналогичных консолей, применяемых на серийных изделиях, была отработана технология прессования материалов П-5-2, П-5-2М.

Для выполнения этой задачи разработана технология изготовления консолей системы аэродинамического управления методом склеивания дискретных элементов, которая позволила исключить дорогостоящую, трудоемкую в изготовлении технологическую оснастку, обеспечивая в то же время получение заданных геометрических и достаточных для опытных изделий эксплуатационных параметров детали. Консоль представляет собой рулевую поверхность

заданного профиля, выполненную из композиционного материала с внутренней пространственной титановой арматурой.

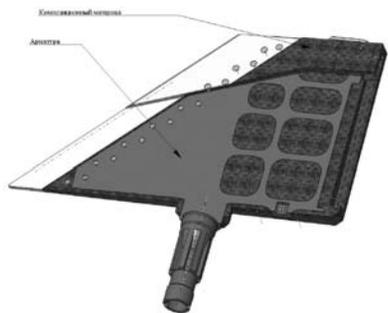


Рис. 3. Консоль общая сборка

Метод склеивания заключается в изготовлении сборной консоли из композиционных элементов (П-5-2М, ТЗМКТ-8К, синтактик), закрепленных на металлическом каркасе. Внутренние полости арматуры заполняются синтактиком низкой плотности. Преимущества метода склеивания: простота варьирования геометрических размеров на этапе проектирования и отработки опытных вариантов ЛА; отсутствие дорогостоящей и трудоемкой в изготовлении технологической оснастки;

малая вероятность появления внутренних дефектов – пустот, неоднородностей, внутренних микро- и макротрещин в композиционном материале; использование в сборной конструкции композиционных материалов меньшей плотности, обеспечивающих снижение массы руля. Недостатки метода склеивания: меньшая прочность конструкции; наличие стыков между пластиковыми деталями – элементов конструкции, наименее устойчивых к внешнему аэродинамическому воздействию; изготовление большого количества комплектующих из различных композитов, необходимость промежуточной механической подгонки отдельных деталей; затраты времени на выдержку клеевых соединений.

Метод прессования заключается в формировании монолитного покрытия из пресс-материала П-5-2М на арматуре в несколько этапов. Формируются брикеты боковых поверхностей и препреги для заполнения окон, затем прессование П-5-2М в оснастке под большой нагрузкой. Преимущества метода прессования: обеспечение монолитности конструкции; малое количество технологических операций, минимальные расхождения в геометрических и массовых характеристиках изделий. Недостатки: срок хранения препрегов не более 5 суток; однократная возможность исправления брака (выжигание П-5-2М); необходимо специальное оборудование для прессования; высокая стоимость технологической оснастки.

Технология склеивания представляется предпочтительнее в опытном или мелкосерийном производстве, когда высока вероятность изменения геометрии изделия в процессе отработки. Технологию прессования в связи с высокой стоимостью специальной оснастки и оборудования предпочтительно реализовывать в серийном производстве. Оба метода внедрены в производство, метод склеивания – в опытное, а метод прессования – в серийное.

## **ОПЫТ ОАО «УНИИКМ» В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ СОПЕЛ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КАРБИДОКРЕМНИЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

*А.Д.Бабин, Ю.В.Кузнецов, С.В.Лимонов*

(ОАО Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов, г. Пермь, Россия)

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях авиационных двигателей для гражданской авиации, достигнувшее в настоящее время значительных масштабов, ограничено верхним температурным пределом до плюс 280 °С. В то же время остается актуальной проблема, связанная с имеющейся потребностью авиационной промышленности в материалах, способных работать при значительно более высоких температурах и скоростях газового потока продуктов сгорания авиационных топлив и сохраняющих при этом свои механические характеристики. На сегодняшний день создано значительное количество термостойких композиционных материалов, к которым, в первую очередь, относятся углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) и углерод-углеродные карбидо-кремниевые композиционные материалы УУКК КМ. Вместе с тем, совершенствование УУКМ и УУКК КМ, адаптация к различным конструкциям и условиям их эксплуатации является актуальной научно-технической проблемой. Основной целью проводимых исследований является решение комплексной проблемы проектирования и разработки УУКК КМ для термонапряженных конструкций авиационных двигателей. В качестве первоочередной детали для внедрения УУКК КМ выбрано сопло газогенератора для проектируемого турбореактивного двухконтурного двигателя семейства ПД-14.

Методом конечных элементов в пакете ANSYS проведен газодинамический и тепловой расчет совместной работы сопла и металлического кожуха, входящих в состав газогенератора. Решалась связанная стационарная задача газодинамического течения и теплопроводности. Система определяющих дифференциальных уравнений включала уравнение неразрывности газового потока, уравнение движения газа Навье-Стокса, уравнение стационарной теплопроводности для анизотропной, кусочно-неоднородной сплошной среды. Расчет газодинамических показателей истечения продуктов сгорания: статического давления, температуры, скоростей, коэффициентов теплоотдачи, проводился для условий установившегося взлётно-го режима с наддувом и подогревом воздуха. Рабочая среда – идеальный несжимаемый газ, близкий по характеристикам к воздуху. В результате расчета установлено, что полученные значения температурных полей в стенке сопла не являются критическими для материалов типа УУКК КМ, однако достаточно большие градиенты температуры могут привести к появлению ощутимых температурных напряжений.

На основании данных газодинамического и теплового расчетов для качественной и количественной оценки НДС материала сопла проведен расчет его термонапряжённого состояния при стационарном установившемся взлётно-го режиме работы двигателя без учета изменения геометрии и толщины деталей вследствие химического и эрозионного уноса. При этом учитывалось, что УУКК КМ обладают существенной анизотропией

и температурной зависимостью теплофизических, упругих и механических свойств. В результате было определено напряженно-деформированное состояние материала, установлены коэффициенты запаса прочности, что позволило уточнить особенности конструкции сопла и перейти к разработке технологии изготовления натуральных изделий.

Процесс изготовления конструкций из УУКК КМ является многостадийным. Первые операции технологического процесса являются стадиями «углепластикового передела» и необходимы для придания заготовке формы и размеров изделия. Остальные операции являются стадиями превращения углепластика в углерод-углеродный композиционный материал и уплотнения его карбидом кремния.

Внешний вид заготовки сопла по стадиям передела приведен на рисунке.



а)



б)



в)



г)

Рис. Внешний вид заготовки сопла по стадиям передела:

а) каркас из углеткани;

б) пропитанный каркас на оснастке для формования;

в) углепластиковая заготовка сопла; г) готовое сопло из УУКК КМ

По разработанной технологии изготовлено 2 опытных узла, масса которых составила около 5,5 кг при массе металлического аналога 21,6 кг.

В настоящее время одно из сопел подготавливается к проведению натуральных огневых испытаний в составе действующего демонстратора газогенератора авиационного двигателя. Результаты огневых испытаний реального сопла позволят сравнить данные расчетов с экспериментальными данными, а также перейти к уточненному газодинамическому расчету, учитывающему нестационарность процесса и другие факторы. Кроме того, огневые испытания позволят оценить окислительную и эрозионную стойкость выбранного УУКК КМ.

## **ЭПОКСИПОЛИУРЕТАНОВЫЕ СМОЛЫ, ИХ СМЕСИ С БИСМАЛЕИМИДНЫМИ И ЦИАНАТНЫМИ СМОЛАМИ – ТЕРМОСТОЙКАЯ И ПРОЧНАЯ ОСНОВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПАУНДОВ И КОМПОЗИТОВ**

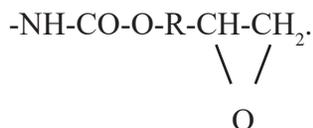
*С.А.Долматов* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Эпоксиполиуретановые композиции известны давно и в последнее время получили широкое распространение при использовании, в основном в качестве клеев и связующих для полимерных композитов, а также они оказались потенциально пригодны для использования в качестве полимерной основы дисперсно-наполненных заливочных компаундов.

Эпоксиполиуретановые полимеры получают смешением олигомерных, в основном эпоксициановых, полиизоцианатуретановых и изоцианатных смол; в виду чего они содержат в результате одновременно эпоксидные группы, изоцианатные и уретановые фрагменты. Глицидилполиуретановые композиции представляют интерес для получения материалов с повышенной теплостойкостью и улучшенными механическими и диэлектрическими свойствами. В общем случае отверждающие агенты для глицидилполиуретановых композиций можно специально и не вводить, однако при необходимости можно использовать традиционные отвердители эпоксидных и полиуретановых смол. Установлено, что глицидилполиуретановые композиции на основе полиизоцианатов и полиглицидиловых эфиров при оптимальном соотношении компонентов достаточно жизнеспособны при комнатной температуре (десятки минут), и быстро отверждаются при умеренно высокой температуре (60-150 °С). Ниже приведены известные из литературных данных обобщенные физико-механические и электрические характеристики полимеров на основе таких эпоксиполиуретановых композиций:

- разрушающее напряжение, МПа
  - при растяжении.....100
  - при сжатии.....130
- относительное удлинение при разрыве, % .....15
- модуль упругости при растяжении, МПа .....  $2,9 \cdot 10^3$
- диэлектрическая проницаемость .....3,8
- тангенс угла диэлектрических потерь
  - при частоте  $10^6$  Гц .....0,019

Как видно, эти полимеры по прочностным и электрическим свойствам не уступают эпоксидным, но превосходят их по эластичности. Кроме того, известны эпоксиполиуретановые композиции, содержащие в своем составе, кроме жесткого эпоксидианового и эластичного изоцианатуриетанового блока, концевые реакционноспособные фрагменты:



Сшитые полимеры на основе таких композиций характеризуются повышенными прочностными показателями и эластичностью. При их растяжении проявляется вынужденная высокоэластическая деформация, и разрушение образцов происходит с образованием шейки. Обычно используют глицидилполиуретаны на основе полиолов и таких изоцианатов, как гексаметилен-, дифениленметан и толуилендиизоцианаты. Лучшими модификаторами свойств эпоксиполиуретановых реактопластов являются глицидилполиуретаны, содержащие ароматические ядра.

Однако в последнее время используют и другие виды модификаторов, например, бисмалеимидные и цианатные смолы. Таким образом, в сшитых материалах на основе таких смесей фактически пространственную сетку создают три вида смол:

- 1) эпоксидная смола;
- 2) уретановая смола;
- 3) бисмалеимидная или цианатная смола.

Следует отметить, что свойства смесей практически одинаковы как в случае смеси эпоксиды, бисмалеимида и изоцианата, так и в случае смеси эпоксиды, бисмалеимида и цианата.

В результате получают сшитые реактопласты с  $T_g \approx 180$  °С, теплостойкостью  $\approx 170$  °С, термостойкостью  $\approx 350$  °С, энергией разрушения  $G_{IC} \approx 10$  кДж/м<sup>2</sup>, ударной вязкостью по Изоду (без надреза)  $a_k$  100–150 Дж/м, прочностью при растяжении 80–190 МПа.

Известно, что эпоксиполиуретаны используются в качестве полимерной основы высокотехнологичных электроизоляционных компаундов, например, разработанный в ОАО «ОНПП «Технология» заливочный эпоксиполиуретановый компаунд КЭУ-1 с температурным индексом 140 °С.

Использование тройных смесей на основе эпоксидных, уретановых и бисмалеимидных смол даст возможность повысить термостойкость дисперсно-наполненных заливочных эпоксиполиуретанбисмалеимидных компаундов до 180 °С – длительно и до 200 °С – кратковременно (100 – 1000 часов). Проведение работ в этом направлении начато на нашем предприятии.

## Секция 2. РЕМОНТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### РЕМОНТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В.Руппель, С.Леба* ( “СТЕВИК”, г. Сержи, Франция);

*Р.Шемама* ( “GMI-AER”, г. Париж, Франция)

Число силовых и средненагруженных композиционных конструкций, а также толщина монолитных ламинатов в современных летательных аппаратах делают необходимым развитие специальных методов ремонта, обеспечивающих восстановление необходимой прочности и жесткости конструкции, а также достижения качества аэродинамической поверхности деталей, отличных от традиционных, которые используются для ремонта тонких монолитных конструкций и трёхслойных сотовых конструкций с относительно тонкими обшивками.

Эти методы затрагивают четыре основных направления:

- исследование повреждения;
- подготовку поверхности;
- установку и полимеризацию заплат;
- отслеживание пригодности отремонтированного участка и качества соединения.

Сегодня компании “STEVİK” и “GMI-AERO” исследуют новые пути развития ремонта конструкций из ПКМ, используя тридцатилетний опыт работы в этой области. Разработанные методы позволяют выполнять ремонт в вакуумном мешке без последующего отверждения в печах или автоклавах.

Стандартной процедурой ремонта является процесс термокомпрессии под вакуумом с использованием термоматов. Одной из разновидностей термокомпрессии является процесс с использованием избыточного давления. Он был разработан для ремонта первичных структурных элементов, где необходима дополнительная компрессия для достижения соответствующих несущих характеристик и безопасности воздушного судна. Дополнительные трудности для проведения данных работ возникают при ремонте фюзеляжа ввиду кривизны поверхностей. По этой причине используется специальное оборудование «ОЛЬГА» с применением избыточного давления – портативное оборудование, адаптированное не только на плоские, но и поверхности с одинарной кривизной.

Процесс «Термокомпрессии под вакуумом» включает в себя следующие пошаговые операции:

- оценку и классификацию повреждения;
- исследование повреждения;
- удаление повреждённых слоёв;
- подготовку поверхности;
- замену слоёв и установку вакуумного мешка;
- установку и коммутацию термоматов;
- проведение термокомпрессии под вакуумом.

При помощи портативного комплекта «ЭЛИЗА» станции техобслуживания могут проводить исследования и анализ повреждений ультразвуком, определяя границы и глубину повреждения, тем самым определяя пригодность повреждения к ремонту и зону ремонта.



Фото 1. «ЭЛИЗА» – комплект для исследования и анализа повреждений ультразвуком

После оценки повреждения и определения его степени и размера следует подготовка к механической обработке. Перед установкой композитной заплатки проводится обработка поверхности (удаление резакром поверхностных дефектов), чтобы гарантировать надлежащее соединение между участком ремонта и первичной структурой.



Фото 2. Инструмент и приспособления для удаления поврежденных слоев

Для этого необходимо выполнить ряд действий: сошлифовку, трассирование, снятие фаски, удаление резакром поверхностных дефектов. Эти работы проводятся на плоских или изогнутых поверхностях. Специально разработанная и адаптированная для обработки композиционных материалов «Мобильная мастерская ЛЕСЛИ»-оборудование, инструмент и приспособления для удаления поврежденных слоев материала и раскроя ремонтных слоев, взята на вооружение большинством станций техобслуживания многих эксплуатирующих организаций. Инструмент, входящий в модуль, позволяет легко и безопасно проводить сложные работы, получая высокие результаты. Подготовка и установка заплатки является наиболее сложным шагом выполнения ремонтных работ, так как эта операция наиболее резко отличается от классических функций, выполняемых техническим персоналом.

В 2010 году компанией «GMI-AERO» был разработан новый пульт для термокомпрессии «АНИАТА EZ», который открывает новые возможности выполнения операций компрессии с высокими параметрами качества полимеризации заплатки. Пульт позволяет соединять большие площади мультizonальным контролем, предлагает возможность добавить ограниченную высокую температуру для компенсации потерь, обеспечивает автоматическое качественное сообщение и радиосвязь с отдаленным компьютером.



Фото 3. «АНИТА» – пульт для проведения термокомпрессии под вакуумом

При термокомпрессии с использованием избыточного давления применяется оборудование для создания локального давления до 1,5 Бар на плоской поверхности с максимальной температурой ремонта до 180°C. Это позволяет использовать для создания заплата препреги, аналогичные тем, что были применены при формовании ремонтируемой детали.

В состав оборудования «ОЛЬГА» входят:

- выравнивающая рамка;
- пневматическая камера;
- комплект вакуумных присосок;
- блок управления и обеспечения безопасности.

Одним из новых методов ремонта является локальная полимеризация с использованием индукционного нагрева. Учитывая разносторонность в применении и эффективность, индукционный нагрев может обеспечивать проведение композитных ремонтов во множестве случаев, а именно:



Фото 4. «ОЛЬГА» – система для создания избыточного давления

- «классический» ремонт композиционного материала композиционным материалом;
- новый, но уже достаточно отработанный ремонт композитным материалом металлических конструкций самолетов;
- ремонт термопластов.

Индукционный нагрев – отличная альтернатива стандартной термокомпрессии, так как он демонстрирует определенные преимущества по сравнению с обычным кондуктивным нагревом, который, среди прочего, включает в себя:

- минимизацию остаточных напряжений и, следовательно, улучшение прочностных свойства детали, за счет нагрева значительно меньших площадей;
- сокращение потребления энергии на ремонт, что очень важно в случае ремонтов термопластов при повышенных температурах (например, 400°C).

Ещё одним из новых методов является ремонт расслоений: технология Термоболта. В процессе отсверловки угле- и стеклопластиков часто возникают различного рода повреждения, ведущие к нарушению целостности ламинатов, расслоению, выкрошиванию полимерной матрицы и как результат – к ухудшению

качества изготавливаемой детали. Причём такие повреждения могут возникнуть как на входе, так и на выходе сверла, а также внутри самого отверстия.

Общепринято, что ремонт изделий проводится после определённого эксплуатационного периода детали на станциях ТО эксплуатирующих организаций. Ремонт же данного типа повреждений более актуален для производственных предприятий. Для решения данной задачи было разработано технологическое решение с целью обеспечения локального нагрева, необходимого для полимеризации смолы, нанесенной внутрь отверстия при ремонте повреждений, возникших во время разделки отверстий в углепластике.

Мы предлагаем следующие услуги:

- подробный обзор и определение основных эксплуатационных характеристик / спецификация ремонтного процесса заказчика;
- оптимизацию, адаптацию к основным эксплуатационным характеристикам заказчика;
- составление рабочих инструкций;
- 3-уровневое обучение заказчиков технологиям ремонта.



Обучение может проводиться на территории заказчика либо в Париже, Франция, или Монреаль, Канада.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИБОРА NOT BONDER ДЛЯ РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ В СОСТАВЕ ИЗДЕЛИЯ**

***В.В.Бажеряну, Е.А.Басынина, И.В.Зайченко***

(Филиал ОАО “Компания “Сухой” КнААЗ им. Ю.А. Гагарина”,  
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)

Объектом исследований являются процессы ремонта деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением локального нагревательного элемента.

Целью – разработка технологии, подбор оборудования для ремонта деталей и агрегатов из ПКМ с применением локального нагревательного элемента и источника вакуума вне производственного участка, в составе летательного аппарата.

В процессе выполнения конкурсной работы был проведен анализ и обзор имеющегося оборудования для локального ремонта деталей из ПКМ. Опробовано оборудование для локального ремонта собственного и импортного производства.

По результатам опробования и анализа рынка подобрано оборудование, удовлетворяющее требованиям НД для изготовления деталей из ПКМ. Разработан техпроцесс ремонта деталей с применением локального нагревательного элемента и прибора для горячей склейки.

По результатам акустических и механических испытаний образцов и после технологической отработки ремонта непосредственно на изделии можно сделать следующие выводы, что данная технология ремонта деталей ПКМ:

- обеспечивает требуемые согласно КД прочностные характеристики деталей из ПКМ после проведения локального ремонта;
- позволяет использовать при ремонте материалы, применяемые в данной конструкции деталей из ПКМ или с температурой эксплуатации, соответствующей температуре эксплуатации агрегатов с деталями из ПКМ;
- позволяет проводить «горячий» ремонт непосредственно на изделии;
- не вызывает поводок и короблений ремонтируемой детали или агрегата после ремонта;
- позволяет снизить затраты на электроэнергию при склеивании без использования энергозатратного оборудования: автоклава «Шольц» и вакуумных термопечей.

Проведена отработка технологии ремонта с применением прибора на деталях и агрегатах в составе изделия в цехах АСП. Технология ремонта уточнена в части использования вспомогательных материалов, оптимального расположения термопар и нагревательного элемента. Исходя из опыта ремонта на основе статистики площадей повреждения, подобраны и приобретены соответствующие по форме и площади термоодеяла.

Общий экономический эффект при применении для ремонта деталей из ПКМ прибора Hot Bonder ACR-3 на одно изделие ПАК ФА - 3 681 774,00 руб.

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ ИЗ ПКМ**

*В.И.Постнов, С.В.Стрельников*

(Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ, г. Ульяновск, Россия)

Рассмотрены различные технологические методы устранения дефектов в элементах из ПКМ и полученные механические свойства, реализованные в материале после ремонта.

Увеличение объемов применяемых конструкций из ПКМ в авиационной технике требует более глубокого исследования условий возникновения дефектов в ПКМ, развитие их во время эксплуатации, выявление зависимости прочностных и упругих свойств конструкций от вида и размера дефектных зон.

Согласно нормам летной годности FAA США (FAR 25.571) и общеевропейским нормам летной годности (JAR 25.571) авиационные конструкции рассматриваются как имеющие начальные дефекты, которые могут возникать при производстве полуфабрикатов материалов и изготовлении конструкций, быть следствием

окружающей среды или результатом происшествий. Дефекты, возникающие в конструктивных элементах из ПКМ, могут быть классифицированы в зависимости от стадии их возникновения.



Известно, что ремонт агрегатов из ПКМ может проводиться как с применением клеев холодного, так и горячего отверждения. Первый метод обычно используется как временный, с целью сдерживания дальнейшего разрушения узлов агрегата на короткий период эксплуатации. Использование второго метода требует специальной аппаратуры и подготовки обслуживающего персонала как на заводах (серийных, ремонтных), так и в условиях базирования той или иной авиакомпании. Кроме того, в данном случае требуются специальные долгоживущие клеи, препреги, т.к. период ремонта агрегата в зависимости от сложности обычно равен 1–30 суток. Для создания температурного поля в зоне ремонта агрегата обычно используются калориферы, эластичные нагреватели (для зон более 0,2 м

и неметаллические тканые или стеклопластиковые нагреватели для зон от 0,2 до 10 м<sup>2</sup>. Кроме того, в трехслойных конструкциях обычно используются сотовые наполнители (типа ССП, ПСП, из алюминиевого сплава АМг-2н, титанового и стального сплавов), отличающиеся по высоте как в отдельных, так и одной детали. В этой связи необходимо знать распределения температурного поля как по площади ремонтируемой детали, так и по толщине, чтобы правильно выбрать составы клеевых композиций. При формовании зон ремонта на детали из ПКМ такой перепад температур приведет к большим напряжениям, который вызовет ее коробление, расслоение и другие дефекты.

В данной работе было исследовано влияние технологии формования обшивок из различных ПКМ в крупногабаритных трехслойных панелях на различных сотовых наполнителях. Установлено, что снижение прочностных свойств обшивок из ПКМ, отформованных на сотах, составляет от 10 до 20 %. При этом разрушение образцов происходит в зонах контакта к стенкам ячеек. В то же время усилие разрушения всей трехслойной конструкции практически не изменяется по сравнению с серийной конструкцией.

Проведенные исследования показали, что формование обшивки с одновременным склеиванием их с сотовым наполнителем не приводит к существенным потерям упруго-прочностных свойств материала обшивки и не снижает прочность конструкции в целом. При этом формование обшивок при одностороннем нагреве позволяет отказаться от дорогостоящего оборудования типа автоклавов и термопечей. Результаты на влагопоглощение образцов из обшивок, отформованных на сотах и на оснастке, показывают, что формование на сотах при одностороннем нагреве позволяет получить практически беспористый ПКМ, при этом показатели влагопоглощения даже за 60 суток не превышают 1-2% во всех случаях. Разработанная технология ремонта изделий из ПКМ позволяет получить конструктивные элементы (трехслойные панели с обшивками из различных ПКМ), по упруго-прочностным характеристикам соответствующим требованиям чертежей на данные агрегаты. Эксперименты по защите торцевых поверхностей в трехслойных панелях показывают, что использование эпоксидных связующих с наполнением микросферой позволяет в несколько раз снизить влагопоглощение по сравнению с применяемой пастой ВПЗ-3. Полученные результаты использованы при разработке опытной ремонтно-восстановительной технологии на примере створки заднего грузолука самолета АН-124-100. Эксплуатационная надежность восстановленной створки ЗГЛ подтверждена результатами испытаний многочисленных образцов-свидетелей.

## РЕМОНТ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИНАРНЫХ ПРЕПРЕГОВ

*С.В.Бухаров, Н.И.Андросова, Г.В.Комаров*

(“МАТИ - Российский государственный технологический университет  
Им. К.Э. Циолковского”, г. Москва, Россия)

Разработка способов ремонта изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является одним из современных направлений развития технологии ПКМ. Основными способами ремонта изделий из ПКМ являются склеивание, приформовка и сварка. В производстве вертолетов объем применения ПКМ на термопластичной матрице невелик. Поэтому использование для выполнения ремонта сварки еще не назрело. Более перспективным является применение приформовки. Решение главным образом технических проблем ремонта изделий из ПКМ многопланово:

- определение допустимости ремонта изделия;
- выбор метода ремонта;
- выбор ремонтных материалов;
- оптимизация конструкции ремонтируемого участка;
- прогнозирование работоспособности подвергнутого ремонту изделия.

Уровень решения этих проблем во многом определяется видом дефекта или повреждения, условиями проведения ремонта, степенью развития технологии соединения ПКМ.

Ввиду этого для ремонта в полевых условиях и в условиях ограниченного обеспечения техническими средствами актуальным следует считать применение ремонтных материалов, готовых к использованию. Такими ремонтными материалами для ремонта по технологии приформовки могут служить долгоживущие препреги. Долгоживущие препреги на основе реактопластов горячего отверждения требуют нагрева. Для выполнения ремонта в стесненных условиях требуются материалы, способные отверждаться при комнатной и даже ниже комнатной температурах. Как нам представляется, подобными материалами могут быть бинарные препреги. В работе предполагается исследовать возможность создания таких препрегов на основе эпоксидных и акрилатных связующих с раздельным нанесением компонентов и стекловолоконистых наполнителей и эффективность их применения для устранения типовых дефектов в деталях из ПКМ. Для решения таких задач выбраны отверждающие системы для обоих типов связующих; проводится изучение способа механического блокирования компонентов и их процессов отверждения, методов его ускорения; исследуются свойства материалов приформованных к дефектному участку накладок из бинарных препрегов и степень восстановления характеристик отремонтированного ПКМ. Также будут проведены эксперименты по изучению эффективности ускорения отверждения накладок из бинарных препрегов с помощью термохимических нагревателей.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЛЕЕВЫХ ПРЕПРЕГОВ РАСПЛАВНОГО ТИПА ПРИ РЕМОНТЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА

*Б.Б.Морозов, Ф.А.Насонов*

(Филиал ОАО “Компания “Сухой” “ОКБ Сухого”, г. Москва, Россия)

Одними из первых конструкционных композитов, примененных в авиастроении, были радиопрозрачные стеклопластики. Носовые радиопрозрачные обтекатели (РПО) самолетов типа Су-27 изготавливались из стеклопластиков на основе фенолформальдегидного связующего ВФТ. В целом, созданные обтекатели обеспечивали требуемые радиотехнические характеристики. С ростом возможностей радиолокационных станций (РЛС) возникла острая необходимость создания принципиально новых РПО, обеспечивающих не только высокие радиотехнические характеристики (РТХ), но также и их стабильность. Благодаря разработке ФГУП «ВИАМ» нового типа материалов – так называемых клеевых препрегов, обладающих длительной жизнеспособностью, допускающих изготовление деталей сотовой конструкции за единый цикл формования, стало возможным создание носовых РПО с улучшенными характеристиками. Точность изготовления элементов стенки современных РПО при габаритах 1,5х2,5м, благодаря уникальным свойствам материала и запатентованной технологии, обеспечивается на уровне  $\pm 0,2$  мм практически без использования механической обработки. В настоящее время все вновь разрабатываемые изделия фирмы Сухого имеют в своем составе стеклопластиковые детали, изготовленные на основе клеевых препрегов, в том числе имеющих рабочую температуру до 175 °С.

Однако сотовые конструкции с относительно тонкими обшивками чрезвычайно чувствительны к сосредоточенным нагрузкам. В процессе технического обслуживания и эксплуатации изделий имеют место повреждения тонкостенных обшивок из-за небрежного обращения с ними либо вследствие попадания посторонних предметов.

Наиболее широко применяемыми способами ремонта таких повреждений являлись шприцевание зон отслоения сотового заполнителя и приклейка заплат из стеклоткани с применением клеевых композиций «холодного» отверждения, например эпоксидного клея ВК-9. Ремонт, проведенный подобным образом, неизбежно приводит к локальному изменению радиотехнических свойств стенки РПО, что отрицательно влияет на эффективность применения всего авиационного комплекса (АК).

Специфические особенности клеевых препрегов делают их крайне выгодными ремонтными материалами. Рассмотрим эти особенности.

Во-первых, указанные полуфабрикаты обладают достаточно длительным временем технологической жизнеспособности – от одного до трех месяцев при комнатной температуре без применения герметичной упаковки. То есть необходимое количество материала может быть легко доставлено к месту проведения работ без необходимости обеспечения особых условий хранения.

Во вторых, связующее, содержащееся в препреге, способно не только формировать матрицу композиционного материала, но также обеспечивать склейку формируемой ремонтной заплаты как с материалом неповрежденной

композиционной обшивки, так и с сотовым наполнителем.

Путем проведения экспериментальных работ была определена величина перехлеста слоев, обеспечивающая после отверждения равнопрочность материала исходной обшивки из стеклопластика, ремонтной заплаты и переходной зоны (рис.).

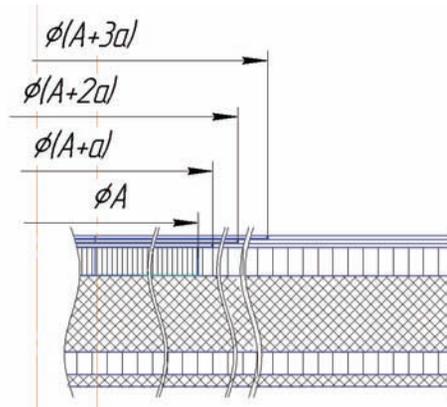


Рис. Пример ремонта многослойной конструкции спомощью послойной замены поврежденных слоев

Типовую последовательность действий при проведении ремонта с использованием клеевых препрегов можно описать следующим образом:

1. Удаление лакокрасочного покрытия (ЛКП) в зоне ремонта и фрагментов поврежденного материала;
2. Подготовка кромок ремонтируемой обшивки путем ступенчатого послойного снятия материала;
3. Сушка композиционного материала детали в зоне ремонта;
4. Установка (при необходимости) вставки сотового наполнителя взамен поврежденного;
5. Выкладка слоев ремонтной заплаты;
6. Вакуумное формование;
7. Обработка накладки, шпатлевание, восстановление ЛКП.

Для проведения ремонта деталей типа радиопрозрачных обтекателей без их демонтажа с изделия возможно использование комплектов компактного оборудования (типа «Brisk Heat Hot Bonder»), позволяющих эффективно создавать и поддерживать избыточное давление формования (склеивания) и температуру отверждения. При использовании компактного мобильного оборудования возможно проведение качественного и экономичного ремонта как в условиях авиаремонтных предприятий, так и в условиях, близких к полевым.

Таким образом, авторами работы подчеркивается целесообразность применения существующих и вновь разрабатываемых клеевых препрегов не только в качестве основных, но и в качестве ремонтных материалов, обладающих относительно высокой степенью технологичности при проведении ремонтных мероприятий в условиях серийного производства, эксплуатирующих предприятий и в полевых условиях, исходя из имеющихся средств технического оснащения, с заданными показателями качества и объемов выполнения работ.

## Секция 3. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

### ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ И ТРЕЩИНОСТОЙКИЕ УГЛЕРОДКЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

*С.С.Солнцев* (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, г. Москва, Россия)

Теплозащитные плитки из супертонкого кварцевого волокна, гибкая теплоизоляция из алюмосиликатных, высококремнеземных и кварцевых волокон, обладая необходимыми теплоизоляционными и другими важными свойствами, не могли быть применены непосредственно в конструкциях многоразового орбитального корабля (ОК) «Буран», т.к. не обладали целым рядом других свойств и характеристик, требующихся по условиям эксплуатации космического аппарата, а по некоторым показателям не удовлетворяли требованиям. К ним относятся, в частности, эрозионная стойкость плитки и «гибкого одеяла», влагопроницаемость плитки из-за пористости более 90 %, повреждаемость при механических воздействиях, большая вероятность загрязнения пылевидными частицами и др.

Необходимость и целесообразность создания и применения специальных покрытий для многоразовой теплозащиты ОК «Буран» была обусловлена не только необходимостью компенсации таких недостатков кварцевых плиток, как неудовлетворительная эрозионная стойкость и интенсивная влагопроницаемость, но также требованиями снижения температуры поверхностей многоразового космического корабля за счет переизлучения тепловой энергии в окружающую атмосферу, ограничения реакций гетерогенной каталитической рекомбинации атомов азота и кислорода земной атмосферы, высокого аэродинамического качества поверхностных слоев покрытий и обеспечения заданных геометрических параметров плиток (минимальные усадки углов плиток с покрытием для обеспечения плотности стыков). Не менее актуальными были вопросы доступности разработанных технологий для промышленного приготовления и нанесения покрытий на сотни тысяч плиток, контроль качества и ремонт покрытий, защита от повреждений в процессе монтажа и эксплуатации и др.

В результате проведенных исследований созданы научные основы синтеза реакционно-отверждаемых терморегулирующих эрозионно стойких покрытий для ОК «Буран». Разработана серия эрозионно стойких терморегулирующих покрытий для защиты волокнистых ультралегких теплоизоляционных материалов многоразового применения:

- покрытие ЭВЧ-4М1У-3 для материала ТЗМК-10 (плотность 0,14 г/см<sup>3</sup>);
- покрытие ЭВЧ-6 для материала ТЗМК-25 (плотность 0,25 г/см<sup>3</sup>) с рабочей температурой до 1250 °С, термостойкость – 105 циклов, излучательная способность  $\epsilon \geq 0,86$ , константа скорости реакции каталитической рекомбинации атомов азота и кислорода  $K_w \leq 2$ ;
- покрытия ЭВС-4, ЭВС-6 (для материалов ТЗМК-10, ТЗМК-25, соответственно) с рабочей температурой до 800 °С, отношение  $\alpha_{s/e} \leq 0.4$ , термостойкость - 105 циклов;

– фиксирующее покрытие для гибкой волокнистой теплоизоляции с рабочей температурой до 800 °С;

– покрытие холодного отверждения ЭВЗ-2 для материала ТЗМК-1700 (с плотностью 0,25 г/см<sup>3</sup>) с рабочей температурой 1500 °С, термостойкость 105 циклов;

– покрытие ЭВЧ - 5 для плиток из материала ВТНК.

Для оперативного восстановления работоспособности плиточной теплозащиты разработаны ремонтные покрытия холодного отверждения ВРЧ-1 (для ТЗМК-10), ВРЧ-2 (для ТЗМК-25), ВРС-1 (для ТЗМК-10), ВРС-2 (для ТЗМК-25) с температурой эксплуатации до 1250 °С. Т, а также маркировочные покрытия.

Экстремальные условия движения в плотных слоях атмосферы многоразовых авиакосмических летательных аппаратов, в частности, при спуске с космических орбит, работе деталей двигателей в гиперзвуковых газовых потоках требуют применения новых высокотемпературных материалов и покрытий, устойчивых к действию высоких (1300-1800 °С) и сверхвысоких (2000-3000 °С) температур в окислительной газовой среде. К таким материалам можно отнести современные углестеклокерамические композиты, стеклокерамические, реакционноотверждаемые и окситермогенные покрытия, а также углерод-керамические материалы, синтез которых ведут путём пиролиза керамообразующих полимеров.

Наноструктурные композиционные материалы на основе кремнийорганических полимеров представляют один из наиболее важных классов новых перспективных синтетических материалов. Применение элементоорганических керамообразующих полимеров открывает новые возможности направленного повышения эксплуатационных свойств высокотемпературных углерод-керамических композитов, а именно, повышение трещиностойкости, рабочей температуры, прочностных характеристик, термостойкости.

Рассмотрены перспективные системы для получения трещиностойких (квазипластичных) композитов с армировкой высокопрочными углеродными наполнителями и тонкодисперсными модификаторами.

## **ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВА ВОЛОКНИСТОЙ ТЕПЛОЙ ЗАЩИТЫ**

*Б.В.Щетанов, Ю.А.Ивахненко (ФГУП “ВИАМ”, г. Москва, Россия)*

12 апреля 1977 года в ВИАМ был выпущен приказ о создании лаборатории «Волокна тугоплавких соединений, волокнистые высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы». Возглавил ее молодой доктор наук В.Н. Грибков, в ее состав вошли специалисты лаборатории композиционных материалов, занимавшиеся технологией получения нитевидных кристаллов тугоплавких соединений: Б.В. Щетанов, О.А. Мордовин, Э.Л. Уманцев, Б.Р. Горобец, Д.Д. Покровский, Н.А. Теплов, а также специалисты из других

лабораторий Г.Т. Мизюрина, Л.В. Белунова, Р.Н. Додонова, Р.А. Яковлева и др. Перед лабораторией была поставлена задача в кратчайшие сроки, в прямом смысле слова – с нуля, разработать технологию (в том числе оборудование) изготовления и организовать производство легковесного теплозащитного материала (ТЗМ) для внешнего плиточного теплозащитного покрытия (ТЗП) для советского варианта многоразового космического корабля.

Решить задачу предстояло коллективу, который накопил опыт работы в создании технологий изготовления нитевидных кристаллов тугоплавких соединений ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) и волокнистой высокотемпературной теплоизоляции.

### **Плиточная волокнистая теплозащита**

В плиточном ТЗП главным конструктивным элементом является теплозащитный элемент. Корпус многоразового космического корабля должен был быть, как чешуей, покрыт ТЗЭ. Их количество составляет 38800 шт.

ТЗЭ состоит из волокнистой теплозащитной плитки, эрозионно стойкого и лакового покрытий, демпфирующей прокладки и клея, соединяющего демпфирующую прокладку с плиткой ТЗЭ и с корпусом ОК [1]. Таким образом, создается конструкция, в которой каждому материалу отводится своя функция, и при отсутствии любого из названных материалов конструкция в целом не будет работать. Понятно, что главная роль здесь отводится теплозащитной плитке. Изготовлена она из волокнистого теплозащитного материала (ТЗМ) и представляет собой жесткий пространственный каркас из неорганических высокотемпературных волокон, спеченных между собой в местах их контакта с помощью специального связующего. Самый главный вопрос, какие волокна необходимы, чтобы ТЗМ плитки был работоспособным и надежным? При этом важно отметить, что свойства ТЗМ (теплопроводность, плотность, прочность, термическая стабильность, температурный коэффициент линейного расширения) в первую очередь определяются волокнами – их составом, структурой, морфологическими особенностями и др., что напрямую зависит от способа их получения. Несомненно, какие бы ни были прочные волокна, они должны быть спечены друг с другом в местах их контакта, т. е. должна образоваться прочная связь между ними. Это второе неперемное условие для получения ТЗМ, прочностные характеристики которых удовлетворяют предъявленным требованиям.

### **Материалы для ТЗП**

Принципиальных отличий конструкции ТЗЭ – и тепловой защиты ОК «Буран» в целом, и космической системы «Спейс Шаттл» – нет, но в использованных материалах имеются существенные различия [1].

Для ТЗМ системы «Спейс Шаттл» в качестве основы использованы кремнеземные волокна, которые имели недостаточную термическую стойкость из-за высокого содержания в них пор. Кроме этого, наличие в них примесей оксидов также приводит к снижению термической стабильности волокон и способствует кристаллизации аморфной фазы  $\text{SiO}_2$  в  $\alpha$ -кristобалит, имеющий крайне высокий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) в интервале температур 950–1100°C.

Следовательно, материалы для «Спейс Шаттл» Li-900 и Li-2200 [2], где

в качестве основы были использованы кремнеземные волокна, обладали явно недостаточной, на взгляд авторов, термической устойчивостью. Так, у материала Li-900 линейная усадка за 16 ч при 1250°C в условиях изотермического нагрева достигала 25%. Это не позволило, когда возникла необходимость существенного повышения прочности плитки, ограничиться модификацией кремнеземной системы активными легкоплавкими спекающими добавками на основе  $B_2O_3$ . Такой путь привел бы к дополнительному возрастанию усадок, неустойчивости геометрической формы и размеров плитки в полете. Решение было найдено в создании принципиально новых материалов FRCI [3], а затем НТР [4] – на основе смеси волокон  $SiO_2$  с более тугоплавкими волокнами на базе  $Al_2O_3$ : «Nextel» (США) и «Saffil» (Великобритания).

Разработка волокнистого ТЗМ плитки велась в нашей стране практически одновременно по нескольким направлениям:

- из нитевидных кристаллов (НК) карбида и нитрида кремния (материал ВТНК);
- из кварцевых волокон (ряд материалов под маркой ТЗМК);
- из поликристаллических волокон (ПКВ) на основе оксида алюминия (материал ТЗМК-1700).

Основные свойства волокон и нитевидных кристаллов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные свойства волокон и нитевидных кристаллов (НК)

Характеристика	Показатели характеристик			
	для волокна		для НК	
	$Al_2O_3$	Кварцевое ( $SiO_2$ )	$Si_3N_4$	SiC
Рентгенофазовый состав	Поликристаллическое	Аморфное	Монокристалл	
Диаметр, мкм	<3	1–2	1–5	<1
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,3–3,5	2,2	3,5–4,0	3,0
Рабочая температура, °C	1650	1250	1400	1400
Прочность при растяжении, МПа	1000	<1000	10 000	10 000
Модуль упругости, ГПа	150	80	300–400	500–570*
Температурный коэффициент линейного расширения: $\alpha \times 10^{-6}, K^{-1}$	6,0–9,0	0,5	2,5–3,0	3,0–3,5
Линейная усадка, % (не более), мата из волокон (без связующего), за 14 ч при температуре, °C:				
1250	0	15	–	–
1600	2	–	–	–

\* Массивные монокристаллы [В.Т. Bernstein, J. Appl. G. Arlt, G.R. Shodder, К.М. Taylor, С. Lenie]

К началу работ по созданию теплозащиты не было отечественных кварцевых волокон, связующего для создания жесткой плитки, необходимого технологического оборудования, не было опыта, который необходимо было наработать в кратчайшие сроки. Были только ученые-энтузиасты, увлеченные высокой идеей и не считавшиеся со временем, и была страна с огромными ресурсами.

Были выделены площади, за один день создана планировка нового участка, разработка проектов уникального технологического оборудования и его изготовление проводились в ВИАМ (Главный инженер Ю.И. Каплин). В кратчайшие сроки создана конструкторская документация (конструкторский отдел во главе с В.А. Николаевым) на трехметровую установку для получения волокнистой плитки из водной пульпы по бумажной технологии – установки, которая интенсивно используется и по сей день, и службы Главного инженера исполнили этот проект в металле.

Перед разработчиками И.С. Силаевым (заместителем министра Минавиапрома) были поставлены крайне жесткие сроки – через 9 мес. должна быть выпущена первая партия теплозащитных плиток в количестве 100 штук.

### **Нитевидные кристаллы тугоплавких соединений**

Применительно к тепловой защите летательных аппаратов НК тугоплавких соединений, в частности НК карбида и нитрида кремния, обладают следующими преимуществами (по сравнению с другими возможными вариантами – НК оксида и нитрида алюминия, ПКВ на основе оксида алюминия и др.) [5]:

- стабильностью размеров и фазового состава в связи с монокристаллической структурой волокон;

- слабой зависимостью теплопроводности от температуры в области высоких температур вследствие большого значения коэффициента излучения карбида и нитрида кремния;

- относительно невысоким ( $(\sim 3-5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) температурным коэффициентом линейного расширения (промежуточным между значениями для стекла и оксидов и близким к  $\alpha$ -графита).

К недостаткам этих кристаллов следует отнести:

- наличие в насыпной массе неволоконистых включений, что требует дополнительных затрат по очистке и без того дорогостоящих волокон;

- склонность к окислению.

Отмеченные недостатки являются следствием технологии их получения – выращивания путем осаждения из газовой фазы. Метод осаждения из газовой фазы состоит в том, что НК нужного соединения конденсируют из парогазовой фазы, содержащей или образующие кристалл элементы в виде паров, или их газообразные (при температуре роста) соединения, которые способны в результате химического взаимодействия с компонентами парогазовой смеси выделять искомое соединение в твердой фазе. Процессы и реакции, используемые для роста эпитаксиальных пленок, покрытий и порошков, используются и при получении нитевидных кристаллов.

Процессы получения НК тугоплавких соединений  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{AlN}$  наряду с НК карбида и нитрида кремния были внедрены ВИАМ в производство на Редкинском

опытном заводе – директор В.Г. Курбатов. Необходимо еще раз отметить, что процесс роста НК предусматривает введение элементов-растворителей и, несмотря на их незначительное количество, они являются нежелательными примесями при изготовлении волокнистых ТЗМ. К сожалению, и карбид, и нитрид кремния, как уже отмечалось, имеют склонность к окислению, что из-за высокой пористости и развитой поверхности волокнистых материалов требует крайней осторожности и тщательнейшей экспериментальной проверки для определения возможности их применения в элементах тепловой защиты летательных аппаратов.

### **Волокна тугоплавких соединений**

Поликристаллические волокна оксида алюминия были выбраны для изготовления плитки ТЗМ из-за их высокой термостойкости. [6,7]. Получали волокна по золь-гель методу. Дефекты, влияющие на термостойкость и прочность волокон, получаемых по золь-гель технологии, это, прежде всего, поры и несовершенство структуры.

Кристаллическая структура термостойких волокон должна оставаться достаточно мелкозернистой даже после длительных выдержек при высоких температурах. Это может быть обеспечено созданием мелкодисперсной, равномерно распределенной двухфазной структуры, где зерна стабильных фаз препятствуют неограниченному росту друг друга. В данном случае это муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Основной результат состоит в том, что предложен механизм создания стабилизированной структуры волокон системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , заключающийся в формировании пространственного муллитового каркаса, стабилизированного зернами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые, в свою очередь, стабилизированы вышеупомянутой муллитовой фазой. Основные свойства волокон приведены в табл. 1. К недостаткам волокон следует отнести наличие в них неволокнистых включений и высокий температурный коэффициент линейного расширения.

Более подробно о преимуществах и недостатках материалов на основе нитевидных кристаллов и волокон тугоплавких соединений представлены в статье [8].

Однако главным направлением исследований был выбран вариант с использованием кварцевых волокон, который по совокупности теплофизических и механических свойств материала на их основе представлялся наиболее перспективным.

В отечественном варианте в качестве основы плитки было использовано специально созданное во ВНИИСПВ с участием ВИАМ супертонкое кварцевое волокно из расплава природного «жильного» кварца, обладающее существенно более высокой термостойкостью. Так, изготовленные из этого волокна материалы – аналоги Li-900 (без стеклообразующей присадки), имели за 36 ч при  $1250^\circ\text{C}$  линейную усадку не более 2–3%. Таким образом, на стадии оснащения «Бурана» вопрос был решен использованием чисто кварцевого материала без введения в него более тугоплавких волокон, что усложнило бы технологию, ухудшило экономические показатели и т. д.

Основные свойства материалов на основе нитевидных кристаллов и волокон тугоплавких соединений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные свойства теплозащитных материалов на основе нитевидных кристаллов нитрида кремния, кварцевых волокон и волокон оксида алюминия

Характеристика	Значения свойств материалов			
	ВТНК	ТЗМК-10/2,5	ТЗМК-25	ТЗМК-1700
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,15	0,15	0,25	0,25
Рабочая температура, °С	1600	1250	1250	1700
Прочность при растяжении, МПа	0,20	0,25	0,40	0,30
Температурный коэффициент линейного расширения: $\alpha \times 10^6, K^{-1}$	2,5–3,0	0,55	0,55	6,0–9,0
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м×К), при $P=10^5$ Па при температуре, °С:				
20	0,06	≤0,05	≤0,05	0,07
800	0,16	–	–	0,13
1700	–	–	–	0,42
Линейная усадка, %, после нагрева по режиму:				
1250°С, 36 ч	0	14	4	0
1600°С, 24 ч	3	–	–	2

Кульминацией всех работ был, конечно, запуск «Бурана». Сотрудники ВИАМ с нетерпением ждали результатов послеполетной экспертизы материалов. Результаты превзошли все ожидания. Что касается теплозащиты, из 38800 плиток серьезно повреждены (оплавлены) были только 3 и 4 плитки утеряны [1]. По общему мнению, по качеству плитки советская теплозащита превосходила американскую.

Разработанные волокна тугоплавких соединений, волокнистые высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы нашли в дальнейшем новые применения. Получаемый легкий и прочный материал хорошо обрабатывается на обычных станках, что позволяет изготавливать из него детали любой сложной формы

Высокая пористость и жесткий каркас в сочетании с низкой теплопроводностью обеспечили широкое применение его в качестве теплоизоляционных материалов для футеровки высокотемпературных нагревательных печей. Это позволило не только существенно снизить вес и габаритные размеры печей, но и сократить время термообработки изделий.

Большой успех был достигнут при использовании этого материала на линии непрерывной разливки алюминия. Вот уже более двадцати лет на Заволжском моторном заводе в цехе лент и вкладышей на линии «Federal Mogul» используются сменные детали (расходный материал) из «космической плитки». Это – щелевые кристаллизаторы, ванночки (контейнеры) для хранения и транспортирования жидкого сплава на основе алюминия, упругие «затравки», заглушки. Щелевой

крупногабаритный кристаллизатор (сборный) был с успехом опробован и на отечественном оборудовании (Ленинградском фольгопрокатном заводе) – процесс разлива металла продолжался непрерывно более суток, пока не закончился весь, имеющийся в наличии металл.

Пропитка волокнистых заготовок металлом позволила получить уникальный композиционный материал. Использование его в поршнях автомобильных двигателей за счет снижения теплопроводности их днища (~ на 25%) позволила поднять температуру в камере сгорания примерно на 100 °С выше по сравнению с обычными двигателями, то есть с некомпозиционными поршнями. И, как следствие, повысить мощность и к.п.д., снизить количество вредных выбросов, уменьшить расход топлива. Дизельные двигатели с композиционным поршнем были разработаны ВИАМ совместно с НИИАТМ (НПО “Автопромматериалы”) и применены на КамАЗе и Заволжском моторном заводе (ЗМЗ).

Разработанные процессы получения волокон и композиционных материалов явились основой создания нового поколения материалов для авиации и космоса.

#### Литература

1. Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. М.: ЗАО ТФ Мир, 2003. 671 с.
2. Silicarensable surface insub. pat. 3.952.083 US; filed 26.12.1973.
3. Leiser D.B., Smith M., Stewart D.A., Goldstein H.E. // *Ceram. Eng. And Sci. Proco.* 1983. №7–8. P. 551.
4. McCormick M.J. // *Advam. Ceram. Mater.* 1988. V. 3. № 4. P. 317.
5. Грибков В.Н., Силаев В.А., Щетанов Б.В., Уманцев Э.Л., Исайкин А.С. Особенности механизма роста нитевидных кристаллов нитрида кремния // *АН СССР Кристаллография.* 1971. Т. 16, № 5. С. 982–985.
6. Грибков В.Н., Щетанов Б.В., Кондратенко А.В. Непрерывные волокна окиси материалах // В сб.: *Композиционные материалы.* – 1984. – С. 66–79.
7. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А. Получение, структура и прочность волокон  $Al_2O_3$  // *Труды Междунар. конф. «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов алюминия: методы получения, свойства и применение в композиционных и новых металлических сплавах».* – М., 2003. – С. 194–196.
8. Грибков В.Н., Мизюрина Г.Т., Щетанов Б.В., Ляпин В.В. Возможности волокнистой тепловой защиты // *Труды Первой междунар. авиакосмич. конф. «Человек–Земля–Космос».* Т. 5. *Материалы и технология производства авиакосмических систем.* – М.: Военная акад. им. Ф.Э. Дзержинского, 1995. – С. 223–231.

## **РАЗРАБОТКА И ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТОЙ ПРОНИЦАЕМОЙ КЕРАМИКИ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

*Б.Л.Красный* (ЗАО “НТЦ “Бакор”, г. Щербинка, МО, Россия)

Проблемы снижения энергетических затрат, энергосбережения становятся всё более актуальными как в России, так и за рубежом. Особенно важны эти проблемы для экономики нашей страны, так как энергоёмкость нашего промышленного производства и предприятий ЖКХ во много раз выше общемировых показателей. В себестоимости продукции доля затрат на энергетические ресурсы часто становится преобладающей, и в связи с этим конкурентоспособность продукции отечественных предприятий всё больше зависит от рационального расходования энергетических ресурсов. Подавляющую часть энергоресурсов в настоящее время представляют так называемые невозобновляемые источники энергии в виде органического минерального топлива – это природный газ, нефть, торф, горючие сланцы и другие виды топлива. Использование их в качестве энергетических источников приводит к значительным выбросам как парниковых газов, так и вредных веществ (пыли, оксидов серы, оксидов азота и др.), поэтому решение проблемы энергосбережения тесно связано с решением экологических проблем.

Электроэнергетика, по различным оценкам, использует около 30 – 35 % содержащейся в ископаемом топливе энергии, при этом её теряется почти 70 % безвозмездно. Только около 55 % энергии, используемой в металлургической промышленности, расходуется эффективно. На транспорте дело обстоит совсем неблагоприятно, только 25 % поступающей этому потребителю энергии расходуется по назначению, а 75 % теряется. В результате в целом менее 50 % всей энергии, расходуемой в мире, используется эффективно, остальную часть составляют потери энергии при её превращениях, на тепловое излучение, с охлаждающей водой и т.д. За период с 2005 по 2011 гг. расход энергии на единицу ВВП в России увеличился не менее чем на 35 %, что связано с неоптимальными режимами её использования, вызванными недогрузкой промышленного оборудования, ухудшением качества сырья и др. Следовательно, находясь по сути дела в едином экономическом пространстве с развитыми странами, отечественный производитель вынужден платить за энергию, потребляемую при производстве продукции, в несколько раз больше.

Одним из магистральных направлений для решения задач повышения энергоэффективности и экологической чистоты предприятий промышленной и социальной сферы должно стать создание принципиально новых материалов, организация производства изделий на основе этих материалов, а также различных технологических аппаратов на их основе и применение этих изделий и аппаратов взамен морально устаревших, традиционно используемых. На примере разработок новых пористых проницаемых керамических материалов, можно показать, как применение новых материалов влияет на экономическую и энергетическую эффективность, экологическую чистоту предприятий промышленной и социальной сферы.

## **СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КАРБИДА БОРА, ПРОИЗВОДИМОГО В ООО «ВИРИАЛ»**

*А.И.Овсиенко, Я.Г.Дятлова, И.Н.Манина, А.П.Лужкова,  
А.С.Осмаков, С.С.Орданьян, В.И.Румянцев, С.Ю.Бойков*  
(ООО «Вириал», г.Санкт-Петербург, Россия)

Карбид бора обладает высоким уровнем химических, физических и механических свойств. Благодаря своей высокой твердости, способности поглощать удары и небольшой плотности он занимает прочную позицию материала для создания легких броневых блоков. Получение плотного материала с определенным уровнем свойств во многом зависит от способа консолидации.

### **Цель работы**

Целью данной работы являлось сопоставление структуры и свойств карбида бора, полученного методами горячего прессования (HPBC), SPS-спекания, реакционного спекания (RBBC). Анализ результативности и перспективности каждого метода спекания и выработка рекомендаций по сферам применения.

### **Материалы и методы**

В качестве исходных порошков использовали микронные порошки карбида бора от разных производителей, а также синтезированные порошки, полученные в ООО «Вириал». Уплотнение материала осуществляли методами горячего прессования, SPS-спекания, реакционного спекания. Режимы для каждого способа спекания подбирали таким образом, чтобы обеспечить получение плотного материала с минимальной пористостью и максимальным уровнем физико-механических свойств.

Исследование физико-механических свойств проводили по стандартизованным методикам. Определение твердости по Виккерсу проводили по ИСО 14705, предела прочности при изгибе – по ИСО 3327, трещиностойкости – методом индентирования по методике №09/0100302-2010/2012, модуля упругости – по ИСО 3312. Исследование микроструктуры полученных материалов осуществляли методами оптической и растровой микроскопии. Оценивали результаты сравнительных баллистических испытаний материалов из карбида бора, полученных по разным технологиям. Проведены трибологические испытания осевых опор из материала на основе карбида бора на универсальной машине трения УМТ 2168 в режиме трения в воде под осевой нагрузкой.

### **Результаты**

В табл. 1 представлены результаты диагностирования физико-механических свойств и микроструктуры материалов, полученных горячим прессованием и реакционным спеканием на промышленном оборудовании ООО «Вириал».

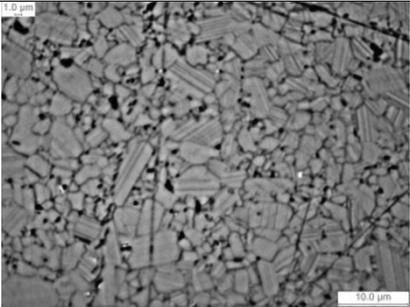
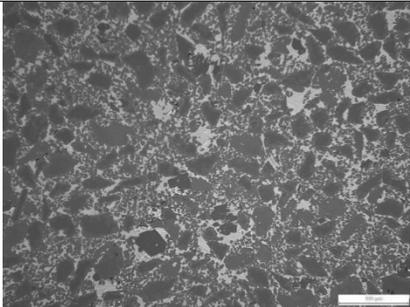
При горячем прессовании карбида бора спекание протекает по твердофазному механизму. Высокая температура и давление горячего прессования приводят к увеличению контактной поверхности частиц, интенсификации диффузионных процессов и замедлению процессов рекристаллизации за счет снижения температуры спекания материала. Уплотнение материала осуществляли на горячем прессе HP W 125 FCT. В зависимости от того, какое удельное давление

прикладывалось во время процесса горячего прессования, момент полного уплотнения материала наступал при разных температурах. В отработанном режиме соотношение давления и максимальной температуры подобраны таким образом, чтобы оптимизировать временной процесс получения плотного материала.

Спеченные изделия представляют собой плитки с размерами 50·50 мм и 100·100 мм. Микроструктура горячепрессованного материала после травления характеризуется присутствием зерен как изометрической, так и вытянутой формы со средним размером частиц 5 мкм. Материал, полученный методом горячего прессования, обладает физико-механическими свойствами, соответствующими уровню отечественных и зарубежных аналогов. При проведении процессов спекания использовали как коммерческие порошки, так и порошки собственного синтеза.

Таблица

Физико-механические свойства и микроструктура карбида бора, полученного методами горячего прессования и реакционного спекания

Физико-механические свойства	HPBC ТУ 3988-033-23042805-2013	RBBC ТУ 3988-034-23042805-2013
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,52	2,63
Микротвердость, ГПа	35-40	30-35
Прочность при изгибе, МПа	450-500	300
Трещиностойкость, МПа·м <sup>1/2</sup>	2,5-3,0	2,1-2,6
Модуль упругости, ГПа	450	400
Микроструктура		

Апробирование консолидации порошка карбида бора методом SPS показало возможность достижения тех же физико-механических свойств за значительно более короткое время при подборе соответствующих технологических параметров (температура, давление, время). Однако эти заключения сделаны по образцам диаметром 25 мм, полученным на установке SPS KCE-FCT HP D 25-SD, и носят предварительный характер.

Реакционное спекание протекает с присутствием жидкой фазы. Спекание в этом случае осуществляется за счет пропитки пористой карбонизованной заготовки жидким металлическим кремнием. В результате химического взаимодействия

образуется каркас из вторичного карбида кремния и твердого раствора сложного состава, упрочненного зернами карбида бора. Температурные режимы спекания определяют степень растворения карбида бора в жидком расплаве и соотношение конечных фаз, формируя микроструктуру материала. В силу присутствия остаточного кремния реакционноспеченный карбид бора уступает по физико-механическим свойствам (табл.) горячепрессованному материалу и материалу, полученному методом SPS. Однако способ реакционного спекания позволяет реализовать на действующем оборудовании ООО «Вириал» многотоннажное производство (25-30 тонн/год), в частности, для изготовления легких броневых блоков, разрабатываемых ЗАО «НЭВЗ-Керамика» в рамках выполнения ОКР «Карбид бора».

Предварительные результаты отстрела пластин из НРВС и RVBC показали их сопоставимость.

### **Выводы**

1. В компании ООО «Вириал» поставлено производство изделий из карбида бора методами горячего прессования (ТУ 3988-033-23042805-2013) и реакционного спекания (ТУ 3988-034-23042805-2013).

2. Проведено апробирование режима консолидации карбида бора методом SPS и показана сопоставимость свойств с горячепрессованным материалом.

3. Показана возможность получения керамики на основе синтезированных порошков с уровнем свойств, сопоставимым с материалом на основе коммерческих порошков.

## **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Н.И.Бакланова<sup>1</sup>, Н.Б.Морозова<sup>2</sup>, В.В.Лозанов<sup>1</sup>* (<sup>1</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия; <sup>2</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия)

В настоящее время предпринимаются большие усилия по разработке сверхвысокотемпературных конструкционных материалов. Ведутся работы по созданию монолитной керамики и композитов на основе диборидов гафния и циркония, в том числе армированной дискретными SiC волокнами, разрабатываются HfC и TaC волокна, композиты с тугоплавкими карбидными матрицами и т.д. Однако углерод - углеродные композиционные материалы (углеродная матрица, армированная углеродными волокнами, УУКМ) остаются пока единственным конструкционным материалом, который обладает необходимой прочностью и трещиностойкостью при температурах выше 2000°C, низкой плотностью, хорошо разработанными методами получения и относительно низкой стоимостью, и поэтому рассматриваются как реальная основа для создания новых образцов ракетно-космической техники. Существенным недостатком УУКМ является низкая окислительная устойчивость. Для предотвращения окисления УУКМ и уменьшения скорости абляции необходимо разработать комплексную

многослойную систему защиты. Каждый из слоев должен выполнять свою функцию, а все вместе они должны быть совместимыми друг с другом и с УУКМ, сохранять хорошую адгезию к композиту в течение определенного времени, эффективно защищать УУКМ от окисления, иметь низкое давление паров при экстремальных температурах, высокие температуры плавления, иметь адекватные механические свойства.

Цель работы - разработка и фундаментальное исследование многослойной тугоплавкой системы защиты УУКМ от окисления, отвечающей требованиям функционирования в экстремальных условиях гиперзвукового полета. Система защиты включает внутренний карбидный слой и внешний барьерный слой из благородного металла (рис.).

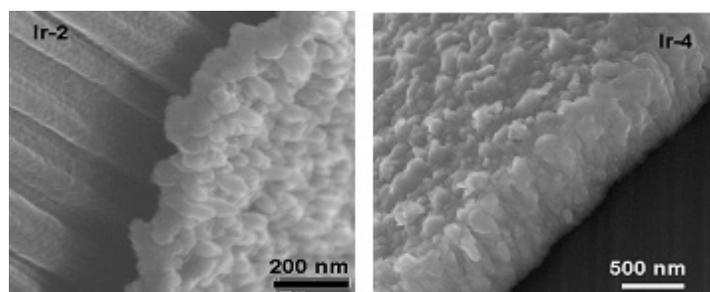


Рис. Иридиевое покрытие, полученное при различных условиях на углеродных волокнах

Нами были разработаны низкотемпературные методы получения покрытий тугоплавких карбидов и благородных металлов на углеродсодержащих подложках. Состав, морфология, текстура и топография покрытий на углеродных материалах в зависимости от параметров получения были изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии, сопряженной с энергодисперсионным анализом, атомно-силовой микроскопии, рентгенофазового анализа и EXAFS. Полученные результаты могут быть использованы для разработки конструкционных материалов, стабильных в экстремальных условиях эксплуатации.

## **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ**

*В.П.Пахомов\**, *Г.Н.Волощенко\**, *Н.Н.Саванина\*\**, *Е.А.Кораблёва\*\**,  
*М.Ю. Русин\*\**, *В.Н.Фатеев\** (\*НИИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия;  
\*\*ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Доклад посвящён рассмотрению конструкторско-технологических решений при создании высокотемпературных электрохимических устройств (ВТЭХУ) и их возможном применении. Рассматриваются два типа конструкторско-технологических решений: планарный (плёночный) и трубчатый. Их сравнение применительно к реализации ВТЭХУ приводит к выбору трубчатых решений как

предпочтительных из выбранных критериев, которые состоят в следующем:

- безотказность работы устройства с сохранением эксплуатационных показателей в заданных пределах в течение требуемого периода;
- низкая материалоемкость. Понятное требование, особенно, если иметь в виду возможный масштаб применения ВТЭХУ;
- компактность, т.е. высокая производительность единицы объема устройства;
- малое сопротивление твёрдого электролита. Его уменьшение ведёт к уменьшению капитальных и эксплуатационных затрат. И не только. Ещё и к увеличению производительности единицы объема (см. выше);
- ресурсоспособность и, связанная с нею, ремонтоспособность;
- последнее требует простоты технологии изготовления элементов и батарей, что должно привести к:
  - автоматизации изготовления электролитических элементов, ячеек и модулей;
  - учитывая возможные масштабы применения, технологическое оборудование, обеспечивающее производство элементной базы ВТЭХУ, под которой мы понимаем керамические электролитические элементы, ячейки и модули, должно быть высокопроизводительным;
  - наконец, формируются особые требования к электродным материалам, газодиффузионным и теплообменным процессам, связанным между собой, при эксплуатации устройств.

Поскольку речь идёт об электрохимических устройствах в применении к процессам электролиза воды или процессам с водородом и кислородом, то уместно использовать более, чем вековой, опыт низкотемпературного электролиза воды, в частности, биполярные, фильтр-прессные электролизёры и монополярные, в том и другом случае водно-щелочные. Опыт их создания и эксплуатации оказывается полезным при формировании отношения к выбору типа конструкции ВТЭХУ.

Среди сравнительно новых результатов заслуживает внимания ультрадиспергирование исходного диоксида циркония до частиц наномасштабного размера. Измерения электропроводности нанодисперсных систем показали некоторое снижение энергии активации переноса кислорода по твёрдому электролиту, что указывает на изменения размеров агрегатов зёрен в керамике. К значительному увеличению электропроводности это пока не привело, но очевидно, что потенциал нанодиспергирования твёрдого электролита не исчерпан. Возможно, это связано с тем, что физическая модель переноса иона большой атомной массы внутри твёрдого тела пока ещё не может считаться завершённой и сравнение с данными из низкотемпературной электрохимии показывает, что в этом отношении возможны неожиданности.

Рассматривается ретроспектива конструкторско-технологических решений по ВТЭХУ. В частности, конструкции электролитических элементов, способы изготовления из них электролитических модулей и соответственно батарей. Обсуждаются некоторые недостатки этих технологий, вызывающие снижение ресурсоспособности аппаратов.

Рассматриваются также области применения ВТЭХУ. Обсуждается возможность их реализации:

- в качестве преобразователей химической энергии топлив в электрическую;
- в качестве источников водорода из воды для крупномасштабных систем энергообеспечения;
- как медицинских средств формирования атмосферы для дыхания в замкнутых объёмах, предназначенных для индивидуальных пользователей;
- и другие.

В докладе приводятся примеры технических решений в области аппаратостроения ВТЭХУ за рубежом, и обсуждается состояние данной проблемы в России.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПОЛУЧЕНИЮ УЛЬТРАВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДИБОРИДА ЦИРКОНИЯ МЕТОДОМ SPS**

*Л.А.Чевыкалова, И.Ю.Келина, И.Л.Михальчик, Л.А.Плясункова, А.В.Аракчеев*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия);

*А.А.Касимовский, К.С.Матюшин* (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва, Россия)

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по разработке ультравысокотемпературной керамики (УНТС) на основе диборида циркония ( $ZrB_2$ ) с различными активаторами спекания, полученной методом спекания в разряде плазмы (SPS).

В качестве исходного сырья использовали микронные порошки  $ZrB_2$ , представляющие собой агломераты неопределенной формы размером 5–20 мкм, состоящие из частиц размером 0,5–4 мкм, в качестве спекающих добавок использовали два вида порошков: карбид кремния (SiC), который выступает как замедлитель роста зерна, и нитрид кремния ( $Si_3N_4$ ) - как наноактиватор спекания. Карбид кремния вводили в количестве 20, а нитрид кремния 5 масс. % (далее %). В работе использовали порошки SiC производства ОАО «Запорожского абразивного комбината» с размером частиц ~ 3 мкм и удельной поверхностью 11,5 м<sup>2</sup>/г; плазмохимические (ПХС) ультрадисперсные порошки нитрида кремния производства ОАО «Neomat», г. Рига, представляющие собой агломераты округлой и неопределенной формы размером 5–40 мкм и состоящие из частиц размером 0,05–0,1 мкм. Разрушение агломератов и смешение исходных компонентов  $ZrB_2+SiC$  и  $ZrB_2+Si_3N_4$  проводили на валковой мельнице шарами из  $Al_2O_3$  в бензине в течение 48 ч для получения однородного распределения частиц.

Спекание образцов проводили в ФГУП ГНЦ «Центр Келдыша» на установке импульсного плазменного спекания FCT-HP D 25 в формах диаметром 20 мм в вакууме с усилием прессования 20 кН.

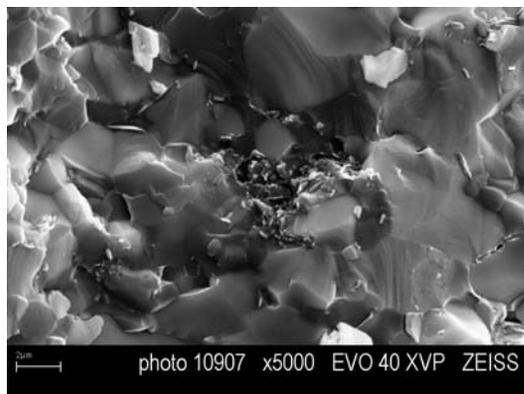
Основываясь на известных данных о спекании аналогичных систем и характеристиках исходных порошков, параметры процесса SPS, такие, как максимальная температура (1750...1900°C), скорость 100...260 град/мин.), время (5..14 мин.) выхода на заданную температуру и время выдержки (импульсное) (3..10 мин.) варьировали в широких пределах.

Как показали исследования, при прочих равных условиях увеличение температуры спекания до 1900°C положительно сказывается на увеличении плотности композита с 3,97 до 4,81 г/см<sup>3</sup>, при этом открытая пористость уменьшается с 15,9 до 0,07 %. Дальнейшее варьирование указанными выше технологическими факторами SPS-процесса привело к повышению плотности до 4,97 г/см<sup>3</sup> (теоретическая плотность – 5,37 г/см<sup>3</sup>). Для материала состава ZrB<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> максимальное значение плотности, равное 5,32 г/см<sup>3</sup> (теоретическая плотность – 5,91 г/см<sup>3</sup>), достигнуто при температуре 1850°C (скорость нагрева 260 град/мин., время выхода на заданную температуру 5 мин. и выдержка на импульсном режиме 5 мин.). При этом следует отметить, что для всех образцов, независимо от температуры спекания, характерна практически нулевая пористость (0,04–0,08 %). Это обуславливает возможность в дальнейшем в данной системе уменьшить с 5 до 2 % содержание Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, что, в свою очередь, согласуется с литературными данными.

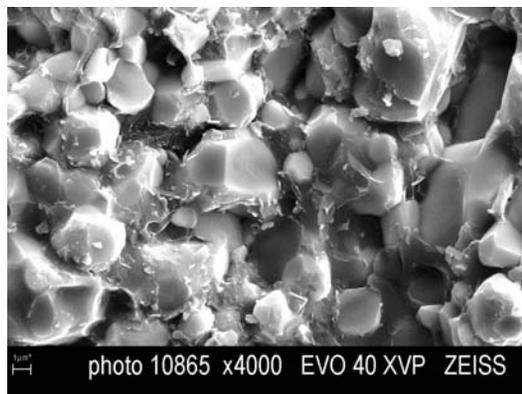
Исследования полированных поверхностей образцов (шлифов) состава ZrB<sub>2</sub>-SiC методом оптической микроскопии показали, что независимо от параметров технологического процесса микроструктура керамики состоит из агломератов неопределенной морфологии размером ~ 10–60 мкм и отдельных зерен (или мелких агломератов) размером ~ 1–4 мкм. Между агломератами и зернами распределяется межзеренная более хрупкая фаза, которая частично выкрашивается в процессе подготовки шлифа (рис., а).

Микроструктура образцов состава ZrB<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> также представлена агломератами неопределенной морфологии, состоящими из более мелких по сравнению с составами ZrB<sub>2</sub>-SiC зерен размером ~ 4 - 24 мкм, и отдельными зернами округлой формы размером ~ 1–4 мкм (рис., б). По границам агломератов и зерен наблюдаются раковины, образовавшиеся вследствие выкрашивания межзеренной фазы в процессе подготовки шлифов или мелких частиц матрицы.

Таким образом, на данном этапе исследований методом SPS получены образцы материалов в системах ZrB<sub>2</sub>-SiC и ZrB<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с плотностью 90 % от теоретической, пористостью до 0,04 %, микротвердостью от 10 до 18 ГПа и коэффициентом интенсивности напряжений на уровне 4-6 МПа×м<sup>1/2</sup>.



а



б

Рис. Характерная микроструктура образцов состава ZrB<sub>2</sub>-SiC (а) и ZrB<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (б)

Сравнение полученных результатов со свойствами известных зарубежных материалов, полученных в аналогичных системах методами HP и SPS с использованием тонких порошков (таблица), показывает, что даже при 90 % плотности от теоретической керамика имеет высокий уровень физико-механических свойств, близкий к зарубежным аналогам.

Таблица

Свойства керамических материалов в системах  $ZrB_2$ -SiC и  $ZrB_2$ - $Si_3N_4$

Источник информации	Плотность, г/см <sup>3</sup> (%)	Пористость, %	Микротвердость, HV1, ГПа	Критический коэффициент интенсивности напряжений, $K_{Ic}$ , МПа $\times$ м <sup>1/2</sup>
$ZrB_2$ -20 % SiC				
[1] (HP)	5,36 ± 0,04 (98)	0,6 ± 0,33	20,9 ± 1,9	4,3 ± 0,2
[2] (SPS)	(98,5-99,6)	0,6 ± 0,33	16,7 – 16,9	5,0 - 5,9
[3]	(99,0)	< 1	17,5 – 17,9	4,07
[4] (HP)	(97,9)	-	15,2	3,8
$ZrB_2$ -2 % $Si_3N_4$				
[5] (HP)	(~ 99 %)		13,4	3,7± 0,1

#### Литература

1. J.F. Justin, A.Jankowiak Ultra-High Temperature Ceramics: densification, properties and thermal stability // Aerospace Lab. – 2011. – N. 3.
2. R.Licheri, R.Orru, C.Musa, A.M.Locci. Spark Plasma Sintering of  $ZrB_2$ - and  $HfB_2$ -Based Ultra High Temperature Ceramics Prepared by SHS//International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis.- 2009, Vol.18, N. 1. PP. 15-24.
3. L. Scatteia, F.De Filippis, G. Marino Ultra-High Temperature Diboride Ceramics for RLV's Hot Structures // European Conference Aerospace Sciences Received
4. Sung S. Hwang, Alexander L. Vasiliev, Nitin P. Padture Improved Processing and Oxidation-resistance of  $ZrB_2$  Ultra-High Temperature Ceramics Containing SiC Nanodispersoids // Journal of Materials Science and Engineering A. – 2007. – № 464. – P. 216-224.
5. Alida Beiiosi Ultrahigh Temperature Ceramics: microstructure control improvement related to materials design and processing procedures // Proceedings 5<sup>th</sup> European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures Noordwijk, The Netherlands, 2006.

# ПИРОЛИТИЧЕСКИЙ НИТРИД БОРА: СТРУКТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ

*В.И.Румянцев, А.С.Осмаков, Н.М.Радциг, А.Е.Кравчик*  
(ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия)

Эффективность применения пиролитического нитрида бора (ПНБ) в ряде направлений промышленности (синтез полупроводниковых материалов, СВЧ-техника и др.), обусловленная уникальностью этого материала, была продемонстрирована до 90-х годов прошлого столетия.

Уникальность ПНБ, получаемого методом химического газофазного осаждения (ХГО), проявляется в том, что это поликристаллический радиопрозрачный диэлектрик, для которого характерны высокая степень чистоты, термостабильность, газонепроницаемость, коррозионная стойкость. Причем эти свойства сохраняются при высоких температурах. Однако в настоящее время в России нет действующего производства ПНБ, в то время как за рубежом движение в этой области не останавливается: развиваются и производство и сферы новых применений материала.

## **Цель работы**

Целью работы являлось сопоставление свойств ПНБ по разработкам ООО «Вириал» со свойствами зарубежных аналогов и оценки возможной модернизации технологии для промышленного выпуска продукции.

## **Методы и результаты**

Компания «Вириал» до 2005 года развивала производство ПНБ на арендованной у ГИПХ установке. Проводилось совершенствование технологии различных изделий и управления структурой материала с оптимизацией свойств для конкретных применений: кристаллизаторы различной формы для синтеза полупроводниковых материалов, стержни-теплоотводы, окна вывода и другие изделия (рис.1). Были разработаны методы позволяющие, управлять структурой материала на всех уровнях структурной иерархии.



Рис.1. Изделия из ПНБ производства ООО «Вириал»

Следует отметить, что на наномасштабном уровне организации структуры для ПНБ характерна наноламинарность (рис. 2).

Реальная микроструктура ПНБ представляет собой слоистую композицию из кристаллических (H-BN, R-BN) и турбостратных (T-BN) нанослоев. Содержание

каждого из компонентов (H-BN, R-BN, T-BN) может изменяться в самых широких пределах от 0 до 100%, обуславливая тем самым широкий диапазон свойств материала. При этом для оценки уровня структурного совершенства определяется степень гофрированности нанослоев, рассчитываются «Lс» – средняя толщина нанослоя, «La» – средняя длина квазировного участка нанослоя, а также уровень искаженности борзотной сетки в «с» и «а»- кристаллографических направлениях.

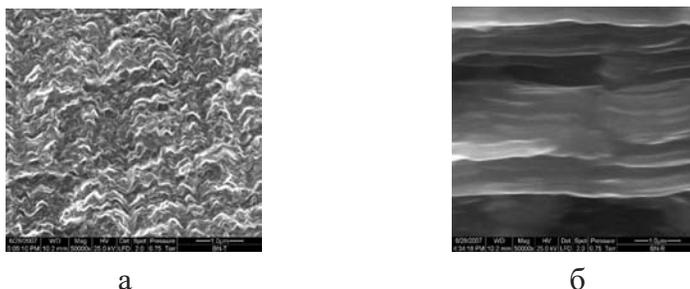


Рис.2. SEM–изображения:Т-BN (а) и R-BN (б) x 50 000

Сравнение свойств ПНБ, полученного в ООО «Вириал», со свойствами материалов от ведущих зарубежных производителей показало их сопоставимость, причем зарубежные фирмы заявляют свойства только гексагональной (турбостратной) модификации материала.

Анализ полученных результатов показал также, что основные технологические задачи повышения качества ПНБ при получении изделий можно определить как:

1. Уменьшение уровня неоднородности микроструктуры ПНБ;
2. Повышение уровня технологичности заготовок ПНБ при механической обработке (минимизация расслаиваемости материала);
3. Получение изделий (заготовок) с оптимизированным для конкретного применения комплексом свойств.

Решение этих задач требует создания установки следующего поколения, основанной на современной автоматике для контроля и управления технологическими режимами, в т.ч. предусматривающей возможность реализации разработанных технологий (патенты РФ №2160224 и №2167224).

### **Выводы**

1. Уровень физико–механических, термо–и электрофизических характеристик ПНБ определяется структурным состоянием образующих материал нанослоев. Для адекватной организации технологического процесса необходима постановка производства ПНБ на новом современном технологическом уровне.

2. Регулируя структуру пиролитического нитрида бора путем изменения технологических параметров процесса ХГО, можно получить материал с широким диапазоном свойств и по крайней мере не уступающий лучшим зарубежным аналогам, что обеспечивает разнообразие возможности его применения.

3. Для восстановления и развития производства необходима поддержка государства в рамках современных федеральных целевых программ.

# КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ МАГНИЯ, АЛЮМИНИЯ, ИТТРИЯ ДЛЯ ВИДИМОЙ И ИК-ОБЛАСТЕЙ СПЕКТРА

*С.С.Балабанов, Д.А.Пермин*

(Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,  
г. Нижний Новгород, Россия)

Современные технологии оксидной керамики открывают новые возможности создания поликристаллических оптических материалов, превосходящих по совокупности оптико-механических характеристик монокристаллы. Учитывая гибкость керамического производства и его экономическую эффективность, очевидно, что оксидная оптическая керамика получит широкое распространение в качестве защитных окон, лазерных материалов и пр. Одним из ключевых этапов их технологии является синтез нанопорошков заданного состава и морфологии.

В настоящей работе были проведены исследования влияния исходных соединений и условий получения на характеристики нанопорошков алюмомагниевого шпинели (АМШ) и оксида иттрия. Для синтеза порошков использовались различные подходы: алюмомагниевого шпинель получали по золь-гель технологии, оксид иттрия – методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Алюмомагниевого шпинель получали гидролизом предварительно очищенного вакуумной перегонкой двойного изопрропилата магния-алюминия  $MgAl_2(OPr^i)_8$  с последующим прокаливанием образовавшихся гидроксидов при температуре 800-1300°C. Наилучшие по совокупности характеристик порошки АМШ были получены при гидролизе эквимолярным количеством воды. Удельная поверхность порошков в зависимости от температуры кальцинирования меняется от 160 м<sup>2</sup>/г (при 800°C) до ~1 м<sup>2</sup>/г (при 1300°C). На микрофотографиях порошков хорошо различимы первичные частицы размером 50-200 нм, объединённые в агломераты. По данным статического светорассеяния средний размер агломератов составляет 16 мкм, число индивидуальных частиц (размером менее 1 мкм) не превышает 1%. Это обуславливает необходимость дополнительной подготовки порошков (размол) перед прессованием. Основными примесями по данным атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) являются Na (7ppm), Ca (5ppm), Fe (10ppm) и Zn (13 ppm).

СВС оксида иттрия проводили из ацетатонитратов иттрия  $Y(NO_3)_{3x}(CH_3COO)_{3(1-x)} \cdot aq$  ( $0,3 \leq x \leq 0,7$ ), которые получали растворением  $Y_2O_3$  в водном растворе соответствующего состава предварительно очищенных перегонкой уксусной и азотной кислот. После высушивания полученные образцы ацетатонитратов помещали в печь, предварительно нагретую до 700°C, где происходило их воспламенение. В результате этого получалась хрупкая пена, состоящая из наноразмерных частиц оксида иттрия.

Морфология  $Y_2O_3$  исследовалась с помощью методов статического светорассеяния и электронной микроскопии (ЭМ). Исследование гранулометрического состава методом светорассеяния указывает на бимодальное распределение частиц по размерам. Первая мода находится в диапазоне

80-130 нм, вторая мода представлена частицами размером до 50 мкм, являющихся агломератами частиц меньшего размера. Предположение о строении частиц второй моды подтверждается тем, что при диспергировании ультразвуком доля субмикронных частиц значительно увеличивается, в то время как частицы больше микрона практически исчезают. По данным ЭМ первичные частицы порошка имеют округлую форму и размер 50-100 нм. На основании результатов измерения удельной площади поверхности БЭТ методом показано, что максимальная дисперсность ( $46,7\text{ м}^2/\text{г}$ ) характерна для порошков  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , полученных из ацетатонитратов с  $x=0,7$ .

Примесный состав нанопорошков оксида иттрия был определён с помощью метода АЭС-ИСП. Основными примесями в  $\text{Y}_2\text{O}_3$  являются Si (50ppm), Ca (15ppm), Fe (1ppm).

Из порошков методами искрового плазменного спекания (для АМШ) и высокотемпературного вакуумного спекания (для  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) были получены образцы прозрачной керамики. В целях улучшения спекаемости в оксид иттрия вводили добавку оксида лантана в количестве 10 % ат. Внешний вид керамики показан на рис. Оптическое пропускание АМШ в видимой области составляет величину  $\sim 20\%$ , а в области 1-5 мкм достигает 70 %. Пропускание в видимой области керамики оксида иттрия приближается к теоретическому и составляет около 81 %.

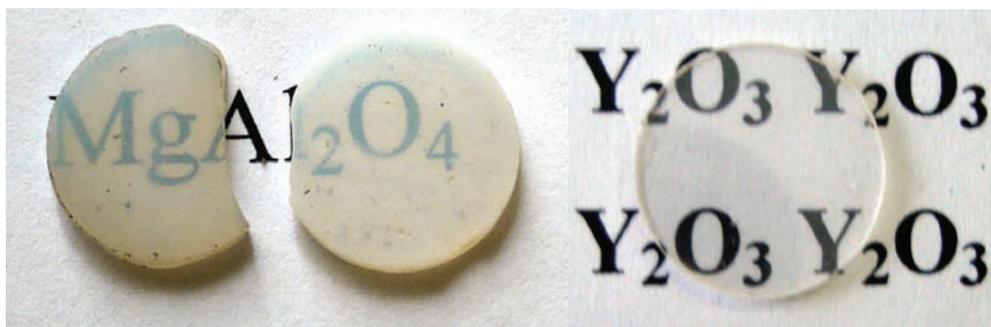


Рис. Образцы керамики алюмомагниево-шпинели и оксида иттрия

## **АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ**

*Б.Л.Красный, В.П.Тарасовский, А.Б.Красный, А.Л.Галганова, Я.Г.Матыцин*  
(ЗАО “НТЦ “Бакор”, г. Москва, г. Щербинка, Россия)

Все основные свойства материала определяются, кроме условий испытаний, структурой испытуемого образца, независимо от того, какими путями эта структура была получена. Поэтому возникает особый интерес к задаче нахождения путей регулирования свойств материалов за счёт изменения их структуры. В физико-химическом анализе эта задача была сформулирована как проблема «дисперсность – состав – структура – свойство». Первая часть этой зависимости «дисперсность – состав – структура» относится к технологии изготовления материала, т.е. к путям

получения данной структуры. Вторая часть этой цепочки «структура – свойство» определяет потребительское качество продукта, т.е. пригодность его к службе. Поэтому звено «структура – свойство» становится одним из главных проблем материаловедения [1].

В настоящее время под термином структура понимают пространственную организацию вещества материала, характеризующуюся совокупностью морфометрических, геометрических и энергетических признаков и определяющуюся составом, количественным соотношением и взаимодействием компонентов, составляющих материал [2].

До последнего времени наиболее распространённым и информативным методом получения информации о строении материала являлась растровая электронная микроскопия (РЭМ), которая позволяет получать чёткие двумерные срезы высокого разрешения. РЭМ даёт возможность получать изображение исследуемой микроструктуры и выполнять различные операции по обработке этого изображения и количественной оценке её морфометрических и геометрических признаков [3]. Однако двумерные изображения дают лишь косвенную информацию о структуре материала, которой недостаточно для оценки свойств материала.

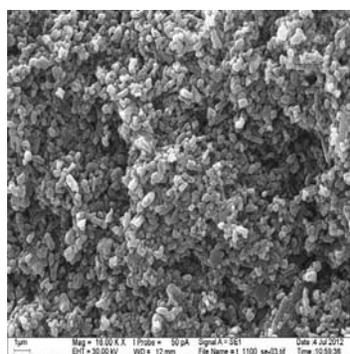
Трёхмерная структура материала может быть восстановлена по двумерным срезам с помощью статистических реконструкций, но для проверки адекватности полученного результата информация о трёхмерном строении материала всё равно необходима. Такая информация может быть получена с помощью рентгеновской микротомографии ( $\mu$ КТ).

При исследовании материалов с помощью метода рентгеновской микротомографии не нарушается изначальная структура материала, не происходит растворения или превращения веществ, составляющих первичную структуру материала, в другие вещества. В отличие от таких методов исследования поровой структуры материала, как капиллярметрия или ртутная порометрия, результатами которых являются полуинтегральные характеристики (распределение пор по размерам),  $\mu$ КТ в дополнение к этим характеристикам позволяет получить информацию о форме пор, их связности, распределению пор в пространстве образца.

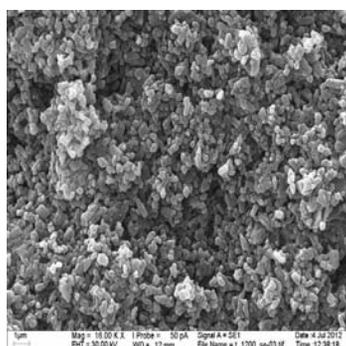
Образцы для исследования структуры керамики получали методом полусухого прессования при Руд. = 50 МПа. В качестве исходного материала использовали порошок оксида алюминия марки СТ 3000 SG (фирма “Almatis GmbH”, Германия). Характеристики исходного порошка приведены в табл. Удельная поверхность порошка (БЭТ) составляла 7,5 м<sup>2</sup>/г. В работе представлены результаты количественного анализа структуры корундовой керамики, спеченной при температурах: 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 °С (микроструктура керамики, рис.; структура порового пространства; распределение пор по размерам и фактору формы и др.).

## Физико-технические характеристики порошка реактивного глинозёма

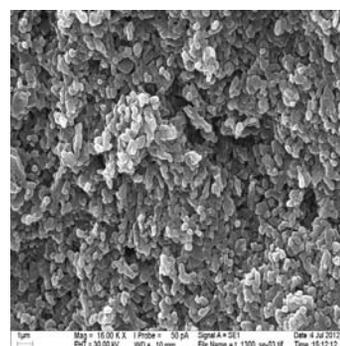
Наименование характеристик порошка	Единица измерения	Численное значение
D[4,3]	МКМ	1,26
Удельная поверхность	$\text{см}^2/\text{см}^3$	74083
D <sub>10</sub>	МКМ	0,35
D <sub>50</sub>	МКМ	0,81
D <sub>90</sub>	МКМ	2,36
Коэффициент удлинения частиц	-	1,9



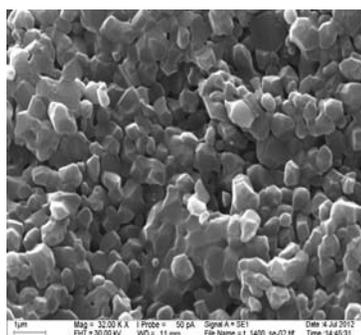
T = 1100 °C



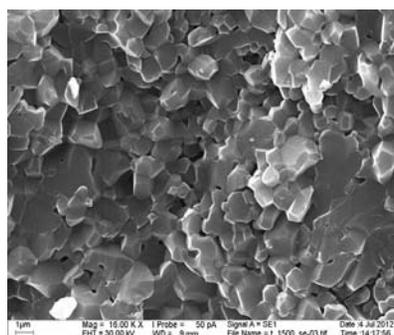
T = 1200 °C



T = 1300 °C



T = 1400 °C



T = 1500 °C

Рис. Микроструктура корундовой керамики при различных температурах обжига

## Литература

1. Тананаев И.В. Физико-химические и технологические основы жаростойких цементов и бетонов.-М.: Наука, 1986.- 187 с.
2. Грунтоведение / Трофимов В.Т., Королёв В.А., Васильчук Ю.К., Зингауров Р.С., Под ред. В.Т.Трофимова. – 6-е изд. Перераб. и доп. – М.: МГУ, 2005. – 1024 с.
3. Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б. Исследование влияния формы частиц на структуру и свойства пористой проницаемой керамики // XIX-я Международная конференция огнеупорщиков и металлургов: тез. докл.– М., 2012.

## ПОЛУЧЕНИЕ ВАКУУМНО-ПЛОТНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБА КВАЗИИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

*И.Н.Бизин, Н.Е.Шер, А.А.Жуков, Л.И.Горчакова*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Изделия из оксидной керамики широко используются в различных областях современной науки и техники. Особое место в технической керамике занимают высокочастотные вакуумно-плотные керамические материалы. Эти материалы непроницаемы для газов, обладают большой механической прочностью и могут работать в условиях высокого вакуума в большом интервале температур. Их важной особенностью является способность образовывать вакуумно-плотные высокотемпературные соединения с металлами, что позволяет создавать конструкции, включающие керамические и металлические детали, сочлененные между собой.

Одним из основных материалов, применяемых в настоящее время для получения вакуумно-плотных металлокерамических узлов, является алюмооксидная керамика. Изделия из такой керамики можно изготавливать методами непластической технологии, однако при массовом производстве наиболее распространен способ горячего литья под давлением пластифицированных парафином масс. В то же время формование таким способом крупногабаритных и массивных бездефектных деталей представляет значительную проблему. Основными дефектами при этом являются внутренние полости разных размеров и существенная разноплотность отливки, что приводит к возникновению внутренних напряжений при обжиге и, как следствие, снижению прочности керамики.

Известно, что для получения вакуумно-плотной керамики применяется способ квазиизостатического прессования. Принцип способа заключается в том, что средой, передающей изостатическое равномерное давление, является твердый эластичный материал полиуретан. Давление пресса, приложенное через металлический пуансон пресс-формы к эластичному элементу, передается всему объему засыпанного пресс-порошка, обеспечивая объемное трехосевое обжатие. Кроме того, для реализации данного способа не требуется специального дорогостоящего оборудования.

В настоящей работе для оценки применимости данного способа была использована шихта на основе порошка оксида алюминия с удельной поверхностью 3700 м<sup>2</sup>/г и 4300 м<sup>2</sup>/г. С целью определения влияния масштабного фактора на свойства готового изделия применялись пресс-формы трех диаметров Ø35мм, Ø90мм, Ø155мм для которых были изготовлены пресс-буферы из полиуретана марки СКУ-7Л.

Установлены зависимости свойств получаемых изделий от давления, влажности пресс-порошка и его удельной поверхности, типа ПАВ, толщины и места расположения пресс-буфера, на основании чего оптимизированы технологические параметры процесса квазиизостатического прессования и свойства шихты, позволяющие получать вакуумно-плотную керамику:

- удельная поверхность - 3700 м<sup>2</sup>/г - 4300 м<sup>2</sup>/г;
- влажность пресс-порошка – до ~ 10% масс;
- толщина полиуретанового пресс-буфера 10-15 мм;
- давления прессования 80-110 кг/см<sup>2</sup>.

Отмечено, что расположение пресс-буфера (под пресс-порошком или над ним) не вносит принципиальных различий в свойства керамики и зачастую выбирается из удобства выполнения работ. В то же время существенным условием обеспечения высокого качества керамики является медленное снятие прессующего усилия. Выполнение этого требования позволяет предотвратить разрушение формовок.

Полученные таким образом образцы диаметрами Ø35мм, Ø90мм, Ø155мм и толщиной δ- 5–20 мм имели:

- плотность 3,72–3,74 г/см<sup>3</sup>;
- открытую пористость 0,04–0,08 %;
- водопоглощение 0,01–0,03 %;
- газопроницаемость по гелию  $Q=3\div 4\times 10^{-12}$  Па×м<sup>3</sup>/с ( $2.2\div 3\times 10^{-8}$  л×ммкм рт ст/см<sup>3</sup>).

На основании результатов исследования микроструктуры и рентгеновской дефектоскопии установлена равномерность полученных образцов и отсутствие дефектов по всему их объему.

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛОТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ УЗЛОВ**

*М.Ю.Русин, Н.Е.Шер, И.Н.Бизин, Н.Н.Саванина, Г.И.Куликова, А.В.Бабошин*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Современное развитие вакуумной техники и энергетики требует разработки новых материалов и конструктивных решений для создания металлокерамических узлов (МКУ), работающих в экстремальных условиях и (или) имеющих крупные габариты. Наиболее подходящим материалом для МКУ считается оксид алюминия, керамические изоляторы из которого отвечают практически всем современным требованиям. На данный момент разработан ряд вакуумно-плотных материалов на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> следующих промышленных марок: ВК-102, ГБ-7, ВК-94, «Миналунд», «Микролит», 22ХС и т.д. Эти виды керамики успешно применяются для создания МКУ различного назначения, однако изготовление крупногабаритных бездефектных изоляторов представляет значительную сложность.

Целью настоящей работы является разработка технологии изготовления крупноразмерных и массивных изоляторов из оксида алюминия диаметром до 150 мм и толщиной до 20 мм.

Наиболее широко используемым способом формования заготовок керамических изоляторов является горячее пластифицированное литье на парафиновом связующем. Однако применение этого метода для получения отливок заданных размеров не обеспечило формирование бездефектных заготовок из-за

непроливов в объеме массивного изделия. Несмотря на широкое варьирование технологических параметров литья и использование форм различных конструкций, определяющих эволюцию потока шликера, уровень брака достигал 80 %.

Известно, что для получения вакуумно-плотной керамики может применяться способ квазиизостатического прессования с использованием пластичного пресс-буфера из полиуретана, обеспечивающего трехосевое обжатие изделия. К достоинствам этого метода относится равномерное распределение механических нагрузок и, как следствие, равноплотность материала в прессованной заготовке.

В настоящей работе для получения заготовок изоляторов использовали шихту на основе оксида алюминия с удельной поверхностью 3700 – 4300 м<sup>2</sup>/г и влажностью пресс-порошка до 10%. Толщина пресс-буфера составляла – 10-15 мм, давление прессования варьировали от 80 до 110 кг/см<sup>2</sup>. Прессование осуществляли в цилиндрических пресс-формах, при этом пресс-буфер располагали под верхним пуансоном.

Установлены оптимальные свойства пресс-порошка и параметры процесса прессования, обеспечивающие получение качественных заготовок изоляторов:

- удельная поверхность пресс-порошка – 4300 м<sup>2</sup>/г;
- влажность пресс-порошка – 10%;
- толщина пресс-буфера – 10 мм;
- давление прессования – 110 кг/см<sup>2</sup>.

Спрессованные диски подвергали сушке при 150 °С и затем – предварительному обжигу при температуре 1200 °С. После обжига они приобретали прочность, достаточную для механической обработки их на обычном токарном станке с применением металлорежущего инструмента с целью придания заготовкам геометрии изоляторов с припуском на окончательный обжиг.

Окончательный обжиг проводили при температуре 1700 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 5 часов. Изоляторы диаметром 130 мм и толщиной 16 мм имели плотность 3,72–3,74 г/см<sup>3</sup>; открытую пористость 0,04–0,08%; водопоглощение 0,01–0,03% и газопроницаемость по гелию  $3-4 \times 10^{-12}$  Па×м<sup>3</sup>/с. Результаты рентгеновской дефектоскопии показали равноплотность изоляторов и полное отсутствие в них макродефектов.

Полученные таким образом изоляторы были использованы для пайки крупногабаритного металлокерамического узла электровакуумного прибора.

Следует отметить, что способ квазиизостатического прессования пригоден для изготовления крупногабаритных изоляторов со сложной геометрией и его использование в экспериментальном или мелкосерийном производстве позволяет отказаться от использования сложной формовой оснастки.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ПОЛУЧЕНИЮ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ РЕАКЦИОННОСВЯЗАННОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АЗОТИРОВАНИЯ**

*В.Н.Рудыкина, И.Н.Курская, А.О.Забейайлов, И.Ю.Келина, А.И.Ганичев, А.П.Метлева* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Реакционносвязанный нитрид кремния (РСНК) является перспективным конструкционным материалом для изделий различного назначения.

Отсутствие усадки при реакционном спекании и как следствие деформации, присущей спеканию усадочных материалов, позволяет использовать его для изготовления сложнопрофильных и крупногабаритных изделий. Для их формования часто применяется метод горячего литья под давлением на термопластичных связках, с последующим их удалением перед реакционным спеканием (азотированием). Прочность заготовок после этой стадии мала и составляет не более 0,5 МПа, что может приводить к их разрушению, особенно в случае тонких стенок. Поэтому для получения тонкостенных крупногабаритных заготовок необходимо увеличивать толщину стенки для обеспечения необходимого уровня прочности и доводить до заданной толщины механической обработкой уже полностью синтезированные заготовки.

В работе предложен способ получения крупногабаритных тонкостенных изделий из РСНК с использованием стадии предварительного низкотемпературного азотирования с последующей механической обработкой до заданных размеров и повторным азотированием при более высоких температурах (1450-1500°C). При этом уменьшаются затраты на дорогостоящую алмазную мехобработку.

Свойства материала на стадии предварительного азотирования исследовали на образцах в виде балочек размером 10x10x75 мм, изготовленных из порошков кремния двух дисперсностей. Учитывая, что температура начала азотирования кремния составляет ~ 980°C, температуру предварительного синтеза ограничивали температурой 1100 и 1150 °C.

Проведенные исследования показали, что предварительный синтез при температурах 1100 и 1150°C обеспечивает формирование заготовок образцов с прочностью при изгибе 38-57 и 90-110 МПа, соответственно. Причем более высокие значения прочности имеют заготовки, полученные из более тонкодисперсного порошка кремния. Достаточная прочность образцов после начального азотирования позволяла легко обрабатывать их на шлифовальных станках. На полученных образцах определяли также привес при азотировании, плотность, микротвердость, фазовый состав.

Предварительному азотированию при 1100°C было подвергнута заготовка изделия высотой 600 мм с толщиной стенки 12 мм. После механической обработки до толщины стенки 5 мм заготовка прошла окончательное азотирование при конечной температуре 1500°C. Исследования скорости прохождения ультразвука показали, что и в образцах, и в изделии она одинаковая, разброс скорости по высоте изделия составляет менее 5 %, что свидетельствует о достаточно высокой однородности изделия по плотности.

Таким образом, предложенный способ низкотемпературного предварительного азотирования с последующей механической обработкой до заданных размеров и окончательным синтезом при температуре 1500°C может быть использован в некоторых случаях при получении крупногабаритных тонкостенных изделий из РСНК.

## **СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ**

*Е.А.Кораблева* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Ионопроводящая керамика системы  $ZrO_2-Y_2O_3$  широко применяется в качестве твердых электролитов для электрохимических устройств: твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), кислородных насосов, датчиков кислорода в газах и расплавах металлов. Масштабному внедрению и коммерциализации ТОТЭ мешают основные недостатки керамических материалов: высокая температура эксплуатации 900-1000°C (температура максимальных значений плотности тока), низкие термомеханические свойства при быстром включении и выключении и деградация свойств при длительном применении. Проведенный анализ конструктивных особенностей ТОТЭ с твердым электролитом на основе диоксида циркония выявил, что в настоящее время остается перспективным применение керамических структур из диоксида циркония толщиной менее 300 мкм, полученных методом пленочного литья в качестве несущих.

А для этого направления конструкции ТОТЭ требуется решить задачу совершенствования керамических твердых электролитов с целью получения высокой удельной плотности тока при более низких температурах 650-850°C и с повышенными значениями термомеханических свойств.

Известны следующие способы повышения ионопроводящих и термомеханических свойств у керамики в системе  $ZrO_2-Y_2O_3$ :

- применение нанокристаллических порошков для получения керамики с наноструктурой (50-100нм) и технологии, обеспечивающей равномерное распределение стабилизирующего элемента и активное спекание до плотности, близкой к теоретической;

- получение в структуре диоксида циркония  $\kappa'$ -фазы методом спекания в области метастабильных фаз.

Известен факт, что скорость охлаждения после спекания в области кубической фазы существенно влияет на фазовый состав материала. При быстром охлаждении кубическая фаза диоксида циркония претерпевает бездиффузионное превращение, отличающееся большим количеством растворенного оксида иттрия. Медленное охлаждение приводит к формированию в кубической фазе выделений тетрагональной фазы по диффузионному механизму.

Целью исследования было создание ионопроводящей керамики с  $\kappa'$ -фазой и изучение влияния структуры на ионопроводящие и термомеханические свойства при длительном температурном применении.

В данной работе представлены результаты исследований электрических свойств керамического материала состава  $ZrO_2 + 8-18 \text{ мол. \% } Y_2O_3$ , находящегося в кубической фазе в интервале температур 850–970°C. В зависимости от предыстории получения наноразмерных порошков режимы быстрого охлаждения бывают различные ( $T_{\text{max}}$ , скорость охлаждения). Порошки были получены методом химосаждения из растворов хлористых солей циркония и иттрия. Проведено исследование по подбору спекания керамики из этих порошков с максимальной плотностью. Выявлено, что быстрое охлаждение после спекания в области кубической фазы существенно повлияло не только на фазовый состав, но и на структуру и проводящие свойства керамики. Удельное сопротивление образцов измеряли на образцах спеченной пленки  $5 \times 10 \times 0,27 \text{ мм}$  четырехзондовым методом при температурах 850–970°C с платиновыми контактами. Было проведено электронно-микроскопическое исследование структуры на электронном микроскопе EVO-40 фирмы “Carl Zeiss” (Германия) и сделан сравнительный анализ спеченной керамики. В работе представлены результаты исследования деградации ионопроводящих свойств керамики на основе  $ZrO_2$  (8–10 мол%  $Y_2O_3$ ) в  $k'$  кристаллической фазе. Обнаружено, что быстрое охлаждение после спекания в области кубической фазы существенно повлияло не только на фазовый состав, но и на структуру и проводящие свойства керамики. Проведение длительных испытаний керамики состава  $ZrO_2$  (8-10 мол%  $Y_2O_3$ ) с  $k'$ -фазой позволило сделать вывод о фазовой и структурной устойчивости, необходимой для применения в качестве элементов электрохимических устройств - ТОТЭ.

## **КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ “НАНООКСИДОВ” – ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА И БИМЕДИЦИНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

*С.Н.Кульков* (ИФПМ СО РАН, Томский госуниверситет, Томский политехнический университет, г. Томск, Россия)

Исследованы структура, фазовый состав пористых наносистем на основе диоксида циркония, полученных методом плазмохимической денитрации водных растворов солей в плазме высокочастотного разряда. Изучено морфологическое строение ультрадисперсного порошка  $ZrO_2$ , его изменение при механической активации, прессовании, отжиге. Показано, что в процессе мехактивации данная наносистема разделяется на две подсистемы с отличающимся на два порядка средним размером структурных элементов. При этом возрастает доля квазиаморфной (рентгеноаморфной) фазы, что позволяет направленно изменять характеристики спеченных материалов. Изменяя скорость нагрева при спекании можно направленно варьировать ее усадку на стадии изотермического спекания, что позволяет получать материалы с разными значениями пористости.

Изучено деформационное поведение при активной деформации сжатием с унимодальной и бимодальной пористостью, изменяющейся в широких пределах - до 70%. Установлено, что на характер деформационного поведения керамики оказывает влияние не только само наличие пористости, но и морфология

поровой структуры. В частности, в материале с унимодальным распределением пор существует критическое значение пористости, при котором характер его деформирования принципиально изменяется: материал разделяется на две подсистемы, по-разному деформирующиеся под действием внешнего нагружения. Для керамики с бимодальным распределением пористости характерно то, что чем меньше ее величина, тем больше показатель степенной функции уравнения деформирования, экспоненциально уменьшающийся с ростом пористости.

Показано, что отклонение от линейности в деформационном поведении керамики с пористостью выше порога перколяции не связано с перемещением микрообъемов материала, а имеет место только упругая деформация – упругое взаимодействие элементарных объемов в пористой структуре. Наблюдаемая особенность в деформационном поведении нанокристаллического керамического каркаса обусловлена особенностью его структуры. Структура керамики, полученной из нанокристаллических частиц, сформирована из хаотически ориентированных «стержней», длина которых определяется количеством составляющих их зерен.

В силу малых размеров самих зерен и значительных размеров площади контакта по отношению к размерам кристаллитов возникающие после потери устойчивости изгибные напряжения не превосходят предела прочности материала керамики (практически бездефектного в пределах нанозерна диоксида циркония). Данное поведение обусловлено потерей микромеханической устойчивости стержневых структур, сформированных при синтезе пористого каркаса, обуславливающей значительную макродеформацию материала, осуществляемую без макроразрушения.

Это позволяет получить керамические материалы со средним размером пор от 1 до 1000 мкм и высокими прочностными свойствами. Материалы с такими характеристиками весьма перспективны для изготовления рабочих элементов фильтров, носителей катализаторов и лекарств, эндопротезов костной ткани.

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА C-SiC В СОПЛОВЫХ ТРАКТАХ (НАСАДКИ, КАМЕРЫ СГОРАНИЯ) ЖРД И ЖРДМТ**

*Е.А.Богачев, Н.В.Ларионов, А.В.Лахин, А.Н.Тимофеев*  
(ОАО «Композит», г. Королев, Россия)

В качестве одного из наиболее важных направлений развития современного ракетного двигателестроения можно выделить удешевление и упрощение конструкций с одновременным повышением их эффективности. Создание ЖРД с повышенными по сравнению с существующими на сегодняшний день энергомассовыми характеристиками, сниженной стоимостью, а также с повышенными показателями экологической безопасности видится в применении материалов с повышенной температурной и окислительной стойкостью. Так, полная или частичная замена металлических сопел с регенеративно охлаждаемой стенкой двигателей с большой степенью расширения, а также создание ЖРДМТ

с повышенной рабочей температурой невозможны без применения окислительно-стойких материалов. Если в первом случае речь идет о внедрении материала в изделие с отработанным режимом работы, то во втором случае задача усложняется тем, что потребуются отработка параметров работы двигателя в составе с новой камерой сгорания, изготовленной на основе материала нового типа. В обоих случаях достижение максимальных показателей изделий будет определяться уровнем свойств применяемого материала.

Одним из наиболее перспективных материалов для решения указанных задач является углерод-керамический композиционный материал (УККМ) C-SiC. Однако, несмотря на множество преимуществ, которые могут быть достигнуты благодаря его применению, на сегодняшний день он не получил еще широкого распространения в ракетном двигателестроении. С одной стороны, это может быть обусловлено действительно низкими показателями характеристик, недостаточными для достижения требований к конструкции, высокой стоимостью и нетехнологичностью изделий, что зачастую имеет место для УККМ C-SiC в виду ограниченности того или иного метода, выбранного для получения изделия, или недостаточно развитой технологией. С другой стороны, это может быть обусловлено недостатком экспериментальных данных об особенностях материала, касающихся его поведения в условиях функционирования и которые могут быть выявлены в ходе стендовых испытаний, имитирующих натурные.

Традиционно подходы к разработке материалов, в том числе и УККМ C-SiC, определяются технологическими тенденциями, существующими в отрасли, мало принимая во внимание микроструктурные аспекты и особенности функционирования материала на микроуровне с учетом условий его работы в изделии в силу слабой изученности. Таким образом, необходимость применения УККМ C-SiC в сопловых трактах ЖРД определяет необходимость эффективного подхода к разработке таких материалов, который учитывал бы весь комплекс требований к нему с учетом воздействий, которым подвергаются изделия на его основе.

Для разработки такого подхода необходимо знание взаимосвязи между системой факторов, определяющих воздействие среды функционирования УККМ C-SiC в условиях сопловых трактов ЖРД и ЖРДМТ, которая представляет собой высокотемпературный газовый поток продуктов сгорания, обладающий по отношению к материалу окислительным и эрозионным характером, и поведением материала в этих условиях. Поэтому разработке такого подхода предшествовало исследование поведения свойств УККМ C-SiC в данных условиях. В качестве исследуемых материалов использовали УККМ C-SiC различных рецептов, получаемые на основе различных типов тканого наполнителя и компонентов углеродной составляющей матрицы. Формирование окислительно-стойкой карбидокремниевой матрицы и покрытий на основе карбида кремния получали согласно разработанному в ОАО «Композит» процессу химического осаждения из газовой фазы с использованием в качестве исходного реагента метилсилана. Испытания материала в виде экспериментальных и модельных образцов проводили на стендовой базе ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» и ОАО «Композит».

В ходе проведенного исследования было установлено, что характер влияния

факторов среды функционирования материала на показатели его поведения, среди которых в качестве основных были определены стойкость в окислительном теплоэрозионном потоке продуктов сгорания и характер поведения прочности и микроструктуры материала в условиях термоудара, в том числе при окислительном воздействии, во многом определяется составом материала, этапами и параметрами технологического процесса его получения. Без учета установленных закономерностей поведения УККМ C-SiC невозможно обеспечение надежного функционирования деталей на его основе в составе конструкций ЖРД и ЖРДМТ.

Результаты, полученные в ходе экспериментальной отработки материала и его исследований, были использованы при разработке технологий и изготовлении опытных образцов крупногабаритного насадка ЖРД и камер сгорания ЖРДМТ. На изготовленных опытных образцах удалось достичь соответствующих требуемым ресурсных показателей стойкости материала, определённых в ходе стендовых испытаний с воспроизведением реальных условий.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ**

*Р.А.Миронов, М.О.Забейайлов, С.П.Бородай*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Одним из наиболее важных теплофизических параметров теплоизоляционных и конструкционных материалов, характеризующих взаимодействие теплового излучения с объектом, является излучательная способность. При увеличении температуры энергетический вклад переноса тепла излучением увеличивается, и необходимость достаточно точного знания излучательной способности возрастает. Несмотря на важность этой характеристики, в литературе имеется мало достоверных данных об интегральной излучательной способности многих теплоизоляционных материалов и, в частности, для кварцевой керамики при высоких температурах. Кварцевая керамика относится к классу полупрозрачных по отношению к тепловому излучению материалов, для которых излучательная способность зависит и от оптических свойств при данной температуре, и от толщины слоя материала.

В настоящей работе определяются спектральная и интегральная полусферические излучательные способности плоскопараллельных пластин кварцевой керамики в зависимости от температуры для различных толщин материала. В основе расчета лежат экспериментальные данные по коэффициенту диффузного отражения от слоев двух толщин в диапазоне длин волн 0,5-5 мкм. Экстраполяция свойств материала в область высоких температур производится на основе литературных данных в рамках расчетной модели переноса излучения в материале. Разработанные подходы позволяют уйти от необходимости экспериментального определения излучательной способности для образца каждой толщины при использовании материала в сложных изделиях. Предложен способ прогнозирования температурной зависимости интегральной излучательной

способности на основе экспериментальных и литературных данных по свойствам кварцевого стекла.

Для измерений коэффициентов диффузного отражения были использованы образцы кварцевой керамики с общей пористостью 9,5% и кажущейся плотностью 1,99 г/см<sup>3</sup>, полученной на основе кварцевого стекла методом шликерного литья. По измеренным данным были вычислены спектры показателя поглощения и показателя рассеяния [1]. Разработанный в [1] метод расчета позволяет по определенным оптическим параметрам материала находить спектральную излучательную способность образца заданной толщины (рис. 1).

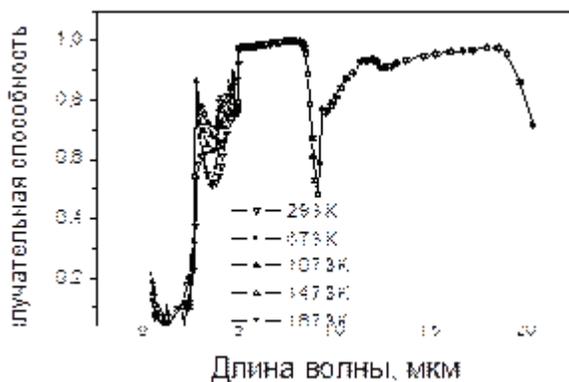


Рис. 1. Спектральная излучательная способность кварцевой керамики толщиной 10 мм при различных температурах

По спектральной излучательной способности  $\varepsilon(\lambda, T)$  была рассчитана интегральная излучательная способность  $\varepsilon(T)$  по формуле:

$$\varepsilon(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot B(\lambda, T) / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T),$$

где:  $B(\lambda, T)$  – спектральная плотность излучения абсолютно черного тела, рассчитанная по формуле Планка;  $\lambda_1, \lambda_2$  – длины волн начала и конца спектральной области теплового излучения; в работе рассматривался диапазон интегрирования от 0,5 до 20 мкм.

Для вычисления интегральной излучательной способности проводилась экстраполяция экспериментальных данных в ИК – область. Учет температурного смещения поглощения в материале производился на основе литературных данных [2, 3].

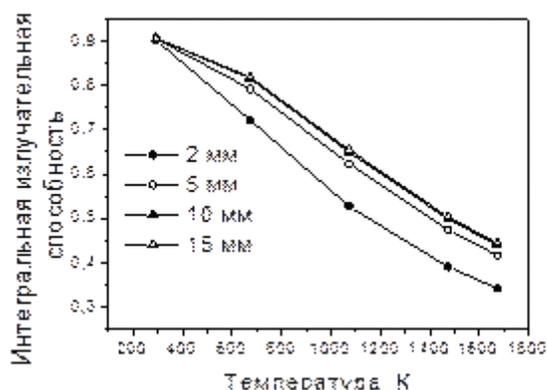


Рис. 2. Температурная зависимость интегральной полусферической излучательной способности при четырех толщинах образца

### Выводы

1. Предложенный в работе метод позволяет производить расчетно-экспериментальное определение температурной зависимости интегральной и спектральной излучательной способности кварцевой керамики (и других материалов на основе кварцевого стекла) в диапазоне температур 293-1673 К для любой толщины слоя материала.

2. При условии экспериментального определения спектров диффузного отражения и пропускания образцов материалов в диапазоне 0,5-20 мкм предложенный метод может быть использован для определения интегральной и спектральной излучательной способности других материалов при комнатной температуре.

### Литература

1. Миронов Р.А., Забейайлов М.О., Бородай С.П. Определение показателей поглощения, рассеяния и излучательной способности кварцевой керамики по измеренным спектрам коэффициента диффузного отражения в диапазоне длин волн 0,5 - 5 мкм//Тепловые процессы в технике. -2013. Т. 5, №. 6. с. 262-269.

2. Двуреченский А.В. Исследование спектральных излучательных характеристик кварцевых стекол и кварцевой керамики при высоких температурах с помощью высокоскоростной экспериментальной установки: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. М., 1978 (ИВТАН).

3. Kryukova E.B., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. IR absorption spectra in high-purity silica glasses fabricated by different technologies//Advances in Fiber Optics, Proc. of SPIE.-2000. Vol.4083.

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СВЯЗУЮЩИХ И КВАРЦЕВЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ДЛИТЕЛЬНУЮ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

*Е.Н.Филатов, В.А.Дьяконов, Н.И.Арсланова, А.Д.Камалов, Б.Ф.Пронин*  
(ОАО “Композит”, г. Королев, Россия)

В настоящее время широкое применение нашли композиционные радиопрозрачные теплозащитные материалы (РТЗМ) на основе кремнийорганических смол, фосфатных связующих или кремнезольей. Проведенные исследования показали, что наиболее высокие радиотехнические и теплозащитные характеристики сочетают в себе композиционные материалы на основе связующих-кремнезольей и кварцевых изотропных тканых наполнителей. Однако температура эксплуатации таких материалов ограничена температурами 1200-1500°С.

Учитывая возрастающие требования по термостойкости радиопрозрачных материалов, в настоящее время ведутся работы по разработке композиционных материалов, работоспособных до 2000°С и обладающих стабильными диэлектрическими характеристиками. Повышение термостойкости может быть достигнуто за счет дополнительного насыщения кварцевого композита тугоплавкими оксидами, такими, как  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , оксидами редкоземельных металлов. Такое насыщение может быть произведено из водных растворов термически нестойких соединений-прекурсоров, термолиз которых приводит к образованию вышеуказанных тугоплавких оксидов. Содержание тугоплавких оксидов в материале может варьироваться путём выбора прекурсора и его концентрации в пропиточном растворе, использования нескольких пропиток.

В качестве модифицирующих добавок композиционного материала на основе  $\text{SiO}_2$  в настоящей работе были использованы оксиды циркония и хрома, которые обладают удовлетворительными радиотехническими характеристиками и высокими температурами плавления.

В докладе представлены основные механические, диэлектрические и теплофизические свойства разработанных композиционных материалов на основе  $\text{SiO}_2$  и модифицирующих тугоплавких оксидов  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Разработанные модифицированные кварцевые композиционные материалы прошли испытания в индукционном плазмотроне ВГУ-4 (ИПМех РАН) в условиях, моделирующих натурные по тепловому и химическому воздействию набегающий поток, воздействующий на теплозащиту летательных аппаратов.

После проведения анализа экспериментальных данных были определены основные величины, показывающие стойкость материалов к воздействию высокотемпературных плазменных потоков. Полученные значения эффективной энтальпии разрушения для кварцевых материалов с введёнными тугоплавкими оксидами оказались сильно завышены, что обусловлено тем, что скорость уноса

массы этих материалов и механизм их взаимодействия с плазменным потоком характерны скорее для материалов не разрушаемой, а не абляционной тепловой защиты. На основании теории моделирования локального теплообмена определены полётные условия, которые моделируются двумя режимами плазмотрона ВГУ-4, использовавшимися в испытаниях. Результаты проведенных исследований показывают возможность применения разработанных композиционных материалов для создания теплозащиты летательных аппаратов с температурой поверхности в процессе эксплуатации до 2000°С.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*В.А.Дьяконов, Н.И.Арсланова, А.Д.Камалов, Б.Ф.Пронин, Н.П.Ступакова*  
(ОАО «Композит», г. Королев, Россия)

Для обеспечения работоспособности радиоаппаратуры летательных аппаратов в условиях воздействия энтальпийных аэродинамических потоков, высоких температур и давлений, а также для защиты от воздействия искусственных поражающих факторов, применяются радиопрозрачные теплозащитные материалы (РТЗМ). Основными определяющими свойствами РТЗМ являются радиотехнические и теплозащитные характеристики.

В настоящее время широкое применение нашли как керамические так и композиционные РТЗМ на основе кремнийорганических смол, фосфатных связующих или кремнезольей, позволяющие обеспечить прохождение радиосигнала и приемлемый температурный режим для работы радиоаппаратуры. Основным преимуществом армированных композиционных материалов по сравнению с керамикой является более высокое значение ударной вязкости, и соответственно трещиностойкости, особенно в условиях теплового удара. Современные композиционные РТЗМ можно условно разделить на несколько основных разновидностей, исходя из состава их матрицы:

1. Стеклопластики на кремнийорганическом связующем;
2. Стеклопластики на неорганическом (фосфатном) связующем;
3. Материалы класса «оксид-оксид».

С другой стороны, все эти три класса материалов могут быть изготовлены из однослойных, многослойных тканей различного плетения, материалов объемного плетения типа 3D, а также отличаться химическим составом армирующего наполнителя.

В докладе показаны основные классы РТЗМ и приведены основные характеристики материалов, разработанных в ОАО «Композит». Проведено сравнение свойств композиционных материалов различных классов и составов в широком диапазоне температур, приведены условия их возможного применения.

Представлены направления исследований, направленных на улучшение основных характеристик материалов, придания им стабильности в различных условиях эксплуатации, а также технологические вопросы направленные на

изготовление изделий сложной формы, расширяющий ассортимент выпускаемых изделий.

Установлено, что все материалы имеют достаточно большие гарантийные сроки службы до 25 лет, в том числе в условиях низких температур и морского климата.

Все рассмотренные в статье материалы разработки ОАО «Композит» обеспечены сырьевой базой, промышленной технологией и нашли свое применение при проектировании и производстве перспективных изделий.

Для некоторых видов теплозащиты в рамках ОАО «Композит» организованы специализированные производственные участки по изготовлению комплектующих деталей в виде, например, радиопрозрачных окон, вставок.

## РАЗРАБОТКА ЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЕРАМИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В.А.Афанасьев, М.П.Кужель, Г.И.Иванов, А.В.Шебалов, А.П.Жабин*  
(РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия)

Проблемами разработки и исследования противопулевой брони во ВНИИЭФ начали заниматься с начала 70-х годов двадцатого века. Исследовалась гомогенная и слоистая броня из традиционных конструкционных материалов, в частности, из стали, алюминиевых сплавов, титана, и других, а также из керамических и композиционных материалов.

В период с 1970 г. по наше время проведен большой комплекс научно-экспериментальных исследований по стойкости брони на основе керамических и композиционных материалов к воздействию пуль и осколков. Разработаны принципы создания комбинированной (многофункциональной) защиты на основе керамики и композитов. Проведен большой комплекс расчетно-экспериментальных исследований слоистой брони и получены зависимости влияния технических характеристик керамического слоя на защитные и массогабаритные свойства брони при воздействии пуль и осколков. Также получены соотношения по выбору параметров подложек и керамического слоя в зависимости от вида воздействия. Технические решения защищены более чем 20 патентами РФ.

В таблице приведены результаты исследований по разработке бронезащитных элементов минимальной толщины и поверхностной плотности с усредненными характеристиками стойких к воздействию пуль Б-32 калибра 7,62 мм (класс ба пулестойкости по ГОСТ Р 50744-95, ГОСТ Р 51112-97 и ГОСТ Р 50963-96).

Таблица

Параметры	Бронезащитный элемент №1	Бронезащитный элемент №2	Бронезащитный элемент №3
Толщина, мм	20,5	13,5	15,0
Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	38,0	66,7	58,0

## 1. Опытный образец бронезилета БИК-2

Во ВНИИЭФ разработан опытный образец бронезилета класса ба пулестойкости по ГОСТ Р 50744-95. На рис. 1 приведена лицевая сторона бронепанели для бронезилета, испытанная на воздействие пуль (цифрами 1-9 показаны места воздействия), пробитие отсутствует. На рис. 2 представлен опытный образец бронезилета БИК-2 с характеристиками.

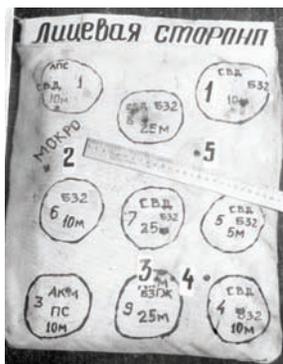


Рис.1. Бронепанель



Рис.2. Бронезилет БИК-2

## 2. Взломо-пулестойкая слоистая структура П587

При анализе современных бронепанелей отечественных и зарубежных разработчиков выявлено, что все они разрабатываются до 5 класса устойчивости к взлому по ГОСТ Р 51113-97 и до 3 класса по пулестойкости по ГОСТ Р 51112-97. Толщина данных бронепанелей от 80 мм и выше, а поверхностная плотность от 230 кг/м² и выше. В связи с этим панели размером 1200×400 мм становятся менее мобильными из-за своей массы. Целью нашей работы являлась разработка более легкой слоистой структуры.

На рис. 3 представлена слоистая структура П587 толщиной не более 40 мм с поверх-ностной плотностью не более 120 кг/м², прошедшая успешные испытания по 5 классу устойчивости к взлому (ГОСТ Р 51113-97) и ба классу по пулестойкости (ГОСТ Р 51112-97), а на рис.4 представлен опытный образец бронемашины с установленными бронепанелями П587.



Рис. 3. Слоистая структура П587

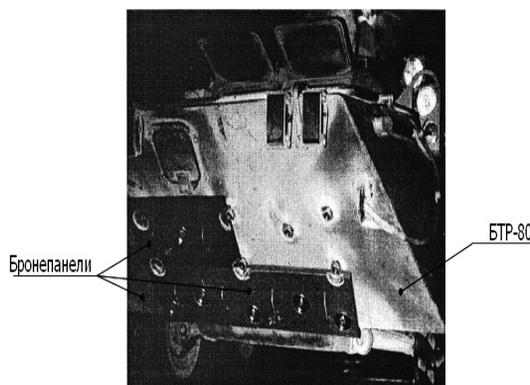


Рис. 4

### **3. Авиационный защитный контейнер**

Транспортировка опасных и ценных грузов авиационным транспортом является наиболее предпочтительным из-за экономии времени, исключения несанкционированных действий, а в ряде случаев, материальных затрат. При этом важнейшей задачей является сохранение капсулы с опасным или ценным грузом в случае возможных авиационных аварий (падение, пожар) и террористических действий (воздействие автогенного и электродугового резаков, механических средств взлома – дрели, «Болгарки», пуль стрелкового оружия). В связи с этим создание защитного контейнера, стойкого к аварийным воздействиям высокого уровня при авиакатастрофе и террористических действиях, должно привести к существенному повышению безопасности воздушных перевозок и сохранению ценных грузов от повреждения, разрушения и хищения. При перевозке опасных грузов практически исключить загрязнение местности вредными веществами.

Во ВНИИЭФ разработан авиационный защитный контейнер с диаметром внутренней емкости для упаковывания груза 450 мм, обладающий высокой стойкостью к авиационным авариям.

#### **Заключение**

Результаты лабораторно-конструкторской отработки, проведенной во ВНИИЭФ, подтверждают, что:

1. Опытный образец бронежилета БИК-2 имеет 6а класс пулестойкости по ГОСТ Р 50744-95. Площадь защиты 15 дм<sup>2</sup> и массы менее 9 кг удовлетворяет современным требованиям к бронежилетам.

2. Взломо-пулестойкая слоистая структура П587 толщиной 40 мм и поверхностной плотности не более 120 кг/м<sup>2</sup> имеет 5 класс устойчивости к взлому по ГОСТ 50862-96. Лучшие образцы зарубежных аналогов при 5 классе устойчивости к взлому имеют минимальную толщину 80 мм. Сочетание таких свойств наряду с наивысшим 6а классом пулестойкости делает данную конструкцию уникальной в своем роде, не имеющей аналогов, которую можно применять для перевозки опасных и ценных грузов (в конструкции защитных контейнеров и транспортных защитных устройствах), защиты часовых (бронированные кабины) и при конструировании бронедверей, сейфов и других взломо-пулестойких объектов.

3. Авиационный контейнер обеспечивает безопасность транспортирования при аварийных воздействиях в соответствии с правилами МАГАТЭ и при воздействии различных средств взлома.

# ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ И ЦИРКОНИЯ С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОПОРОШКОВ

*О.Ю.Задорожная<sup>1</sup>, О.В.Тунова<sup>1</sup>, А.А.Богаев<sup>1</sup>, Ю.К.Непочатов<sup>1</sup>, А.В.Шкодкин<sup>2</sup>*  
(<sup>1</sup> ООО “Керамик Инжиниринг”, г. Новосибирск, Россия; <sup>2</sup> ООО “ОЦПН”, г. Обнинск, Россия)

Благодаря высоким значениям физико-механических свойств, отличной химической устойчивости, а также относительно невысокой стоимости корундовая керамика широко применяется в самых различных областях современной техники. Оксид алюминия обладает высокой твердостью, термической стойкостью, прочностью на сжатие, но имеет относительно невысокие показатели прочности на изгиб (380 МПа), трещиностойкости (до 4,5 МПа м<sup>1/2</sup>), а также стойкости к абразивному износу по сравнению с керамикой на основе оксида циркония [1, 3].

Для улучшения ряда физико-механических свойств алюмооксидной керамики в ее матрицу на стадии приготовления шихты вводится высокодисперсный частично стабилизированный оксид циркония. Полученная композитная керамика используется в качестве конструкционного материала в условиях, когда к материалу предъявляются высокие требования по твердости, износо- и трещиностойкости [2]. Износостойкость изделий из композитной ZTA-керамики превышает износостойкость корундовых изделий в 3-4 раза, в результате чего этот материал используется в условиях высокого механического истирания и теплового удара, например, в качестве режущего инструмента или насадок для распыления абразивов – сопел [3].

Сравнительные натурные испытания опытных образцов различных видов керамики на износостойкость проводились на керамических соплах для промышленной пескоструйной установки. В качестве абразива в установке использовался электрокорунд средней фракции 15-20 мкм. Испытания проходили образцы керамики трех различных составов: Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>95 %), ZTA-1 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZrO<sub>2</sub> composite, ZrO<sub>2</sub> > 3 % масс.), ZTA (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZrO<sub>2</sub> composite, ZrO<sub>2</sub> > 20 % масс.), а также состава ZTA+ 3% нанопрошка ZrO<sub>2</sub>.

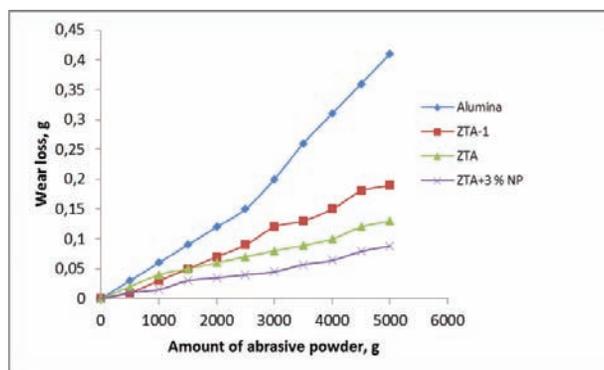
Исследования микроструктуры и физико-механических свойств указанных видов керамики показали, что средний размер зерна в спеченном керамическом материале составляет: для Alumina – 3 мкм, для ZTA-1 – 2 мкм, для ZTA – 2 мкм, а значения кажущейся плотности 3,8 г/см<sup>3</sup>, 4,1 г/см<sup>3</sup> и 4,35 г/см<sup>3</sup>, соответственно.

Для оценки износостойкости материала сопел при касательном падении абразивных частиц измерение веса сопла производилось до и после испытания. Зависимость потери массы (mass wear) сопел от количества прошедшего через сопла абразива представлена на рис., а. Дополнительно были выполнены сравнительные испытания износа цилиндрических образцов керамики при обдуве потоком абразивных частиц внешней поверхности сопел перпендикулярно оси образцов.

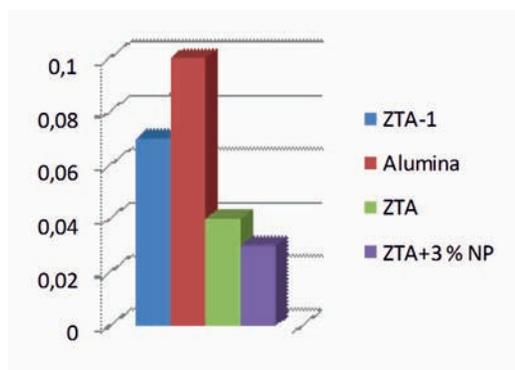
Потеря массы цилиндрических образцов при обдуве потоком абразивных частиц перпендикулярно оси образцов приведена на рис., б.

Образцы керамики ZTA + 3 % масс. нано-ZrO<sub>2</sub> показали лучшую стойкость по двум видам эрозионного воздействия – внутренний износ по касательной и износ при обдуве потоком абразивных частиц перпендикулярно оси образцов. При износе в потоке абразивных частиц перпендикулярно оси образцов ZTA-керамика показала износостойкость более чем в два раза выше, чем керамика Alumina.

Для оценки физико-механических свойств методом холодного осевого прессования были изготовлены образцы керамики ZTA с различным содержанием нанопорошка ZrO<sub>2</sub>. После спекания при испытаниях физико-механических свойств образцов керамики ZTA с добавлением различного количества нанопорошка ZrO<sub>2</sub> (в диапазоне 1-4 % масс.) наиболее высокие значения прочности на изгиб и сжатие наблюдались у образцов с 3 % масс. нано-ZrO<sub>2</sub>.



а



б

Рис. Зависимость износостойкости образцов от количества прошедшего абразива:  
а – при внутреннем касательном износе пескоструйных сопел;  
б – при перпендикулярном обдуве цилиндрических образцов потоком абразивных частиц

#### Литература

1. Материалы с сайта компании Ferro-Ceramic Grinding Inc.: <http://www.ferroc ceramic.com/>
2. H. Wakily, M. Mehrali, and H. S. C. Metselaar. Preparation of Homogenous dense composite of zirconia and alumina (ZTA) using colloidal filtration // World Academy of Science, Engineering and Technology.– 2010. 46. PP. 140-145.
3. S.T. Aruna, K.S. Rajam. Mixture of fuels approach for the solution combustion synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> nanocomposite. //Materials Research Bulletin.– 2004. № 39. PP. 157–167.

## МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

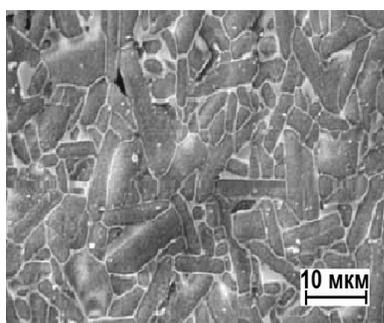
*С.Н.Первислов, В.Д.Чупов* (ОАО “ЦНИИМ”, г. Санкт-Петербург, Россия)

Нитрид кремния высокотвердый, износостойкий материал, стойкий к расплавам металлов, растворам кислот и щелочей. Высокие механические свойства достигаются при получении материалов на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  горячим или горячим изостатическим прессованием, однако низкая производительность метода, использование дорогостоящего графита и невозможность получения изделий сложной геометрической формы без дополнительной механической обработки делают ограниченным использование метода горячего прессования. Наибольшее распространение получил метод свободного жидкофазного спекания  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с оксидными спекающими добавками, в качестве которых используют 2-, 3-компонентные оксидные смеси в эвтектическом соотношении, образующие на стадии спекания термодинамически стабильные соединения ( $5\text{Al}_2\text{O}_3 \times 3\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$  и др.). В качестве исходных порошков используют микронный  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с размером частиц  $d_{0,5} = 1-2$  мкм и наноразмерный  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с размером частиц  $d_{0,5} = 40-60$  нм (SSN) (табл.). Для увеличения твердости, коэффициента линейного термического расширения и коррозионной стойкости к расплавам металлов в состав материала вводят карбид кремния, получая композиционные материалы в системе  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC-MeO}$  (SSNC). Карбид кремния является основой композиционного материала, а нитрид кремния – армирующей составляющей (табл.). Структура материала представлена на рис. 1а. В качестве армирующей добавки в материал на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и SiC вводят нитевидные кристаллы  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{w}$  и SiCw и волокна SiCf (рис. 1б). Крупногабаритные изделия формируются методом шликерного литья с последующим реакционным спеканием (азотированием) (RBSN) (табл., рис. 2).

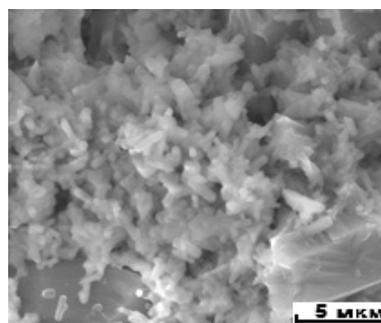
Таблица

Свойства материалов на основе нитрида кремния

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	П, %	$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа	$K_{\text{IC}}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	HV, ГПа
SSN	3,12-3,16	2-3	450-500	3,5-4,0	15-16
SSNC	3,15-3,20	1-2	500-550	3,3-3,6	16-18
RBSN	2,70-2,80	12-15	180-200	-	-



а



б

Рис.1. Микроструктура материала на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ : а) SSN; б) SiC с  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{w}$

Детали подшипниковых узлов на основе нитрида кремния, типа вкладыш, втулка, плавающее кольцо, испытаны в центробежных насосах (рис. 3). Макет насоса испытывался на теплофизическом стенде в ГНЦ РФ-ФЭИ. Перекачиваемая среда – свинец при температуре 465°C. Число оборотов вала насоса 3000-4000 об/мин. Макет насоса проработал 1000 часов. Подшипники скольжения на основе нитрида кремния были установлены в реактор БОР-60, где проработали ~3000 часов при температуре 360-540°C. Число оборотов вала насоса – 3630 об/мин, перекачиваемая среда – свинец. Детали подшипника не имели видимых повреждений.



Рис.2. Детали из реакционноспеченного нитрида кремния (RBSN)



Рис.3. Подшипник скольжения из спеченного нитрида кремния (SSN)

## ВЫСОКОПЛОТНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ШЛИКЕРЫ НА ОСНОВЕ СТЕКЛА МАГНИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОГО СОСТАВА

*Е.И.Суздальцев, Т.В.Зайчук, Ю.С.Устинова, С.Н.Вандрай*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Среди многочисленных стеклокристаллических материалов важное место занимают материалы на основе кордиерита  $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ . Материалы этого класса не содержат ионов щелочных металлов, что обеспечивает стабильные диэлектрические свойства в широком диапазоне температур и позволяет использовать их в изделиях ракетной техники.

В отличие от технологии получения традиционных ситаллов на нашем предприятии разработан и успешно применяется способ получения беспористых стеклокристаллических материалов, основанный на получении заготовок путем формования из водных шликеров с последующим спеканием до получения заданного уровня свойств.

Свойства исходных суспензий и определяемые ими конечные характеристики (плотность и пористость) получаемого на их основе полуфабриката (сырца) при прочих равных условиях (например, тип исходного материала) в исключительной степени зависят от способов и технологических параметров их получения.

Технология получения высокоплотных суспензий в общем случае состоит в тонком измельчении исходного материала, соединении его с дисперсионной средой и дополнительной стабилизации.

Настоящая работа посвящена получению высокоплотных водных суспензий на основе стекла магнийалюмосиликатного состава, обладающих литейными свойствами для получения плотной отливки. Этот вид материалов является основным, а получение высокоплотных водных суспензий из основных материалов крайне затруднительно ввиду их высокой активности по отношению к дисперсионной среде. Известно, что получение высокоплотных водных суспензий (шликеров) из таких материалов возможно только путем кратковременного диспергирования. Кроме того, низкий ионный потенциал ИП твердой фазы существенно уменьшает объемную долю твердой фазы в таких суспензиях, повышает содержание химически связанной жидкости, что приводит к росту пористости получаемых отливок [1, 2].

Для получения суспензий применяли метод мокрого помола с постадийной загрузкой измельчаемого материала с использованием воды в качестве дисперсионной среды, стабилизирующих и диспергирующих добавок – кислот (соляной и щавелевой) и полимеров (полимеры и сополимеры на основе полиакриловой кислоты).

При использовании в качестве добавки соляной кислоты наилучшими результатами были: плотность суспензии 2,00-2,01 г/см<sup>3</sup> при объемной доле твердого вещества  $C_v = 0,60-0,61$ ; пористость полученной отливки 28,0-29,0 %. Отливки из таких суспензий, полученные формованием в гипсовые формы, отличались низкой прочностью. Подобные же результаты были получены и с использованием щавелевой кислоты, но пористость отливок была несколько выше и достигала 30,0-31,0 %.

Суспензии, полученные с применением соляной и щавелевой кислот, действующих по принципу электростатической стабилизации, были недостаточно агрегативно-устойчивы, структурообразование массы из таких суспензий происходило слишком быстро. При этом частицы сохраняли то случайное рыхлоупакованное взаиморасположение, в котором они оказались при соприкосновении, что и приводило к снижению прочности отливок.

В некоторых случаях более эффективной, чем электростатическая стабилизация, может быть стабилизация с использованием полиэлектролитов, действующих по механизму электростерической стабилизации. Наилучшими свойствами для электростерической стабилизации обладают дисперсанты на основе полиакриловой и полиметакриловой кислот [3, 4]. Полимерные дисперсанты действуют по комбинированному механизму стабилизации, объединяя свойства классических смачивающих и диспергирующих агентов, они имеют электростатический заряд и в то же время модифицированы поверхностно-активными группами.

Нами были использованы полимеры на основе полиакриловой кислоты, а также аммонийной и натриевой солей полиакриловой кислоты, условно обозначенные P1, P2, P3.

Установлено, что с увеличением средневесовой молекулярной массы

акрилового полимера увеличивается плотность шликера, уменьшается его влажность. Концентрация твердой фазы  $C_v$  увеличивается в основном из-за увеличения гидродинамического объема частиц твердой фазы слоем адсорбированного полимера. Наилучшие параметры сырых заготовок получены для шликеров с использованием акрилового полимера РЗ с наибольшей средневесовой молекулярной массой (табл.).

Таблица

Параметры водных шликеров и свойства сырых заготовок

Полимер	$M_{cp}$ , г/моль	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	W, %	рН	$\Delta E$ , мВ	$T_{63}$ , %	до 5 мкм, %	$C_v$	Свойства сырца	
									$\rho_c$ , г/см <sup>3</sup>	П, %
Р1	5200	2,13	15,92	8,51	-114,6	15,84	28,06	0,67	1,96	26,56
Р2	16000	2,17	15,07	8,54	-115,0	11,94	35,54	0,68	2,01	24,36
Р3	35700	2,27	13,56	8,82	-130,4	17,35	34,46	0,71	2,23	16,14

Таким образом, показано, что для получения высокоплотных водных суспензий основного материала в системе  $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - TiO_2$  целесообразно использовать диспергирующие агенты на основе полиакриловой кислоты и ее солей. Наиболее эффективны с точки зрения дефлокуляции и получения плотных отливок полиакрилаты с большей длиной углеводородной цепи.

#### Литература

1. Пивинский Ю.Е. Керамические и огнеупорные материалы.– Избранные труды. Т. 2.– Санкт-Петербург: Стройиздат СПб, 2013.– 688 с. ил.
2. Пивинский Ю.Е. Разжижающие, пластифицирующие и упрочняющие добавки как эффективные модификаторы в технологии ВКВС и керамобетонов // Новые огнеупоры.– 2011. №12. С.11-16.
3. Нагель К., Весселс В. Новая концепция диспергаторов для водных систем // Лакокрасочные материалы и их применение.– 2011. № 1-2. С.23-25.
4. Василик П.Г. Новые диспергаторы (дефлокулянты) для производства огнеупорных бетонов // Новые огнеупоры.– 2003. №8. С.28-31.

## ПОЛУЧЕНИЕ БЕСПОРИСТОГО СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА МАГНИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОГО СОСТАВА

*Е.И.Суздальцев, Т.В.Зайчук, А.А.Орлов, Ю.С.Устинова*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

В ряду современной высокотемпературной керамики особое место занимает керамика на основе кордиерита – единственного стабильного тройного соединения в системе  $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ . Кордиерит имеет различные полиморфные модификации и образует серию стабильных и метастабильных твердых растворов. Уникальными свойствами кордиеритовой керамики являются невысокий тангенс

угла диэлектрических потерь, высокая механическая прочность и химическая стойкость.

Кордиеритовую керамику получают различными способами – кристаллизацией из стекол, выращиванием монокристаллов из флюсов, золь-гель технологией, посредством твердофазных реакций [1, 2, 3]. При этом первые три метода в крупных масштабах производства пока неприемлемы из-за высокой стоимости применяемых реагентов и относительной сложности операций. Традиционным способом получения кордиеритовой керамики является твердофазный синтез непосредственно из оксидов или из природных материалов – талька, высококачественных огнеупорных глин, искусственного технического глинозема или электроплавленного корунда.

В настоящей работе предложен способ получения стеклокерамического материала, состоящий в спекании и кристаллизации заготовок, полученных путем формирования зернистых структур из водных суспензий (шликеров) на основе кристаллизующегося магнийалюмосиликатного стекла в системе  $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - TiO_2$ . При этом в качестве исходного материала использовано как аморфное, так и закристаллизованное стекло.

Спекание заготовок из закристаллизованного стекла проводили при температуре 1375 °С с выдержкой 1-3 часа (партии образцов 1 – 3), спекание и кристаллизацию заготовок из аморфного стекла проводили путем двухступенчатой термической обработки – при температуре первой ступени 850 °С с выдержкой в течение 3 часов, при температуре второй ступени 1350 °С с выдержкой 5 часов (партии образцов 4 – 6). Кажущуюся плотность, пористость и водопоглощение образцов после термообработки определяли методом гидростатического взвешивания (табл.).

Таблица

Плотность, пористость и водопоглощение образцов

№ п/п	Свойства сырых заготовок		Режим термической обработки				Свойства материала после термообработки		
	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	П, %	$t_1$ , °С	$T_1$ , ч	$t_2$ , °С	$T_2$ , ч	$\rho_{\text{каж}}$ , г/см <sup>3</sup>	П, %	W, %
1	1,76	32,39	-	-	1375	1	2,51	0,25	0,10
						3	2,50	0,60	0,24
						5	2,49	1,09	0,44
2	1,83	29,88	-	-	1375	1	2,50	0,32	0,13
						3	2,49	0,66	0,26
						5	2,48	4,43	1,79
3	1,83	29,47	-	-	1375	1	2,50	0,32	0,13
						3	2,50	0,87	0,35
						5	2,49	3,19	1,28
4	1,94	27,25	850	3	1350	5	2,55	0,20	0,01
5	1,95	26,56	850	3	1350	5	2,54	0,01	0,01
6	2,06	22,73	850	3	1350	5	2,58	0,04	0,02

Верхний предел температуры кристаллизации выбран так, чтобы достигнуть кристаллизации с максимальной скоростью, но без недопустимой деформации

материала. Температура, при которой готовый материал заметно деформируется, соответствует температуре ликвидуса преобладающей кристаллической фазы, поскольку при температурах выше этого ликвидуса данная фаза станет снова растворяться. Именно в этом и состоит сложность технологий изготовления кордиеритовых материалов – кордиерит имеет узкий интервал спекания.

От структуры вещества зерен существенно зависит конкретный молекулярный механизм переноса массы вследствие вязкого течения. В случае зерен аморфного вещества вязкое течение осуществляется путем перемещения атомов и коэффициент вязкости является константой вещества, определяющей скорость течения. В случае кристаллических тел вязкое течение вещества может осуществляться вследствие диффузионно-вязкого преобразования формы мозаичных блоков или вследствие диффузионного восхождения дислокаций. Досконально изучить механизм спекания в данной системе нам еще предстоит.

Методами электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп EVO 40 XVP) исследована микроструктура полученного стеклокерамического материала магнийалюмосиликатного состава, методом рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр ДРОН-6,0) определены основные кристаллические фазы: кордиерит, рутил, незначительные количества кристобалита, в некоторых образцах наблюдались следы алюмотитаната магния.

В результате исследований показана возможность получения беспористого стеклокерамического материала в магнийалюмосиликатной системе путем спекания и кристаллизации заготовок, полученных формированием зернистых структур из водных шликеров.

#### Литература

1. Ульянова Т.М., Крутько Н.П., Матрунчик Ю.В., Дятлова Е.М., Паэмурд Е.С. Термостойкая композиционная керамика на основе кордиерита // Стекло и керамика. 2006. №12. С.15-18.
2. Андрианов Н.Т., Абдель-Гавад С.Р., Зенкова Н.В. Синтез и спекание кордиеритовых золь-гель порошков на основе различных солей магния // Стекло и керамика. 2006. №12. С.19-22.
3. Зобина Л.Д. Семченко Г.Д., Тарнопольская Р.А. и др. Синтез кордиерита из природных материалов в присутствии  $Al_2O_3$  – содержащих компонентов // Огнеупоры. 1997. №2. С. 24-27.

## **ПРОНИЦАЕМАЯ КОРУНДОВАЯ ПЛАЗМОКЕРАМИКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ**

*А.А.Бочегов<sup>1</sup>, А.В.Ермаков<sup>1</sup>, С.В.Никифоров<sup>1</sup>, И.В.Вандышева<sup>2</sup>*  
(<sup>1</sup> ЗАО “УРАЛИНТЕХ”; <sup>2</sup> ФГАОУ ВПО “УРФУ”, г. Екатеринбург, Россия)

Оксид алюминия – один из наиболее перспективных керамических материалов для широкого круга конструктивных применений с напряженными условиями эксплуатации благодаря сочетанию высокой твердости, термостойкости

химической инертности и экономической доступности. Химическая, структурная и термическая стабильность материала в жидких и газообразных средах позволяет использовать его для изготовления проницаемых диафрагм электрохимических устройств. Так, чистая спеченная корундовая керамика устойчива к расплавам таких металлов, как магний, алюминий, хром, кобальт, никель и олово, а также до температуры 800°C – к расплавам щелочных металлов, в том числе в смеси со свинцом.

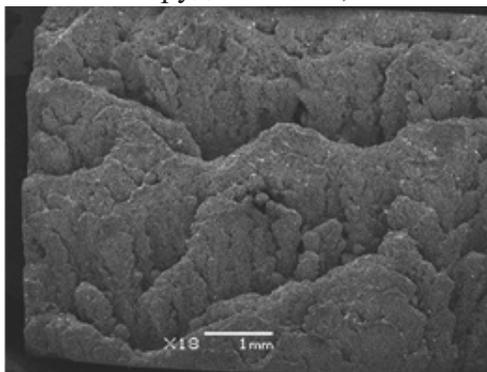
При изготовлении диафрагм важна не только пористость материала, но и его проницаемость. Использование технологии плазменного напыления дает возможность получить изделие с высокой проницаемостью, до  $0,85 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ , причем открытая пористость является канальной, с преимущественным направлением каналов.

Как известно, свойства пористых материалов определяются морфологией и объемом порового пространства. Экспериментальное изучение этой проблемы весьма затруднительно, поскольку форма пор в реальных материалах имеет стохастический характер, нет полного представления о структуре и морфологии канальной пористости, в частности, в плазموкерамических мембранах: ясно, что поры имеют сложную форму разветвленных, одно- или многовершинных конусов переменного сечения.

В работе предпринята попытка изучения формы, пространственного распределения и строения пор методом оптической и растровой электронной микроскопии с использованием цифровых методов обработки изображения.



Корундовая плазмокерамическая диафрагма



Структура проницаемой плазموкерамики

## ВЫСОКОТЕРМОСТОЙКАЯ РАДИОПРОЗРАЧНАЯ КВАРЦЕВАЯ КЕРАМИКА С ПОВЫШЕННОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

*Е.И.Суздальцев, Е.В.Горелова*

(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Кварцевая керамика обладает уникальным сочетанием физико-технических и технологических свойств. Отвечая целому ряду высоких требований, предъявляемых к современным материалам высокоскоростных летательных аппаратов, кварцевая керамика имеет сравнительно низкую степень черноты. Возникает необходимость повышения излучательной способности материала

для увеличения его устойчивости в условиях воздействия высокотемпературных газовых потоков. Известно, что благодаря введению в исходное сырье различных добавок удастся существенно повлиять на конечные свойства продукта. Даже незначительные количества модифицирующих добавок способны улучшить технические характеристики различных материалов.

Повысить устойчивость материала к воздействиям высокоскоростных газовых потоков возможно путем повышения доли тепла, отводимого излучением, что обычно достигается за счет введения «зачерняющих» добавок, увеличивающих коэффициент черноты материала. С этой точки зрения одним из удачных модификаторов для кварцевой керамики служит оксид хрома. Способ изготовления кварцевой керамики с повышенной излучательной способностью не нов, он включает приготовления шликеров кварцевого стекла, введение добавок оксида хрома и термообработку материала.

Однако наличие открытой пористости (до 8-11 %) у данного материала (ТСМ-983 – «силихрит») существенно ограничивает возможности его использования в жестких климатических условиях и требует специальных мер по обеспечению влагозащиты. До настоящего момента для влагозащиты изделий из силихрита применялся только один из способов – нанесение ЛКП на наружную поверхность.

В данной работе был успешно опробован такой способ влагозащиты силихрита, как объемная пропитка продуктом МФСС-8 (метилфенилсприросилоксан в ацетоне). Основные свойства такого материала представлены в табл.

Таблица

Свойства силихрита чистого и силихрита с объемной пропиткой МФСС-8

Наименование показателя	Значения показателя	
	Силихрит (исходные значения)	Силихрит с объемной пропиткой
1. Плотность кажущаяся, г/см <sup>3</sup>	1,96-2,01	1,99-2,07
2. Открытая пористость, %	7-11	<0,2
3. Водопоглощение, %	-	<0,1
4. Предел прочности при статическом изгибе при температуре 20 °С, МПа	>30	>50
5. Диэлектрическая проницаемость при 20 °С	3,30-3,55	3,40-3,65
6. Тангенс угла диэлектрических потерь, при 20 °С	<0,004	<0,004
7. Коэффициент черноты спектральный полусферический для $\lambda=0,65$ мкм при 20 °С, %	45-50	>60

Благодаря объемному модифицированию удалось получить беспористый материал, что, в свою очередь, привело к увеличению более чем на 20 % коэффициента «черноты». Кроме того, пропитка материала кремнийорганической

смолой должна привести к тому, что при воздействии тепловых потоков на материал, происходит выпаривание – выгорание смолы и отведение от изделия некоторого количества тепла.

Различные виды испытаний показали высокую термостойкость и стабильность основных свойств материала в широком диапазоне температур. Объемную пропитку можно осуществлять на любой стадии после температурного обжига силихрита. После механической обработки пропитанных изделий сохраняются все эксплуатационные свойства.

Таким образом, предложен новый способ влагозащиты изделий из силихрита, с помощью которого можно получить беспористый материал. И кроме того, объемная пропитка приводит к увеличению степени черноты, что повышает устойчивость материала к воздействиям высокоскоростных газовых потоков. На данный способ получения беспористой кварцевой керамики с повышенной излучательной способностью подана заявка на выдачу патента.

## **ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИКИ ИЗ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ МЕТОДОМ ИНЖЕКЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ**

*В.С. Якушкина, Е.А. Кораблева, Н.Н. Саванина, А.С. Ермолаев, Л.А. Плясункова, М.Е. Осипова* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Новая технология формирования сложных изделий, изготавливаемых из керамических порошковых материалов (СИМ-ceramic injection molding), находит всё большее промышленное применение. Основными преимуществами этой технологии являются её высокая точность и воспроизводимость, что делает ее максимально пригодной для массового производства крупных партий изделий сложной формы с точными геометрическими размерами.

В работе представлены результаты исследований по получению керамических образцов состава  $ZrO_2 + 3 \text{ моль\% } Y_2O_3$  методом инжекционного формования и изучению взаимосвязи свойств получаемой керамики с используемыми наноструктурными порошками, разработанными на нашем предприятии.

Получение наноструктурных порошков частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ) осуществлялось методом химического осаждения из растворов солей с использованием высокотехнологичного оборудования. Применение высокотехнологичного оборудования дает возможность управлять синтезом нанопорошков и получать порошки с заранее заданными свойствами.

Рассмотрена взаимосвязь морфологического строения, размеров агломератов наночастиц порошков и свойств получаемой керамики. Проведено электронно-микроскопическое исследование морфологического строения агломератов наночастиц.

Рассмотрены технологические особенности формирования агрегатов наночастиц порошка ЧСДЦ на различных этапах изготовления.

Достижение оптимального сочетания необходимых свойств разрабатываемых материалов ЧСДЦ обеспечивается за счёт использования

наноструктурных порошков с размером частиц не более 100 нм в агломератах 1-2 мкм.

Инжекционное формование осуществляли на гидравлической литьевой машине с использованием гранул формовочной смеси. Наибольшая кажущаяся плотность получена у образцов, спечённых при максимальной температуре 1500°C и составляет 5,9 г/см<sup>3</sup>.

Проведённые исследования показали, что основным фактором, влияющим на свойства спечённых керамических образцов, полученных методом инжекционного формования, являются применяемые порошки, их свойства, размер частиц и агломератов, фазовый состав, морфологическое строение. Также на качество керамики влияют и другие факторы: конструкция литейной оснастки, режимы формования (давление впрыска, скорость потока и объема впрыска, температура литьевой оснастки), способ и режимы удаления временной технологической связи.

Применение наноструктурных порошков частично стабилизированного диоксида циркония, имеющих необходимый комплекс требуемых свойств, и метода инжекционного формования позволило получить плотноспечённые образцы керамики с относительной плотностью 98% от теоретической.

## **ЛАЗЕРНАЯ ОКСИДНАЯ КЕРАМИКА ИЗ НЕАГЛОМЕРИРОВАННЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ**

*Ю.Л.Копылов, В.Б.Кравченко*

(ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия)

Одно из наиболее существенных требований к лазерной керамике – минимальные оптические потери (неактивные) на длине волны генерации. Величина потерь обуславливается поглощением на примесных центрах и рассеянием. Обычно материалы, которые используются для изготовления керамики, имеют высокую степень химической чистоты, и потери в значительной степени определяются не поглощением, а рассеянием. Основными центрами рассеяния являются остаточные поры. На границах пор скачок показателя преломления высок и поэтому даже небольшая концентрация пор порядка 10<sup>-3</sup> объемных процента приводит к заметному, порядка 1%, снижению *in line* пропускания. Поры преимущественно формируются на стадии компактирования нанопорошков, но ни один из методов компактирования не может гарантировать отсутствие пор в случае, когда исходные порошки агломерированы [1]. Таким образом, получение неагломерированных нанопорошков является одной из наиболее важных задач технологии оптической, и особенно лазерной, керамики.

Было опробовано несколько методов получения неагломерированных наноразмерных порошков как простых редкоземельных оксидов, так и соединений для использования их в технологии получения высокопрозрачной керамики. В качестве методов получения применялись сольватермальный синтез, пиролиз, химическое (со-)осаждение из водных растворов и размол в высокоэнергетических

мельницах. Неагломерированные порошки иттриево-алюминиевого граната (ИАГ)  $Y_3Al_5O_{12}$  были получены в специально разработанной системе непрерывного сольватермального синтеза и пиролиза. В сольватермальном синтезе получены фасетированные нанокристаллы ИАГ, а при использовании пиролиза получены поликристаллические наносферы. Химическое осаждение было исследовано детально на примере  $Y_2O_3$  и ИАГ. Было найдено, что при использовании нитратных растворов исходных оксидов при гетерогенном (со-)осаждении наблюдается наибольшая степень агломерации. Меньшую степень агломерации обеспечивает использование хлоридных и сульфатных исходных растворов. В хлоридных и сульфатных растворах формируются агломераты 2 и 3 порядков. При использовании нитратных растворов формируются агломераты третьего порядка с трехмерными караллоподобными структурами. Наноразмерные порошки редкоземельных оксидов, полностью свободные от агломерации, получены методом гомогенного осаждения с использованием мочевины и сильно разбавленных растворов исходных оксидов. Частицы таких порошков являются агломератами третьего порядка, но имеют близкую к идеальной сферическую форму с диаметром от 80 до 500 нм. Количество начальных частиц в каждой наносфере зависит от условий термической обработки. При достаточно высокой температуре формируются монокристаллические сферы. И форма, и размер таких частиц весьма выгодны для получения максимальной плотности упаковки при компактировании. Был исследован ряд коммерческих порошков оксидов для их размолта в высокоэнергетических мельницах – планетарных и атриторах. Найдено, что некоторые коммерческие порошки оксидов при оптимальных условиях помола пригодны для получения высокопрозрачной и лазерной керамики. Качество размолотых порошков зависит от прочности агломератов в исходных коммерческих порошках. Таким методом удалось получить порошки ИАГ и оксида иттрия с узким распределением размера частиц в области 100 нм. В итоге, на основе полученных порошков были изготовлены образцы лазерной керамики с прозрачностью (in line пропускание 84% для ИАГ и 82% для  $Y_2O_3$ ), близкой к теоретической и обеспечивающей эффективную лазерную генерацию.

#### Литература

1. S.N. Bagayev, A.A. Kaminskii, Yu.L. Kopylov, V.B. Kravchenko // Optical Materials.– 2011.– № 33.– P.702.

### **ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ**

*И.Ю.Келина, В.Н.Рудыкина, И.Н.Курская, Л.А.Чевыкалова, И.Л.Михальчик,  
А.С.Шаталин, В.П.Крылов* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Начиная с 70-х годов прошлого века, широко исследовались материалы на основе нитрида кремния как конструкционные для применения в напряженных узлах и деталях, работающих при высоких температурах. В основном изучались

такие свойства, как прочность и стойкость до 1500°C и выше. В последние годы все чаще исследуются диэлектрические характеристики материалов разных марок из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Большое количество публикаций посвящено исследованиям диэлектрических свойств монокристаллических и композиционных материалов на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , влиянию содержания и типа активирующих добавок, фазового состава, пористости, размера пор и других параметров. Анализ патентной и технической литературы также выявил более сотни публикаций, посвященных исследованиям частотной и температурной зависимости диэлектрических характеристик различных материалов из нитрида кремния. В зависимости от качества исходного сырья, составов и методов получения свойства материалов на основе нитрида кремния изменяются в широких пределах.

В работе приводятся результаты исследований диэлектрических свойств (диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ) четырех материалов: горячепрессованного на основе нитрида кремния ОТМ-917, реакционносвязанного нитрида кремния (РСНК), горячепрессованного композиционного материала в системе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -20 % BN (ОТМ-918<sub>20</sub>), реакционносвязанного уплотненного нитрида кремния (УРСНК).

Измерения диэлектрической проницаемости в интервале температур 20-1200°C проводили по разработанной на предприятии методике в цилиндрическом волноводном резонаторе с волной  $\text{H}_{01}$  на частоте 10 ГГц на образцах в виде диска полуволновой толщины в соответствии с ГОСТ Р 8.623-2006.

Горячепрессованный нитрид кремния ОТМ-917 в ряду исследуемых материалов, обладая нулевой пористостью и максимальной прочностью при статическом изгибе (500-700 МПа), имеет стабильные значения  $\epsilon$  – 7,2-8,5 в интервале температур 20-1200°C. Значения  $\text{tg}\delta$  в исследуемом температурном диапазоне изменяются от 0,0003 до 0,015.

РСНК при пористости 10-15 % и прочности 180-230 МПа имеет  $\epsilon$  – 5,5-6,6 и  $\text{tg}\delta$  0,015-0,003 в интервале температур 20-1200°C. Изменение  $\epsilon$  от температуры в этом диапазоне не превышает 5 %. Выявлена зависимость  $\epsilon$  от плотности, химического и фазового состава керамики.

Композиционный материал ОТМ-918<sub>20</sub> в отличие от зарубежных аналогов имеет низкую пористость (не более 1 %) и высокую прочность 250-480 МПа. Материал при комнатной температуре имеет  $\epsilon$  – 6,9-8 и  $\text{tg}\delta$  до 0,002, с ростом температуры до 1200°C  $\epsilon$  стабилизируется на уровне 7,5 -7,8 и  $\text{tg}\delta$  0,018-0,030. Варьирование содержанием BN от 10 до 60 % и активирующих добавок ( $\text{MgO}$  или  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) позволяет изменять диэлектрические характеристики материала.

УРСНК с открытой пористостью до 5% в зависимости от плотности и фазового состава имеет стабильные диэлектрические характеристики  $\epsilon$  – 7,0-9,0, причем изменение  $\epsilon$  в диапазоне температур 20-1200°C не превышает 3 %, значения  $\text{tg}\delta$  в этом же температурном интервале составляют 0,002-0,030. Отработаны технологические приемы, обеспечивающие снижение значения  $\text{tg}\delta$  при температуре 1200°C до 0,020.

# РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В ЖЕСТКИХ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ УСЛОВИЯХ

*К.Б.Шамшетдинов, И.Ю.Келина, Л.А.Чевыкалова*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Разработаны многокомпонентные теплозащитные покрытия (ТЗП) на основе аморфного диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), состав которых варьировался в диапазоне, (масс.%):  $\text{SiO}_2$  36-58;  $\text{B}_2\text{O}_3$  1-5; BN 1-3;  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  2-3;  $\text{Si}_3\text{N}_4$  2-4; микросферы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1-3; АСПМ 1-10; МКВ 1-10; тальк 1-3; вермикулит вспученный 2-3; алюмоборфосфатное связующее 30-34.

Учитывая сложные условия эксплуатации (воздействие высоких температур с темпом нагрева  $60^\circ\text{C}/\text{с}$  и выше) керамических деталей, компоненты тепловой защиты должны обладать следующими свойствами: хорошими теплоизоляционными характеристиками (низкая теплопроводность); анизотропией свойств; пористостью; непрозрачностью для тепловых лучей; способностью локализовать тепло в тонком поверхностном слое; способностью к образованию на нагретой поверхности изделия высоковязкой жидкой пленки, препятствующей уносу компонентов ТЗМ тепловым потоком; поглощением сравнительно малым объемом уносимой массы большей части тепла, подводимого к конструкции; хорошей адгезией к керамической подложке и хорошей излучательной способностью; иметь ТКЛР максимально близкий к ТКЛР материала подложки.

На предварительном этапе были приготовлены 20 составов ТЗП и исследованы их теплофизические характеристики: теплопроводность ( $\lambda$ ); температуропроводность ( $a$ ); удельная теплоемкость ( $c$ ); термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Некоторые составы ТЗП приведены в табл. 1, а их оптимальные теплофизические характеристики, пористость и плотность, в табл. 2.

Таблица 1

Состав многокомпонентных композиций исследуемых ТЗП

№ состава	Компоненты, масс. %										
	$\text{SiO}_2$	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	BN	АСПМ	МКВ	$\text{Al}_2\text{O}_3$ мкс	$\text{Si}_3\text{N}_4$	тальк	вермикулит	АБФС
1	56	2	3	-	-	-	2	2	3	-	32
2	58	3	2	-	-	-	1	-	2	2	32
3	47	2	2	-	8	-	2	2	1	3	33
4	36	1	2	2	10	10	3	-	2	2	32

Свойства ТЗП различных составов

Сос-тав	$\rho_{\text{каж}}, \text{ г/см}^3$	$\Pi_{\text{откр}}, \%$	$\lambda, \text{ Вт/м}\times\text{К}$ (20-1000°C)	$\alpha \times 10^6, \text{ К}^{-1}$ (200-900°C)	$c, \text{ кДж/кг}\times\text{К}$ (20-1000°C)	$K_{\text{ТЗ}}$ (20-1000°C)
1	1,39	37,5	0,41 - 0,61	6,2 - 2,9	0,76 - 1,14	0,56 - 0,84
2	1,25	44,0	0,45 - 0,87	5,4 - 3,0	0,75 - 1,13	0,56 - 1,08
3	1,04	46,5	0,27 - 0,48	4,2 - 2,0	0,69 - 1,12	0,28 - 0,50
4	0,9	54,5	0,18 - 0,37	4,0 - 1,9	0,79 - 1,16	0,16 - 0,33

В данной работе был оптимизирован способ получения ТЗП на подложке из реакционносвязанного нитрида кремния (РСНК), исследованы влияние добавок алюмосиликатных полых микросфер (АСПМ) и муллитокремнеземных волокон (МКВ) на теплофизические свойства покрытий, микроструктура покрытий. Проведены оценочные теплопрочностные испытания керамических образцов с покрытиями на температуру 1200°C с темпом нагрева 60°C/с, термоциклирование образцов по режиму 20°C→1300°C→20°C, определена адгезия покрытий разной толщины с керамической подложкой при комнатной температуре.

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства образцов РСНК с нанесенными ТЗП

№ образца	Состав ТЗП	Толщина ТЗП, мм	Термостойкость, циклы (20-1300-20°C), до появления первого дефекта	Снижение температуры относительно эталона, °С
1	1	0,5	40	120
2	2	1,0	42	142
3	3	1,2	46	261
4	4	1,2	52	285

Температура применения ТЗП – 1400°C, кратковременно – до 1600°C.

Многокомпонентность состава, возможность варьирования толщины покрытий позволяет изменять их теплозащитные свойства в широких пределах, что сделает возможным расширение области применения ТЗП в качестве дополнительной защиты изделий, например, из кварцевой, муллитокорундовой, циркониевой, карбидкремниевой керамики, работающих в термонагруженных условиях.

Области применения ТЗП: авиационно-космическая техника; стекольная промышленность; машиностроение; печное оборудование и др.

# ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ НА ЕЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*М.В. Григорьев*<sup>1,2</sup>, *С.Н. Кульков*<sup>1,2,3</sup>

(<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; <sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия)

В настоящее время большое внимание исследователей уделяется пористым проницаемым материалам, особенно керамическим. Это связано с широкими возможностями их применения в качестве биоимплантов, фильтров, носителей катализаторов и др. [1,2].

Наличие пористости в керамике приводит, как правило, к заметному снижению механической прочности вследствие ограниченной возможности релаксации концентраторов напряжений при нагружении [3]. Синтез пористых материалов на основе оксида алюминия с необходимым комплексом свойств требует детального исследования закономерностей формирования физико-механических характеристик в зависимости от особенностей структуры, таких, как размеры структурных элементов, вид пор, их количество и распределение по размерам.

В связи с этим, целью настоящей работы явилось изучение прочности корундовой керамики при изменении размеров структурных элементов и распределения пор по размерам в широком интервале пористости.

Для получения пористой керамики были приготовлены смеси порошков в широком интервале соотношения от технического глинозема (ГОСТ 30558-98) до плазмохимического  $Al_2O_3$  (ТУ-2320-001-07622928-96). Спекание осуществляли в интервале температур от 1200, до 1650°C с продолжительностью изотермической выдержки в течение часа.

Рентгеноструктурный анализ керамики осуществляли на дифрактометре Дрон УМ1 с фильтрованным  $CuK_{\alpha}$  излучением. Средний размер кристаллитов рассчитывали по уширению рефлекса на малых углах.

Испытания на сжатие образцов пористой керамики осуществлялись на испытательной машине «Instron-1185» с постоянной скоростью нагружения  $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

Установлено, что плотность после прессования больше в образцах с преобладающим содержанием промышленного глинозема. Плотность после спекания при температурах 1200-1400°C тем выше, чем выше исходная плотность прессовок, зависимость имеет линейный характер. При дальнейшем увеличении температур спекания основную роль начинает играть не начальная плотность образцов, а количество плазмохимического порошка  $Al_2O_3$  в исходной смеси порошков, увеличение содержания которого приводит к смене механизмов уплотнения и, как следствие, росту плотности в образцах. После спекания при температуре 1500°C пористость в образцах составляет около 50% и, по-видимому, происходит смена характера поровой структуры от изолированной к сообщающейся, что соответствует перколяционному переходу в рассматриваемой керамике.

Проведенные испытания синтезированной керамики на сжатие показали, что после спекания при температурах ниже 1500°C образцы обладают прочностью до 75 МПа, при этом предел прочности увеличивается с ростом содержания плазмохимического порошка оксида алюминия в исходной смеси порошков. Спекание при температурах 1600 и 1650°C приводит к значительному увеличению предела прочности, прочность тем выше, чем больше плазмохимического порошка в исходной смеси порошков. После спекания при температуре 1650°C в случае, когда в компактах преобладает плазмохимический порошок, предел прочности значительно возрастает и максимум (500 МПа) достигается в образцах с содержанием 80 вес% плазмохимического порошка  $Al_2O_3$ .

Исследование влияния пористости на прочность керамики показало, что она существенно уменьшается с ростом пористости, при этом в области значений пористости около 50% изменяется угол наклона аппроксимирующих линий (рис.). По-видимому, это связано с тем, что здесь происходит смена характера поровой структуры от обособленных пор и поровых кластеров различных форм и размеров к структуре керамики, состоящей из двух взаимопроникающих компонент – «вещество - пора» [4].

Вид порового пространства и размер пор также существенно влияют на прочность материала. Установлено, что предел прочности тем больше, чем меньше средний размер пор и их дисперсия по размерам, а экстраполяция данной зависимости на нулевую пористость показала, что прочность исследуемой керамики составит около 3,5 ГПа, что соответствует оценкам прочности оксида алюминия, имеющимся в литературе [5].

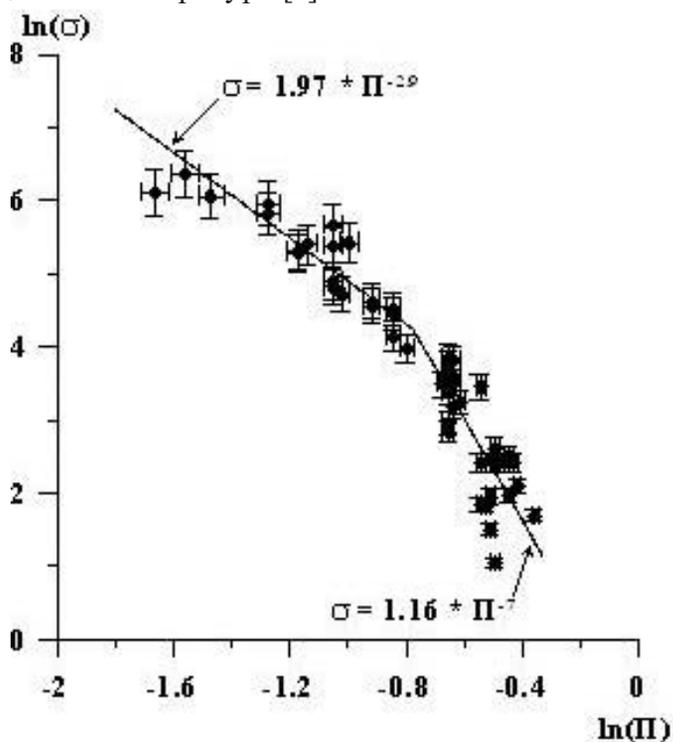


Рис. Зависимость предела прочности на сжатие от пористости в керамике на основе порошков различной дисперсности

Проведен анализ влияния размеров областей когерентного рассеяния, определенных из рентгенографических данных, на механические свойства материала. Установлено, что увеличение размера областей когерентного рассеяния приводит к увеличению прочности, зависимость имеет вид степенной функции. По-видимому, это обусловлено тем, что прочность в исследуемой керамике минимальна при низких температурах спекания, когда размер областей когерентного рассеяния ( $D$ ) не растет и пористость не уменьшается. С другой стороны, в исследуемых материалах  $D$  растет только при повышении температуры спекания, когда происходит заметное уменьшение пористости и рост прочности.

#### Литература

1. Лукин Е. С. Пористая проницаемая керамика из оксида алюминия /Е. С. Лукин, А. Л. Кутейникова, Н. А. Попова // Стекло и керамика. – 2003. – №3.– С. 17–18.
2. Лукин Е. С. Оксидная керамика нового поколения и области ее применения / Е. С. Лукин, Н. А. Макаров, А. И. Козлов и др. // Стекло и керамика. – 2008. – №10.– С. 27–31.
3. Кульков С.Н. Негуковское поведение пористого диоксида циркония при активной деформации сжатием / С.Н. Кульков, В.И. Масловский, С.П. Буякова, Д.С. Никитин // Журнал технической физики. – 2002. –Т. 72, №3. – С. 38–42.
4. Григорьев М.В., Кульков С.Н. Исследование тонкой кристаллической структуры пористой корундовой керамики // Известия ВУЗов. Физика – 2010.– №11.
5. Андриевский Р.А., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе // Челябинск: Металлургия. – 1989. – С. 250-251.

### **ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕРМОУДАРНЫХ НАГРУЖЕНИЙ НА СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $ZrO_2$**

***В.В.Промахов, С.П.Буякова, С.Н.Кульков***

(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия)

Изучено влияние термоциклирования при охлаждении в воде от  $1000^\circ\text{C}$  на структурные и фазовые превращения в нанокристаллической керамике на основе  $ZrO_2$ , частично стабилизированного в высокотемпературных модификациях катионами замещения  $Mg^{+2}$ . Керамика отличалась количеством модифицирующей добавки оксида магния в твёрдом растворе  $ZrO_2-MgO$  и, как следствие, соотношением долей высоко- и низкотемпературной модификаций диоксида циркония. Независимо от количества оксида магния в твёрдый раствор с увеличением количества термонагрузений в керамике твёрдый раствор  $ZrO_2-MgO$  распался, однако даже при практически полном выходе  $MgO$ , то есть расстабилизации, керамика сохраняла способность противостоять термонагрузениям.

Выявлено, что после первого термоударного нагружения вследствие низкой теплопроводности  $ZrO_2$  на поверхности образцов всех составов сформировалась трещиноватая блочная структура. Несмотря на наличие микротрещин, прочность образцов на сжатие составляла не менее 400 МПа, что позволило использовать их в дальнейших экспериментах по термическим нагружениям.

Установлено, что размер кристаллитов кубической модификации диоксида циркония контролируется содержанием кубической фазы  $ZrO_2$ . При этом кубическая фаза  $ZrO_2$  стабилизируется при среднем размере ОКР – 25 нм независимо от количества оксида магния в системе  $ZrO_2 - MgO$ .

Циклические термоударные испытания привели к перераспределению фазового состава в керамике системы  $ZrO_2 - MgO$ . Так, после 50 термовоздействий в образцах всех составов доля кубической модификации  $ZrO_2$  не превышала 5 %. Однако все образцы сохранили целостность после 200 термоударных нагружений. Это свидетельствует о релаксации напряжений при возникновении градиента температур за счёт сформировавшейся на поверхности сетки трещин.

Термоциклирование привело к увеличению среднего размера ОКР моноклинной фазы диоксида циркония в образцах. Интенсивные изменения размеров ОКР моноклинной модификации  $ZrO_2$  происходили до тех пор, пока имели место изменения в соотношении фаз диоксида циркония. К десятому термоциклу средний размер ОКР моноклинной фазы  $ZrO_2$  во всех образцах составил около 45 нм.

По мере увеличения числа термонагружений в образцах всех составов наблюдалось уменьшение размеров ОКР кубической модификации  $ZrO_2$ . Причиной этого могло служить увеличение содержания моноклинной модификации  $ZrO_2$ , сопровождающееся значительными сжимающими напряжениями вследствие увеличения объёма элементарной ячейки при фазовом переходе высокотемпературной в низкотемпературную модификацию диоксида циркония, приводящее к дроблению кристаллитов кубической фазы.

Керамика системы  $ZrO_2 - MgO$  сохраняет термомеханическую устойчивость при циклических нагружениях в режиме «нагрев – резкое охлаждение», что позволяет создавать долговечную теплозащитную футеровку камер сгорания в современных газотурбинных двигателях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов: РФФИ 12-08-33099 мол\_a\_вед, Государственного задания «Наука».

## КИНЕТИКА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ СПЕКАНИИ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $ZrO_2$

*В.В.Промахов, С.П.Буякова, С.Н.Кульков*

(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия)

В данной работе изучено влияние суммарной длительности изотермической выдержки при циклическом спекании на фазовый состав и структуру материалов системы  $ZrO_2 - MgO$  с различным соотношением компонентов.

В системе  $ZrO_2 - MgO$  благодаря высокому давлению паров оксида магния при нагревании имеют место его испарение и диффузия из твердого раствора. Данное обстоятельство позволяет получать материалы с градиентным распределением по химическому и фазовому составу. При этом скорость испарения зависит от количества растворенного компонента в системе и длительности высокотемпературных воздействий.

Установлено, что при увеличении суммарной длительности высокотемпературной изотермической выдержки происходят структурные изменения, выраженные в увеличении среднего размера пор и зёрен кубического твёрдого раствора  $ZrO_2$ . Выявлено, что фазовый состав в керамике системы  $ZrO_2 - MgO$  при циклических термонагрузениях контролируется обратимыми диффузионным и бездиффузионным фазовыми переходами высокотемпературных и низкотемпературных полиморфных модификаций диоксида циркония и диффузией катионов магния. Вследствие высокого парциального давления паров  $MgO$  в формировании фазового состава на поверхности керамики существенный вклад вносит его испарение. Наблюдаемые при изотермических выдержках изменения в фазовом составе керамики (рис.) свидетельствуют о том, что в процессе однократной изотермической выдержки в течение одного часа при температуре  $1650\text{ }^\circ\text{C}$ , предпринятой с целью спекания порошковых заготовок, система  $ZrO_2 - MgO$  не приходит к фазовому равновесию.

Установлено, что формирование в керамике  $ZrO_2 - MgO$  выделений тетрагональной фазы  $ZrO_2$  или  $MgO$  сдерживает рост зёрен кубической фазы  $ZrO_2$  и тем самым ограничивает рекристаллизацию. Это свидетельствует о возможности применения керамики  $ZrO_2 - MgO$  в высокотемпературной технике, в частности, в качестве футеровки печей и рабочих лопаток в ГТД.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов: РФФИ 12-08-33099 мол\_a\_вед, госзаказа «Наука».

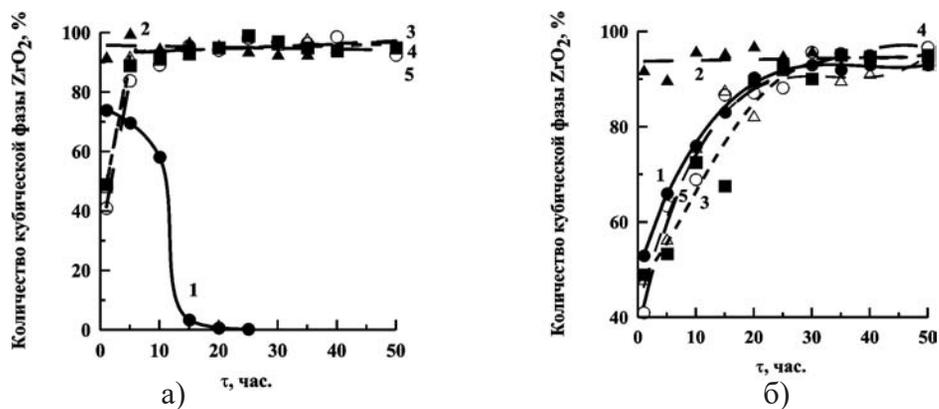


Рис. Зависимость содержания кубической фазы ZrO<sub>2</sub> от суммарной длительности изотермической выдержки при циклическом спекании на поверхности (а) и в приповерхностном слое образцов (б) для составов: 1) ● – ZrO<sub>2</sub>(8,6 мольн.% MgO); 2) ▲ – ZrO<sub>2</sub> (13,9 мольн. % MgO); 3) ■ – ZrO<sub>2</sub>(25,4 мольн.% MgO); 4) △ – ZrO<sub>2</sub>(35 мольн. % MgO); 5) ○ – ZrO<sub>2</sub> (43,3 мольн. % MgO)

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРОШКОВ ZrO<sub>2</sub> И TiC ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ

*М.В.Григорьев*<sup>1,2</sup>, *С.П.Буякова*<sup>1,2,3</sup>, *С.Н.Кульков*<sup>1,2,3</sup>

(<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; <sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; <sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия)

Механическая обработка – один из способов активации физико-химических процессов в порошковых системах при спекании. В процессе обработки дисперсной системе передаётся механическая энергия, в результате чего происходит её диспергирование, формирование центров с повышенной активностью на вновь образованных поверхностях, возможна реализация фазовых превращений, деформация кристаллической решётки, аморфизация, образование дефектов и т.п. Энергия, получаемая порошком в процессе механической обработки, а соответственно и эффекты активации зависят от вида воздействия (свободный удар, истирание, раздавливание, комбинации этих механизмов).

Несмотря на то, что изучению эффектов механической активации порошков ZrO<sub>2</sub> и TiC посвящено большое количество работ, разработка технологических параметров обработки порошковой системы требует детального изучения кинетики структурно-фазовых изменений, происходящих в процессе механической обработки. Под воздействием различных факторов при обработке возможен целый ряд механически стимулированных структурных изменений, в результате чего порошки высокомолекулярных соединений могут иметь одинаковую дисперсность, но существенно отличаться по морфологии, совершенству кристаллической

структуры, что непременно отразится на структуре и свойствах получаемых из них консолидированных тугоплавких высокомодульных материалов.

Таким образом, предметом исследований в рамках данной работы явилось изучение структурных и фазовых изменений в порошках  $ZrO_2$  и  $TiC$ , подвергнутых механической активации.

Материалами для исследований служили высокомодульные порошки диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, полученные методом обратного соосаждения, и порошок карбида титана, полученный карбидизацией диоксида титана. Механическая обработка порошков осуществлялась в барабанной мельнице с рабочей ёмкостью и мелющими телами из высокоплотного корунда при скорости вращения барабана 70 об/мин. Продолжительность механической обработки порошков составляла: 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75 и 100 часов.

Исследование морфологии частиц методом растровой электронной микроскопии показало, что исходный порошок диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, состоял из сильно агрегированных частиц осколочной формы, средний размер которых составил 11,6 мкм, дисперсия 6,8 мкм. При увеличении больше 2000х видно, что поверхность частиц состоит из мелких фрагментов, размеры которых лежат в нанометровом диапазоне. Исследуемый порошок  $TiC$  состоял так же из частиц осколочной формы, средний размер частиц составил 5,8 мкм, дисперсия 5,7 мкм. Преимущественное количество частиц имело размер от 1 до 7 мкм, однако в порошке присутствовали частицы, размер которых достигал 25 мкм. Порошок имел весьма небольшую удельную поверхность, 0,6 м<sup>2</sup>/г.

Рентгеноструктурный анализ показал, что исследуемый порошок  $ZrO_2$  состоит из двух фаз: низкотемпературной моноклинной модификации и высокотемпературной тетрагональной модификации с содержанием последней 65%. Размеры областей когерентного рассеяния для моноклинной и тетрагональной фаз составили 34 и 38 нм, соответственно.

На рентгеновской дифрактограмме порошка  $TiC$  все дифракционные максимумы принадлежали карбиду титана, но были расщеплены на две составляющие. Составляющие дифракционных максимумов со стороны меньших углов имели большую пиковую интенсивность и меньшую ширину по сравнению с большеугловой составляющей. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР), рассчитанный по уширению малоугловой составляющей дифракционных максимумов, составил 40 нм, по уширению большеугловой составляющей – 55 нм. Параметр кристаллической решетки  $TiC$ , определённый по малоугловой составляющей дифракционных максимумов, составил  $a = 4,318 \text{ \AA}$ , по большеугловой составляющей –  $a = 4,304 \text{ \AA}$ . Это свидетельствует о присутствии фаз с атомным отношением углерода к титану 0,68 ( $TiC_{0,68}$ ) и 0,53 ( $TiC_{0,53}$ ). Микроискажения кристаллической решетки фаз  $TiC_{0,68}$  и  $TiC_{0,53}$  составили  $4 \cdot 10^{-3}$  и  $3,5 \cdot 10^{-3}$ , соответственно.

Исследование растровых электронных изображений порошка  $ZrO_2$  после механической обработки в течение 10, 30, 75 и 100 часов показало, что после 10 и 30 часовой механической обработки распределение частиц по размерам имеет унимодальный характер, большинство размеров частиц лежит в области до одного микрометра, частицы имеют округлую форму, средний размер частиц составил

0,4 мкм, и дисперсия 0,14 мкм. С дальнейшим увеличением времени механической обработки в распределении частиц по размерам появляется бимодальное распределение, первая мода лежит в области до 1 мкм и соответствует отдельным частицам, вторая мода – от 4 до 15 мкм соответствует вновь образовавшимся агломератам из мелкодисперсных частиц, образовавшихся в результате разрушения исходных агрегатов.

Исследование фазового состава порошков после механической обработки показало, что с увеличением продолжительности механической обработки количество высокотемпературной тетрагональной модификации уменьшается с 65 до 52%, что косвенно свидетельствует о тетрагонально-моноклинном превращении при разрушении частиц  $ZrO_2$  под действием ударно-сдвиговых деформаций в шаровой мельнице.

Механическая обработка порошка диоксида циркония приводит к уменьшению размеров ОКР с 38 до 15 нм для тетрагональной фазы  $ZrO_2(Y_2O_3)$ , и с 34 до 23 нм для моноклинной фазы  $ZrO_2(Y_2O_3)$ . Уровень остаточных микронапряжений кристаллической решетки моноклинной фазы  $ZrO_2(Y_2O_3)$  увеличивается с  $11 \cdot 10^{-3}$  до  $14 \cdot 10^{-3}$ , а у тетрагональной фазы  $ZrO_2(Y_2O_3)$  с  $18 \cdot 10^{-3}$  до  $37 \cdot 10^{-3}$ .

Установлено, что при механической обработке порошка карбида титана в шаровой мельнице средний размер частиц уменьшается с 6 до 2 мкм, что приводит к увеличению удельной поверхности порошка TiC с  $0,6 \text{ м}^2/\text{г}$  до  $3,4 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Механическая обработка порошка карбида титана приводит к уменьшению размеров ОКР с 55 до 45 нм для фазы  $TiC_{0,68}$ , и с 44 до 30 для фазы  $TiC_{0,53}$ , а уровень остаточных микронапряжений кристаллической решетки  $TiC_{0,68}$  увеличивается с  $4 \cdot 10^{-3}$  до  $7 \cdot 10^{-3}$ , а у  $TiC_{0,53}$  с  $3,5 \cdot 10^{-3}$  до  $12 \cdot 10^{-3}$ . Так как микродеформация кристаллической решетки возрастает линейно с увеличением продолжительности механической обработки, то можно рассчитать ее скорость накопления. Расчет показал, что для фазы  $TiC_{0,68}$  скорость накопления микродеформации равна  $0,7 \cdot 10^{-8} \text{ 1/с}$ , а для фазы  $TiC_{0,53}$  –  $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ 1/с}$ . Более высокая скорость накопления деформации фазы  $TiC_{0,53}$  обусловлена тем, что в ней присутствует больше, относительно  $TiC_{0,68}$ , вакансий в углеродной подрешетке, что приводит к уменьшению ее твердости, и обуславливает формирование большей микродисторсии кристаллической решетки.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СО СВЕРХНИЗКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ НА ЕГО СВОЙСТВА**

*Т.И.Рожкова, В.П.Павлова, Е.М.Кашикарва, О.В.Томчани, Г.С.Шуль*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Стремительное развитие техники и непрерывное совершенствование ее объектов требуют создания конструкций, обеспечивающих рациональное использование энергоресурсов. Поэтому для решения проблемы энергосбережения актуальны работы, направленные на создание высокоэффективных

теплоизоляционных материалов (ТИМ). К таким материалам относятся теплоизоляционные материалы со сверхнизкой теплопроводностью как неконструкционного назначения в виде плит, матов, секторальных элементов, так и конструкционного - в виде различных деталей и изделий для конкретных узлов, установок, агрегатов.

В зависимости от назначения материал должен обладать соответствующим комплексом эксплуатационных свойств. Если в неконструкционных ТИМ определяющее значение имеет коэффициент теплопроводности, то конструкционные материалы должны обладать достаточной прочностью, обеспечивающей надежную работоспособность изделия.

В настоящей работе представлены результаты исследований теплофизических и физико-механических свойств неконструкционного ТИМ-МП-НК и конструкционного ТИМ-МП-К теплоизоляционных материалов со сверхнизкой теплопроводностью различного состава. Материалы изготовлены на основе пирогенного диоксида кремния и функциональных добавок, обеспечивающих прочностные показатели и низкую теплопроводность материала при повышенных температурах. Формование изделий осуществлялось способом сухого прессования, в зависимости от назначения материал не подвергался термообработке или проходил стадию высокотемпературного обжига.

При получении неконструкционного ТИМ были опробованы различные типы волокон: измельченное различными способами кремнеземное марки PS-23, алюмосиликатное Fiberfrax S24 и кварцевое ТКВ. Наилучший результат по теплопроводности (0,024 Вт/м·К) в сочетании с прочностью был получен при использовании диспергированного волокна PS-23. Это волокно равномерно распределяется в объеме смеси, и при этом происходит плакирование поверхности волокна частицами пирогенного диоксида кремния. Более тонкие волокна, хотя и обеспечивают низкую теплопроводность (до 0,021 Вт/м·К), но из-за меньшей их прочности материал обладает более низкими физико-механическими показателями.

Для минимизации радиационной составляющей теплопередачи в состав теплоизоляционного материала вводится глушитель ИК-излучения. В составе неконструкционного ТИМ-МП-НК были опробованы три вида глушителя: SiC разной степени дисперсности с основным диапазоном размера частиц от 16 до 18 мкм и от 2 до 3,5 мкм, а также TiO<sub>2</sub> со средним размером частиц 3,5 мкм. Наиболее низкой теплопроводностью как при 20°C, так и в диапазоне температур 20–700°C обладает материал с добавкой TiO<sub>2</sub>. В то же время прочность его ниже, чем у материала с карбидом кремния.

При получении конструкционного теплоизоляционного материала со сверхнизкой теплопроводностью были опробованы различные виды спекающих добавок: бор аморфный, карбид бора, стекловолокно. Для обеспечения повышенных прочностных свойств после сухого прессования материал обжигали при температурах от 800 до 1000°C. Результаты испытаний показали, что теплопроводность материалов после спекания при 800°C при использовании всех добавок низкая и составляет 0,024-0,027 Вт/м·К, однако после повышения температуры спекания до 1000°C материал с использованием стекловолокна

дает значительную усадку и его теплопроводность повышается до 0,038 Вт/м·К. Теплопроводность ТИМ с использованием других спекающих добавок в этих условиях растет незначительно – до 0,028-0,029 Вт/м·К. Прочность конструкционного теплоизоляционного материала при 10 %-ой деформации составляет ~1,5 МПа.

Следует отметить, что каждый из рассматриваемых типов теплоизоляционных материалов со сверхнизкой теплопроводностью имеет свое направление практического применения. Для неконструкционного ТИМ - это теплоизоляция различного высокотемпературного оборудования, элементов трубопроводов, воздухопроводов в авиакосмических объектах, портативных топливных элементов, для конструкционного - изготовление прецизионных элементов теплозащиты, например, для модулей памяти накопителей летной информации.

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОТЕРМОСТОЙКИХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*В.Н.Воробьев, О.В.Томчани, Л.А.Пляскина, Т.И.Рожкова, М.В.Шугаев*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Современный рынок теплоизоляции предлагает широкий спектр материалов различной химической природы для различных условий эксплуатации. Особый интерес проявляется к волокнистой теплоизоляции, поскольку она обладает рядом ценных свойств – низкой теплопроводностью, большим сопротивлением к термическому удару, возможностью получения материалов с различной плотностью и соответственно прочностными показателями.

На протяжении нескольких десятилетий ОНПП «Технология» выпускает волокнистые теплоизоляционные материалы (ТИМ) марок АТМ, ТЗМК, ТЗМ-23М по технологии вакуумного формования в виде простейших форм – плит и блоков. Десятки тысяч блоков теплоизоляционных материалов ТЗМК-10 и ТЗМК-25 были изготовлены для теплозащиты космического корабля многоразового использования «Буран», 25-летие успешного полета которого будет отмечено в ноябре 2013 года.

Однако в настоящее время предприятия-заказчики проявляют больший интерес к приобретению не материалов, а деталей или конструкций из них. Это связано с затратными работами по организации соответствующих рабочих мест для механической обработки в части приобретения оборудования, соблюдения требований охраны труда и окружающей среды. Выпуск изделий из теплоизоляционных материалов экономически оправдан и для их изготовителя - это возможность выпуска наукоемкой, высокотехнологичной продукции, требующей наличия новейшего оборудования и высококвалифицированного персонала.

В настоящей работе представлены изделия из конструкционного теплоизоляционного материала ТЗМ-23М различной плотности, которые в последние годы изготавливаются в ОАО «ОНПП «Технология»:

- заготовки обечаек, столиков и стаканов из материала плотностью 220 кг/

м<sup>3</sup> для стоматологических малогабаритных электровакуумных печей серии ЭВП производства НПК «Аверон», г. Екатеринбург, и аналогичного оборудования производства ООО «СПАРК-ДОН», г. Волгодонск (детали 1 на рис. 1). Заготовки изготавливаются в виде цилиндрических деталей заданного размера путем вакуумного формования из дисперсии волокна и функциональных добавок без последующей мехобработки;

- разливные стаканы для распределения жидкого металла в кристаллизаторе для ООО «Дайдо Металл Русь», г. Заволжье (детали 2 на рис.1). Всего было изготовлено 100 разливных стаканов на пятикоординатном фрезерном станке ФП-17S, Россия. Это был первый опыт на предприятии изготовления изделий сложной конфигурации из волокнистых ТИМ на оборудовании с ЧПУ, который показал необходимость приобретения его специальных модификаций для механической обработки такого типа материалов, позволяющих эффективно и надежно удалять абразивную пыль из рабочей зоны без выброса в окружающую среду. Таким приобретением стал вертикальный обрабатывающий центр MINIMILL2 фирмы «НААС», США, который позволяет изготавливать из конструктивных ТИМ в трёх- или четырехкоординатной системе изделия любой степени сложности при высокой точности, обеспечить их 100 %-ую идентичность и минимизировать отрицательное влияние человеческого фактора на качество. Обрабатывающий центр оборудован автономной системой удаления и сбора волокнистой мелкодисперсной пыли;

- комплекты теплоизоляционных деталей для защиты модулей памяти бортовых накопителей полетной информации ЗБН-1-3, выпускаемых ОАО «НПО «Прибор», г.С-Петербург (детали 3 на рис.1). Детали изготавливаются из цилиндрических заготовок материала ТЗМ-23М плотностью 180 кг/м<sup>3</sup> путем механической обработки на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре MINIMILL2. В течение года изготовлено более 500 комплектов, изделия поставлены в серийное производство;

- комплекты деталей из ТИМ для функциональных узлов различных испытательных установок и стендов, при необходимости с разработкой технологии способов их крепления и проведением монтажа. Среди них – элементы теплоизоляции для различных установок теплопрочностных наземных испытаний летательных аппаратов в ОАО «ОНПП «Технология», исследовательской установки терморadiационного обогрева для кафедры РККК МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, печей производства ООО «Техноаналит», г. Томск, (рис. 2), и других российских предприятий. Такой комплексный подход к изготовлению изделий из разработанных на предприятии высокотемпературных волокнистых теплоизоляционных материалов позволяет быть востребованными и конкурентоспособными на рынке этого вида продукции для авиации, космоса и других высокотехнологичных отраслей науки и техники.



Рис. 1. Изделия из конструкционного теплоизоляционного материала ТЗМ-23М



Рис. 2. Программируемая двухкамерная быстродействующая печь ПДП-20

## **РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ**

*П.А.Степанов, Д.А.Мельников, И.Г.Апрощенко, О.В.Шуткина, А.А.Сапарова, В.П.Крылов* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Современные тенденции в сфере высоких технологий авиакосмического и ракетостроительного производств диктуют определенные требования к материалам и покрытиям, используемым в конструкциях элементов ЛА:

максимальные физико-технические характеристики при относительно низкой цене производства. Это касается и материалов, применяемых в изготовлении теплонагруженных конструкций. В процессе эксплуатации такие конструкции испытывают экстремальные нагрузки, связанные с резкими перепадами температур (от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $1300^{\circ}\text{C}$ ).

В ОАО «ОНПП «Технология» методами вакуумного и контактного формования производится композиционный материал ХАФС на основе неорганического (алюмохромфосфатного) связующего и текстурированного стеклонеполнителя. Различные испытания, проведенные с нашим материалом, показали его высокую эксплуатационную надежность в области высоких температур (до  $1300^{\circ}\text{C}$ ). На основе материала ХАФС уже сегодня разрабатываются различные варианты конструкций элементов ЛА.

Одним из вариантов применения материала ХАФС может стать изготовление широкополосных радиопрозрачных конструкций, имеющих достаточно высокую прочность при минимально возможной массе. Для изготовления таких конструкций перспективно использовать многослойные композиционные материалы.

В связи с тем, что термостойкие композиционные материалы для широкополосных радиопрозрачных элементов ЛА в большинстве случаев являются пористыми, покрытия на них должны обладать высокими радиотехническими показателями, тепло- и атмосферостойкостью и влагозащитными свойствами. В ОАО «ОНПП «Технология» разработаны системы защитных покрытий, подбор которых осуществляется, исходя из используемых материалов конструкции, температурных условий эксплуатации и хранения, а также степени влажности окружающей среды.

В ходе работ по созданию перспективного широкополосного элемента ЛА в ОАО «ОНПП «Технология» изготовлена многослойная конструкция. Обшивки были выполнены из материала ХАФС, средний слой из стеклосотопласта с наполнителем на основе неорганического связующего, модифицированного микросферами и другими микродисперсными порошками. В зависимости от предназначения конструкции, величина диэлектрической проницаемости среднего слоя может варьироваться в диапазоне от 1,5 до 2,5 (при частоте  $10^{10}$  Гц).

Для уменьшения пористости и обеспечения герметичности конструкций, разработаны технологические операции импрегнирования поверхностей термостойкими системами на основе модифицированных кремнийорганических смол типа МФСС-8 и отработана технология нанесения лакокрасочного защитного покрытия. По результатам климатических испытаний водопоглощение КМ ХАФС не превысило 0,1%, диэлектрические характеристики КМ практически не изменились.

Эксплуатация полученной нами конструкции возможна до  $1300^{\circ}\text{C}$  кратковременно и до  $600^{\circ}\text{C}$  длительно. Стоит отметить низкую себестоимость изготовления конструкций на основе нашего материала, что соответствует современным тенденциям по снижению стоимости выпускаемой продукции и обеспечению при этом высоких эксплуатационных характеристик готовых изделий.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАМКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ЛОПАТОК И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ДИСКА В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

*С.В.Резник, Д.В.Сапронов* (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия)

Турбинные лопатки, изготовленные из керамического материала, позволят повысить КПД двигателя за счёт возможности увеличения рабочей температуры газа на выходе из камеры сгорания и уменьшения потерь воздуха при охлаждении лопаток, а также существенно снизить массу деталей за счёт низкой плотности [1]. Основной неблагоприятный фактор при использовании керамических деталей – хрупкость материала, ограничивающая работоспособность конструкции. Главной проблемой при создании ротора с работающими на растяжение под действием центробежных сил керамическими лопатками является обеспечение прочности замкового соединения [2]. В современных конструкциях турбин наиболее распространено соединение лопаток и диска типа «елочка». Данный тип соединения позволяет разместить необходимое число лопаток в диске и обеспечить равномерное распределение напряжений. Однако в работе авторов «Исследование статической прочности соединения керамических лопаток и металлического диска в рабочем колесе газовой турбины» показано, что при использовании керамических лопаток в высоконагруженных турбинах требуется проводить оптимизацию конструкции с целью повышения прочности. Характерной особенностью керамических лопаток является низкая плотность по сравнению с никелевыми материалами. Исследования, проведенные западными и отечественными авиадвигателестроительными компаниями, показали целесообразность использования замка типа «ласточкин хвост» [3].

В данной работе представлено сравнение двух вариантов модификации конструкции замкового соединения типа «ласточкин хвост»: 1 – с удлиненной ножкой лопатки (рис.1); 2 – с плавным радиусом перехода (рис. 2). Объектом исследования являлось рабочее колесо турбины высокого давления типового авиационного двигателя с периферийным диаметром рабочего колеса турбины на выходе 680 мм. Частота вращения 13637 об/мин соответствовала наиболее тяжелому режиму работы двигателя. В качестве материала лопаток рассматривался горячепрессованный нитрид кремния с плотностью 3450 кг/м<sup>3</sup>.

В программном комплексе Ansys Multiphysics проводилось численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций. Оптимизация конструкций проводилась посредством модуля Ansys Design Optimization. Также проводилась вероятностная оценка прочности конструкции в модуле Ansys Probabilistic Design с учетом разброса геометрических параметров и свойств материала. Программный код был написан на языке APDL. При определении вероятности разрушения предложено использовать энергетический критерий разрушения материала.

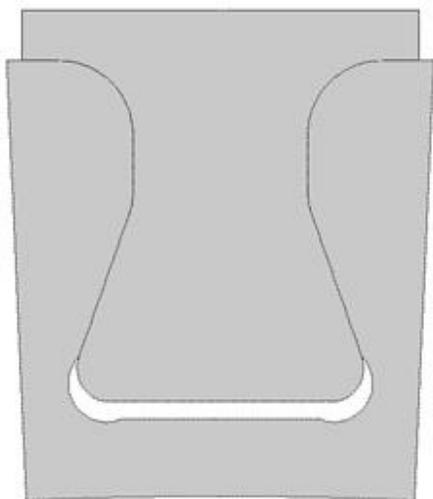


Рис. 1. Конструкция с удлиненной ножкой лопатки

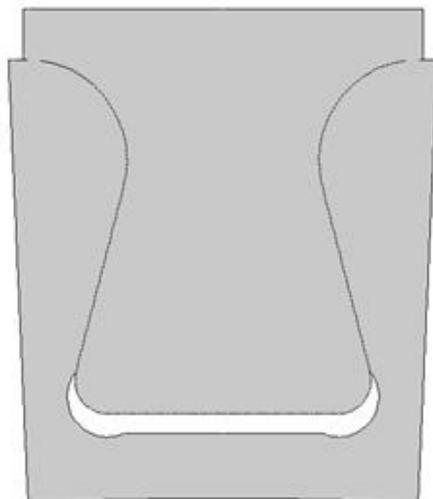


Рис. 2. Конструкция с плавным радиусом перехода

Было показано, что в конструкции с удлиненной ножкой уровень напряжений в керамическом хвостовике ниже, чем в конструкции с плавным радиусом перехода, и не превышает уровня 250 МПа.

Также проводилось исследование статической прочности в зоне контакта керамического хвостовика и металлического диска. При контакте керамической и металлической деталей существенное влияние на работоспособность соединения оказывает шероховатость поверхностей деталей. Была создана упрощенная модель, учитывающая шероховатость (рис. 3). Проведен анализ напряженно-деформированного состояния, определена вероятность разрушения конструкции в зоне контакта.

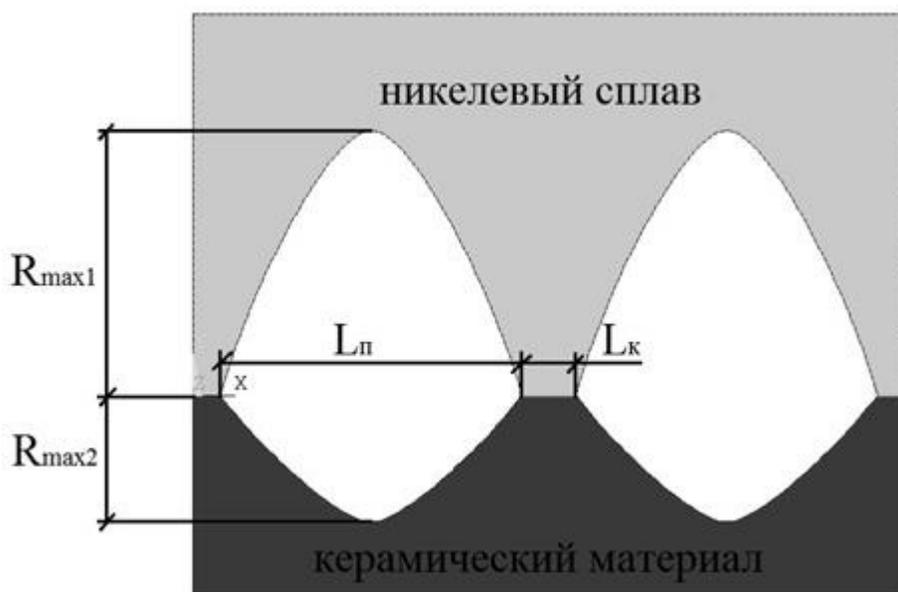


Рис. 3. Упрощенная модель контакта

## Литература

1. David W. Richerson Historical Review of Addressing the Challenges of use of Ceramic Components in Gas Turbine Engines // Proceedings of GT2006 ASME Turbo Expo. – 2006. – GT2006-90330.
2. Оценка напряженно-деформированного состояния, прочности и надежности деталей из керамических материалов / Н.А. Бутурлинова, К.Д. Каримбаев, Е.Г. Кузнецов, В.В. Навроцкий, Ю.А. Ножницкий, Ю.А. Федина // Тезисы докладов XXIII Всесоюз. научн. совещания по проблемам прочности двигателей. – М.: АН СССР, 1990. – С. 48.
3. Jurgen G. Heinrich, Fritz Aldinger Ceramic Materials and Components for Engines. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001. – 665 p.

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКЦИИ КЕРАМИЧЕСКОГО ОБТЕКАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА ШПАНГОУТА ПОЛИКОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

*М.Е.Поletaев, Л.И.Колоколов, С.Б.Воробьев, П.А.Степанов, Д.А.Рогов*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

В настоящее время в качестве материала для изготовления шпангоутов в узлах соединения керамических обтекателей, изготавливаемых в ОАО «ОНПП «Технология», широко применяются инварные сплавы, такие как 32НКД, 32НК-ВИ, 32НКБЛ, 32НКМБЛ, 32НКХБЛ и др. Эти материалы используются уже почти 40 лет, и в основном с их помощью конструктивно решаются многие проблемы при разработке керамических обтекателей.

Инварные материалы являются почти единственно используемыми для изготовления шпангоутов в узлах соединения с керамической оболочкой, обеспечивая работоспособность конструкции современных ракет различного назначения. Эти материалы обладают пластичностью низкоуглеродистых сталей и низким температурным коэффициентом линейного расширения в диапазоне температур от минус 60 до плюс 300°C (далее ТКЛР), что является одним из основных свойств их применимости в комбинации с хрупкой керамической оболочкой. Однако инварные сплавы имеют такой существенный недостаток, как высокая стоимость изготовления из них шпангоутов из-за содержания в их составе дорогостоящих элементов (никель – 31...33%, кобальт – 8...9%, и др.). Кроме того, при применении инварных сплавов работоспособность узла соединения керамического обтекателя ограничена температурой до 300°C.

Проведена работа по оценке возможности применения альтернативного материала для изготовления шпангоутов, а также проверка работоспособности керамического обтекателя с его использованием.

Обладая совокупностью теплофизических и механических свойств, стеклопластики являются альтернативным конструкционным материалом для изготовления шпангоутов. К основным достоинствам этих материалов можно отнести следующее:

- относительно низкая стоимость изготовления из них шпангоутов по сравнению с инварными материалами;
- низкая плотность материала (почти в 4 раза) существенно облегчает конструкцию керамических обтекателей;
- согласованность ТКЛР с керамикой в более широком диапазоне температур, чем инварные сплавы.

Был проведен расчет напряженно-деформированного состояния (далее НДС) конструкции керамического обтекателя, анализ которого показал допустимый уровень возникающих в узле соединения оболочки со стеклопластиковым шпангоутом напряжений. Уровень возникающих в оболочке напряжений в зоне узла соединения представлен в таблице.

Таблица

Результаты расчета напряжений, возникающих в керамической оболочке в зоне узла соединения в зависимости от материала изготовления шпангоута

Материал шпангоута	От теплового воздействия		От силового воздействия		Сумм.
	Окружные напряжения, МПа	Меридиональные напряжения, МПа	Окружные напряжения, МПа	Меридиональные напряжения, МПа	$\sigma_{\Sigma}$ , МПа
32НКМБЛ	37	6,2	5,3	12,3	39
СТП-97	6,1	6,1	10,4	12,2	10,5

Конструкция узла соединения макетного изделия представлена на рисунке.

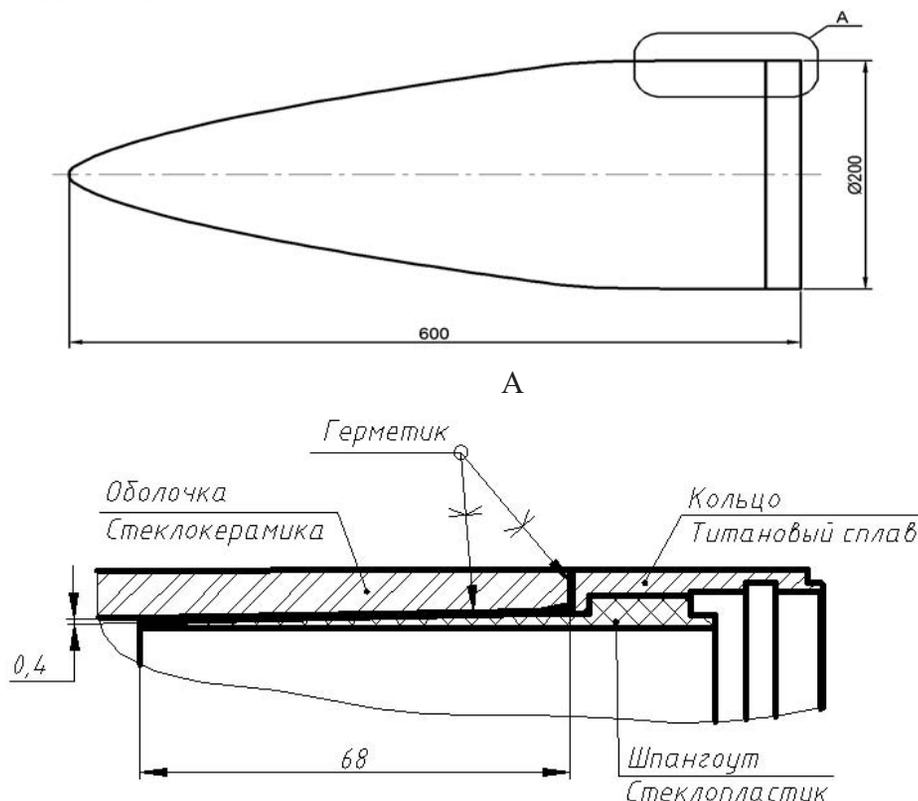


Рис. Конструкция узла соединения макетного изделия

Было изготовлено и собрано 4 макетных изделия с применением шпангоутов из стеклопластика СТП-97 и керамических оболочек из стеклокерамики ОТМ-357-О.

Изделия прошли основные виды испытаний по режимам эксплуатации изделия:

- испытание на герметичность;
- термоциклирование (-60...+190°C) ;
- вибродинамику;
- теплопрочность (максимальный изгибающий момент – 2200

кН/м, максимальная температура на шпангоуте – 250°C).

На теплопрочность были испытаны 3 макетных обтекателя по расчетному режиму автономной работы изделия, два из которых испытания выдержали с коэффициентом запаса по прочности 2,2 и 1,4.

На основании результатов испытаний были сделаны выводы о возможности создания конструкции керамического обтекателя летательного аппарата с применением в качестве материала шпангоута поликомпозиционного материала (например, стеклопластика СТП-97).

Необходимо продолжить исследования по возможности применения и уточнить расчеты конструкции с учетом анизотропии свойств.

## **ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМЕ AlN-BN**

*Р.Ю.Курфтырев, А.В.Беляков, И.Г.Кузнецова*

(ФГБОУ ВПО “РХТУ им. Д.И.Менделеева”, г. Москва, Россия)

Благодаря ценным свойствам компонентов система AlN-BN давно привлекает внимание исследователей. Керамика из гексагонального нитрида бора обладает высокими электроизоляционными свойствами, устойчивостью к тепловым ударам, химической стойкостью и прочностью при высоких температурах, повышенной теплопроводностью, устойчивостью в вакууме, большим сечением захвата тепловых нейтронов в сочетании с хорошей обрабатываемостью, а также высокими огнеупорными свойствами. Керамика из нитрида алюминия также обладает высокими показателями физико-технических свойств, такими, как теплопроводность и электросопротивление, тугоплавкость, термостойкость, устойчивость в агрессивных химических средах – расплавленных металлах и сплавах [1]. Таким образом, керамические композиционные материалы системы AlN-BN, сочетая эти свойства, позволят получить керамику с уникальным набором свойств – высокой теплопроводностью при высоком электросопротивлении, хорошими диэлектрическими характеристиками и механическими свойствами. Такое сочетание свойств позволит применять данный композиционный материал в различных областях промышленности: в электронной технике для деталей, требующих отвода большого количества тепла и имеющих высокое электросопротивление; в силовой электронике для деталей, требующих

высоких диэлектрических свойств при сверхвысоких частотах (низкие значения диэлектрической постоянной и диэлектрических потерь); в радиоэлектронике для получения радиопрозрачных деталей; в вакуумной технике для создания различных огнеупорных деталей и тиглей для вакуумного осаждения; в приборостроении для создания теплоотводов, изоляторов и защитных трубок для специальных печей, деталей и огнеупорных изделий с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР); в других областях в качестве конструкционного материала. Кроме того, благодаря хорошей механической обрабатываемости данного композита существует возможность создания из него деталей сложной формы с высокой степенью точности, что имеет большое значение в электронике.

В работе [2] проведён обзор методов получения композиционных материалов на основе AlN и BN. Из приведённых данных видно, что конечные свойства композита сильно зависят от способа его получения. Это связано с тем, что введение BN затрудняет получение плотного материала, а это, в свою очередь, ухудшает прочностные и электрофизические свойства керамики. Для повышения плотности композита применяют горячее прессование, спекание методом SPS, введение уплотняющих добавок.

В данной работе представлены результаты по влиянию гексагонального BN (до 60 % мас.) на микроструктуру, плотность, открытую пористость, предел прочности при изгибе, относительную диэлектрическую постоянную и тангенс угла диэлектрических потерь композиционных материалов, полученных горячим прессованием.

#### Литература

1. Самсонов, Г. В. Получение и методы анализа нитридов / Г. В. Самсонов, О. П. Кулик, В. С. Полищук. – Киев: Наукова думка, 1978. – 320 с.
2. Куфтырев Р. Ю. Методы получения композиционных керамических материалов на основе AlN-BN (обзор) / Р. Ю. Куфтырев, А. В. Беляков, И. Г. Кузнецова // Новые огнеупоры. – 2013. – № 4. – С. 65-73.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАКРИСТАЛЛИЗОВАННОГО ДО 1000°С ЛИТИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Е.И.Сuzдальцев, Д.В.Харитонов, А.С.Ермолаев*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

В настоящее время изделия радиотехнического назначения эксплуатируются в условиях длительного воздействия морской воды и повышенной влажности. В результате чего стеклокерамика с высокой эрозионной устойчивостью к пыли и дождю становится незаменимой для использования при изготовлении таких изделий.

В ОНПП “Технология” разработана и внедрена керамическая технология

получения изделий из стеклокерамики ОТМ-357 (основная фаза  $\beta$ -сподумен). В соответствии с этой технологией изделия формируют из аморфного литийалюмосиликатного (LAS) стекла. Результаты комплексных исследований стеклокерамики ОТМ-357 показали, что по уровню основных физико-технических свойств стеклокерамика соответствует аналогичным зарубежным материалам, разработанным в США (Пирокерам 9608) и на Украине (ситалл АС-418) по традиционной стекольной технологии, а по термостойкости, стабильности прочностных и диэлектрических свойств в диапазоне от 20 до 1175°C существенно их превосходит.

Однако, несмотря на неоспоримые преимущества, керамическая технология производства изделий из стеклокерамики ОТМ-357 имеет ряд недостатков: необходимость длительного процесса термообработки заготовок в высокотемпературных печах обжига (более 70 ч), наличие градиента показателей физико-технических свойств по объему изделия (особенно по объему крупногабаритных изделий высотой до 1200 мм), что существенно затрудняет получение изделий с заданным уровнем радиотехнических характеристик.

Для того чтобы уменьшить длительность процесса термообработки заготовок в высокотемпературных печах обжига и градиент показателей физико-технических свойств по объему изделия была предложена технология получения изделий из предварительно закristаллизованного стеклокristаллического материала ОТМ-357-О (основная фаза  $\beta$ -сподумен). Это позволило сократить длительность термообработки с 70 до 24-30 ч и получить материал с более однородной структурой. Однако применение в качестве исходного материала литийалюмосиликатного стекла, закristаллизованного при 1170-1250°C в течение 4-8 ч, требует дополнительного использования высокотемпературных печей обжига и увеличивает время на обжиг одного изделия до 10 ч.

Поэтому проведены исследования возможности использования закristаллизованного до 1000°C LAS стекла для изготовления изделий радиотехнического назначения, что позволит проводить термообработку не в высокотемпературных печах обжига, а в низкотемпературных (до 1000°C) и соответственно сократить время термообработки в высокотемпературных печах.

## **ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИКИ SiC-NbC**

*Г.К.Сафаралиев, Ш.Ш.Шабанов, Б.А.Билалов, Г.Д.Кардашова, С.Ш.Шабанов*  
(Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия)

Большой интерес представляет введение в SiC таких добавок, как карбиды переходных металлов и, в частности, TiC, NbC, ZrC. Это связано с существенным улучшением механических свойств карбидкремниевой керамики. В данной работе исследуются структура и электропроводность керамических материалов SiC-NbC.

При изготовлении керамики SiC-NbC порошок NbC (размер частиц – 5 мкм) добавляли к порошку SiC (размер 5 мкм) в весовых отношениях 0-100%. Порошки размалывали в шаровой мельнице с добавлением органических веществ в течение

24 часов и подвергали холодному прессованию в стальных пресс-формах, высушивали и использовали как исходный материал для изготовления керамики. Затем проводили спекание в атмосфере Ar при температурах 1900-2200°C в течение 1 часа. Из полученных заготовок были приготовлены образцы для исследования температурной зависимости электропроводности с линейными размерами 2x5x12 мм. Для рентгенодифрактометрического анализа керамики SiC-NbC были отобраны две партии образцов, спеченных при 1900°C и при 2200°C в атмосфере Ar. В целях однозначной интерпретации результатов все составы керамики SiC-NbC для каждой температуры спекались одновременно. Структурные исследования керамики SiC-NbC осуществлялись методом рентгеновской дифрактометрии на аппарате ДРОН-УМ2. Использовалось излучение  $\text{Cu}_{K\alpha}$ , Ni-фильтр, однокристалльная методика, съемка по схеме  $\theta - 2\theta$ . Серии образцов с различным содержанием SiC и NbC, полученные при 1900 и 2200°C анализировались по фазовому составу и значениям параметров элементарной ячейки SiC. Исследование проводилось с поверхности плоского образца керамики (без измельчения). Фазовый состав определялся по рентгенограммам, снятым в диапазоне углов  $2\theta = 16 - 42^\circ$ . Параметры элементарной ячейки рассчитывались по отражениям (30.0) и (00.18) - «а» и «с», соответственно. Определение параметров проводилось при двукратной съемке каждого образца и при расчете параметров по  $K\alpha_1$  и  $K\alpha_2$  в отдельности с последующим усреднением. Параметры рассчитывались по известным квадратичным формулам для гексагональной сингонии. Чувствительность фазового анализа 5%, погрешность в определении параметров  $\pm 0,0005 \text{ \AA}$ .

На рентгенограммах, снятых в интервале  $(16 - 42)^\circ = 2\theta$ , присутствует весь спектр линий, принадлежащих как SiC, так и NbC (сравнение с табличными данными по картотеке ASTM), с замещением SiC на NbC интенсивность линий, соответствующих SiC, уменьшается, а интенсивность линий NbC – возрастает. Кроме смещения дифракционных линий, связанных с изменением параметра элементарной ячейки на серии рефлексов (00.18) от образцов, полученных при 1900°C, наблюдается аномальное распределение интенсивности, которое проявляется в соотношениях  $I_{K\alpha1}$  и  $I_{K\alpha2}$ .

Интенсивность линий  $K_{\alpha1}$  и  $K_{\alpha2}$  в  $K_\alpha$  – дублете (теоретически и экспериментально) соотносятся как 2:1. Как известно, это соотношение связано с энергетическими переходами, имеющими место при формировании характеристического рентгеновского излучения. Отношение  $I_{K\alpha1}/I_{K\alpha2}$  для образца 90%SiC – 10% NbC составляет 2:1. По мере замещения SiC на NbC  $I_{K\alpha1}$  постепенно уменьшается, а  $I_{K\alpha2}$  увеличивается.

Этот эффект не проявляется для керамики, полученной при 2200°C. В нашем случае такое изменение интенсивности связано с одномерным разупорядочением в SiC. Поскольку, как известно, структура SiC обладает ярко выраженным политипизмом, можно предположить, что происходит разупорядочивание плотно упакованных слоев SiC (без нарушения порядка внутри слоя).

Исследование диффузии и растворимости в системе SiC-NbC, проведенное ранее нами [1], показало, что при твердофазном взаимодействии монокристаллов SiC и NbC на границе раздела монокристаллов образуется непрерывный ряд твердых растворов, ширина запрещенной зоны которых непрерывно уменьшалась от SiC до NbC.

На керамике SiC-NbC этих же составов исследовалась температурная зависимость электропроводности в температурном интервале 300-1800 К. На рис. представлены кривые температурной зависимости электропроводности для керамики SiC-NbC, спеченной при 1900 (а) и 2200°C (б). Видно, что с увеличением содержания NbC проводимость керамики SiC-NbC возрастает от полупроводниковой до металлической для керамики, спеченной при температуре 1900°C. При этом резкое увеличение наблюдается в интервале от 50 до 70 % вес. NbC. А температурная зависимость проводимости для состава 30 % вес. SiC – 70% вес. NbC и выше носит чисто металлический характер. Что касается керамики, спеченной при температуре 2200°C, то ход температурных зависимостей носит ярко выраженный полупроводниковый характер. Кривая для керамики с 70 % содержанием NbC свидетельствует о том, что в низкотемпературной части примесь полностью ионизирована, и проводимость керамики носит полуметаллический характер.

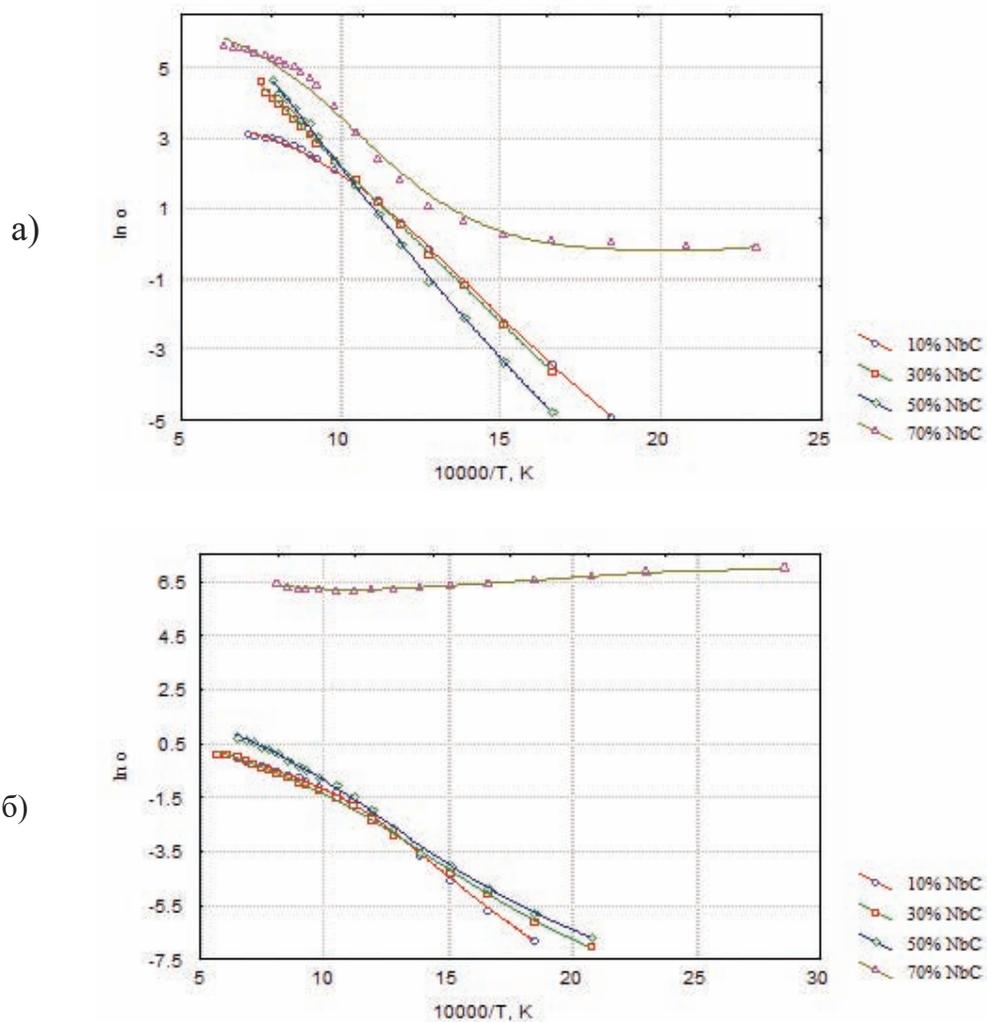


Рис. Температурные зависимости электропроводности для керамики SiC-NbC, спеченной при: а) 1900 °C; б) 2200 °C

## Литература

1. Сафаралиев Г.К., Таиров Ю.М., Цветков В.Ф., Шабанов Ш.Ш. Исследование растворимости и диффузии в системах SiC-NbC, SiC-TiC, SiC-ZrC // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17, вып.23. С.80-83.

## ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ SiC-AlN

*Г.К.Сафаралиев, Ш.Ш.Шабанов, Б.А.Билалов, Г.Д.Кардашова, С.Ш.Шабанов*  
(Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия)

Керамические материалы SiC-AlN привлекают к себе внимание специалистов в области микроэлектроники благодаря сочетанию таких полезных физико-химических свойств, как высокая теплопроводность, термостойкость и электросопротивление. В данной работе исследовались тепловые и электрические свойства горячепрессованных образцов керамических материалов в системе SiC-AlN в широком интервале составов и температур.

Образцы керамики SiC-AlN получали методом горячего прессования при температурах 2050-2200 К в среде азота в течение 60 минут. Давление горячего прессования составляло до 35 МПа. В качестве исходных компонентов использовались порошки карбида кремния  $\alpha$ -модификации. Дисперсность порошков карбида кремния составляла в среднем 2,4 мкм, а нитрида алюминия – около 1 мкм. Образцы керамики получали в виде пластин 2x5x12 мм<sup>3</sup> и дисков диаметром 10 и 20 мм, толщиной 1-2 и 7 мм. Состав твердых растворов SiC-AlN изменялся от 10 до 90 % AlN с шагом в 20 %. Измерения теплопроводности проводились абсолютным компенсационным методом в стационарном тепловом режиме. Для расширения температурного интервала в качестве компенсатора был использован сульфид гадолиния, который выдерживал температуру и цикличность до 1200 К. КТР измерялся методом емкостной дилатометрии с чувствительностью 10<sup>-9</sup>м. Измерения электропроводности проводились четырехзондовым методом в печи с графитовым нагревателем в инертной среде аргона в диапазоне температур 300-1800 К. Регистрация сигналов с зондов и термопары осуществлялась двухкоординатным самописцем. Погрешность измерений температуры составляла от 0,5 до 10 К в исследуемом интервале температур.

Экспериментальные результаты температурной зависимости теплопроводности керамических твёрдых растворов (SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub> (x=0,1; x=0,3; x=0,5; x=0,7; x=0,9) приведены на рис. 1. Видно, что теплопроводность керамики SiC-AlN уменьшается с ростом температуры и содержания нитрида алюминия в карбиде кремния. В полупроводниковых твёрдых растворах на величину и температурную зависимость теплопроводности значительное влияние оказывают дефекты масс и упругие параметры решётки. Температурная зависимость фоновой теплопроводности выражается уравнением  $\lambda_{\phi} \sim T^{-n}$  (n<1).

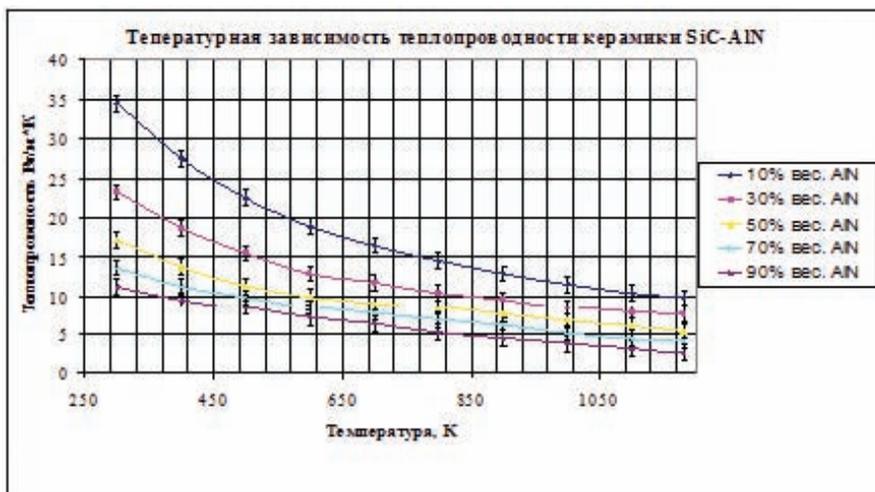


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности керамики SiC-AlN

Общее теплосоппротивление можно выразить как  $W=W_1+\Delta W$ , где:  $W_1$  – тепловое сопротивление, связанное с фоновым взаимодействием;  $\Delta W$  – тепловое сопротивление, связанное с дефектом масс, вакансий и изменением упругих параметров решётки. Величина  $\Delta W$  может достигать 50% от  $W$ .

При постоянных температурах коэффициент термического расширения линейно растёт от карбида кремния до нитрида алюминия. Коэффициент термического расширения увеличивается с ростом температуры и увеличением содержания нитрида алюминия в карбиде кремния. Удельная теплоёмкость исследованных составов увеличивалась с ростом температуры и вблизи температуры Дебая переходила к насыщению. Значение удельной теплоёмкости ( $C_p$ ) изменяется незначительно с добавлением нитрида алюминия к карбиду кремния.

На рис. 2 представлены температурные зависимости электропроводности керамических материалов в системе SiC-AlN.

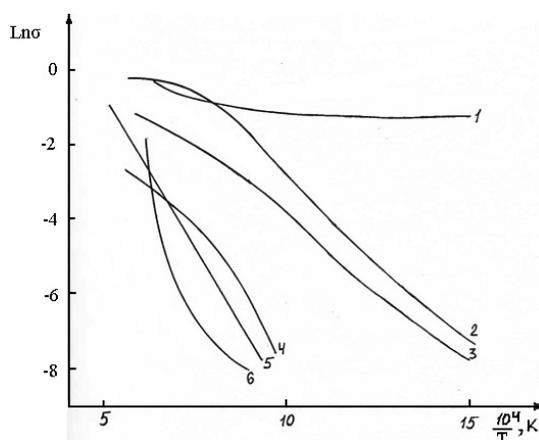


Рис. 2. Температурная зависимость электропроводности керамических материалов в системе SiC-AlN: 1- азотированный карбид кремния; 2 – SiC+ 10%вес. AlN; 3 – SiC+ 30%вес. AlN; 4 – SiC+ 50%вес. AlN; 5 – SiC+ 70% вес. AlN; 6 – SiC+ 90% вес. AlN

Видно, что почти все зависимости  $\ln\sigma(10^4/T)$  имеют характер, типичный для полупроводников или диэлектриков, и состоят из двух частей – низкотемпературной и высокотемпературной, причем точка перехода из одной области в другую с ростом содержания AlN сдвигается в область высоких температур. При комнатной температуре удельное сопротивление образцов керамики SiC-AlN с содержанием нитрида алюминия более 30 % составляло  $10^{13} - 10^{15}$  Ом·см, а заметная электропроводность наблюдалась лишь при  $T \geq 1100$  К. Были определены энергии активации в низкотемпературной и в высокотемпературной частях зависимостей  $\ln\sigma(10^4/T)$ . Для этого данные в соответствующих областях подвергались обработке методом наименьших квадратов. Экстраполированная к 0 К ширина запрещенной зоны чистого карбида кремния в области высоких температур  $\Delta E_{SiC}$  составила величину  $\sim 3,24$  эВ, а для образцов с содержанием нитрида алюминия 90 вес.%  $\Delta E_{SiC-AlN} - \approx 6$  эВ.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕРМЕТИКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*В.И.Неповинных, А.В.Терехин, А.М.Думанский*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Кремнийорганические герметики типа Виксинт У-2-28НТ и Виксинт У-1-18НТ широко применяются в качестве клеев-герметиков в конструкциях летательных аппаратов, где требуется обеспечить прочное соединение деталей из материалов, имеющих различный ТКЛР, и герметичность конструкций (головных обтекателей, вставок, окон), подвергающихся большим знакопеременным тепловым и механическим нагрузкам [1]. Учитывая высокие требования к сохраняемости свойств таких конструкций в процессе эксплуатации, понимание всего комплекса свойств герметика имеет большое значение.

Кремнийорганический герметик Виксинт У-2-28НТ представляет собой наполненный шитый полимер (полидиметилсилоксан), содержащий свободные гидроксильные группы. Известно, что в отвержденном состоянии герметик проявляет реологические свойства, то есть способность к течению и накоплению необратимых повреждений во времени при постоянной нагрузке [2, 3].

В настоящей работе представлена экспериментальная установка для исследований долговечности клеевых соединений на примере образцов металл-герметик-керамика в условиях нагрева и квазистационарного силового нагружения, близких к условиям работы герметика в конструкции головного обтекателя при проведении теплопрочностных испытаний. А также приведены результаты исследования реологических свойств герметика на примере двух партий образцов, изготовленных в разные периоды. Построены экспериментальные зависимости разрушающего герметик напряжения от времени его воздействия при заданных тепловых параметрах.

Исследования показали, что разрушение клеевого соединения происходит не сразу при достижении установленных значений теплосилового воздействия,

а с течением времени. То есть процесс разрушения герметика имеет свою длительность и в зависимости от параметров теплосилового воздействия может меняться от нескольких секунд до десятков минут.

В результате проведенных исследований установлено, что имеющиеся критерии разрушения герметика, основанные на понимании процесса разрушения как скачкообразного мгновенного события, (например, при испытаниях на определение предела прочности в разрывной машине), не полностью характеризуют прочностные свойства клеевого соединения, так как не учитывают реологические свойства герметика.

Таким образом, при работе герметика в конструкции ЛА (головного антенного обтекателя) отсутствие сведений о его реологических свойствах, а именно, зависимости долговечности от теплосиловых условий эксплуатации, может привести к потере его несущей способности и выходу из строя всей конструкции ЛА.

#### Литература

1. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания: Учебн. пособие / А.Г. Ромашин, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. – Харьков: Нац. Аэрокосм. Ун-т «Харьк. авиац. Ин-т», 2003. – 239 с.
2. Viscoelastic properties of polymers / Ferry John D. – TA455.P58F4,1980, ISBN 0-471-04894-1.
3. Реология полимеров / Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин – М.: «Химия», 1977.

### **ВЛИЯНИЕ РЯДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЯ КЕРАМИКИ И МЕТАЛЛА ГЕРМЕТИКОМ ТИПА ВИКСИНТ**

*Е.И.Суздальцев, Е.В.Миронова* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Долгое время на предприятии изготавливают изделия из керамических и металлических составных частей посредством соединения этих разнородных материалов клеем-герметиком Виксинт У-2-28(НТ) или Виксинт У-1-18(НТ). При этом для контроля качества сборки используют образцы-спутники, выполненные из технологических припусков сборочных деталей изделий. Но, несмотря на многолетний опыт использования указанных герметиков для склейки металла и керамики, до сих пор остаются открытыми некоторые вопросы, касающиеся влияния различных технологических факторов на прочность клеевого соединения при сдвиге.

В изготовлении образцов-спутников используются различные виды керамики, в зависимости от того, в каком материале выполнена керамическая часть изделия. На настоящий момент в основном используется стеклокерамика ОТМ-357 и кварцевая керамика НИАСИТ. Первая является беспористой, и поэтому не нуждается в дополнительном покрытии или пропитке в целях герметизации. Вторая – пористая и, как правило, для закрытия пор и увеличения прочности пропитывается кремнийорганической смолой МФСС-8 или ТМФТ с последующей термообработкой для полимеризации при температурах не

менее 250 °С. По действующей технологии пропитанные керамические призмы перед сборкой зачищают до удаления глянца, стеклокерамика дополнительной механической обработке не подвергается. Различия в характере разрушения образцов с использованием той или другой керамики не обнаруживается, во всех случаях при 20 °С разрыв происходит по герметику, то есть влияние вида керамики на адгезию не проявляется при использовании герметика Виксинт У-2-28НТ (или У-1-18НТ). Более того, в некоторых случаях есть необходимость сборки образцов из НИАСИТа без пропитки, то есть с пористостью от 7 до 11%, и на значениях прочности клеевого соединения, на характере разрушения это никаким образом не сказывается. Также эксперимент с различной степенью зачистки пропитанных образцов не показал существенного влияния. Таким образом, природа проявляющегося ослабления адгезионных сил между герметиком и подложкой не обусловлена типом используемой керамики.

Принято считать, что кремнийорганические клеи и герметики имеют низкую адгезию к подложкам, ввиду чего они требуют введения различных полярных модификаторов или использования специальных праймеров – подслоев. Согласно техническим условиям на Виксинт У-1-18(НТ) и Виксинт У-2-28(НТ) для обеспечения надежного адгезионного контакта рекомендуется использовать их вместе с подслоями холодной сушки П-9 и П-11, что в условиях производства изделий очень удобно. На снижение прочности клеевого соединения при сдвиге, связанное с частичным отрывом герметика от поверхности металла или керамики, может оказать влияние отсутствие подслоев. Для установления этого влияния и уточнения, какой из подслоев П-9 или П-11 оказывает решающую роль в адгезии, был проведен эксперимент и без нанесения обоих подслоев, и без нанесения одного из них, при этом в сборке применялся герметик У-2-28НТ. Главным критерием оценки влияния наличия подслоев на адгезию в рамках данного эксперимента был принят характер разрушения образцов при испытаниях.

По результатам эксперимента установлено, что при температурах от 20 до 300°С керамика проявляет малую чувствительность к наличию или отсутствию подслоев, но при 400°С отсутствие праймера становится более заметным. Металл же оказался более зависим от подслоев, особенно от наличия подслоя П-11. При температуре 300 °С все образцы не зависимо от того, нанесли подслоя или нет, обнаружили когезионный характер разрушения. Данный эффект может быть связан с тем, что при такой температуре проявляется собственная специфическая адгезия герметика. Возможно это связано с тем, что температура 300 °С является предельной для эксплуатации герметика Виксинт У-2-28НТ, то есть при её воздействии начинаются некоторые деструктивные процессы.

Проведенный эксперимент дает представление о возможности влияния человеческого фактора – случайного пропуска образца (или нескольких образцов) в ходе обработки всей партии подслоями – на исход испытаний образцов при паспортизации изделий. Грубейшее нарушение технологического процесса в виде пропуска операции нанесения подслоев может повлечь снижение адгезии, но данная ошибка не обязательно проявится на испытаниях образцов при 20 °С при паспортизации изделия и, судя по значениям прочности, полученным в рамках проведенного эксперимента, которые оказались не ниже требований ТУ на изделия, практически не может повлиять на итоговую величину предела

прочности клеевого соединения. Но представленные данные касаются только герметика Виксинт У-2-28НТ, для Виксинта У-1-18НТ по факту использования подслоя П-11 были получены совсем иные результаты. Испытания склеек показали, что адгезия в присутствии только подслоя П-9 сильно ухудшается, разрушение образцов происходило либо по керамике, либо по металлу, участков с когезионным характером разрушения не обнаружилось вовсе. При этом прочность клеевого соединения составила  $1,9 \pm 0,3$  МПа, что ниже требований ТУ к изделиям. Столь заметная разница в свойствах двух герметиков Виксинт У-2-28(НТ) и Виксинт У-1-18(НТ), прежде всего, связана с их составом. Этилгидридсилоксан, входящий в состав первого герметика, при приготовлении частично реагирует с катализатором, а часть его остается в объеме и на поверхности вулканизата. Непрореагировавшая часть участвует в формировании адгезионных связей и обеспечивает дополнительное сцепление герметика с подложкой. Именно присутствие ГКЖ делает возможным сборку с использованием герметика Виксинт У-2-28НТ без применения подслоя П-11. В свою очередь, использование герметика Виксинт У-1-18НТ без подслоя П-11 оказывается невозможным.

Для большинства изделий, выполненных из кварцевой пористой керамики, предусмотрены такие операции, как сушка перед нанесением ВЗП (влагозащитного покрытия) и термообработка изделия после его нанесения. Режим тепловой обработки обычно составляет 2-4 часа при температуре от 75 до 100 °С. Поэтому часто образцы-спутники к изделию, склеенные герметиком, также подвергаются сушке. Проведение этой операции способно ускорить процесс вулканизации герметика. Однако опыт показывает, что при высоком качестве компонентов герметика, при соблюдении технологии приготовления и при хорошем исполнении сборки улучшения прочности герметика или незначительны или отсутствуют и нет необходимости вносить подобную операцию повсеместно.

Так же, исследования влияния различных факторов показали, что какой-либо зависимости между значением прочности при сдвиге ( $\tau_{сдв}$ ) от длительности выдержки не обнаруживается. Все значения прочности, полученные после выдержки образцов до испытаний в течение 3, 5, 10, 20 и 30 суток, достаточно близки и отличаются друг от друга не более чем на 10-15%, что входит в обычную погрешность результатов испытаний.

Кроме вышеизложенного, были проведены эксперименты, направленные на обнаружение влияния температуры и влажности на прочность клеевого соединения металла и керамики, которые показали, что влажность от 14 до 80 % и температура от 17 до 30°С не оказывают какого-либо значимого влияния на конечную прочность клеевого соединения.

Из представленного выше, можно сделать заключение, что все рассмотренные технологические факторы, за исключением нанесения подслоев П-9 и П-11, не играют решающей роли в получении надежного клеевого соединения металла и керамики. Наличие же подслоев является необходимым условием для обеспечения хорошей адгезии герметика к подложкам, но не нанесение подслоя на образцы не обязательно ведет к заметному при 20°С ухудшению адгезии и при паспортизации изделий может не проявиться.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ НАГРЕВЕ**

*В.С.Райлян, Д.В.Алексеев, В.И.Фокин, Т.М.Храновская, Г.И.Куликова, Р.М.Гусев*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Стандартная методика определения термостойкости конструкционных керамических и стеклообразных материалов, выполненная в соответствии с рекомендациями ГОСТ 11103-85, не позволяет получить объективную информацию о стойкости материала к одностороннему нагреву. Под термостойкостью, согласно данной методике, понимается максимальный температурный перепад, выдерживаемый образцом из исследуемого материала без разрушения. Метод основан на быстром охлаждении в воде равномерно нагретого образца, при этом температурный перепад определяется разностью температур в печи и охлаждающей воды. В процессе реальной эксплуатации элементы конструкции ЛА подвергаются одностороннему нагреву, и корректней, по мнению авторов, оценивать термостойкость именно при одностороннем нагреве, а под термостойкостью понимать температурный градиент по толщине образца, при котором возникают трещины.

В данной работе приведен сравнительный анализ стандартной и предлагаемой методики определения термостойкости. Представлены результаты экспериментальных исследований термостойкости образцов из различных керамических материалов при одностороннем нагреве. Нагрев образца осуществляется на установке контактного нагрева (собственной разработки) за счёт контакта поверхности образца с телом накала. Телом накала служит гибкий токопроводящий материал с высоким удельным электрическим сопротивлением (ткань углеродная, ткань графитированная, фольга вольфрамовая, фольга молибденовая и др.).

Результаты экспериментальных исследований позволили отобрать материал для головной части (обтекателя) перспективного ЛА.

## **СПОСОБ ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ КОНТАКТНЫМИ НАГРЕВАТЕЛЯМИ**

*В.С.Райлян, Д.В.Алексеев, В.И.Фокин*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Получившие наибольшее распространение средства теплопрочностных испытаний конструкций летательных аппаратов (ЛА) – установки инфракрасного нагрева [1], имеют один существенный недостаток. При одновременном воспроизведении теплового и силового воздействий наблюдается сильное искажение температурного поля на наружной поверхности конструкции ЛА из-за того, что устройства силового нагружения вводятся в зону нагрева. Погрешность

воспроизведения температурного поля на наружной поверхности конструкции ЛА может достигать 90 %.

Альтернативой инфракрасному нагреву может стать контактный метод нагрева [2...4]. Сущность метода заключается в том, что нагрев наружной поверхности изделия происходит за счёт контакта с телом накала. Телом накала может служить гибкий токопроводящий материал с высоким удельным электрическим сопротивлением (ткань углеродная, ткань графитированная, фольга вольфрамовая, фольга молибденовая и др.). Преимуществом контактного метода нагрева является возможность приложения силовой нагрузки поверх нагревателя (через слой теплоизоляции). В этом случае устройства силового нагружения не экранируют нагреватель и не искажают температурное поле по наружной поверхности конструкции ЛА. Для выявления условий работы контактного нагревателя была разработана математическая модель воспроизведения аэродинамического нагрева конструкции ЛА.

В данной работе авторы приводят теоретическое обоснование возможности воспроизведения аэродинамического нагрева конструкций ЛА из неметаллических материалов в диапазоне температур от 300 до 1500 К.

На основе математической модели выбраны электропроводящие материалы, которые могут быть использованы для практического воспроизведения аэродинамического нагрева. Наилучшие результаты получены на нагревателе из ткани графитированной ТГН-2М.

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать однозначный вывод – контактными нагревателями из тканых токопроводящих материалов можно воспроизводить аэродинамический нагрев конструкций ЛА из неметаллических материалов.

#### Литература

1. Баранов, А. Н. Статические испытания на прочность сверхзвуковых самолётов / А. Н. Баранов. – М. : Машиностроение, 1974. – 344 с.
2. Пат. 2456568 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 M 9/04, G 01 N 25/72. Способ теплового нагружения обтекателей ракет из неметаллических материалов / В. С. Райлян, М. Ю. Русин, С. В. Резник, Д. В. Алексеев, В. И. Фокин ; заявитель и патентообладатель ОАО «ОНПП «Технология». - № 2011106866/28 ; заявл. 22.02.11 ; опубл. 20.07.12, Бюл. № 20. – 4 с. : ил.
3. Райлян, В. С. Методика теплопрочностных испытаний элементов летательных аппаратов с перфорированной стенкой / В. С. Райлян, Д. В. Алексеев, В. И. Фокин // Авиационная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 43 – 45.
4. Райлян, В. С. Моделирование теплопрочностных испытаний с помощью контактных нагревателей / В. С. Райлян, Д. В. Алексеев, В. И. Фокин // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: тезисы докладов науч.- тех. конф.– Обнинск: 2010. – С. 129 – 130.

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОРАБОТКИ ВНУТРЕННЕГО СОЕДИНИТЕЛЬНОГО ШПАНГОУТА ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ РАДИОПРОЗРАЧНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛА**

*М.В.Васюков, Д.А.Рогов, С.И.Латыш, С.Б.Воробьев, А.Н.Прасолов*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

К обтекателям антенн летательных аппаратов предъявляется сложный комплекс различных требований. Особенно сильному воздействию обтекатели подвергаются во время скоростного полета (работы) летательного аппарата в плотных слоях атмосферы, во время которого условия нагружения как по температуре, так и по силовым факторам достигают своих предельных максимальных значений.

Несущая способность обтекателя в основном определяется сохранением целостности его оболочки, в большинстве случаев изготавливаемой из радиопрозрачных неметаллических материалов, например, керамики (кварцевой, стеклокерамики, нитридной, алюмоксидной и т.д.). Главным недостатком подобных материалов является их повышенная хрупкость и в некоторых случаях низкая прочность на растяжение.

Одним из конструкторских решений по снижению величины распора при прогреве внутреннего металлического шпангоута с большим (по сравнению с керамикой) КТЛР является снижение его жесткости в области склейки с оболочкой. Главными элементами снижения жесткости шпангоута в окружном направлении являются продольные прорезы, позволяющие материалу шпангоута свободно расширяться в окружном направлении без стеснения деформаций, и, следовательно, без изменения своего поперечного круглого сечения в радиальном направлении. Величина максимальных растягивающих напряжений в керамике определяется количеством прорезей, протяженностью зоны склейки без прорезей (при наличии такой зоны), а также расстоянием от края прорезей до керамики. Величина максимальных растягивающих напряжений в керамике в окружном направлении не может быть ниже меридиональных напряжений от растяжения шпангоутом через клеевой подслои и в основном определяется упругими характеристиками клея-герметика.

Напряжения в «обжатых» областях герметика при всех прочих равных условиях сдавливания – перемещениях металла и керамики, определяются упругими характеристиками самого герметика, толщиной клеевой прослойки, а также параметрами перфорации – диаметром отверстий и их взаимным расположением.

Целью данной работы являлось определение напряженно-деформированного состояния узла заделки оболочки радиопрозрачного головного обтекателя ракеты класса воздух-воздух при применении доработки в виде продольных прорезей и напуска (зазора между оболочкой и шпангоутом в торцевой части) металлического шпангоута. Пример типовой конструкции шпангоута показан на рис. 1.

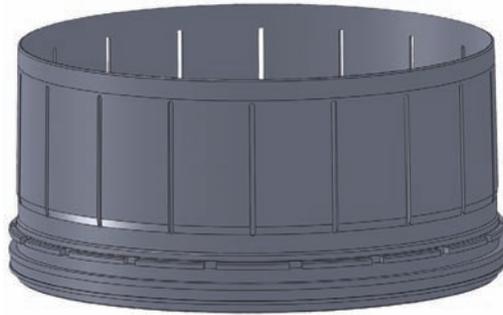


Рис. 1. Шпангоут с продольными прорезями полки в зоне склейки

Показаны зависимости значений растягивающих напряжений в кварцевой керамике от различных типов доработки внутреннего шпангоута. В работе рассматривался наиболее напряженный режим работы изделия с максимальными прогревами конструкций (температура шпангоута достигает 250-330°C) и максимальным уровнем силового воздействия.

Расчет выполнен с помощью конечно-элементного метода с учетом всех теплофизических и механических свойств материалов, применяемых в конструкции. Принципиальная расчетная схема показана на рис. 2.

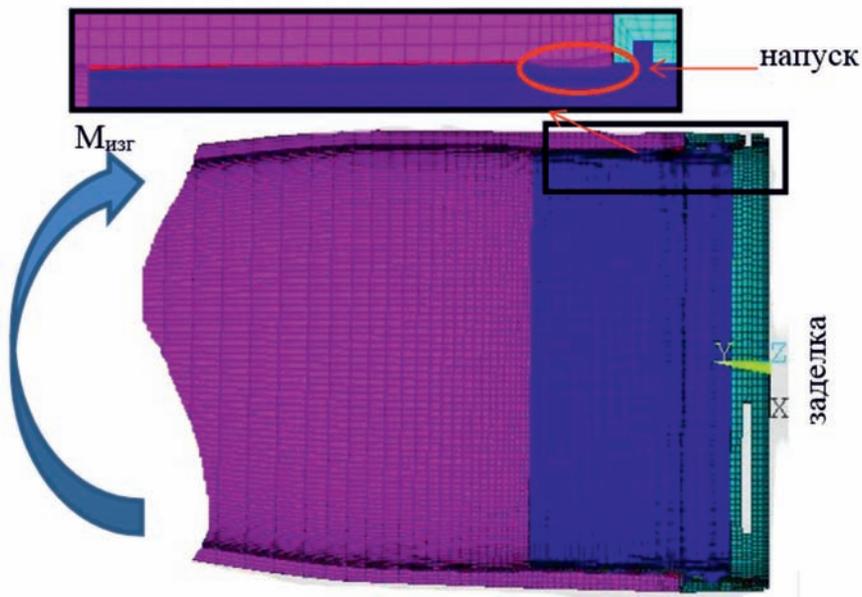


Рис. 2. Деформированное состояние конструкции узла заделки при воздействии изгибающего момента (увеличено)

Выполнена оценка влияния конструктивных элементов (величина напуска, длина проточки шпангоута, расположение паза под упорные клинья) на величину максимальных растягивающих напряжений в керамической оболочке, реализуемых на режиме. Сравнительные результаты расчетов представлены в табл.

Зависимость максимальных растягивающих напряжений в оболочке от типа конструкции внутреннего инварового шпангоута с прорезями

Паз в титановом шпаноте	Максимальные растягивающие напряжения в керамике, МПа						
	Напуск в торце оболочки	Длина проточки внутренней поверхности шпангоута (от торца оболочки), мм					
На стороне растяжения		0	5	8	11	60	80
	Без напуска	23.35	23.3	23.23	23.11	23.14	23.26
	Напуск 11мм	14.24	14.27	14.28	14.3	14.27	13.5
На стороне сжатия							
	Без напуска	24.58	24.5	24.44	24.32	24.19	24.2
	Напуск 11мм	16.47	16.49	16.5	16.53	16.43	15.6

На основании расчетных данных сделан вывод о возможном снижении напряжений по сравнению с первоначальными вариантами конструкций при имеющихся типах доработки внутреннего штатного шпангоута без изменения его заготовки.

## НИТРИД БОРА ГЕКСАГОНАЛЬНЫЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ

*А.С. Нечепуренко, О.Ф. Гарипов, Ю.Я. Ласыченков*

(ОАО «Уральский научно-исследовательский химический институт с опытным заводом», г. Екатеринбург, Россия)

Нитрид бора гексагональной структуры в силу своих физических свойств (высокой температуры диссоциации, диэлектрических свойств, высокой теплопроводности, низкого коэффициента трения, способности поглощать тепловые нейтроны) и химических свойств (инертности к расплавам многих металлов и стекол, стойкости в кислотах, высокой температуры окисления) находит широкое применение во многих отраслях современной промышленности. Однако его применение может быть еще более разнообразным при расширении только таких характеристик, как дисперсность первичных частиц-зерен и степень упорядоченности кристаллической решетки.

В данной работе представлены результаты исследований по получению порошков нитрида бора гексагонального (ГНБ) с размером первичных частиц от 0,04 до 18 мкм и индекса графитизации “g” от 1,4 до 100 и более (аморфная структура).

В результате исследований на ОАО «УНИХИМ с ОЗ» были получены порошки ГНБ по карбамидной, карботермической и меламиновой технологиям. Основные характеристики образцов гексагонального нитрида бора, полученные по различным технологиям, представлены в табл.

Характеристики ГНБ, полученного по разным технологиям

Наименование показателей	Способ получения		
	Карботермический	Карбамидный	Меламиновый НГНБ
Массовое содержание BN, %,	97–98	97–98	97–98,0
Массовое содержание $B_2O_3$ ,	0,1–0,2	0,1–0,3	0,2–0,3
Массовое содержание С, %, не более	0,33	0,3	0,3
Индекс графитации, «g», ед	1,4–1,7	1,6–100	3–30
Размер кристаллитов, мкм	5–18	1–7	0,04–0,2
Форма частиц	Диск (гексагон)	Конгломераты из дисков	Усы

Нитрид бора гексагональной структуры является одним из самых перспективных материалов, используемых в качестве наполнителя для получения теплопроводных (теплоотводящих) керамики, компаундов, высокотемпературных клеев и высокопластичных клеящих прокладок, обладающих теплопроводностью на уровне 1 Вт/м.град и работающих при температурах от минус 40 до плюс 125 °С с минимальным газовыделением. Так, гексагональный нитрид бора с упорядоченной кристаллической решеткой (индексом графитации «g» менее 1,7), большим размером первичных кристаллов (7–10 мкм) остро востребован в авиационной промышленности для изготовления «легкоизнашиваемых» (мягких) уплотнительных покрытий (АНБ, АЛК) при создании и ремонте многих авиационных двигателей.

Поскольку теплопроводность порошков нитрида бора возрастает с ростом первичных частиц (кристаллов), по карботермической технологии были получены порошки нитрида бора со средним размером частиц (D50) более 10 мкм (рис.1).

По «меламиновой» технологии был получен «наноструктурированный» гексагональный нитрид бора с разупорядоченной структурой (индекс графитации «g» в пределах 3–30 ед.). Частицы этого материала имеют вид иголок-усов диаметром 5–25 мкм и длиной 60–100 мкм, состоящих из хаотично спеченных, но радиально размещенных от центра волокна нанокристаллов в виде лепестков – первичных кристаллитов, имеющих вид плоских гексагонов с толщиной 20–60 нм и диаметром 200–400 нм (Рис.2) .

Наноструктурированный гексагональный нитрид бора (НГНБ), получаемый по меламиновой технологии, является перспективным материалом для синтеза кубического нитрида бора и высокотемпературных композиционных материалов.

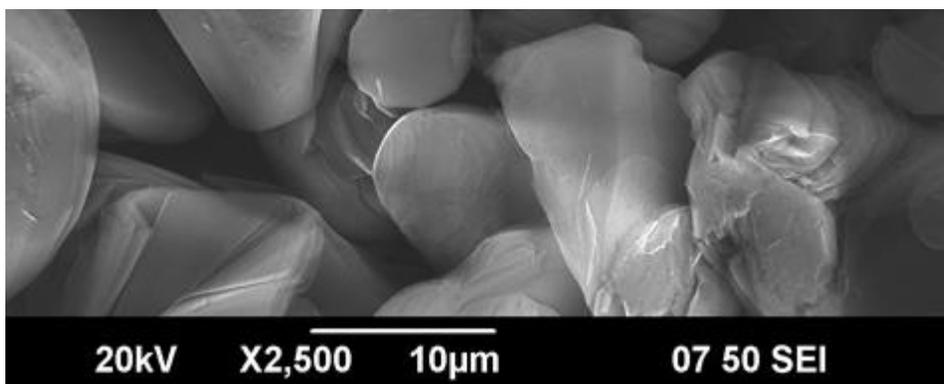


Рис.1. Микроструктура «крупнозернистого» ГНБ (ГНБ-СК-2), полученного по карботермической технологии

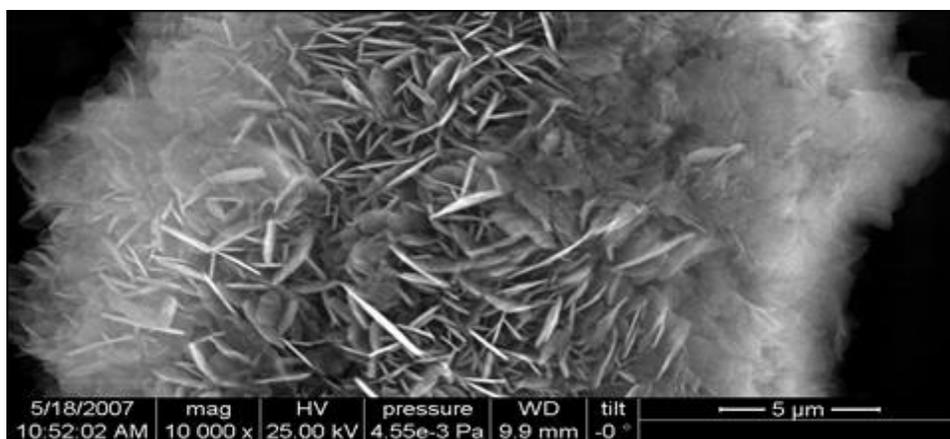


Рис.2. Микроструктура «наноструктурного» нитрида бора, полученного по меламиновой технологии

В результате исследований получены порошки ГНБ, которые могут быть использованы для производства «легкоизнашиваемых» уплотнительных конструкций (АБН, АЛК) в авиационном моторостроении, теплопроводящих материалов (пленок) и высокотемпературных клеев (ВК-9) для электроники, контейнеров для захоронения радиоактивных отходов, антиадгезионных покрытий в металлургии, для получения кубического нитрида бора и горячепрессованных изделий, применяемых в качестве высокотемпературных химически устойчивых и диэлектрических материалов в различных областях техники.

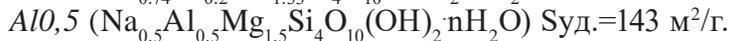
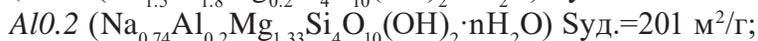
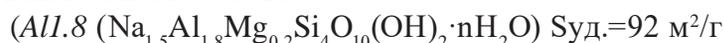
# СИНТЕЗ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО НАНОСОРБЕНТА ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТОВ СО СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

*М.П.Дякина* (Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия)

Защита водных ресурсов от загрязнения, в том числе очистка производственных сточных вод – одна из наиболее важных задач современности. Основными источниками загрязнения водных ресурсов тяжелыми металлами являются предприятия черной и цветной металлургии, машиностроения. Известно, что тяжелые металлы вызывают такие болезни, как повреждение нервной системы, раковые заболевания и ряд других. Среди методов, традиционно используемых для удаления катионов таких металлов, наиболее широко распространен сорбционный.

Алюмосиликаты со слоистой структурой, обладающие такими воспроизводимыми свойствами, как развитая удельная поверхность, регулярное распределение микропор, термическая стабильность и наличие активных центров различной природы, являются перспективными пористыми материалами для применения в адсорбционных процессах.

В лаборатории исследования наноструктур ИХС РАН был успешно разработан метод гидротермального синтеза для получения соединений со структурой монтмориллонита. Гидротермальной обработке подвергали гели, состав которых рассчитывали, исходя из идеальной формулы конечного продукта, имеющей следующий вид:  $\text{Na}_x(\text{Al}, \text{Mg})_{2-3}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Дефицит поверхностного заряда  $x$  варьировали от 0 до 1,9. Постепенное замещение части магния на алюминий в исходном геле, подвергнутом гидротермальной обработке, позволило получить образцы, характеризующиеся определенными, зависящими от состава, характеристиками. Средний размер частиц монтмориллонитов, определенный по данным рентгеновской дифракции, составляет  $40 \pm 7$  нм. Для синтезированных образцов величина удельной поверхности находится в диапазоне от 90 до 200 м<sup>2</sup>/г в зависимости от состава



Электронно-микроскопические исследования показали, что синтезированные образцы представляют собой тонкие пластинки, которые можно охарактеризовать как “нанолепестки” или “наночешуйки”, часть которых свернута в трубки. Несмотря на то, что возможность искривления слоистых структур была отмечена еще в 1930 г. Полингом, для природных монтмориллонитов до сих пор не отмечалось нанотрубчатой морфологии.

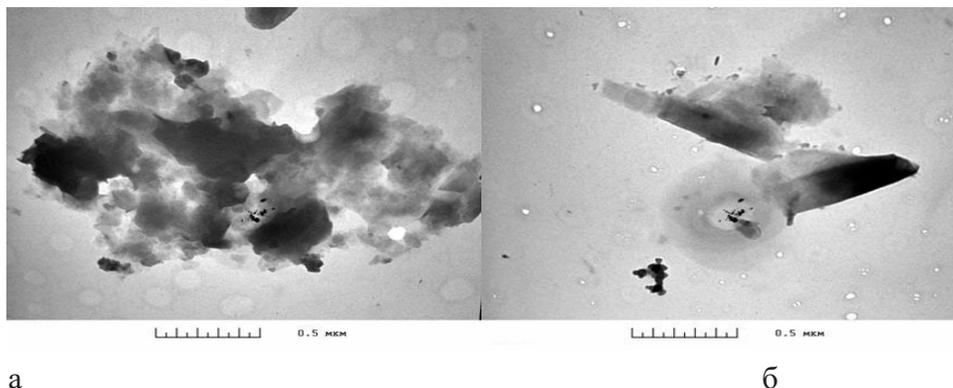


Рис. Морфология синтезированных образцов состава  $\text{Na}_{1.5}\text{Al}_{1.8}\text{Mg}_{0.2}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (Al 1,8) по данным электронной микроскопии: а – нанолепестки; б – нанотрубки

Величина межслоевого расстояния синтезированных образцов в зависимости от состава находится в пределах от 0,9 до 1,2 нм, катионно-обменная емкость – от 20 до 120 мг-экв./100 г.

В работе была оценена активность образцов при сорбции тяжелых металлов из их водных растворов. Сорбцию ионов металлов проводили из модельных растворов нитрата свинца (II) с начальной концентрацией ионов металлов 0,1 ммоль/дм<sup>3</sup> при соотношении 0,2 г монтмориллонита на 30 дм<sup>3</sup> раствора. Образец Al 0,2 ( $\text{Na}_{0.74}\text{Al}_{0.2}\text{Mg}_{1.33}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) сорбирует свинец лучше образцов других составов, что может быть связано с большой величиной его удельной поверхности, а также с особенностями его структуры и морфологии, подтверждаемыми данными электронной микроскопии и ядерного магнитного резонанса. Для синтезированных образцов была исследована кинетика сорбции ионов свинца из раствора. Образец сорбирует максимальное количество свинца уже через 0,5 часа после начала опыта.

Исследуемые образцы сорбируют тяжелые металлы в значительных количествах, что позволяет считать их перспективными для очистки сточных вод, водоемов от загрязнений тяжелых металлов. Учитывая, что синтезированные образцы обладают разными структурными характеристиками, разной удельной поверхностью, а следовательно, и сорбционными свойствами, что позволяет разработать на их основе сорбционные материалы с оптимальными характеристиками. Необходимо отметить, что синтезированные образцы, в результате сравнения оказались лучше, чем природный образец монтмориллонит – за 0,5 часа синтезированные образцы полностью очищают воду от таких металлов как  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cs}^+$ .

Сфера их использования должна заключаться в извлечении редких металлов из растворов, а также в использовании их в качестве сорбентов и носителей в изделиях специальной техники и для очистки сточных вод, а также в качестве материалов для создания фильтров.

## ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОКСИДНЫХ СИСТЕМ, СХЕМЫ И МЕХАНИЗМЫ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОРИСТЫХ СРЕД

*В.Т.Шмурадко, О.В.Роман, Л.В.Судник, Е.Е.Петюшик, Н.В.Киришина*

(Обособленное хозяйственное структурное подразделение “Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством” Государственного научного учреждения “Институт порошковой металлургии”, г. Минск, Республика Беларусь)

Методы и способы взрывного воздействия на пористую среду, а также их схемы, устройства и соответствующие им механизмы ударно-волнового нагружения, представляют собой интегрированную систему и инструмент по переводу порошковых сред в различные термодинамические уровни и структурно-фазовые состояния при помощи ударных волн. Одним из наиболее эффективных методов, способов и схем по изучению поведения керамических порошковых сред при высоких (1-30 ГПа) и повышенных давлениях (до 50 ГПа и более) считается метод взрывного нагружения ударными волнами при помощи осесимметричной (ампульной) схемы кольцевыми зарядами БВВ различной мощности.

Целью данного исследования является оптимизация высокоэнергетических модульных схем импульсного нагружения пористых сред, обеспечивающих получение материалов с прогнозируемой структурой и уровнем свойств.

На рис. представлены усовершенствованные и наиболее энергетически эффективные (по КПД взрыва, длительности импульса) схемы осесимметричного прессования [1], структурное строение которых позволяет более гибко управлять механизмом нагружения пористых сред и его динамическими ударно-волновыми параметрами по сравнению с известными [2].

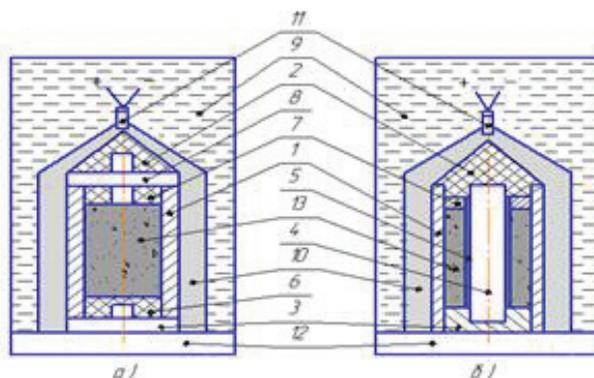


Рис. Схемы взрывного прессования осесимметричных цилиндрических заготовок в жидкой ПС-воде: а) схема взрывного прессования монолитных заготовок; б) схема взрывного прессования полых заготовок.

1 – диафрагма кольцевая; 2 – эластичный конус; 3 – диск центрирующий; 4 – сердечник; 5 – покрытие; 6, 7 – центрирующие кольца; 8 – разделительная диафрагма; 9 – жидкая передающая среда (ПС); 10 – заряд БВВ; 11 – электродетонатор; 12 – плита; 13 – порошок

Основные стадии процесса и механизмы структурообразования при УВ-нагрузении реализуются через детонацию заряда БВВ с образованием продуктов детонации (ПД) и фронтальной цилиндрической детонационной волны, которая, трансформируясь, преломляется и переходит на границах раздела ПД – диафрагма – порошковый материал в УВ – деформации металлической диафрагмы и УВ – нагружения и обработки пористой среды. Основными факторами, определяющими механизмы и уровни структурных преобразований в исследуемых порошковых средах (при помощи УВ-нагружения), являются энергетическая мощность бризантного ВВ (его теплотворная способность и скорость детонации), а также максимальная пропускная энергетическая способность применяемых схем и конструкций устройств, обеспечивающих минимум энергосиловых потерь на границах раздела при трансформации волны детонации в УВ прессовании порошка.

В качестве исходных пористых сред применялись порошки глинозема ( $\gamma$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и корунда ( $\alpha$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) микронного размера, модифицированные 1 % ультрадисперсного порошка (УДП)  $\text{MgO}$  с размером частиц менее 0,2-0,3 мкм. На их основе разработано два композиционных состава: №1 – 99 %  $\gamma$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 1%  $\text{MgO}$  и №2 – 9 %  $\gamma$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 90 %  $\alpha$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 1%  $\text{MgO}$ . Первый состав использовался для изучения  $\gamma$  –  $\alpha$  перехода в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и условий синтеза шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  – твердого раствора  $\text{MgO}$  в  $\gamma$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при УВ-нагружении, с одной стороны, и его поведения при последующей тепловой обработке и спекании – с другой. Фазовый состав №2 формировался как конструкционный материал триботехнического назначения. Присутствие в нем 9 %  $\gamma$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  выполняло роль керамической связки для  $\alpha$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а наличие 1 %  $\text{MgO}$  – ограничивало при спекании рекристаллизацию и рост поликристаллов в керамической системе.

Формирование шихтовых композиций выполнялось в керамическом аттриторе А-5 со скоростью вращения импеллера 270 об/мин в режиме жидкостного размола в водном растворе  $\text{HCl}$  и рН дисперсионной системы 1-3. При этом протекала трибохимическая обработка порошковых систем; на их основе формировались высоконцентрированные вяжущие суспензии (ВКВС), состоящие из наноразмерных зольей ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ), включая микронные, субмикронные частицы оксидов  $\text{Al}$ ,  $\text{Mg}$  с аморфизированной поверхностью идентичного состава. В суспензии вводился 1 %-ный раствор поливинилового спирта, которые сушились до влажности 7-9 %, затем гранулировались до размера конгломератов менее 0,316. Из полученных гранул при давлении 150 МПа прессовались таблетки  $\varnothing$  15 мм и  $h = 15$  мм, из которых повторной сушкой удалялась остаточная конституционная и химически связанная вода. Образцы устанавливались по 7 штук в кольцевую диафрагму устройства (рис.). Подготовленные ампулы размещались в кольцевые заряды из аммонита № 6ЖВ с плотностью  $\rho_{\text{вв}} = 0,7-1,2$  г/см<sup>3</sup>. Прессование выполнялось в ампулах из стали 3 с внутренним диаметром  $\varnothing$ 15 мм, наружным  $\varnothing$ 21 мм.

Для состава №1: кажущаяся плотность исходных образцов из порошка  $\gamma$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с 1 %  $\text{MgO}$  перед УВ нагружением составляла 2,03 г/см<sup>3</sup> (относительная ~56 %); после УВ-обработки – (3,35-3,5) г/см<sup>3</sup>; относительная плотность 91-96 %; согласно РФА и МРСА в материале обнаружены новые фазы в форме  $\alpha$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и

следы твердых растворов MgO в  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  – алюмомагниевого шпинели ( $\text{Al}_2\text{MgO}_4$ ); при давлениях нагружения 4,8 – 9,8 ГПа количественное содержание  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  в прессовках увеличивалось по радиусу – косицилиндрической прессовки и составило ~ 0,5-1,2 %; количественный рост  $\alpha$ -фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в радиальном направлении к оси образцов можно объяснить ростом импульса давлений и температуры прессовки в этом же направлении, за счет сходящейся цилиндрической УВ. Следует отметить, что основными факторами начала фазового перехода  $\gamma$  –  $\alpha$  при спекании  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  являются температура, давление и присутствие других фаз  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{AlCl}_3$  между кристаллами и на поверхности  $\gamma$ -поликристаллов. Практически то же происходит при взрыве. В области высоких давлений создаются необходимые температурные условия для  $\gamma$  –  $\alpha$  перехода, которые активируются ударно-волновым нагружением и самоиндентированием частиц, с одной стороны, и присутствием на поверхности частиц поликристаллов фаз-катализаторов ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ , MgO,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ), снижающих температуру образования  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  – с другой.

В состав №2 входил  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пикнометрической плотностью  $\rho = 4,1$  г/см<sup>3</sup>, что относит его к корунду и является стабильной формой глинозема. В беспористом состоянии плотность состава (9 %  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 90 %  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 1 % MgO) равнялась 4,06 г/см<sup>3</sup>. Кажущаяся и относительная плотность статически спрессованных таблеток ( $\varnothing$  15 мм, h = 15 мм) соответствовала 2,35 г/см<sup>3</sup> и 68 %, а после УВ-обработки при 4,8-9,8 ГПа – 3,73-3,93 г/см<sup>3</sup> и 92-97 %, соответственно. Обнаруженная при этом алюмомагниевого шпинель ( $\text{Al}_2\text{MgO}_4$ ) располагалась в основном на границах и местах стыка поликристаллов  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Это можно объяснить с позиций топохимических реакций, протекающих на поверхности поликристаллов  $\alpha$ -и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , MgO и их аморфизации при размоле, где образуются как гидроксиды, так и хлориды Al и Mg в процессе жидкостной трибохимической обработки в аттриторе. Сформировавшиеся, таким образом, метастабильные фазы на поверхности поликристаллов снизили их поверхностные энергетические и, в первую очередь, тем самым снизив температурные уровни для процессов и механизмов образования твердых растворов ( $\text{Al}_2\text{MgO}_4$ ) при УВ-нагружении.

После УВ обработки получены следующие свойства не спеченного материала. Для состава №1:  $\rho = 3,35$ – $3,5$  г/см<sup>3</sup>;  $\sigma_{\text{сж.}} = 117,6$ – $133,8$  МПа,  $\sigma_{\text{изг.}} = 33,5$ – $39,7$  МПа; для состава №2:  $\rho = 3,8$ – $3,93$  г/см<sup>3</sup>;  $\sigma_{\text{сж.}} = 102,0$ – $119,7$  МПа,  $\sigma_{\text{изг.}} = 27,3$ – $33,9$  МПа. Разницу в прочностных свойствах составов №1 и №2 можно объяснить энергиями поверхностного состояния частиц  $\gamma$  и  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , включающие покрытия из аморфно-молекулярных и наноразмерных формирований, состоящих из мономеров хлоридов и гидроксидов Al и Mg, которые при УВ-нагружении уплотняются и, сближаясь до критических расстояний, полимеризуются, образуя химические связи на уровне диоловых мостиков, связывающих ионы металла (Al и Mg).

**Заключение.** На базе разработанных схем и устройств проведены исследования поведения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при УВ-нагружении. Установлены диапазоны ударно-волновых нагрузок, вызывающие фазовые ( $\gamma$  –  $\alpha$ )-переходы в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и образование алюмомагниевого шпинели  $\text{Al}_2\text{MgO}_4$ . Проведен анализ УВ - процессов и установлены механизмы, вызывающие структурные каталитические превращения в строении оксида алюминия.

## Литература

1. Разработка теоретической закономерности и технологии высокоэнергетического импульсного формования многослойных порошковых материалов на основе оксидных и нитридных соединений для создания высокоэффективных керамических изделий : отчет о НИР (промежут.) / ОХП «НИИ ИП с ОП»; рук. Роман О.В.; исполн.: Шмурадко В.Т. [и др.] – Минск, 2009. – 46 с. – Библиогр.: с. 45-46. - № ГР 2006893.

2. Горобцов, В. Г. Разработка и внедрение процессов импульсного нагружения для получения порошковых и композиционных материалов: дис. ... д-р техн. наук: защищена 05.10.86: утв. 24.12.86 / Горобцов Валерий Георгиевич.- Минск, 1986. - 265 с. – Библиогр.: с.240 – 265.

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КЕРАМИКИ ПУТЕМ ЭКСТРУЗИИ**

*Е.А.Гончаренко, У.Ш.Шаяхметов, А.Р.Мурзакова, Р.М.Халиков*

(Башкирский государственный университет, г. Уфа, Россия)

Инновационное производство требует разработки новых подходов к конструированию трубчатых изделий из композиционной нанокерамики. Композиты в технологии изготовления трубок должны сочетать оптимальное значение коэффициента термического расширения и высокой прочности материала. Процессы формирования структуры керамических трубок определяются исходным составом заготовки и механизмами фазовых новообразований.

Цель данной работы – исследование физико-химических процессов при разработке технологии трубчатых изделий из наноструктурированных керамических композиционных масс путем экструзии.

Перемешиванием тонкомолотых компонентов со связующим получали гомогенную пластическую массу. В зависимости от технических условий на трубчатое изделие к полученной массе добавляли различные виды керамических наполнителей. Формование изделий проводили на экструдере с усилием до 250 тн. Методом экструзии под давлением до 200 МПа (обычно 110 МПа) изготавливали керамические трубки. В дальнейшем полученные трубки подвергали термообработке. В процессе сушки (при комнатной температуре в течение 12-24 ч; в сушилках при температуре 100-150°C – 12 ч; при температуре 350-400°C – 5 ч) происходит удаление влаги из материала, незначительная усадка, увеличение прочности. Для формирования прочностных и огнеупорных свойств трубчатые изделия подвергали обжигу при температуре 700-1200°C.

Для сохранения наноструктуры компакта перед спеканием необходимо было предотвратить пластическую деформацию наночастиц порошкового компонента в процессе прессования, т.е. прессуя порошок в условиях упругих контактов частиц. При нагревании отвержденных композиций протекают различные процессы, связанные с их деформацией: термическое расширение частиц наполнителя, новообразование фаз, усадка изделия вследствие удаления гидратационной воды. Привлечение фрактальной концепции в раскрытии процессов твердения и золь-гель переходов в

дисперсных системах оказалось эффективным подходом при формировании физико-технических свойств. При повторном нагревании термические деформации имели другие значения, так как изменяются количественное соотношение одной или нескольких кристаллических фаз, аморфной (стекловидной) фазы и пор. Некоторые компоненты нанокompозиций при 1000-1200°C переходят из кристаллического состояния в жидкую фазу: формирование в огнеупорных композитах жидкой фазы при этих температурах желательно, так как ускоряет спекание композита и повышает тем самым его прочность.

Преобладание химического или адгезионного взаимодействия определялось химическим и фазовым составом нанокompозиции и наносвязующего. Одной из особенностей наноструктурированных композиций, обусловившей их широкое применение – это способность образовывать твердофазные структуры при относительно невысоких температурах и сохранять прочностные характеристики при нагревании до высоких температур в процессе эксплуатации.

Таким образом, разработана технология изготовления трубчатых изделий из наноструктурированных керамических композиций методом экструзии.

Работа выполнена в рамках выполнения проекта «Разработка образовательных программ ФИОП РОСНАНО».

## **ПОЛУЧЕНИЕ НАНОКОМПОЗИТНОГО АНОДА ТОТЭ В СИСТЕМЕ NiO - ZrO<sub>2</sub>**

*М.А.Майзик, Е.А.Кораблева, М.Ю.Русин, Н.Н.Саванина*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Одним из основных направлений создания электрохимических устройств типа ТОТЭ является создание элементов с пониженной температурой эксплуатации (600-800°C). Это возможно с применением твердого электролита в виде тонких пленок (30-40 мкм). При этом в качестве несущего слоя применяется анод (NiO- YSZ) или катод (LSM).

В работе представлены результаты по разработке ТОТЭ на основе пленочного электролита с несущим анодом.

Пленки из композиционного материала (КМ) на основе оксида никеля с диоксидом циркония должны иметь открытую пористость 30-35% и достаточный уровень прочностных свойств. Прочность пленки пористого анода из КМ необходима для выполнения функции несущей конструкции, на которую наносится покрытие твердого электролита из диоксида циркония.

Ионопроводящие материалы в системе ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по фазовому составу и техническому применению делятся на 3 группы: тетрагональные поликристаллические материалы в международной классификации Y-TZP; частично стабилизированные Y-PSZ; полностью стабилизированные с содержанием Y-FSZ.

Методом пленочного литья получены образцы композиционного материала составов, представленных в таблице. На эти образцы методом трафаретной

печати нанесен слой твердого электролита.

Исследованы особенности спекания и физические свойства композиционного материала на основе NiO-YSZ в зависимости от мольного содержания оксида иттрия в YSZ.

Таблица

№ эксперимента	Состав	h, мкм	T <sub>мах</sub> , °C (выдержка, ч)	ρ, г/см <sup>3</sup>	П откр, %	Сохранение целостности
1	NiO-FSZ (10мол%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	300	1450(3)	4,034	35,6	Разрушение под подложкой во время спекания
			1500(2)	4,58	31,4	Разрушение
			1600(1)	4,69	30,4	Разрушение
2	NiO-FSZ (8мол%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	300	1450(3)	4,02	35,63	Разрушение под подложкой во время спекания
			1500(2)	4,23	33,0	Хрупкая
			1600(1)	4,89	30,0	хрупкая
3	NiO-PSZ (4 мол%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	270	1450(3)	4,8	30	Нет разрушения
			1500(2)	4,67	28	Нет разрушения
			1600(1)	5,27	27,8	Нет разрушения

Исследованы особенности микроструктуры спеченного композиционного материала. Не было обнаружено следов взаимодействия композиционного материала с твердым электролитом.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ПАДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ НА ПЛАСТИНУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ПОТЕРЯМИ

*В.П.Крылов* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Прохождение плоской волны через диэлектрическую пластину подробно изучено в [1], но в связи с поиском новых материалов со значительными диэлектрическими и магнитными потерями появляется интерес к электродинамическому моделированию соответствующих структур.

Даже основополагающий закон оптики в классическом виде, закон Снеллиуса, соответствует материалу без потерь и обычно рассматривается для стационарной задачи падения плоской однородной волны на пластину.

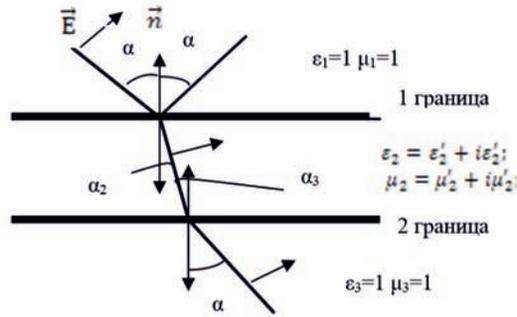


Рис. 1. Преломление и отражение волны через плоский слой

На рис. 1 для угла падения плоской волны  $\alpha_1$  свойства внешнего пространства соответствуют  $\epsilon_1=1$   $\mu_1=1$  и  $\epsilon_3=1$   $\mu_3=1$ . Свойства плоского слоя:  $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2$ ;  $\mu_2 = \mu'_2 + i\mu''_2$  (знак «плюс» выбран в соответствии с [1]).

Запишем закон Снеллиуса в виде:  $\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{n_2 \sin(\alpha_1)}{n_1 \sin(\alpha_2)} = \frac{n_2}{n_1}$ .

Полагая  $\dot{n}_1 = 1 \dot{n}_1 = 1$ , запишем

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \dot{n}_2 = \sqrt{(\epsilon'_2 \cdot \mu'_2 - \epsilon''_2 \cdot \mu''_2) + i \cdot (\epsilon'_2 \cdot \mu''_2 + \mu'_2 \cdot \epsilon''_2)}$$

или запишем в экспоненциальном виде:

$$\operatorname{Re} \left( \frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} \right) = \sqrt{\sqrt{a^2 + b^2}} \cdot \cos \left( \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$\operatorname{Im} \left( \frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} \right) = \sqrt{\sqrt{a^2 + b^2}} \cdot \sin \left( \frac{\varphi}{2} \right) = 0,$$

где  $a = \epsilon'_2 \cdot \mu'_2 - \epsilon''_2 \cdot \mu''_2$ ,  $b = \epsilon'_2 \cdot \mu''_2 + \mu'_2 \cdot \epsilon''_2$ ,  $\varphi = \arctan \left( \frac{b}{a} \right)$ . Так как левая часть действительна, то  $\varphi = 0, \gg b = 0$ ,  $\varphi = 0, \gg b = 0$ , что верно только для среды без потерь.

Для материала с потерями задача становится неоднородной, тем не менее считаем, возможность её моделирования решением классической задачи. Для рассмотрения физических механизмов предположим, что левая часть закона Снеллиуса является комплексной величиной, а для простоты полагаем, что комплексным является только угол в среде 2:  $\dot{\alpha}_2 = \alpha'_2 + i \cdot \alpha''_2$ , то запишем для действительной и мнимой частей

$$\frac{\sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha'_2) \cdot \cosh(\alpha''_2)}{(\sin(\alpha'_2) \cdot \cosh(\alpha''_2))^2 + (\sinh(\alpha''_2) \cdot \cos(\alpha'_2))^2} = \sqrt{\sqrt{a^2 + b^2}} \cdot \cos \left( \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$\frac{-\sin(\alpha_1) \cdot \sinh(\alpha''_2) \cdot \cos(\alpha'_2)}{(\sin(\alpha'_2) \cdot \cosh(\alpha''_2))^2 + (\sinh(\alpha''_2) \cdot \cos(\alpha'_2))^2} = \sqrt{\sqrt{a^2 + b^2}} \cdot \sin \left( \frac{\varphi}{2} \right).$$

Поделим одно на другое:

$$\frac{-\sinh(\alpha''_2) \cdot \cos(\alpha'_2)}{\sin(\alpha'_2) \cdot \cosh(\alpha''_2)} = \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{-\operatorname{tgh} \alpha''_2}{\operatorname{tg} \alpha'_2} = \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{2}.$$

Откуда, для частного случая  $\mu'_2 = 1$  и  $\mu''_2 = 0$  следует

$$a = \varepsilon'_2, b = \varepsilon''_2, \varphi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right):$$

$$\frac{-\sinh(\alpha''_2) \cdot \cos(\alpha'_2)}{\sin(\alpha'_2) \cdot \cosh(\alpha''_2)} = \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{-\operatorname{tgh} \alpha''_2}{\operatorname{tg} \alpha'_2} = \frac{b}{2 \cdot a} = \frac{\varepsilon''_2}{2 \cdot \varepsilon'_2} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \delta.$$

Окончательно получим уравнение связи мнимой части угла преломления с потерями в материале:

$$\alpha''_2 = \operatorname{arctanh}\left(-\frac{1}{2} \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha'_2\right),$$

из которого следует, что потери в материале связаны с негармоническими колебаниями электрического поля.

На рис. 2 приведены расчетные угловые зависимости мнимой части угла преломления при различных диэлектрических потерях в материале. Видно, что с ростом диэлектрических потерь увеличивается величина мнимой части угла преломления, причем более значительный рост отмечается с возрастанием угла падения.

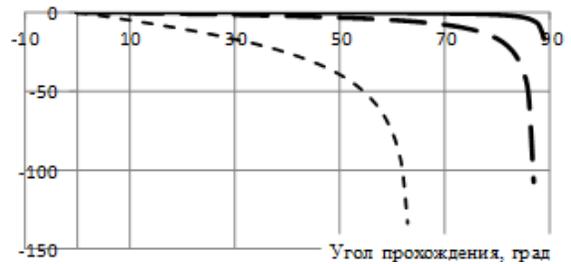


Рис.2. Величина мнимой части угла преломления в зависимости от потерь в материале: — 0,01 — 0,1 — 1

Учет потерь в материале при расчете отраженной волны позволяет воспроизвести наблюдающиеся отличия разности фаз падающей и отраженной волнами между теоретическими расчетами и экспериментальными результатами измерения, не находящими объяснения при рассмотрении задачи без учета потерь в материале[1,2,3].

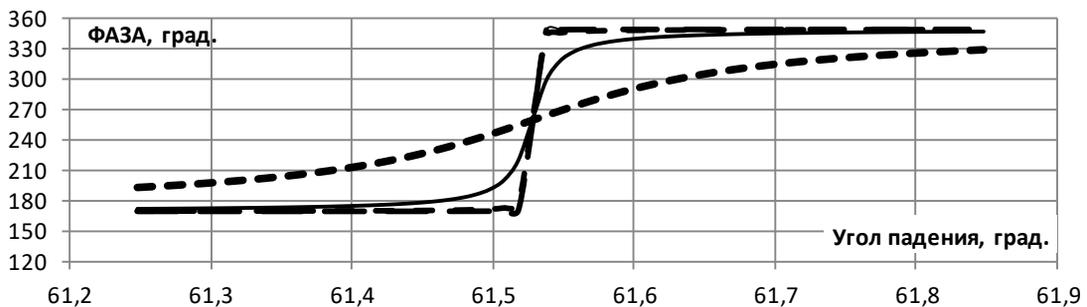


Рис. 3. Разность фаз между отраженной и прошедшей волнами при падении плоской волны на пластину с  $\varepsilon=3,4$  вблизи угла Брюстера при различных потерях материала пластины:

- $\operatorname{tg}(\delta)=0,00001$  (без потерь)
- —  $\operatorname{tg}(\delta)=0,0001$  (малые потери)
- · —  $\operatorname{tg}(\delta)=0,0010$  (заметные потери)
- · · —  $\operatorname{tg}(\delta)=0,01$  (большие потери)

На рис. 3 представлены расчетные зависимости разности фаз между отраженной и падающей плоскими волнами вблизи угла Брюстера. Видно, наличие потерь в материале пластины вызывает плавное, соответствующее экспериментальным наблюдениям изменение фазы, и только в расчете для материала без потерь наблюдается скачок фазы на  $\pi$ , соответствующий теоретическим представлениям.

## Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.- 720с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика.- М.: Наука, 1980.- с. 434-439.
3. Лансберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для вузов.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.- 848с.

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНОВОЙ СМОЛЫ, ОБЛАДАЮЩИХ УЛУЧШЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

*Ю.В.Родиновский, Б.Ф.Пронин, Н.П.Ступакова*  
(ОАО “Композит”, г. Королев, Россия)

Радиопрозрачные теплозащитные материалы (РТЗМ) – материалы, применяемые для защиты радиоаппаратуры, в частности, антенно-фидерных устройств (АФУ) летательных аппаратов от теплового воздействия газовых потоков и давления.

Радиопрозрачные теплозащитные материалы должны выдерживать высокие аэродинамические нагрузки, возникающие при полете изделий, и при этом наряду с теплозащитой обеспечить надежную радиосвязь с наземными спутниковыми станциями. В связи с этим они должны сочетать в себе высокие диэлектрические свойства с высокой эрозионной стойкостью и эффективной энтальпией.

Диэлектрические свойства РТЗМ во многом определяются природой связующего и наполнителя, а энтальпийные характеристики и эрозионная стойкость РТЗМ в большей степени зависят от состава и структуры армирующего наполнителя. Поэтому выбор исходных компонентов при разработке новых РТЗМ весьма важен.

Значение и стабильность диэлектрических характеристик РТЗМ во многом определяются составом связующего и его термостойкостью.

Широкое применение для защиты АФУ находят стеклопластики на основе кремнийорганической смолы КМ-9К. В докладе приведены свойства новых РТЗМ на основе смол КМ-9К и 182-82. Основные свойства стеклотекстолитов в сравнении приведены в таблице.

Таблица

Физико-механические и диэлектрические свойства стеклотекстолитов

Наименование характеристик	Величина характеристик	
	Смола 182-82 + наполнитель марки ИТМ-14,0	Смола КМ-9К + наполнитель марки ИТМ-14,0
1	2	3
1. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1400-1500	1500-1600
2. Содержание смолы, %	22	28

1	2	3
3. Диэлектрическая проницаемость при частоте $1 \times 10^6$ Гц	2,8-3,0	3,0-3,5
4. Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте $1 \times 10^6$ Гц	0,0035	0,005
5. Разрушающее напряжение при изгибе, МПа: - основа - уток	53,44 101,48	53,5 -
6. Разрушающее напряжение при сжатии, МПа: - основа - уток	56,12 96,32	49,3 -

Из таблицы видно, что стеклотекстолит на основе смолы 182-82 обладает лучшими диэлектрическими свойствами и равными физико-механическими свойствами со стеклотекстолитом на основе смолы КМ-9К, тем самым являясь более перспективным.

В докладе представлены основные классы кремнийорганических РТЗМ и приведены результаты экспериментальных исследований по выбору тканого наполнителя. Проведены исследования по выбору кремнийорганического связующего в виде смол, таких, как КМ-9К, 182-82 и др. Оценены основные свойства получаемых материалов и произведен выбор основного состава.

## **СТАТИСТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ОСАЖДЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ В ОБЪЕМЕ КРУПНОГАБАРИТНОГО CVD-РЕАКТОРА**

*Н.В.Ларионов, А.В.Ляхин* (ОАО “Композит”, Королев, Россия)

Применение композиционных материалов на основе карбида кремния давно известно и хорошо зарекомендовало себя в авиационной и космической промышленности. В данных композитах SiC может использоваться и в качестве матрицы, и как защитное покрытие, предотвращая окисление. В настоящее время в технологии нанесения SiC покрытия методом CVD существует проблема обеспечения равномерности протекания осаждения карбида кремния в промышленных реакторах крупногабаритного размера. Равномерность протекания процесса осаждения и повторяемость характеристик покрытия составляют основу для повышения качества при выпуске серийных изделий и являются важным аспектом промышленной отработки процесса.

Целью настоящей работы было исследование равномерности процесса химического газофазного осаждения покрытия из карбида кремния в

крупногабаритных установках. В качестве метода исследования был выбран метод кривых распределения. В качестве реагента для получения покрытия использовали метилсилан. Скорость осаждения фиксировали на пластинах монокристаллического кремния, которые были установлены по всей зоне реактора. В конце каждого процесса, проводили взвешивание, рассчитывали скорость осаждения. На основании данных была составлена диаграмма.

Диаграмма показала наличие разброса в скоростях осаждения. При этом разброс данных зависит от величины подачи реагента в реактор. Полученные в ходе исследования кривые характеризовались несколькими пиками, что может свидетельствовать о наличии нескольких зон в реакторе, отвечающих разным скоростям протекания процесса. Полученные результаты измерений позволяют сделать предположения по направлению усовершенствования процесса.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ БЕТОНА ВО ВРЕМЕНИ

*Г.Л.Горынин* (Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия)

Бетон является композитным материалом, связующее которого обычно является цементным камнем, содержащим те или иные добавки и пластификаторы, а включения образованы камнями гравия или щебня. При изготовлении бетона цементное связующее приобретает жесткость и прочность в течение 5-6 месяцев [1]. На основе бетона изготавливаются несущие конструкции, причем очень часто технология изготовления конструкции является поэтапной и основана на использовании элементов конструкции, уже набравших достаточную прочность и жесткость, в качестве опоры. Таким образом, процесс технологии существенно зависит от умения прогнозировать прочностные и жесткостные характеристики бетона во времени, и задача такого прогнозирования является актуальной.

Считаем, что бетон является трехпериодичной упругой средой (рис.1), упругие характеристики компонент которой зависят от времени

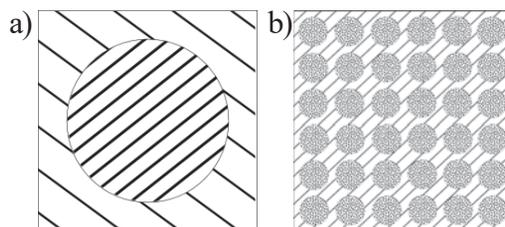


Рис. 1.

- а) бетон—3-периодическая среда;  
 б) ячейка периодичности бетона:  
 цементное связующее и включение

$$\sigma_{\beta} = \sum_{\phi, \psi \in \{x, y\}} E_{\alpha\beta\phi\psi}(t) \frac{\partial(u_{\phi})}{\partial\phi}, \alpha, \beta, \phi, \psi \in \{x, y, z\}, \quad (1)$$

где  $E_{\alpha\beta\phi\psi}(t)$ - компоненты упругого тензора, внутри каждой упругой среды они могут непрерывно меняться, а на границах сред претерпевать скачки. Считаем, что если к телу, вырезанному из бетона, приложить некоторую нагрузку, то напряжения и перемещения, возникающие в теле, удовлетворяют пространственной задаче теории упругости. Тогда для их нахождения применим метод ячейковых функций, изложенный в работах [2,3]. В соответствии с этим

методом периодической неоднородной среде ставится в соответствие однородная макросреда, упругие характеристики которой являются усредненными характеристиками периодической среды, а на ячейках периодичности (рис.1б) вводятся ячейковые переменные  $\xi_x, \xi_y, \xi_z \in [0,1]$  и ячейковые перемещения  $(U_\alpha^\eta)^{\bar{k}}$  и напряжения  $(\tau_{\alpha\beta}^\eta)^{\bar{k}}$ , тогда для напряжений и перемещений периодической среды в первом асимптотическом приближении справедливы равенства:

$$u_\alpha = v_\alpha + \sum_{\varphi \in \{x,y,z\}} \left( \sum_{k_x+k_y+k_z=1} (U_\alpha^{v_\varphi})^{\bar{k}} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \bar{r}^{\bar{k}}} \varepsilon \right), \quad (2)$$

$$\sigma_{\alpha\beta} = \sum_{\varphi \in \{x,y,z\}} \left( \sum_{k_x+k_y+k_z=1} (\tau_{\alpha\beta}^{v_\varphi})^{\bar{k}} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \bar{r}^{\bar{k}}} \varepsilon \right), \quad \alpha, \beta \in \{x,y,z\}, \varphi \in \{x,y\}; \quad (3)$$

где  $v_\alpha$  - перемещения макросреды. Ячейковые перемещения и напряжения определяются решением соответствующих девяти краевых задач [2,3]. Упругие

макрохарактеристики бетона  $\tilde{E}_{ijkl}$  вычисляются по формуле:

$$\tilde{E}_{ijkl} = \langle E_{ijkl} \rangle + \left\langle \sum_{\phi, \varphi \in \{x,y\}} E_{ij\phi\varphi} \frac{\partial (U_\phi^{v_k})^{\bar{1}}}{\partial \xi_\phi} + \sum_{\varphi \in \{x,y\}} E_{ijz\varphi} \frac{\partial (U_z^{v_k})^{\bar{1}}}{\partial \xi_\varphi} \right\rangle, \quad i,j,k,l \in \{x,y,z\}, \quad (4)$$

где  $\langle \_ \rangle$  - усреднение этой величины по ячейке периодичности:

$$\langle \_ \rangle = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \_ \, d\xi_x d\xi_y d\xi_z. \quad (5)$$

**Пример.** В качестве примера рассмотрим бетон, образованный гравием  $E=49$  ГПа и цементным связующим, для которого известен закон изменения модуля упругости со временем ( $E=23$  ГПа через 4 недели со времени образования бетонной смеси), для обоих материалов брался неизменный коэффициент Пуассона  $\nu=0.2$ . Относительная объемная составляющая гравия менялась в пределах 0,024 – 0,738. Тогда на основе решения краевых задач (4)-(8) были найдены ячейковые функции, а с помощью равенства (10) были посчитаны макрохарактеристики бетона в зависимости от времени. На их основе были вычислены модуль Юнга бетона и его коэффициент Пуассона. Результаты представлены на рис. 2.

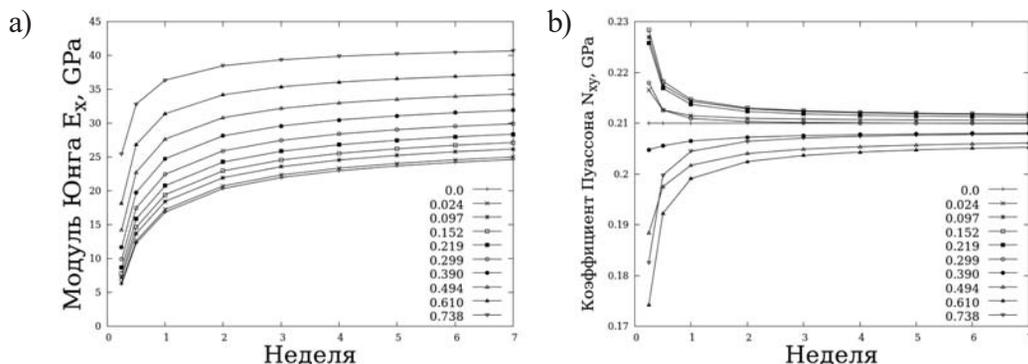


Рис. 2. Зависимость коэффициента Пуассона (а) и модуля Юнга (б) бетона от времени при различных величинах относительных объемных составляющих включений

Поведение модуля Юнга бетона со временем (рис.2б) качественно совпадает с известными экспериментальными кривыми (см., например, [1]). Увеличение доли включения приводит к поднятию соответствующей кривой модуля Юнга.

Поведение коэффициента Пуассона со временем имеет два принципиально разных режима. При относительной объемной составляющей включений меньше 0,3 коэффициент Пуассона бетона сначала резко возрастает на 10%, а затем со временем монотонно убывает до значения  $\nu = 0.2$ . При относительной объемной составляющей включений больше 0,3 процесс меняется на противоположный, сначала коэффициент Пуассона бетона сначала резко убывает до 20%, а затем со временем монотонно возрастает до значения  $\nu = 0.2$ . Указанное свойство коэффициента Пуассона является важным при рассмотрении процессов усадки бетона и появления первичных трещин.

#### Литература

1. Прочность и жесткость железобетонных конструкций / Под. ред. проф. Гвоздева А.А., М.: Изд-во лит. по строительству, 1968.
2. Горынин Г.Л., Немировский Ю.В. Метод асимптотического расщепления для упругой 3-периодической среды // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика [Электронный ресурс] : международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г.– Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2011, № гос. регистрации – 0321101160.
3. Горынин Г.Л., Немировский Ю.В. Математическое моделирование упругих макрохарактеристик для 1-периодических сред // Известия АлтГУ. – 2012. – № 1. – С. 36–41.

## КЕРАМИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ – ВКВС И КЕРАМОБЕТОНЫ НА ОСНОВЕ БОКСИТА

*П.В.Дякин, Ю.Е.Пивинский, С.С.Орданьян*

(Санкт-Петербургский государственный технологический институт (ТУ),  
г. Санкт-Петербург, Россия)

Целью работы являлось получение усовершенствованных по технологии и свойствам изделий на основе высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС) обожженного боксита. Использовали боксит марки «Rota-HD», обожженный во вращающейся печи при температуре 1600°C и характеризующийся открытой пористостью 3-5% с содержанием:  $Al_2O_3$  – 85-90%,  $SiO_2$  – до 4%,  $TiO_2$  – 3,8%,  $Fe_2O_3$  – 1,2%,  $MgO$  – 1,6-1,7% (фазовый состав по данным РФА – 80-85% корунд, 3-5% муллит, 3-5% алюминаты железа, стеклофаза остальное). Отличительной особенностью данных ВКВС является то, что в их состав вводится высокодисперсное кварцевое стекло (ВДКС) 10-12 %, обеспечивающее при соответствующей термообработке процесс муллитобразования. С учетом высоких энергетических затрат при получении кварцевого стекла актуальным является замена данного сырья на кварцевый песок. В связи с этим в настоящей работе была поставлена задача использования для получения ВКВС боксита высокодисперсного кварца (кварцевого песка) как более распространенного и дешевого материала. Для этой цели методом мокрого помола в промышленной мельнице с уралитовой футеровкой и такими же мелющими телами получали суспензии высокодисперсного кварцевого песка (ВДКП) ( $d_{max} = 50-63$  мкм) на основе обогащенного кварцевого песка (раменский концентрат), содержащего 99,3 – 99,5%  $SiO_2$ , 0,25 – 0,4%.

На основе смешанных суспензий в системе боксит – ВДКП были получены отливки, как аналог матричной системы керамобетонов, так и высокоглиноземистые керамобетоны. Последние формовали на основе систем, содержащих 30% ВКВС и 70% заполнителя на основе плотнообожженного боксита марки Rota (фракция 0,1–3 мм). При этом проведены и сопоставительные исследования полученных материалов с таковыми, изготовленными из аналогичных по плотности суспензий, содержащих ВДКС. Образцы матричной системы – в виде кубов (40x40x40 мм), отформованных на основе исходной суспензии ВДКП, из композиционной ВКВС, содержащей 50, 30, 15% ВДКП, суспензии с 10% ВДКС, характеризовались после обжига при 1280 °C:  $P_{отк}$ , % – 19, 15,3; 13,7; 12,8%; и прочностью при сжатии  $\sigma_{сж}$  МПа – 110, 160, 196, 218 и 240 МПа, соответственно. Значения показателей прочности и открытой пористости образцов керамобетонов после обжига при 1250°C: с ВДКС –  $P_{отк}$  – 19,8 %,  $\sigma_{сж}$  190 МПа, а с ВДКП –  $P_{отк}$  – 18 % и  $\sigma_{сж}$  – 260 МПа.

## ЛЕГКОВЕСНЫЙ ОГНЕУПОР ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*М.К.Алексеев, И.Н.Бизин, А.А.Жуков*

(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Экологически чистые волластонитовые материалы, отличающиеся высокой химической инертностью к расплаву алюминия, находят все более широкое применение в технологиях производства футеровочных и функциональных конструкционных керамических элементов оснастки металлопроводов литейных установок, используемых в алюминиевой промышленности.

Актуальными задачами в разработке новых видов волластонитовых огнеупоров являются сокращение продолжительности технологического цикла производства крупногабаритных легковесных изделий на основе природного волластонита, расширение ассортимента волластонитовых изделий для алюминиевой промышленности, обладающих пониженной плотностью и теплопроводностью и повышенной термостойкостью с сохранением химической устойчивости к алюминиевым расплавам до температуры 1000°C.

В ОАО «ОНПП «Технология» уже несколько лет производят керамические изделия на основе волластонита способом, включающим приготовление водного шликера из смеси природного волластонита, глины и вермикулита, формование изделий в гипсовых формах, сушку и обжиг. Такой способ имеет определенные ограничения на толщину производимых изделий (не более 50 мм) и плотность (не менее 1,1 г/см<sup>3</sup>).

Опрос технологов алюминиевых производств, являющихся заказчиками волластонитовой продукции, показал, что существует потребность в толстостенных легковесных огнеупорах с высокой стойкостью к расплаву алюминия для изготовления деталей запорно-регулирующей аппаратуры, в частности, поплавков для дозаторов алюминиевого расплава.

Для производства такого легковесного материала была разработана технология, аналогичная «бетонной», которая включает введение глиноземистого цемента в состав шликера на основе волластонита, глины и вермикулита. Литье изделий осуществляется в разборные металлические формы с применением виброутряски.

Преимуществами такой технологии являются:

- сокращение продолжительности твердения заготовок при формовании изделий в 2 раза;
- возможность изготовления крупногабаритных легковесных изделий толщиной > 70 мм, плотностью менее 1,1 г/см<sup>3</sup> и соответственно пониженной теплопроводностью с сохранением химической устойчивости к алюминиевым расплавам до температуры 1000°C, что позволяет расширить ассортимент волластонитовых изделий для алюминиевой промышленности.

Материал на основе волластонита, получаемый по «бетонной» технологии с применением глиноземистого цемента, химически устойчив к расплавам алюминия до температуры 1000°C, имеет низкую плотность 0,9–1,1 г/см<sup>3</sup>, прочность при

статическом изгибе 5–8 МПа, высокую термостойкость (выдерживает до 40 теплосмен от 850 до 20°C на воздухе) и низкий коэффициент теплопроводности – 0,2–0,3 Вт/м·К.

Из разработанного материала можно получать крупногабаритные легковесные изделия на основе природного волластонита толщиной до 120 мм с высокой однородностью свойств по объему материала (разноплотность в изделиях не превышает 3 %).

В настоящее время ОАО “ОНПП “Технология” серийно производит сложнопрофильные толстостенные огнеупорные изделия – поплавки запорно-регулирующей аппаратуры нескольких типоразмеров.

## **СИНТЕЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ**

*М.К.Алексеев, Г.И.Куликова, М.Ю.Русин*

(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Известно, что прозрачная керамика на основе алюмомагниевои шпинели (АМШ) в настоящее время находит все более широкое применение для изготовления конструктивных элементов специальной техники: ИК- и оптически прозрачных защитных обтекателей, колпаков и окон для ракет, выводных окон мощных УФ- и ИК-лазеров, прозрачной брони, радиационно стойких элементов оптики космических телескопов, смотровых окон для высокотемпературных печей и др.

Производство прозрачной керамики на основе АМШ базируется на использовании высокочистых нанодисперсных порошков.

В настоящей работе была предпринята попытка получения порошков АМШ из доступного отечественного сырья с использованием типового технологического оборудования с целью оценки достижимого уровня чистоты, фазовой однородности и дисперсности, а также их пригодности для получения прозрачной керамики.

В качестве сырья для синтеза АМШ были выбраны производимые промышленно в России нитрат алюминия девятиводный марки ч.д.а., нитрат магния шестиводный и окись магния марки ч.д.а. и карбамид марок ч. или ч.д.а.

Известно, что при повышенных температурах (150-200°C) карбамид в присутствии следов кислот гидролизуеться с выделением углекислого газа и аммиака, что может быть использовано для гомогенного образования смеси гидроокисей алюминия и магния из соответствующих нитратов.

Разработанная технология синтеза порошков АМШ состоит из нескольких этапов.

Первым этапом является приготовление концентрированного водного раствора смеси нитратов алюминия и магния, взятых в необходимом для образования АМШ стехиометрическом соотношении  $Mg^{2+} : Al^{3+} = 1 : 2$ . Раствор может быть приготовлен как смешением нитратов с добавлением воды, так и растворением окиси магния в растворе нитрата алюминия при нагревании.

Вторым этапом является добавление карбамида в раствор нитратов, при

этом карбамид берется в некотором избытке из расчета соотношения аминогрупп и нитрат-ионов 1,05 : 1 для обеспечения полноты осаждения смеси гидроокисей.

Третьим этапом является упаривание полученного раствора и проведение гидролиза карбамида в химически стойкой посуде путем постепенного повышения температуры до 250 °С с выдержкой при этой температуре до завершения выделения углекислого газа и образования гелеобразной массы смеси гидроокисей алюминия и магния, пропитанных расплавом нитрата аммония.

Важным моментом приготовления растворов является использование только химически стойкого термостойкого стекла как материала для всех емкостей и мешалок. Как выявлено, горячие нитратные растворы быстро разрушают эмалевые покрытия на металлических эмалированных реакторах, что ведет к сильному загрязнению получаемых порошков ионами железа и осколками эмали.

Четвертый этап заключается в двух – трехкратной промывке смеси гидроокисей холодной дистиллированной водой методом декантации для удаления основной части нитрата аммония. Полное удаление не является обязательным, однако содержание нитрата аммония в получаемом продукте не должно превышать 20 % во избежание взрывного разложения при последующих термообработках.

На пятом этапе проводится сушка смеси гидроокисей от воды, при этом очень эффективно применение СВЧ-излучения для равномерного прогрева гелеобразной массы, отличающейся весьма низкой теплопроводностью. По завершении сушки полученный порошок перетирается в ступке для разрушения комков и агломератов.

Заключительным этапом является термообработка порошка смеси гидроокисей до температур, обеспечивающих образование алюмомагниевого шпинели. Экспериментально установлено, что образование шпинели, в основном, завершается при температурах выше 900°С.

Описанная схема позволяет проводить введение ряда известных для АМШ спекающих добавок на стадии приготовления растворов.

Порошки алюмомагниевого шпинели, полученные по такой схеме, имеют малые отклонения от стехиометрии (на уровне единиц процентов), небольшой размер единичных кристаллитов – агломераты размерами ~ 20 – 50 микрон, образованные микрокристаллитами полиэдрической формы с размерами от 250 до 800 нм. Удельная поверхность порошков АМШ после термообработки при 950°С составляет 50 м<sup>2</sup>/г (метод БЭТ).

Предприняты попытки получения прозрачной керамики из синтезированных порошков АМШ способами горячего прессования в ОАО «ОНПП «Технология» и SPS-спекания на предприятии ФГУП «Центр Келдыша». Получены первые образцы с плотностью, близкой к теоретической – 3,58 г/см<sup>3</sup>, и «нулевой» открытой пористостью. Образцы толщиной 2-3 мм наряду с прозрачными областями имеют хаотично разбросанные области матово-белого цвета. Наличие подобных областей, вероятно, связано с неполным вакуумированием шихты, недостаточным давлением и малым временем выдержки при проведении процессов.

Изучение структуры и свойств образцов керамики из АМШ позволило сделать вывод о возможности получения оптических материалов из разработанных порошков при условии оптимизации режимов горячего прессования и SPS-спекания.

## КЕРАМИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ИЗ ВОЛЛАСТОНИТА ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

*И.Н.Бизин* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Огнеупоры являются важным звеном алюминиевого производства, при этом керамическая оснастка требуется практически на всех технологических стадиях переработки алюминия: от плавки до литья изделий. В литейном производстве наиболее востребованы огнеупорные изделия в виде различных кирпичей, плит, желобов, лотков, разнообразных втулок, дюзов, стаканов, дозаторов, поплавков, вставок и тепловых насадок в кристаллизаторы.

Все огнеупоры алюминиевого производства можно условно разделить на две большие группы по их назначению: футеровочные и конструкционные. Футеровочные материалы защищают стальные конструкции от разъедания алюминием, а расплав – от окисления и охлаждения. Конструкционные огнеупоры используются как формообразующие элементы в кристаллизаторах, а также для переливания, дозирования, распределения и регулирования потока расплава алюминия.

Общими требованиями к огнеупорам являются, во-первых, химическая инертность к расплаву алюминия, во-вторых, высокая термостойкость в условиях многократных термических перепадов.

Для футеровочных огнеупоров важным требованием является низкая теплопроводность, которая позволяет обеспечить сохранение температуры металла на всей длине алюмотракта.

Конструкционная керамическая оснастка используется в ответственных узлах литевых агрегатов и, как правило, влияет на качество продукции, поэтому важными требованиями к ней являются точность геометрических размеров, хорошее качество поверхности керамики, а также достаточно высокая прочность, при которой не происходит катастрофического разрушения материала, а изделие сохраняет свою целостность в процессе эксплуатации.

В 90-е годы многие российские алюминиевые предприятия закупили за рубежом целые технологические линии по вторичной переработке алюминия. Это высокопроизводительные установки непрерывного литья алюминиевых слитков. Вместе с западными технологиями в Россию пришли и новые огнеупоры, разработанные за рубежом специально для алюминиевой промышленности. Это современный экологически чистый материал – керамика из волластонита. Сейчас на российском рынке активно работают иностранные фирмы «PYROTEK» (США), «SILKA», «FOSECO» (Германия), «SCAMOL» (Дания), «GOSSLER» (Австрия), «POLYTEG-MET» и др., предлагая широкий ассортимент волластонитовых огнеупоров под различными торговыми марками.

Первые отечественные разработки волластонитовых огнеупоров как коммерческой продукции были сделаны в ОНПП «Технология» и основывались на технической базе для традиционной керамической технологии. Это спекание природных волластонитовых порошков, сформованных классическими способами: холодным полусухим прессованием и водным шликерным литьем в гипсовые

формы. Эти два способа дополняют друг друга и позволяют выбирать наиболее рациональный способ формования конкретного изделия.

В качестве исходного сырья нами использовался волластонит марки ВП-2 фирмы «Трансресурс» с основным размером частиц порядка 50 мкм и насыпной плотностью около 1 г/см<sup>3</sup>. Большой набор фракционированного волластонита с различным содержанием тонкодисперсной фазы и длинноигольчатых частиц позволяет комбинировать порошки, варьировать гранулометрический состав шихты и, таким образом, целенаправленно регулировать свойства керамики.

Керамику из природного волластонита мы производим по двум технологическим направлениям, формуя изделия либо полусухим прессованием, либо водным шликерным литьем в гипсовые формы. Способ формования выбираем, исходя из требований к конкретному изделию и его размеров. Обычно шликерное литье применяется для получения крупногабаритных и сложнопрофильных изделий. Прессованием удобно и производительно делать заготовки простой формы.

Формовочные смеси готовятся на основе порошков волластонита, а также пластифицирующих и спекающих добавок. В первом варианте в шихту добавляется пластифицирующий компонент – каолин и спекающая добавка – бор. При приготовлении шликера в волластонит вводят каолин и глину. Обжиг сформованных изделий – низкотемпературный (не выше 1000°С).

Если к изделиям предъявляются требования по геометрическим размерам – заготовки легко обрабатываются на обычных токарных и фрезерных станках. Керамика, получаемая таким способом, имеет высокую плотность и прочность ее даже несколько выше, чем у импортных аналогов. Однако термостойкость этих материалов недостаточна для работоспособности в условиях многократных циклов литья алюминия. В то же время эти материалы могут длительно контактировать с расплавом алюминия без разрушения, если не подвергаются циклическим термоперепадам. Такой материал, полученный прессованием, нашел свое применение в изделиях переходные плиты и вставки в кристаллизатор для установок непрерывного литья алюминиевых столбов. Уже на протяжении 15 лет предприятие «Агрисовгаз» закупает у нас ежемесячно до 500 таких изделий различных размеров взамен импортных.

В большинстве случаев огнеупоры подвергаются многократным циклическим воздействиям расплава алюминия. Поэтому для повышения термостойкости керамики в формовочную смесь дополнительно вводятся неорганические волокна, в основном алюмосиликатные и кремнеземистые. Введение волокна в керамику позволяет получать материалы в широком диапазоне плотности и теплопроводности в зависимости от количества введенного волокна. Присутствие волокна в материале существенно снижает теплопроводность и, следовательно, повышает его работоспособность в режимах термоциклирования. Из наиболее легких волокнистых материалов мы производим и поставляем заказчикам поплавки – дозаторы для автоматического регулирования уровня расплава.

Из разработанных материалов мы производим широкую номенклатуру футеровочных огнеупоров. Это крупногабаритные желоба различного профиля,

сформованные литьем в гипсовые формы. Это сложнопрофильные миниатюрные футеровочные соединительные лотки и мостики в системе алюмотрактвов, это различные комплекты плит, уже подготовленные по форме и размерам для монтажа футеровки литьевой разводки. Освоено производство различных футеровочных труб. Разработаны и внедрены в серийное производство технологии изготовления разнообразных переливных дюз, втулок, стаканов. Нашей продукцией являются и тепловые насадки для кристаллизаторов установок вертикального литья алюминиевых столбов, которые в зависимости от конструкции кристаллизатора имеют различную форму и размеры.

В настоящее время объем наших продаж составляет 700-1000 разнообразных изделий в месяц. Это мелкосерийное производство волластонитовых огнеупоров с суммарным объемом до 10 т в год.

## **ПОВЫШЕНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ**

*И.Ю.Келина, Л.А.Чевыкалова, И.Л.Михальчик, А.В.Аракчеев, Н.А.Голубева, Л.И.Горчакова* (ОАО «ОНПП «Технология»); *И.А.Беспалов* (ОАО «НИИ Стали»)

Специалистами ОАО «НИИ Стали» предложен алгоритм экспериментального определения показателя качества керамики (определение параметра  $n_{пр}$  - числа волновых пробегов в керамике необходимого для ее разрушения при ударном воздействии) и определена эмпирическая зависимость этого параметра от физико-механических свойств материала, таких, как микротвердость, размер зерна и пористость.

В работе [1] показано, что среди изученных различных керамических материалов на основе оксида алюминия отечественных и зарубежных производителей лучшими баллистическими свойствами обладает керамика производства фирмы «Gumi», имеющая мелкие изометрические зерна (~7,2 мкм) и низкую пористость (1,3 %). Остальные материалы, имеющие даже более высокую твердость, но более крупные, призматические зерна или высокую пористость, существенно ей проигрывают (табл., рис.1).

С целью повышения баллистической эффективности корундовой керамики за счет улучшения структурных и физико-механических свойств в настоящей работе проведены исследования по получению горячепрессованной алюмооксидной керамики «Черный корунд».

Экспериментальные исследования проводили с использованием шихты, состав которой аналогичен спеченным материалам ТСМ-300 и ТСМ-303. Образцы спекали в графитовых пресс-формах в атмосфере азота или в вакууме при температурах 1500-1600°C и давлении 10-15 МПа.

Механические характеристики корундовой керамики от различных производителей

Производитель	Микротвердость, ГПа	Математическое ожидание размера зерна, мкм	Пористость, %	Число волновых пробегов до разрушения
ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск	15,5	10,0	5,8	15,2
«НЭВЗ-Союз» г. Новосибирск	14,0	8,3	7,6	11,2
«Прогресс», г. Ухта	14,0	3,8	5,0	14,8
«Поликор», г. Кинешма	16,5	6,6	3,0	16,0
«Barat», Германия	17,5	15,0	2,0	15,0
«Gumi», Индия	16,5	7,2	1,3	22,0

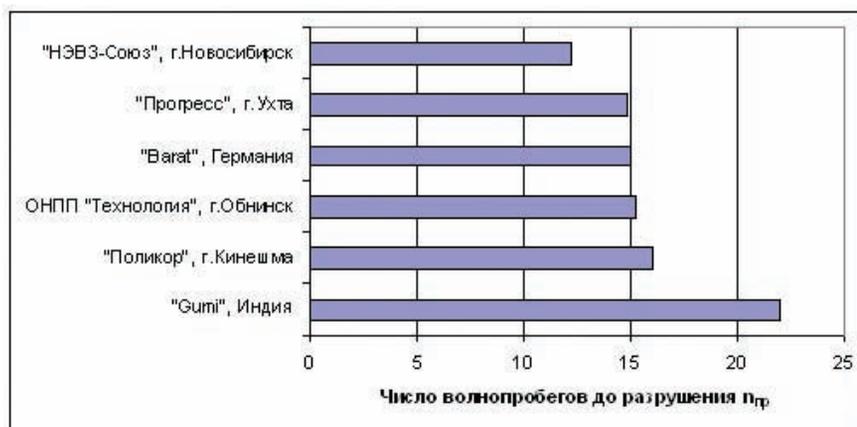


Рис.1. Сравнительный анализ корундовой керамики различных производителей по числу волновых пробегов до разрушения  $n_{пр}$  при воздействии пули 7,62 мм Б-32 со штатной скоростью [1]

Технология горячего прессования обеспечила получение высокоплотных материалов с плотностью 3,96 и 3,86 г/см<sup>3</sup> и открытой пористостью 0,04 и 0,4 % соответственно для составов ТСМ-300 и ТСМ-303; прочностью при изгибе на уровне 330-350 МПа, микротвердостью 16,5 до 19,5 ГПа, в зависимости от направления приложения нагрузки при прессовании, скорости прохождения ультразвука ~ 11000 м/с.

Исследования образцов методом растровой электронной микроскопии показали, что структура горячепрессованной корундовой керамики плотная, образована агломератами размером 10-15 (для ГПТСМ 300) и 5-60 мкм (для

ГПТСМ-303), между которыми распределены зерна с хорошо развитой морфологией размером 2-5 мкм (рис.2). Качественный рентгенофазовый анализ показал наличие основной ярко выраженной фазы – корунд  $Al_2O_3$  и следов шпинели  $MgAl_2O_4$  (только для материала ГПТСМ-300). Уровень достигнутых свойств в материале ГПТСМ-300 близок к свойствам материала «Gumi».

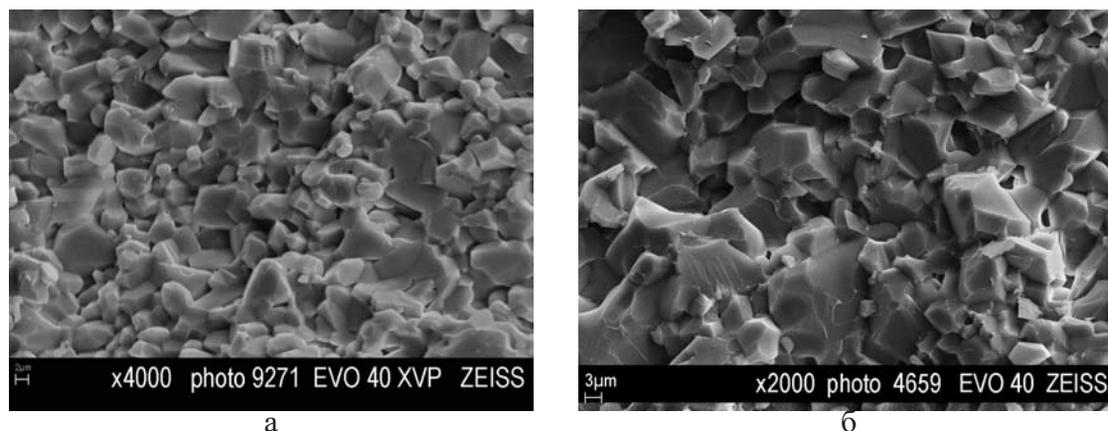


Рис.2. Микроструктура алюмооксидной керамики:  
а - “Черный корунд”; б - ТСМ-303

Экспериментальные исследования керамических образцов ГПТСМ-300 и ГПТСМ-303 на пулестойкость в ОАО «НИИ Стали» показали, что при воздействии пули калибра 7,62 мм типа Б-32 со скоростью 818-830 м/с число волновых пробегов до разрушения возрастает до 19-21 и 14,7-16,4, соответственно. При этом остаточная длина сердечника составила 13,7-14,9 для ГПТСМ-300 и 16,7-18,0 мм для ГПТСМ-303.

Одновременно следует отметить, что для одного из лучших ударопрочных материалов, разработанного на нашем предприятии горячепрессованного нитрида кремния ОТМ-922, эти значения составляют 21,6-28,3 и 9,4-15,1 мм, соответственно.

Выводы:

Высокое содержание основного вещества (99,7 %), мелкозернистая структура керамики (менее 8 мкм), низкая пористость (менее 0,5 %), высокий уровень микротвердости, а также более высокие значения прочности и скорости прохождения ультразвука по сравнению с базовыми спеченными корундовыми материалами обуславливают высокую баллистическую эффективность материала ГПТСМ-300 и перспективы его применения в облегченных бронеконструкциях.

#### Литература

1. Беспалов И.А., Григорян В.А., Кобылкин И.Ф. Экспериментальное определение времени задержки проникания высокоскоростных ударников в керамическую броню: сб. тез. докл. XI междунар. конф. “Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты”. – Хотьково, Московская обл., 2010. – С.49.

# ВЛИЯНИЕ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Е.С.Калатур, С.П.Буякова, С.Н.Кульков* (ИФПМ СО РАН, г. Томск, Россия)

## **Введение**

В работах [1-2], посвящённых анализу механического поведения хрупких керамических материалов, приводятся данные о механическом отклике при нагружении сжатием пористой керамики на основе  $ZrO_2$ , полученной из мелкокристаллических порошков. Керамический каркас в этом случае состоял из хаотически ориентированных стержневых элементов, сформированных нанокристаллическими зёрнами с высокой прочностью связи на межзёренных границах. При механическом нагружении этой керамики происходила обратимая потеря механической устойчивости стержневых элементов (обратимый изгиб) [3], что приводило к появлению нелинейной связи между напряжением и деформацией при упругом деформировании материала. Величина деформации при сохранении целостности пористого каркаса значительно превосходила таковую для циркониевой керамики с равным объёмом порового пространства, но полученной из крупнокристаллических порошков. Несмотря на имеющиеся в литературе данные, исследований, направленных на изучение влияния структуры на деформационное поведение хрупких материалов, крайне мало. Целью работы явилось исследование деформационного поведения пористых керамических материалов с ячеистой структурой.

## **Материалы и методики**

В работе изучена пористая керамика, полученная из порошка  $ZrO_2(Y_2O_3)$ , состоящего преимущественно из пустотелых частиц сферической формы, но также присутствовали агрегаты, состоящие из частиц, не имеющих регулярной формы. Средний размер частиц сферической формы составлял 1,2 мкм.

Образцы керамики были получены прессованием порошка и последующим спеканием прессовок в интервале температур 1400–1600°C и изотермической выдержки от 1 до 5 часов. Разница в пористости в керамике достигалась варьированием температуры спекания и продолжительности изотермической выдержки и составляла от  $\approx 30$  до 80 %.

## **Результаты и обсуждение**

Исследования показали, что керамика имела ячеистую структуру. Ячеистый каркас сформирован укладкой полых частиц порошка. Диаметр ячеек многократно превышал толщину их стенок, которая представляла собой однослойную укладку зёрен  $ZrO_2$ , рис.1. Пористость в керамике представляла собой иерархическую систему, состоящую из трех видов пор, т.е. характер распределения пор по размерам в керамике полимодальный. Увеличение объёма порового пространства в керамике, вызванное снижением температуры спекания и сокращением продолжительности изотермической выдержки, сопровождалось увеличением среднего размера всех видов пор.

Деформационные диаграммы керамики  $ZrO_2(Y_2O_3)$  начинались с участка нелинейной связи между напряжением и деформацией, описываемых степенной

функцией с показателем степени  $n > 1$ , рис. 2. Нагружение образцов керамики  $ZrO_2(Y_2O_3)$  в режиме «нагрузка-разгрузка» на участке нелинейной связи между напряжением и деформацией до значений деформации, соответствующей окончанию нелинейного участка  $\epsilon_1$ , не выявило остаточной деформации, т.е. « $\sigma$ - $\epsilon$ » диаграммы были обратимы по деформации. Данный факт служит доказательством нелинейно-упругого поведения керамики с ячеистой структурой.

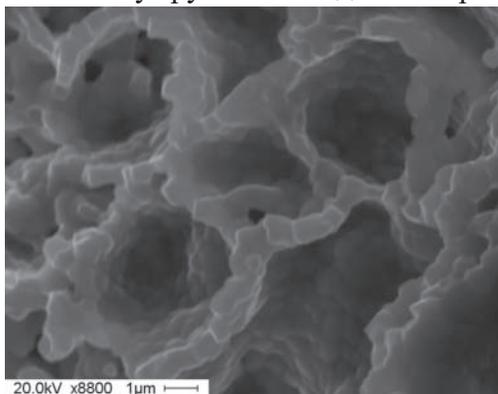


Рис.1. Структура пористой керамики, полученной из мелкокристаллического порошка  $ZrO_2(Y_2O_3)$ . Пористость  $\approx 60\%$

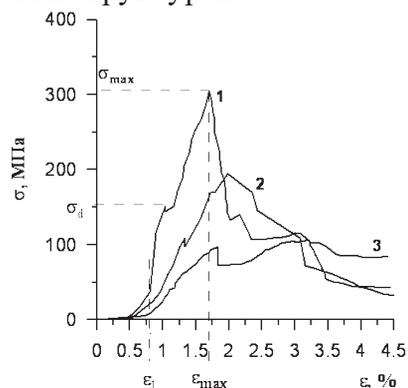


Рис. 2. Деформационные диаграммы при сжатии пористой керамики, полученной из мелкокристаллического порошка  $ZrO_2(Y_2O_3)$ :  
 1 – пористость  $\approx 35\%$ ;  
 2 – пористость  $\approx 60\%$ ;  
 3 – пористость  $\approx 80\%$

Установлено, что повышение пористости в керамике от  $\approx 30$  до  $80\%$  сопровождалось ростом значений предельной деформации ( $\epsilon_{max}$ ), ее значения достигали  $\approx 4\%$ . В свою очередь, значения деформации, соответствующей окончанию участка нелинейной связи между напряжением и деформацией ( $\epsilon_1$ ), при увеличении пористости до  $\approx 50\%$  интенсивно уменьшались от  $\approx 1,2$  до  $0,3\%$ , а дальнейший рост объемной доли пор в материале практически не повлиял на ее значения.

Кроме наличия участка нелинейной связи между напряжением и деформацией на « $\sigma$ - $\epsilon$ » диаграммах керамики при больших деформациях наблюдались вертикальные участки сброса напряжения, связанные с появлением локальных микрповреждений, при этом нагружаемый образец в целом сохранял способность сопротивляться возрастающей нагрузке.

Анализ деформационных диаграмм пористой керамики  $ZrO_2(Y_2O_3)$  выявил их отличие от « $\sigma$ - $\epsilon$ » диаграмм керамики с гомогенной структурой, разрушение которой происходит мгновенно с малым поглощением энергии [4-5]. В пористой керамике процесс разрушения происходит с развитием системы микротрещин из многочисленных концентраторов напряжений.

#### Литература

1. Кульков С.Н., Масловский В.И., Буякова С.П. Негуковское поведение пористого диоксида циркония при активной деформации сжатием // Журнал технической физики. – 2002. – Т.72. – Вып.3. – С. 38-42.

2. Кульков С.Н., Буякова С.П. Фазовый состав и особенности формирования структуры в нанокристаллическом  $ZrO_2$  // Российские нанотехнологии. – 2007. – №1. – С. 60-73.

3. Буякова С.П. Структура, фазовый состав и закономерности формирования пористых наносистем на основе  $ZrO_2$ : дисс. на соиск. учёной степени докт. техн. наук. – Томск. – 2008. – 311 с.

4. Гогоци Г.А., Галенко В.И. Сопротивление разрушению, прочность и другие характеристики циркониевой керамики, стабилизированной оксидом иттрия // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 8. – С. 7-13.

5. Гогоци Г.А., Островой Д.Ю. Механическое поведение керамики и кристаллов на основе диоксида циркония. Сообщение 1. Испытания при изгибе. // Проблемы прочности. – 1995. – №7. – С. 41-47.

## **ВЛИЯНИЕ КАРБИДА ТИТАНА НА ТВЕРДОСТЬ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ $ZrO_2$ -TiC**

*М.В.Григорьев<sup>1,2</sup>, С.П.Буякова<sup>1,2,3</sup>, С.Н.Кульков<sup>1,2,3</sup>*

(<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; <sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия)

Проведено исследование структуры и свойств  $ZrO_2(Y_2O_3)$  композитов с различным содержанием TiC, полученных методом свободного спекания в вакууме. В качестве исходных материалов были взяты высокодисперсные порошки диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия ( $ZrO_2(Y_2O_3)$ ), полученного методом обратного соосаждения, и карбида титана TiC, полученного методом карбидизации диоксида титана. Смеси  $ZrO_2(Y_2O_3)$ -TiC готовили с содержанием последнего 0,5, 1 и 5 объемных процентов. Смеси из порошков диоксида циркония и карбида титана получали двумя способами: отдельной и совместной механическими обработками. Спекание образцов проводили в вакуумной печи при температуре 1650°C и выдержке 1 час, предельный вакуум -  $6,65 \times 10^{-3}$  Па.

Исследование образцов после спекания показали, что отдельная механическая обработка порошков  $ZrO_2(Y_2O_3)$  и TiC дает лучший результат, нежели совместная. Плотность образцов из порошков СМО не превышает плотности образцов из циркониевой керамики без добавок (табл.).

Расчёт пористости показал, что в образцах она варьируется в пределах от 1 до 4% (табл.); отметим, что в образцах  $ZrO_2(Y_2O_3)$ -5%TiC пористость составила ~1%, а в циркониевой керамике без добавок – ~2,5%.

Твердость в образцах растет с увеличением содержания карбида титана (табл.). Образец  $ZrO_2(Y_2O_3)$ -5%TiC (РМО) обладает самой высокой твердостью - 12,5 ГПа.

Механические параметры образцов после спекания в зависимости от содержания TiC способа обработки смесей

Содержание TiC, об.%	0	0,5	1	5
$\rho_{отн}$ (раздельная обработка)	0,97	0,96	0,97	0,98
$\rho_{отн}$ (совместная обработка)	0,97	0,95	0,96	0,97
П (раздельная обработка), %	2,4	3,4	2,5	1,3
П (совместная обработка), %	2,4	3,9	3,1	2,6
Hv (раздельная обработка), ГПа	11,5	11,3	12,2	12,5
Hv (совместная обработка), ГПа	11,5	10,1	10,9	11,9

Исследование шлифованной поверхности образцов после термического травления показало, что структура циркониевой керамики без добавок TiC представлена двумя типами зерен: мелкими порядка 1-2 мкм и крупными порядка 5 мкм. Структура композитов  $ZrO_2(Y_2O_3)$ -TiC представлена двумя видами зерен диоксида циркония и зернами карбида титана, размер которых варьируется от 1 до 15 мкм. Отличительной особенностью структуры керамических композитов  $ZrO_2(Y_2O_3)$ -TiC является образование кольцевой структуры из крупных зерен диоксида циркония вокруг включений карбида титана.

Таким образом, раздельная механическая обработка порошков  $ZrO_2(Y_2O_3)$  и TiC позволяет получить максимальную плотность образцов после спекания, нежели совместная. Добавка 5% TiC при этом позволяет получить минимальную пористость около 1% и максимальную твердость 12,5 ГПа в композитной циркониевой керамике  $ZrO_2(Y_2O_3)$ -TiC.

## ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

*Н.Е.Малова, Э.К.Кондрашов, В.А.Молотова* (ФГУП «ВИАМ», г. Москва)

Для обеспечения теплового баланса космического корабля «Буран» были использованы пассивные системы терморегулирования (терморегулирующие лакокрасочные покрытия), как наиболее дешевые в отличие от активных систем терморегулирования.

Терморегулирующие покрытия (ТРП), разработанные ФГУП «ВИАМ», в зависимости от радиационных оптических характеристик ( $\alpha_s/R_s$  – поглощательная/отражательная способность солнечной радиации,  $\epsilon_n$  – излучательная способность) подразделяются на классы: солнечные отражатели ( $\alpha_s \leq 0,22$ ,  $\epsilon_n \geq 0,85$ ) – цвет белый, «истинные отражатели» ( $\alpha_s \leq 0,18$ ,  $\epsilon_n \leq 0,18$ ) – цвет серебристый, «истинные поглотители» ( $\alpha_s \geq 0,85$ ,  $\epsilon_n \geq 0,9$ ) – цвет черный, темно-серый.

Специально для КА «Буран» (для внутренней поверхности створок отсека полезного груза и панелей РТО) были разработаны ТРП класса «Солнечные отражатели» - эмаль КО-5191А и бензоспиртостойкая эмаль КО-5258 (для комплекта оборудования космонавтов: шлем, ранец).

На элементах конструкции шасси и панели под ЭВТИ были рекомендованы ТРП класса «истинные отражатели» – эмали ВЭ-30 серебристая и ВЭ-50Э (с повышенной бензостойкостью), разработанные специально для «Бурана».

На сотовых конструкциях КА «Буран» (кожух РН-ВТ) и щитках элерона применены ТРП класса «истинные поглотители» – эмали КО-818 «К», КО-819, КО-819А и ВЭ-38 со стабильными значениями  $\epsilon_n$  при длительном термостарении при температуре до 800 °С.

Так как в условиях космоса наиболее сильное воздействие на органические материалы оказывают такие факторы, как УФ-излучение, комплексное облучение протонов, электронов,  $\gamma$ -излучение, глубокий вакуум (усиливающий газовыделение материалов), перепады температур при выходе и входе в атмосферу, то стабильность терморегулирующих покрытий в рабочих условиях является одним из основных показателей и, как показали результаты первого полета, все примененные терморегулирующие покрытия испытания выдержали.

Испытания данных покрытий на различных искусственных спутниках Земли типа «Молния», «Метеор», а также на орбитальных станциях «Мир», «Салют» и «Алмаз» и межпланетной станции «Венера» показали, что обеспечивается стабильность радиационных характеристик покрытий.

Специально для МКС «Буран» было разработано термостойкое терморегулирующее покрытие – эмаль ВЭ-38, содержащая тугоплавкое бескислородное соединение. Покрытие на основе эмали ВЭ-38 имеет степень черноты  $\epsilon_n \geq 0,8$  в интервале температур до 800 °С и термостойкость в течение 200 ч при температуре 700 °С и в течение 100 ч – при температуре 800 °С. Покрытие выдержало ускоренные коррозионные испытания в течение 1 года в камере, имитирующей тропический климат, и 3 месяца в камере солевого тумана.

Покрытие на основе эмали ВЭ-38 успешно прошло стендовые испытания в Тулузе в соответствии с условием контракта с французской фирмой.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВС НИТРИДА КРЕМНИЯ**

*Л.А.Чевыкалова, И.Ю.Келина, И.Л.Михальчик, Л.А.Плясункова, А.В.Аракчеев*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия);

*В.В.Закоржевский, В.Э.Лорян* (ИСМАН РАН, г. Черногоровка, Россия)

Значительный прогресс, достигнутый в повышении уровня высокотемпературных характеристик нитридкремниевой керамики, главным образом, связан с использованием высококачественных ультрадисперсных порошковых композиций состава  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-MeO}$ , получаемых методом плазмохимического синтеза. Однако проблема импорта порошков и их высокая стоимость обуславливает поиск нового более дешевого отечественного сырья, сохраняющего свойства материалов на прежнем уровне. Альтернативой плазмохимическому способу получения ультрадисперсных композиционных

порошков может быть хорошо развитый в России метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

В «ОНПП «Технология» разработаны керамические горячепрессованные материалы на основе порошков нитрида кремния  $\alpha$ -модификации широкого гранулометрического состава, полученных по технологии СВС: ОТМ-922(1) с добавкой оксида иттрия и ОТМ-922(2) с добавкой оксида магния [1]. По комплексу свойств они не уступают горячепрессованным материалам ОТМ-906 и ОТМ-917 на основе ультрадисперсных композиционных порошков [ $\text{Si}_3\text{N}_4$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$ , (MgO)] плазмохимического синтеза, однако не обладают высокотемпературной прочностью, свойственной материалам ОТМ-906, ОТМ-917 и ОТМ-914.

Более поздние исследования показали, что применение микронных порошков нитрида кремния (СВС) с добавками 3-5 масс.% MgO приводит к повышению однородности структуры в сторону уменьшения размера крупных зерен (не более 2-8 мкм), что обуславливает существенное повышение микротвердости: с 14600 до 17500–22760 МПа в зависимости от ориентации образцов. Прочность при изгибе данной керамики составляет 460–680 МПа и сохраняется на уровне 560 МПа при температуре 1000°C [2].

В целях обеспечения высокотемпературной прочности керамики вплоть до 1400°C в ИСМАН РАН разработаны композиционные порошки состава  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -3-5 % масс. MgO, синтезированные методом СВС в условиях минимальных теплотерь и без использования газифицирующихся добавок. Содержание  $\alpha$ -фазы в композициях достигает 90 %. Несмотря на относительно небольшой размер частиц, измеренный различными методами (0,5-2 мкм по электронной микроскопии и 0,5 мкм по Суд.), порошки имеют невысокую удельную поверхность (не более 4 м<sup>2</sup>/г), что можно объяснить частичным спеканием продуктов синтеза в волне горения и недостаточным измельчением. Для повышения дисперсности порошков необходимо дополнительное более интенсивное измельчение.

Образцы керамики получали традиционным методом горячего прессования в графитовых пресс-формах при температуре 1750-1800°C и давлении 15-20 МПа в среде азота.

Рентгенофазовый анализ образцов показал, что основная кристаллическая фаза представлена  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Микроструктура керамики состоит из крупных (3-10 мкм) и мелких (0,5-1,5 мкм) зерен призматической формы, которые равномерно распределены между собой (рис.). В материале наблюдается формирование зерен удлиненной призматической формы.

Сравнительные характеристики образцов керамических материалов, полученных на основе порошков нитрида кремния с механическим введением спекающих добавок: материал ОТМ-922 (2) и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  + (3-5) % MgO и композиционных одностадийных порошков  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -(3-5 %) MgO, представлены в таблице.

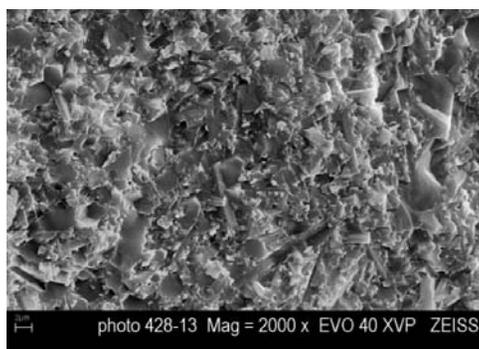
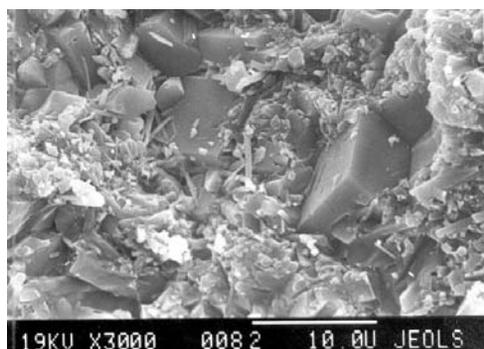


Рис. Сравнение микроструктуры керамики:  
а – ОТМ-922(2); б –  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-MgO}$  (3-5 % масс.)

Физико-механические характеристики исследуемых образцов керамики

Свойства	ОТМ-922 (2)	$\text{Si}_3\text{N}_4 + (3-5)\% \text{MgO}$	$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-}(3-5\%) \text{MgO}$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,00 – 3,20		3,10 – 3,17
Открытая пористость, %	0,5 – 1,0	0,0 – 1,0	0,2 – 1,2
Предел прочности при изгибе, МПа при 20 °С	470-700	460 – 680	540 – 785
1000 °С	500-625*	560	-
1200 °С	-	-	314 – 550
1300 °С	-	-	330 – 446
1400 °С	-	-	150 – 340
Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м <sup>1/2</sup> при 20 °С	6,0 – 7,5	5,5 – 7,4	4,6 – 6,2
1200 °С	-	-	7,0 - 10,2
1300 °С	-	-	4,8 – 8,8
1400 °С	-	-	3,5 – 5,1
Микротвердость, МПа	14000 – 16000	17270–22760	19520- 22910
ε	7,8 – 7,9	-	7,7 – 8,1
tgδ·10 <sup>4</sup>	110 – 126	-	19–80

\* остаточная прочность после окисления при 1000 °С в течение 50 ч

Анализ таблицы показывает, что при переходе на СВС-композиционные порошки наблюдается повышение прочности при комнатной температуре (на 100 МПа) и высокотемпературной прочности до 400 МПа при температуре 1300°С и до 200 МПа при 1400°С. Важным результатом является высокий уровень вязкости разрушения до 8–10 МПа·м<sup>1/2</sup> при температурах 1200-1300°С, что превышает аналогичные значения для лучшего высокотемпературного материала ОТМ-914 из плазмохимических порошковых композиций [ $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Y}_2\text{O}_3$ ], [3]. Также следует отметить существенное уменьшение значения тангенса диэлектрических потерь, обусловленное уменьшением размера зерна и повышением однородности структуры. По значениям диэлектрических свойств материал также приближается к уровню ОТМ-917.

## Литература

1. Келина И.Ю., Дробинская В.А., Плясункова Л.А. Горячепрессованная керамика на основе СВС-нитрида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. -1996. - № 9. -С.20-24.
2. Чевыкалова Л.А., Михальчик И.Л., Плясункова Л.А., Келина И.Ю., Загоржевский В.В. Исследования микронных порошков СВС нитрида кремния в технологии горячего прессования: сб. тез. докл. XVII междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов».- Обнинск, 2007.- С.60-62.
3. Келина И.Ю., Ткачева И.И., Аракчеев А.В., Ершова Н.И., Параносенков В.П. Горячепрессованные керамические материалы конструкционного назначения // Огнеупоры. – 1992. – № 3. – С.28-30.

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И РЕЖУЩИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $\text{Si}_3\text{N}_4$ С НАНОРАЗМЕРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

*Е.Ю.Шаронова, Я.Г.Дятлова, Н.Ю.Ковеленов, Н.В.Кузнецова, С.С.Орданьян, А.С.Осмаков, В.И.Румянцев* (ООО “Вириал”, г. Санкт-Петербург, Россия)

Одно из наиболее удачных применений керамики на основе нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) – режущий инструмент для механической обработки чугуна и суперсплавов. Керамический режущий инструмент отличается большей высокотемпературной твердостью, чем твердые сплавы, что позволяет использовать его для высокоскоростной обработки. Типичный прирост скорости снятия металла при использовании  $\text{Si}_3\text{N}_4$  по сравнению с твердосплавным инструментом составляет более 200%.

### Цель работы

Целью работы являлось изучение влияния способа и режима спекания на формирование структуры материала и физико-механические свойства полученных керамик, сопоставление физико-механических и режущих свойств керамики, полученной методом горячего прессования и компрессионного спекания.

### Материалы и методы

В качестве исходных порошков использовали композицию субмикронного и плазмохимического порошков нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) и активирующие спекание добавки ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Консолидация осуществлялась методами горячего прессования на прессе марки HP W 125 и компрессионного спекания в высокотемпературной вакуумно-компрессионной печи FP W 90-SD. На спеченных образцах определяли кажущуюся плотность, твердость, индентационную трещиностойкость, предел прочности при поперечном изгибе. Микроструктуру материала исследовали методами оптической и растровой микроскопии. Режущие испытания двух видов керамики проводили на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ Mazak VCN410A. В качестве объекта испытаний использовали режущие пластины СМП SNMN 120412. Обработку вели по чугуну марки СЧ20.

### Результаты

Проведен сравнительный анализ свойств плотной керамики, полученной методами горячего прессования и компрессионного спекания, подобраны режимы,

позволяющие получить материал с заданным (по аналогу) уровнем свойств (табл. 1). Известно, что спекание нитрида кремния идет по жидкофазному механизму за счет реакции оксидных добавок ( $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$ ) с  $SiO_2$ , содержащихся на поверхности частиц нитрида кремния. При этом формируется жидкая фаза, которая способствует фазовому переходу  $\alpha-Si_3N_4 \rightarrow \beta-Si_3N_4$  и затвердевает при охлаждении в виде зернограничной фазы. Плазмохимический порошок обладает повышенной активностью и может спекаться при более низкой температуре, образуя жидкую фазу в большем количестве. Установлено, что кристаллизация зернограничной фазы улучшает механические свойства. Высокий уровень свойств можно связать с бимодальным распределением зерен, т.е. сочетанием субмикронных (0,2-0,8 мкм) и крупных зерен игольчатой формы длиной 1-3 мкм и размером поперечного сечения 0,5-0,7 мкм (рис.). Такое распределение обеспечивает плотную упаковку за счет группировки мелких зерен вокруг крупных.

Таблица

Характеристики керамики  $Si_3N_4$ , полученной разными методами

Параметр	Горячего прессование		Компрессионное спекание		$Si_3N_4$ фирмы "SsangYong"	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,27		3,25		3,21	
Hv10, ГПА	16,1±0,1		16,3±0,1		16,2±0,1	
$K_{1c}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	5,4±0,5		5,4±0,1		5,6±0,3	
$\delta_{изг}$ , МПа	1005±42		930±36		-	
Режущие испытания	t, мин	Износ по задней грани ( $VB_B$ ), мм	t, мин	Износ по задней грани ( $VB_B$ ), мм	t, мин	Износ по задней грани ( $VB_B$ ), мм
	4,58	0,165	4,63	0,15	4,00	-
	7,33	0,18	6,96	0,165	6,00	-
	10,80	0,23	10,44	0,175	10,00	0,12

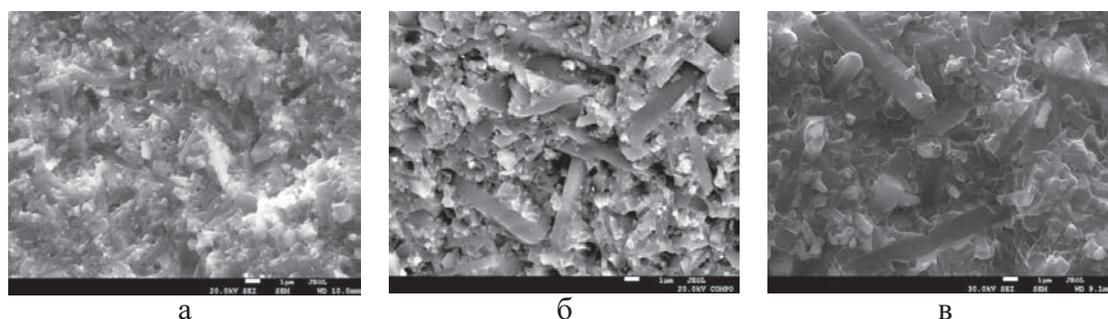


Рис. Микроструктура керамики  $Si_3N_4$ , полученной методами: а – горячего прессования; б – компрессионного спекания; в-  $Si_3N_4$  фирмы "SsangYong"

В результате проведения диагностики установлено, что свойства керамики, полученной методами горячего прессования и компрессионного спекания, сопоставимы с зарубежным аналогом (фирма “SsangYong”).

Керамика, получаемая компрессионным спеканием, не выпускается отечественными производителями. В ходе проведения настоящей работы было освоено производство режущего инструмента из нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) на вакуумно-компрессионном оборудовании. Данный метод дает большое преимущество с экономической точки зрения в силу большей производительности одной технологической операции за счет увеличения загрузки печи. Максимально возможная загрузка изделий в одном цикле спекания составляет 10000 шт.

### **Выводы**

Результаты режущих испытаний СМП, полученных компрессионным спеканием на промышленном оборудовании, оказались сопоставимы с результатами для горячепрессованного материала. За стандартное время испытаний (10 минут) рассматриваемая керамика продемонстрировала достаточно низкий износ. Достигнутый уровень свойств керамики, полученной методом компрессионного спекания, показал, что разработанный материал можно рекомендовать для использования в качестве режущего инструмента.

## **КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ**

*А.П.Дякина* (Санкт-Петербургский государственный технологический институт (ТУ), г. Санкт-Петербург, Россия)

Интерметаллиды – материалы, перспективные для изготовления новых конструкций в аэрокосмической, топливно-энергетической и других отраслях промышленности, работающих в условиях повышенных температур.

Целью работы является разработка нового класса композиционных материалов типа “кермет”, в которой цементирующей матрицей являются не металлы, а рационально выбранные интерметаллиды.

Для разработки жаропрочных материалов на основе интерметаллидных соединений значительный интерес представляют такие системы, как никель-титан, никель-алюминий и др.

При создании керметов с интерметаллидной компонентой были взяты системы, в которых  $\text{Me}^d\text{B}_2$ , обладающий приемлемой жаростойкостью (окалиностойкостью) в условиях эксплуатации – 700–1100°C в воздушной среде, сосуществует с большой группой интерметаллидов: система Ni-Me<sup>d</sup>-B (разрезы  $\text{Me}^d\text{B}_2$ - интерметаллиды).

На основании произведенных термодинамических расчетов диаграмм состояния в тройных системах Ni-Ti-B, Ni-Zr-B и Ni-Al-B, были выбраны составы керметов на основе  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ , а в качестве интерметаллидной матрицы использованы соединения в системах Ni-Ti, Ni-Zr и Ni-Al.

Жаропрочные интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля называют материалами следующего поколения благодаря благоприятному сочетанию комплекса физико-механических свойств. Эти материалы имеют низкую плотность (3,7-6,0 г/см<sup>3</sup>) и обладают высокой жаропрочностью (до 1200°С), высокими характеристиками коррозионной стойкости, жаростойкости и износостойкости. Интерметаллидные сплавы на основе титана могут работать до температуры +850°С без защитных покрытий, сплавы на основе никеля – до температуры +1500°С.

Методом рентгенофазового анализа подтвердили, что получены порошки планируемых интерметаллидов из элементов.

По соответствующим разрезам  $TiNi_3-TiB_2$ ,  $TiNi-TiB_2$ ,  $Ti_2Ni-TiB_2$ , а также  $Zr_2Ni_5-ZrB_2$ ,  $ZrNi-ZrB_2$ ,  $Zr_2Ni-ZrB_2$ ,  $NiAl-TiB_2$  планируется подготовить опытные образцы (смеси) и определить наиболее низшую температуру появления расплава (Тэвт.) в соответствующих «квазибинарных» системах. Полученная информация необходима для осуществления такой важной операции, как спекание композиций в указанных разрезах. Получение перспективного для практического применения материала сопряжено с поиском оптимального по структуре состава, обладающего комплексом свойств, гарантирующих его применение в условиях не только указанных температур, но и допустимых механических нагрузках.

## **ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ**

*Н.Н. Саванина, И.Н.Бизин, А.А.Жуков, Г.И.Куликова*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Технология литья под давлением фасонных керамических изделий (Ceramic Injection Moulding) находит все большее промышленное применение для изготовления деталей сложной геометрической формы. Ее обозначают общепринятой аббревиатурой «СИМ-технология».

Известны важные преимущества этой технологии перед традиционными способами: высокая производительность, возможность автоматизации процесса, возможность производства деталей сложной конфигурации с точными размерами, в том числе миниатюрных, равноплотность заготовки, обжиг изделий без засыпки и т. д.

Для литья под давлением применимы любые керамические порошки, которые можно смешивать с технологическим полимерным связующим, в частности, оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ), фарфор, карбид кремния ( $SiC$ ), диоксид циркония ( $ZrO_2$ ) и т.д.

СИМ-технология состоит из следующих основных этапов:

- смешивание керамического порошка с термопластичным связующим;
- гомогенизация полученной смеси;
- гранулирование материала;

– литье изделий при высоком давлении и температуре плавления связующего на термопластавтомате (ТПА);

- удаление технологического связующего из изделий;
- спекание изделий.

В настоящей работе представлена технология инъекционного формования изделий – изоляторов свечей зажигания из материала на основе оксида алюминия. В качестве исходных компонентов использовалась шихта на основе порошков оксида алюминия с  $S_{уд.} \sim 3,7 - 4,2 \text{ м}^2/\text{г}$  и термопластичное связующее – сополимер на основе полиэтиленоксида торговой марки «Силипласт» производства Германии.

Необходимым этапом СИМ-технологии является гранулирование смеси порошка с полимерным связующим. Гранулят стандартной формы и размеров требуется для автоматического дозирования материала при литье. Средний размер гранул  $\sim 3 \times 3 \times 3 \text{ мм}$ .

Установлены оптимальные параметры процесса получения гранулята при содержании связующего 12 – 30 % масс.:

- распределение температуры на валах - (125 – 110) °С / (110 – 105)°С;
- скорость подачи сырья - 10 – 15 усл.ед.;
- соотношение скоростей вращения валов - 73 / 57 об./мин.;
- зазор между валами – 0,5 мм.

Литье изоляторов проводили на термопластавтомате, позволяющем формовать изделия при высоких давлениях впрыска – до 2500 бар. Максимальный объем впрыска составляет 145 см<sup>3</sup>; скорость потока впрыска – до 140 см<sup>3</sup>/с.

Оптимизированы рабочие диапазоны значений ключевых параметров инъекционного литья изоляторов, которые определяют качество отливок:

- давление впрыска – 800 – 2000 бар;
- выдержка под давлением – 5 – 12 сек;
- скорость потока впрыска – 5 – 70 см<sup>3</sup>/сек;
- температура узла впрыска – 160°С;
- температура формы – 40 – 80°С.

Конкретные соотношения этих параметров зависят от свойств керамического порошка и содержания связующего.

Исследования инъекционного формования изоляторов из оксида алюминия проводили с содержанием связующего в пределах 12 – 30 % масс. Наибольшую плотность после спекания – до 3,75 г/см<sup>3</sup> имеют изоляторы с содержанием связующего «Силипласт» 14 % масс. Согласно результатам рентгеновской дефектоскопии заготовки изоляторов не имеют внутренних дефектов.

Следующим необходимым этапом СИМ-технологии является частичное удаление связующего промывкой отливок в воде с целью создания системы открытых пор для облегчения выхода газообразных продуктов разложения связующего из объема материала. Это возможно благодаря частичной растворимости связующего. Удаление связующего можно проводить либо промывкой в холодной проточной воде, либо в емкости с горячей водой.

Максимально возможное количество связующего удаляется из изоляторов после промывки в проточной воде в течение 72 часов. Быстрее (за сутки) растворение происходит в горячей воде при 70° С.

После частичного удаления связующего в воде изоляторы обжигали в два этапа. Сначала проводили термодеструкцию оставшегося в отливке связующего

до температуры  $\sim 340^\circ\text{C}$  со скоростью нагрева  $10 - 18$  град / час, а затем – окончательный обжиг в области температур спекания материала –  $1560 - 1650^\circ\text{C}$ .

Важно отметить, что удаление связующего не приводит к деформации изделий, поэтому обжиг проводят без засыпки. Некоторое коробление изоляторов наблюдалось лишь при повышенном содержании связующего  $\sim 30\%$  масс.

Значения линейной усадки при обжиге составляют  $9,1 - 14,5\%$  для составов с содержанием связующего  $13 - 17\%$  масс.

После обжига при температурах  $1600 - 1650^\circ\text{C}$  получены бездефектные изоляторы с относительной плотностью до  $\sim 99,5\%$ .

## СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛЬФРАМАТА ЦИРКОНИЯ

*Е.С.Дедова<sup>1</sup>, А.И.Губанов<sup>2</sup>, В.С.Шадрин<sup>3</sup>, С.Н.Кульков<sup>1,3</sup>*

(<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; <sup>2</sup>ФГБУН Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; <sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия)

Вольфрамат циркония  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  обладает уникальным свойством – отрицательным коэффициентом теплового расширения от  $-273$  до  $770^\circ\text{C}$ , который равен  $-9,6 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ . Традиционно вольфрамат циркония получают твердофазной реакцией между оксидами циркония и вольфрама при температурах выше  $1110^\circ\text{C}$ . Однако при высоких температурах вольфрам способен сублимироваться, что не позволяет получать монофазный  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ . Гидротермальный синтез позволяет получать  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  посредством относительно низкотемпературного разложения прекурсора  $\text{ZrW}_2\text{O}_7(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_2$ . Целью данной работы является изучение структуры  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ , синтезированного гидротермальным синтезом.

На рис. 1 представлены РЭМ, ПЭМ изображения и распределение частиц по размерам синтезированного порошка  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ . Морфологический анализ показал, что порошок состоит из агломератов нерегулярной формы и стержневидных частиц, средний поперечный размер равен  $0,2$  мкм. Помимо этого, данные частицы имеют собственную структуру, которая представлена в виде сросшихся зерен, средний размер которых  $0,2$  мкм. Распределение стержневидных частиц по размерам имеет бимодальный характер. Преимущественное количество частиц имеет размер до  $0,7$  мкм. Согласно энергодисперсионному анализу, атомное соотношение циркония и вольфрама в таких частицах составляет  $\text{Zr}:\text{W} = 1:2,07$ , что хорошо согласуется со стехиометрией кубического вольфрамата циркония  $\text{Zr}:\text{W} = 1:2$  [1].

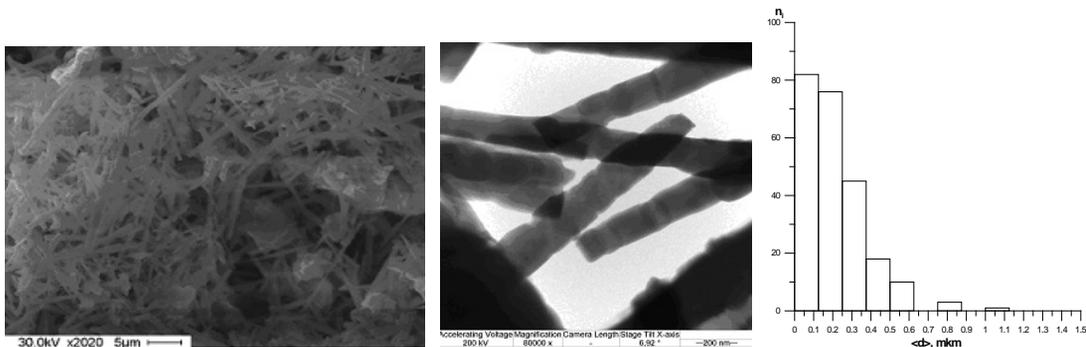


Рис. 1. РЭМ, ПЭМ изображения и распределение стержневидных частиц по размерам порошка  $ZrW_2O_8$

Данные термического анализа  $ZrW_2O_8$  показаны на рис. 2. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) показала, что на экспериментальной кривой фиксируется несколько пиков: экзотермический пик при  $825^\circ\text{C}$  и эндотермические – при  $1148$  и  $1261^\circ\text{C}$ . На термограмме второй эндотермический пик ( $1261\text{--}1270^\circ\text{C}$ ) больше, чем пик при  $1148\text{--}1164^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 представлены высокотемпературные рентенограммы вольфрамата циркония при различных температурах *In Situ* с шагом  $100^\circ\text{C}$ . Видно, что при нагревании образца от комнатной температуры до  $150^\circ\text{C}$  в материале наблюдается постепенное уменьшение интенсивности некоторых пиков вольфрамата циркония, что связано с постепенным фазовым переходом из низкотемпературной  $\alpha$ -фазы кубического вольфрамата циркония в высокотемпературную  $\beta$ -фазу. Полностью переход заканчивается при  $200^\circ\text{C}$ . Дальнейшее повышение температуры до  $750^\circ\text{C}$  приводит к появлению пиков, соответствующих оксидам циркония и вольфрама, что связано с потерей кинетической стабильности [2] и разложением на оксиды циркония и вольфрама. Дополнительные пики моноклинного оксида циркония при температурах ниже  $750^\circ\text{C}$  связаны с примесями этой фазы на подложке. Рентгеноструктурный анализ показал, что в синтезированном порошке вольфрамата циркония размер областей когерентного рассеивания, определенный по уширению рентгеновских рефлексов, составил  $97$  нм, микронапряжения составили  $0,067$ . Расчет параметра кристаллической решетки кубического вольфрамата циркония хорошо согласуется с литературными данными [3] и составил  $a = 9.15215 \text{ \AA}$ .

Экстремумы, полученные на ДСК кривой, можно объяснить следующим образом: первый пик ( $825\text{--}851^\circ\text{C}$ ) соответствует потере кинетической стабильности [2] и полному разложению вольфрамата на оксиды циркония и вольфрама, что согласуется с результатами рентгенофазового анализа; пик ( $1148\text{--}1164^\circ\text{C}$ ) может соответствовать повторному синтезу вольфрамата циркония, который становится термодинамически стабильным в данном температурном диапазоне [1,2]; пику ( $1261\text{--}1270^\circ\text{C}$ ) соответствует интенсивная потеря массы ( $\Delta g = 15\%$ ), что, очевидно, относится к плавлению вольфрамата циркония [1].

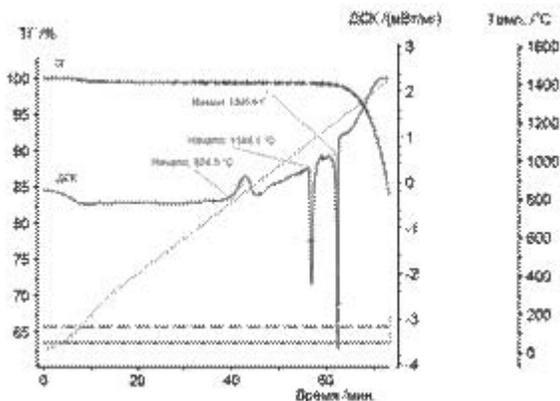


Рис. 2. ТГ-ДСК анализ порошка вольфрамата циркония

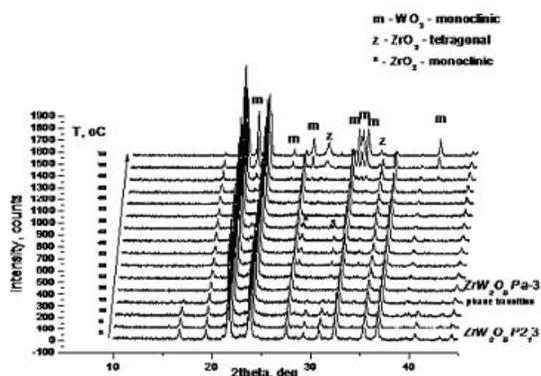


Рис. 3. *In-situ* высокотемпературные рентгенограммы порошка

### Литература

1. L. L. Y. Chang, M. G. Scroger, and B. Phillips. *J. Am. Ceram. Soc.*, 50, 211–215, 1967.
2. Evans J. S. O. *The Royal Society of Chemistry., Dalton Trans.*, pp. 3317 – 3326, 1999.
3. Mary, T. A.; Evans, J. S. O.; Vogt, T.; Sleight, A. W. 272, p.p.90 – 92, 1996.

## КОМБИНИРОВАННАЯ БРОНЯ

**В.В.Викулин, И.Л.Шкарупа, Д.А.Рогов, П.В.Коваленко**  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

С появлением высокоэффективных поражающих средств и повышением требований к бронезащите ресурс традиционных металлических броневых материалов оказался исчерпанным, что привело к созданию многослойной комбинированной брони.

Идеология комбинированной защиты заключается в сочетании нескольких слоев разнородных материалов с приоритетными свойствами, включающая фронтальный слой из особоотвердых материалов и высокопрочный энергоемкий тыльный слой.

В качестве материалов фронтального слоя используют освоенную в промышленном производстве керамику высшей категории твердости: оксид алюминия, карбиды кремния и бора. Задача керамики сводится к нарушению целостности закаленного сердечника и оболочки пули (скалывание, дробление, частичное или полное разрушение) вследствие напряжений, возникающих при их высокоскоростном взаимодействии с высокотвердыми материалами и значительным поглощением их первоначальной энергии.

Уязвимой зоной фронтальной поверхности бронепластины является место стыковки керамических пластин. Предложена конструкция, устраняющая данный недостаток. Расчетным путем показана возможность снижения скорости пули при

попадании в эту зону с 715 м/с (скорость полета пули) до 250 м/с (при входе фрагментов пули в подложку из волокнистого композита) (рис.).

Используя численные методы инженерного анализа, можно моделировать воздействие высокоскоростных пуль на многослойную объемно-комбинированную броню, что позволит резко сократить количество экспериментов при выборе оптимальной конструкции брони.

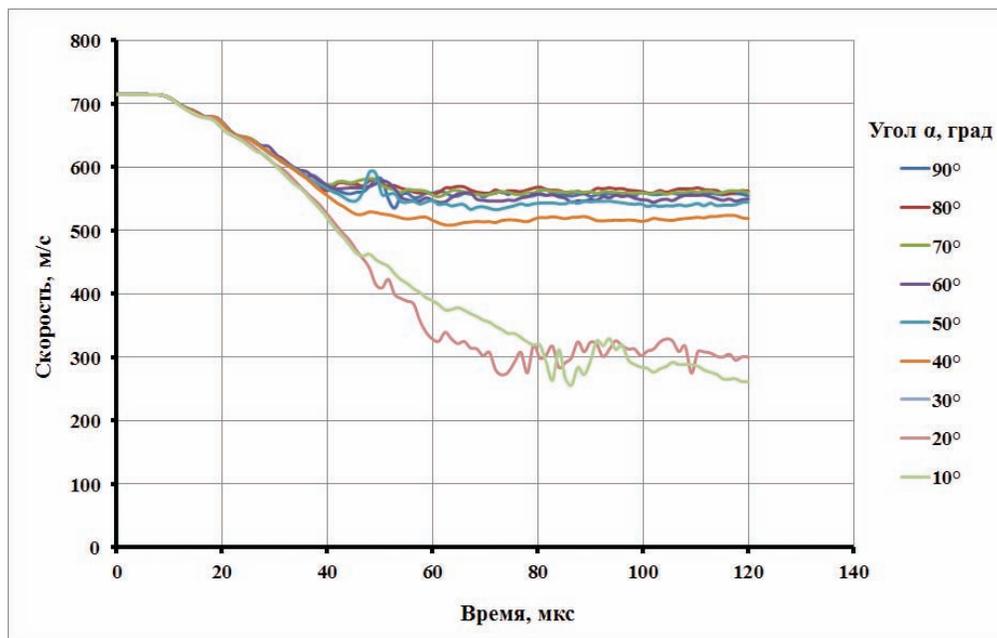


Рис. Изменение скорости пули от времени в зависимости от различных значений угла  $\alpha$

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РЕАКЦИОННОМУ СПЕКАНИЮ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК НИТРИДА КРЕМНИЯ

*А.О.Забейжайлов, А.И.Ганичев, В.Н.Рудыкина, И.Н.Курская*  
(ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

В настоящей работе приведены результаты по азотированию крупногабаритных кремниевых заготовок высотой до 600 мм и толщиной стенки 10–12 мм. Сложность процесса реакционного спекания заключается в высокой экзотермичности реакции азотирования. В ходе реакции прямого азотирования кремния выделяемая энергия равна 739 Дж/моль. При реакционном спекании крупногабаритных заготовок это может приводить к значительному превышению заданной температуры в изделии, что, в свою очередь, может вызвать процесс плавления кремния и привести к образованию дефектов.

При разработке операции реакционного спекания крупногабаритных заготовок была проведена серия обжигов по ступенчатому режиму азотирования

образцов кремния (заполнение камеры печи азотом происходило в интервале температур 900–1500°C). При этом после каждого этапа выдержки (через 50–100°C), начиная с температуры 1150°C, происходила остановка режима для извлечения и взвешивания заготовки. Заготовки, реакционное спекание которых проводили по одинаковому температурному режиму, имели разный прирост массы (привес) после выдержки при 1150°C. Кроме того, заготовки содержали большие выпльвы кремния уже на начальном этапе реакции азотирования. Учитывая, что  $T_{пл}(Si) \sim 1410^\circ\text{C}$  значительно выше заданной температуры в печи, возникла необходимость детального исследования температурного поля заготовки в процессе режима обжига.

Для исследования распределения температуры по поверхности заготовки в процессе реакционного спекания, в объем печи через вакуумное уплотнение были введены четыре дополнительные термопары ВР А-1.

Было установлено, что после напуска азота при подъеме температуры выше 1000°C может происходить неконтролируемый разогрев заготовки из-за выделения энергии в процессе протекания реакции.

С целью устранения неконтролируемого разогрева был изменен режим реакционного спекания заготовок путем добавления дополнительной выдержки при азотировании на 1080 °C в течение 5 часов.

Результатом измененного режима азотирования явилось то, что зона перегрева сместилась в высокотемпературную область, а его амплитуда уменьшилась.

Последующая итерация по изменению режима азотирования была проведена с более значительными корректировками, целью которых было полное устранение неконтролируемого перегрева заготовки без увеличения длительности режима.

В итоге был разработан режим реакционного спекания, в ходе которого дополнительные термопары, установленные на поверхности заготовки, не фиксировали всплеска температуры. По данному режиму были получены крупногабаритные изделия из нитрида кремния с равномерно распределенными свойствами по всему объему, без образования выпльвов кремния и других дефектов.

## **МЕТОД ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ, В ТОМ ЧИСЛЕ КОСМИЧЕСКИХ**

***В.И.Овчинников***

(ОХП “НИИ импульсных процессов с ОП” ГНУ ИПМ, г. Минск, Беларусь)

Показана возможность применения энергии взрывчатых веществ и взрывных технологий в области моделирования процессов соударения микрочастиц (космической пыли) с поверхностью различных материалов, в том числе применяемых для конструирования космических аппаратов (КА) и элементов микроэлектроники, работающих в экстремальных условиях ударно-волнового динамического нагружения.

## Введение

Приоритетной проблемой фундаментальных научных исследований с использованием материаловедческой и технологической информации является создание новых композиционных материалов (КМ) и технологий, которые должны обеспечить работу изделий в экстремальных условиях, в том числе космических. Созданию КМ с новым уровнем свойств, должно предшествовать выявление и исследование взаимосвязи и взаимообусловленности различных процессов, протекающих в космическом пространстве, с обязательным учетом влияния на эти процессы радиационной активности и электромагнитных полей.

## Материалы и методика эксперимента

Для проведения экспериментов по оценке влияния высокоскоростных потоков микрочастиц (ПМЧ) на работоспособность интегральных микросхем (ИМС) в условиях ударно-волнового (УВ) нагружения, а также эффектов, реализуемых при соударении частиц с поверхностью контейнеров с микросхемами, использовали микрочастицы порошков SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фракции 60 - 70 мкм. Ускорение микрочастиц и обработку образцов микросхем, размещенных в металлические контейнеры из стали 45, проводили по схемам, (рис.1). Скорость потока микрочастиц V – 1000-2500 м/с. Фоновое давление составляло 8-10 ГПа, время воздействия – порядка 10 мкс.

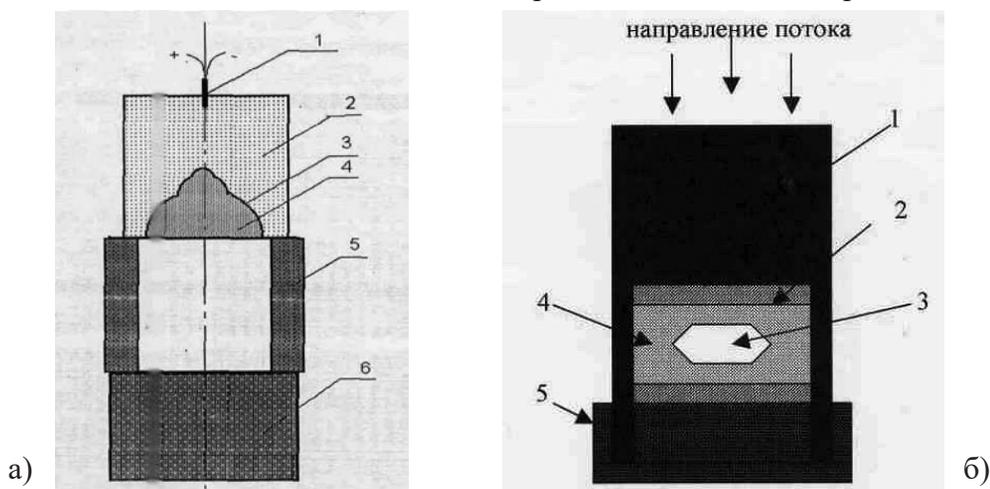


Рис.1. Схема эксперимента: а) схема взрывного ускорителя : 1 – детонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – контейнер для порошка; 4 – порошок; 5 – опора; 6 – образец; б) схема расположения микросхемы в контейнере: 1 – контейнер; 2 – фторопласт; 3 – микросхема; 4 – поролон; 5 – крышка контейнера

Регистрацию импульса электромагнитного излучения (ЭМИ) проводили с помощью разработанного прибора на основе эффекта Холла и методики расчета индукции магнитного поля. В экспериментах использовали микросхемы (АС10), предназначенные для работы на борту КА. Тестирование выходных параметров ИМС до и после обработки контейнеров проводили по разработанной методике и стандартам предприятия изготовителя. Отличительная особенность методики проведения испытаний ИМС заключается в использовании ИМС в качестве детекторов. При этом по изменению выходных эксплуатационных параметров можно определить их работоспособность и оценить защитные свойства материала корпуса или экрана.

## Результаты исследования и их обсуждение

В процессе исследований разработаны: физико-математическая модель заряженного потока вещества ускоренного взрывом, взрывной ускоритель ПМЧ, прибор регистрации ЭМИ, методика испытаний КМ и ИМС в условиях, приближенных к космическим.

Установлено, что основными факторами при соударении высокоскоростных ПМЧ (сгустков космической пыли), которые могут оказать воздействие на элементы микроэлектроники (транзистор, микросхемы, элементы памяти и т.п.), могут быть:

- УВ, а также генерируемые ими высокочастотные процессы и условия резонанса;

электромагнитное и ионизирующее излучение, индуцируемые магнитные и наведенные электрические поля;

- тепловое воздействие;

- проникающие микрочастицы.

Выполненный цикл исследований позволил зарегистрировать появление дефектов на поверхности кристалла микросхемы, приводящих к ее отказу. На рис. 2 представлены характерные зоны повреждения кристалла микросхемы:

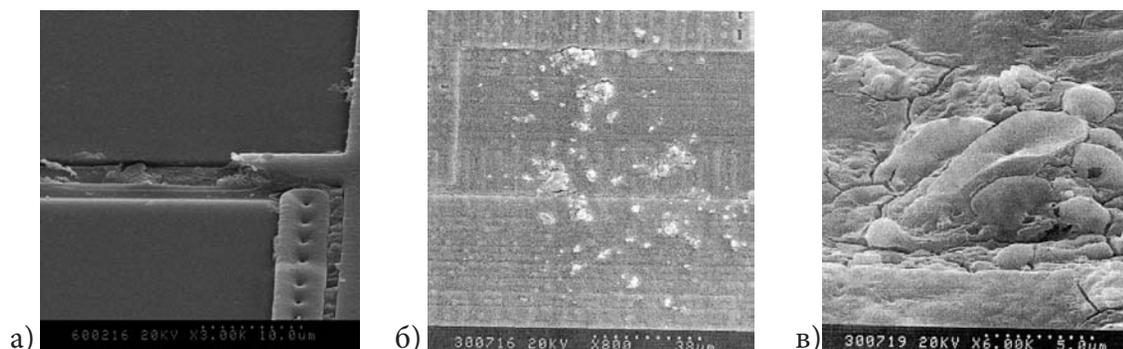


Рис. 2. Дефекты и повреждения в микросхемах после воздействия высокоскоростным потоком микрочастиц:

- а) механические повреждения в виде трещин и сколов кремниевой подложки (результат воздействия УВ и высокого давления);  
б) точечные включения (в результате массопереноса из корпусной части); в) места локального разогрева, причем столь существенного, что приводит к росту новых кристаллов из материала микросхемы

После соударения с потоком микрочастиц и тестирования на стенде ряд микросхем, не имевших механических повреждений, имели отклонение рабочих параметров на 10–40 % от допустимых значений. Предположительно это связано с импульсом ЭМИ, сопровождающего соударение ПМЧ с металлической преградой.

Воздействие импульсного электромагнитного и ионизирующего излучения на элементы микроэлектроники, применяемой в КА, является актуальной задачей и требует разработки средств их защиты. Решение данной задачи обусловлено комплексным подходом, включающим разработку систем

защиты, экранирования и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) с использованием специальных материалов и конструкций.

Материалы для поглотителей ЭМИ получали, используя методы порошковой металлургии и технологии КМ. В качестве исходного сырья применяли порошки (оксиды алюминия, кремния, титана и др.), закрепленных в связующем на основе неорганических или органических (смолы, полимеры, пластмассы) материалов. Такие материалы обладают как высокой эффективностью экранирования, так и большим значением коэффициента поглощения ЭМИ.

Использование в качестве поглощающей компоненты различных по своей природе материалов (металлы, оксиды, органические соединения) приводит к изменению свойств конечного КМ. Изменение радиопоглощающих свойств КМ, изготовленных на основе порошкообразных составов, герметизированных различными высокомолекулярными соединениями, можно контролировать по измерению удельного поверхностного сопротивления и изменению диэлектрической и магнитной проницаемости в течение длительных временных интервалов в условиях эксплуатационных нагрузок, зависящих от удельной электропроводности.

Для проведения исследований изготавливали образцы КМ, состоящие из нескольких слоев (рис. 3).

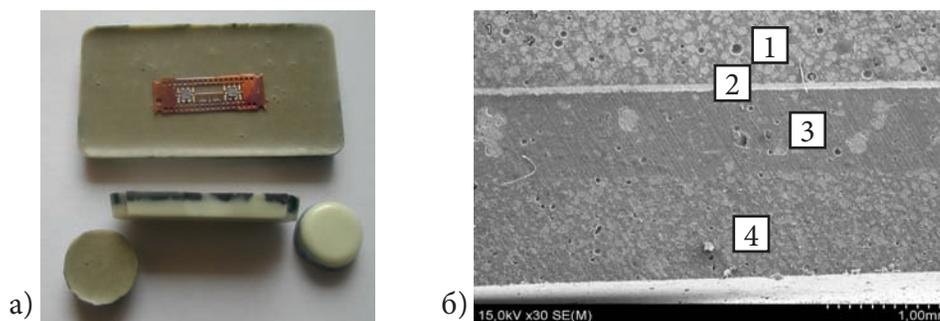


Рис.3. Многослойный композиционный материал:

- а) КМ; б) структура КМ: 1 - слой (полимерная матрица (ПМ) +  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); 2 - слой (аморфная фольга  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{14}\text{P}_6$ ); 3 - слой (ПМ + фуллерен  $\text{C}_{60}$ ); 4 - слой (ПМ +  $\text{SiO}_2$ )

В качестве наполнителя использовались порошки окиси алюминия, окиси кремния с размером частиц 20-50 мкм, а также нанопорошки фуллерена  $\text{C}_{60}$ . В качестве матричного материала использовалась полимерная композиция с высокой адгезией к широкому ряду материалов. Процентное соотношение порошкообразного наполнителя (по объёмному содержанию) в композиции варьировалось от 15 до 50 %. Были подготовлены составы с различным содержанием исходных компонентов. В качестве отражающего металла использовали фольгу из аморфного сплава  $\text{Fe}_{40}\text{-Ni}_{40}\text{-P}_{14}\text{-B}_6$  толщиной 300-600 мкм. Исследуемые образцы представляли собой многослойный КМ, предназначенный для корпусной части ИМС с защитными функциями от электромагнитного и ионизирующего излучения.

## **Заключение**

Проведенные исследования показали возможность использования энергии взрыва в экспериментах по моделированию процессов соударения микрочастиц (космической пыли), их воздействия на защитные материалы и элементы микроэлектроники в экстремальных условиях их эксплуатации.

Полученные результаты по влиянию УВ, импульса ЭМИ и проникающей способности микрочастиц на элементы микроэлектроники и проведение дальнейших исследований в данном направлении позволят сделать выбор материалов и создать новые КМ с повышенными защитными свойствами для военных и космических целей, где существует опасность подобного воздействия.

## **МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ “МЕТАЛЛ-КЕРАМИКА” ПРИ НАГРУЖЕНИИ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПЛОСКОГО И ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ТИПОВ**

*О.В.Татарников, В.С.Фетисов, Д.А.Рогов*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

При разработке конструкторско-технологических решений соединений металлических и неметаллических элементов конструкций, которые функционируют в условиях повышенных температур необходимо решать проблему температурных напряжений и деформаций, вызванных неоднородным прогревом конструкции. Соединение неметаллов и металлов недопустимо традиционным методом с помощью механического крепежа вследствие разности их температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР). В частности, эта проблема является одной из ключевых для антенных обтекателей ракет, в которых широко применяются клеевые соединения.

На предприятии ОАО «ОНПП «Технология» для соединения керамической оболочки обтекателя с металлическим шпангоутом используются кремнийорганические герметики типа ВИКСИНТ. Для надежной адгезии герметика к металлическим и керамическим поверхностям используются специальные виды подслоя [1].

Обеспечение необходимого уровня прочности при сдвиге в клеевом слое узла соединения является одним из требований, выполнение которого требует подтверждения при контроле качества изделия.

Прочность клеевого соединения «оболочка-шпангоут» каждого обтекателя оценивают по средним значениям результатов испытаний на прочность при сдвиге образцов-спутников по методике, разработанной на предприятии с учетом требований, изложенных в [2]. Схема испытания приведена на рис. 1.

При расчете критических касательных напряжений  $\tau$ , возникающих в клеевом слое при испытаниях, используются следующие предположения:

В клеевом слое реализуется напряженное состояние чистого сдвига;

Напряженное состояние клеевого слоя является однородным.

Если полученный результат оказывается ниже уровня, заданного в

технической документации, то изделие бракуется.

Проведенные расчеты показали, что оба эти предположения являются неточными. Во-первых, в клеевом слое реализуется напряженное состояние, отличающееся от чистого сдвига и, во-вторых, в краевых зонах возникают концентрации напряжений, заметно превышающие уровень средних напряжений клеевого слоя.

Для устранения отмеченных недостатков методики испытаний был разработан метод контроля качества клеевого соединения «металл-керамика» при нагружении сжатием модельного цилиндрического образца телескопического типа.

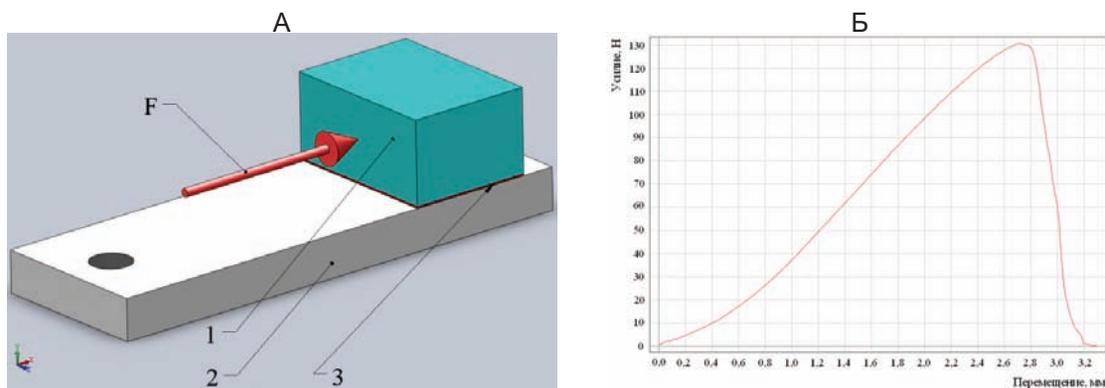


Рис. 1. Схема испытания на сдвиг клеевого соединения:

А – схема нагружения (1 – керамическая призма, 2 – металлическая пластина, 3 – герметик,  $F$  – прилагаемое усилие); Б – диаграмма зависимости «усилие-перемещение»

Предлагаемый образец состоит из керамического цилиндра и металлического пуансона, соединенных между собой адгезивом. Телескопическая сборка на специальной опоре устанавливается в рабочее пространство универсальной испытательной машины.

Размеры образца и площадь склейки определялись с помощью модельного эксперимента. Напряженно-деформированные состояния клеевого соединения образца и натурального изделия рассчитывались с использованием конечно-элементных моделей в системе FEMAP-NASTRAN на основе подхода, представленного в работе [3].

В работе рассматривалось детальное отличие напряжений, возникающих в клеевом слое образцов двух вышеуказанных типов. Показаны распределения напряжений по длине клеевого слоя, установлены места концентрации касательных и растягивающих напряжений, приводящих к возникновению мест когезионного или адгезионного типов разрушения.

Методами численного моделирования установлены протяженности зон концентрации напряжений в зависимости от типа образца, его геометрических размеров, а также от толщины клеевого слоя. Выработаны рекомендации по пригодности того или иного типа образцов для подтверждения работоспособности изделия в целом.

Проведенные расчеты и исследования по оценке влияния масштабного фактора подтвердили соответствие напряженно-деформированных состояний клеевого соединения модельного образца и соединения натурной керамической оболочки с металлическим шпангоутом. Полученные результаты позволили разработать новый подход к экспериментальному моделированию напряженно-деформированного состояния в узле соединения керамической оболочки с металлическим шпангоутом, обеспечивающий необходимый уровень однородности напряжений в клеевом слое, а также вид напряженного состояния адгезива. Этот подход может быть положен в основу метода контроля качества клеевого соединения «металл-керамика» на образцах – свидетелях.

#### Литература

1. Русин М. Ю., Антонов В. В., Ромашин В. Г. Научно-технические проблемы создания перспективных конструкционных материалов для обтекателей управляемых ракет // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб. тезисов XIX Междунар. науч.-техн. конф. (5-7 октября 2010 г.). – Обнинск, 2010. – С. 78-80.
2. КЛЕИ. Метод определения прочности при сдвиге. ГОСТ 14759-69.
3. Татарников О. В., Русин М. Ю., Воробьев С. Б., Прасолов А. Н. Моделирование упругого поведения кремнийорганических герметиков при больших деформациях // Клеи. Герметики. Технологии. – 2008. – № 9. – С. 20-23.

### **БОЛЬШЕМЕРНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КОРПУСА ПОДШИПНИКОВ С ПОВЫШЕННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ**

*В.В.Макаренко, Г.Д.Семченко* (Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, г. Харьков, Украина)

Подшипники широко используются в аэрокосмической и оборонной промышленности, металлургической промышленности, станкостроении, в подводных аппаратах и т.д. Именно в аэрокосмической промышленности для повышения стойкости подшипников в потоке ионизированных газов необходимо применять корпуса, которые должны быть изготовлены из высококачественных керамических износостойких материалов. Керамические корпуса подшипников изготавливают по различным технологиям из порошков тугоплавких бескислородных соединений и окислов алюминия и циркония. Учитывая то, что корпуса подшипников представляют собой изделия сложной конфигурации, а размером до 250 мм – это уже крупногабаритное изделие с тонкими стенками, имеющими отверстия, разработка технологии изготовления керамического изделия, которое должно подвергаться механической обработке, представляет большой практический интерес.

Нами разработана технология и изготовлена партия керамических корпусов подшипников на основе корундовой матрицы, модифицированной элементоорганическим веществом, и муллитокремнеземистого или

поликристаллического корундового волокна в качестве армирующего элемента с использованием пластифицированного золь-гель связующего. Изделия изготавливали методом полусухого прессования. Свежеотпрессованные заготовки имели высокие прочностные характеристики, обладали достаточной влагустойчивостью, что позволяло их подвергать механической обработке для получения изделий особо сложной конфигурации. Благодаря хорошим геотехнологическим свойствам масс при использовании пластифицированного золь-гель связующего исключается возможность появления трещин.

В результате термообработки указанных шихт были созданы изделия из керамических композиционных материалов, представляющего собой корундовый материал с высокими прочностными характеристиками (предел прочности при сжатии до 910 МПа) благодаря армированию керамическими волокнами. Установлено, что муллитокремнеземистое волокно при нагревании подвергается разрушению, которое обусловлено образованием и ростом кристаллов муллита и кристобалита, отрицательно сказывающихся на свойствах керамического материала. Особенно интенсивно разрушение муллитокремнеземистого волокна происходит в восстановительной среде. Но в процессе восстановительного обжига на поверхности армирующих волокон образуется оксинитридная пленка кремния, что повышает термостойкость материала, несмотря на частичное разрушение волокон.

Наиболее эффективным для создания композиционного материала для корпуса подшипников с высокой термостойкостью и износостойкостью в потоках ионизированных газов оказалось применение для армирования корундовых матриц поликристаллического волокна в весьма небольших количествах при условии, что для керамической матрицы применяют механоактивированный порошок электрокорунда элементоорганическим соединением. Установлено, что модифицированный порошок электрокорунда представляет собой не только аморфизированный электрокорунд с дефектами кристаллической решетки  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , но он армирован мелкими кристаллами до 100 нм механохимически синтезированного (при 550°C) муллита, который, правда, менее термостабилен, чем муллит, который синтезируется при 1350°C, но оказывает положительное влияние на дополнительное самоармирование необоженной корундовой матрицы, что позволяет уменьшить количество вводимого для создания фрагментарной структуры поликристаллического корундового волокна до 1 % и облегчить механическую обработку изделий.

## **НЕФРИТТОВАННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ГЛАЗУРИ НА ОСНОВЕ ЦЕОЛИТОВОГО ТУФА**

*А.В.Верченко* (Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), г.Новочеркасск, Россия)

Разработка шихтовых составов сырых керамических глазурей основывается, прежде всего, на правильном подборе сырьевых компонентов, совместное

сплавление которых при требуемой температуре образует прочное стеклообразное покрытие на поверхности керамического изделия с заданными эксплуатационными характеристиками.

Одним из малоизученных, но перспективных материалов для приготовления сырых керамических глазурей является цеолитовый туф.

В данной работе проведен подбор шихтовых составов нефритованных керамических глазурей для керамического гранита с использованием цеолитового туфа.

Цеолитовый туф вводился в состав сырых керамических глазурей в количестве 10, 15, 20 и 30 % взамен нефелина. Разработанные шихтовые составы приведены в табл.

Таблица

Составы шихт нефритованных керамических глазурей

Наименования материала	Содержание, % по массе			
	ГМ1	ГМ2	ГМ3	ГМ4
Глина ВКН-2	5	5	5	5
Каолин	10	10	10	10
Цеолитовый туф	10	15	20	30
Полевой шпат	5	5	5	5
Нефелин	45	40	35	25
Волластонит	5	5	5	5
Карбонат бария	7	7	7	7
Силикат циркония	6	6	6	6
Глинозем	2	2	2	2
Оксид цинка	5	5	5	5
Триполифосфат натрия	0.2	0.2	0.2	0.2
КМЦ	0.2	0.2	0.2	0.2

Глазури готовились совместным мокрым помолом сырьевых компонентов шихт в фарфоровых барабанах с уралитовыми мелющими телами. Тонкость помола контролировалась остатком на сите № 0.045 и составляла 2-4 % от общего количества сухого вещества в шихте.

Обжиг проводился в муфельной печи с электрическими нагревателями в течение 60 минут, с постепенным подогревом, изотермической выдержкой при 1200°C в течение 15 минут и плавным охлаждением образцов.

Полученные глазурные покрытия обладали гладкой поверхностью и хорошим сцеплением с керамогранитным черепком.

Глазури ГМ1-ГМ2 имели матовую, а ГМ-3 и ГМ-4 полублестящую поверхности, что говорит о том, что с увеличением процента ввода цеолитового туфа в состав глазури происходит снижение температуры плавления компонентов шихты, появляется блеск и улучшается разлив глазури.

Разработанные глазури были проверены согласно методике ГОСТ 27180-2001 на истираемость, химическую стойкость и прочность по шкале Мооса. Все глазури

оказались химически стойкими к действию растворов кислот и щелочей и обладали третьей степенью износостойкости. Прочность глазурей ГМ-1 и ГМ-2 по шкале Мооса составила «6», а глазурей ГМ-3 и ГМ-4 – «7», что говорит о повышении прочности глазури с увеличением количества цеолитового туфа в её составе.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что использование цеолитового туфа в шихтовых составах нефритованных глазурей представляется возможным, кроме того, применение цеолитового туфа позволяет снизить температуру плавления глазури, повысить её блеск и прочность.

## ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА $\beta$ -СИАЛОНА

*Е.Н.Пряилова, А.Р.Саитова* (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия)

Сиалоны являются перспективными материалами для получения высокопрочных изделий высокотемпературного назначения. Они сочетают в себе в известной мере достоинства нитридов и оксидов. Поскольку в сиалонах сохраняется кристаллическая решетка нитрида кремния, механические и физические свойства их подобны свойствам нитрида кремния и сиалоны характеризуются высокими значениями прочности, твердости и термостойкости. Важным свойством сиалоновой керамики является устойчивость к окислению при высоких температурах, значительно более высокая, чем у нитрида кремния, близкая к устойчивости карбида кремния. [1].

Существует две основные модификации сиалоновой керамики, которые находят применение в инженерии:  $\alpha$ -сиалон и  $\beta$ -сиалон. Наиболее распространенными из них являются  $\beta$ -сиалоны.

В данной работе приведены результаты изучения состава и свойств  $\beta$ -сиалонов.

В качестве материала для исследований выбраны сиалоны состава:  $\text{Si}_5\text{AlON}_7$  и  $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$ . Для получения  $\beta$ -сиалона использовали ультрадисперсные порошки:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ , а также  $\text{Y}_2\text{O}_3$  для интенсификации уплотнения при спекании. Порошок нитрида алюминия был синтезирован газофазным методом (г. Екатеринбург).

Смешивание шихты проводилось с использованием планетарной мельницы с добавлением поверхностно-активного вещества изопропилового спирта. ПАВ облегчают процесс разрушения конгломератов, производят расклинивающий эффект и, адсорбируясь на мельчайших частицах, препятствуют агрегации, стабилизируют порошковую массу.

Образцы прессовали на ручном гидравлическом прессе при давлении 100 МПа. В шихту вводили пластификатор – 3%-ый раствор каучука в бензине. Отожженные образцы спекали в вакуумной печи при  $T = 1750^\circ\text{C}$ .

Методом гидростатического взвешивания определена плотность спеченных образцов. Определение микротвердости образцов проводили на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 200 г.

Рентгеноструктурный анализ спеченных образцов проводили на дифрактометре ДРОН-4-13.

Твердость и трещиностойкость исследовали с помощью твердомера ТП-7Р-1 при нагрузке 98,1 Н.

Получены материалы  $\text{Si}_5\text{AlON}_7$  плотностью  $3,01 \text{ г/см}^3$ , пористостью около 3%, микротвердостью  $11,6 \pm 0,28 \text{ ГПа}$ , твердостью  $13,11 \pm 0,14 \text{ ГПа}$ , трещиностойкостью  $4,97 \pm 0,32 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  и  $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$  плотностью  $2,6 \text{ г/см}^3$ , пористостью около 17%, микротвердостью  $10,9 \pm 0,34 \text{ ГПа}$ , твердостью  $11,38 \pm 1,54 \text{ ГПа}$ , трещиностойкостью  $3,52 \pm 0,36 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Следует сделать вывод о том, что состав влияет на свойства  $\beta$ -сиалонов. В ходе исследований механических свойств было выявлено, что по мере возрастания  $z$ -степени замещенности наблюдается снижение значения микротвердости, твердости, трещиностойкости.

$\beta$ -сиалон сложный объект для физико-химического исследования и получения, поэтому требует дальнейшего изучения.

#### Литература

1. Кульметьева В.Б., С.Е. Порозова. Керамические материалы: получение, свойства, применение: учеб. пособие.– Пермь: Перм. Гос. Техн. Ун-т, 2009.– 237с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ СИНТЕЗА SiC КЕРАМИКИ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕЕ

*И.Н.Рожко, Г.Д.Семченко, А.В.Вовк, И.П.Товстокожая*

(Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, г. Харьков, Украина)

Использование золь-гель процесса и механосинтеза позволяет синтезировать при более низких температурах тугоплавкие соединения, в том числе бескислородные, и создавать из них нанокomпозиционные материалы, регулируя химические процессы структурирования на молекулярном уровне.

Для получения прочной и трещиностойкой конструкционной керамики предложено использовать модифицированные порошки тугоплавких наполнителей, в том числе бескислородных соединений, тетраэтоксисиланом. Или его производными. Именно благодаря механохимическому синтезу  $\beta$ -SiC и оксинитрида кремния из кремнийорганики в процессе измельчения с этими добавками использование таких порошков приводит к повышению их спекания и самоармированию наночастицами  $\beta$ -SiC. Изготовление материалов из модифицированных порошков или частичное их использование при составлении шихт дает положительный результат при создании структур, повышающих физико-механические свойства материалов.

Механохимическая обработка порошков тугоплавких соединений с участием алкоксида кремния и ЭТС сопровождается повышением температуры и давления в результате механодеструкции исходных модифицирующих

порошки кремнийорганических веществ и продуктов их превращений. Механодеструкция этих веществ сопровождается разрывом межатомных связей по свободнорадикальному механизму. Образовавшиеся радикалы ( $-\text{CH}_3$ ) при механо- и термодеструкции алкоксида кремния являются источником атомарного углерода, т.к. в результате рекомбинации радикала образуются водород и атомарный углерод. Под воздействием стерических факторов радикалы образуют соединения внедрения в аморфном  $\text{SiO}_2$ , в который превращается гелевый кластер  $\beta$ -кристобалитовой структуры под воздействием тепла.

В ходе химических превращений алкоксида кремния под воздействием механических и тепловых нагрузок при измельчении и при термообработке гелей из него создается стойкая углеродная система в кластере в виде органо-неорганического комплекса  $(-\text{CH}_3)-(\text{SiO}_2)_n$ , который является прекурсором компонентов (как углерода, так и кремния в виде монооксида), резко снижая температуру синтеза бескислородных соединений. Синтез наноразмерного  $\beta$ -SiC происходит в нанореакторах, представляющих собой полости кремнеземистого кластера размером от десятков до сотен нанометров. Синтез наноразмерных частиц и нановолокон  $\beta$ -SiC и  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  происходит в том случае, когда скорость термообработки органо-неорганического комплекса составляет не менее 10 град/мин. Характерной особенностью методов синтеза нанопропроченных конструкционных материалов и огнеупоров является целенаправленная организация нанореакторов для синтеза наноразмерных частиц и нановолокон тугоплавких бескислородных соединений из созданного органо-неорганического комплекса. Механохимический синтез  $\beta$ -SiC в процессе модифицирования порошков тугоплавких соединений алкоксидом кремния подтвержден РФА.

Самоармирование керамических матриц при консолидации модифицированных алкоксидом кремния порошков тугоплавких соединений благодаря присутствию созданных при механоактивации органо-неорганических комплексов  $(-\text{CH}_3)-(\text{SiO}_2)_n$ , синтезу наночастиц  $\beta$ -SiC и созданию из них глобул размером 30-80 нм приводит к повышению прочностных характеристик материалов до 620-650 МПа и трещиностойкости не менее  $6,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ .

## **РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ОБЖИГА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДЕЛИ СПЕКАНИЯ**

*Ю.М.Мосин, С.А.Першиков (Москва, Россия)*

Разработка новых керамических материалов, новых типоразмеров изделий, развитие их технологии и стремление снизить себестоимость производства требуют непрерывных усилий по разработке и оптимизации технологии, включая температурно-временные режимы обжига. Эмпирический подбор режимов, связанный с заметными затратами материалов, энергии и времени, до сих пор является основным методом.

Однако, начиная уже с 1940-х гг. развивается физика спекания, основанная на работах Я.Е.Гегузина, Б.Я.Пинеса, Я.И.Френкеля, Г.С.Кучински (G.C.Kuczynski),

Р.Л.Кобла (R.L.Coble), У.Д.Кингери (W.D.Kingery) и др. Сформулированные ими и их последователями кинетические уравнения спекания основаны на закономерностях массопереноса различными механизмами (объемная и поверхностная диффузия, вязкое течение, испарение-конденсация и др.) и включают в качестве параметров размер частиц (как правило, сферических) и физико-химические свойства спекающегося вещества (удельная свободная поверхностная энергия, коэффициенты диффузии или вязкость, молярный объем и т.д.).

Уравнения физики спекания адекватно описывают только отдельные частные случаи, а именно начальную стадию спекания – рост шейки между двумя частицами, и конечную стадию – удаление (сжатие) изолированных пор в поликристаллической матрице. Проблема появлялась, когда тот или иной частный случай (вариант) решения пытались распространить на весь процесс спекания и в результате расчеты давали даже при температурах, близких к точке плавления, продолжительности спекания, которые не менее чем в  $10^3 - 10^5$  раз превышали реальные.

Феноменологический подход, развитый В.А.Ивенсеном и его последователями, позволяет описать весь процесс спекания единообразными уравнениями. Однако, величины кинетических параметров этих уравнений могут быть получены только как результат эксперимента, основанного на обжигах образцов или изделий при различных условиях. Таким образом, данный подход не позволяет делать теоретические предсказания.

Проведенные нами исследования показывают, что при корректном применении классическая теория спекания дает адекватную оценку продолжительности спекания керамики. Использование пространственной модели на основе правильной упаковки сферических частиц (простейшей кубической или кубической объемно-центрированной) и оригинальное описание геометрии частиц и пор на промежуточных стадиях позволили включить названные выше частные случаи процесса в единую последовательность и рассчитывать продолжительность изотермического спекания как сумму продолжительностей последовательных стадий.

Разработанная модель на основе той или иной правильной объемной упаковки позволяет связать исходную пористость заготовки с методом её формования. В частности, простейшая кубическая (пористость около 48%) ближе к случаю одноосного прессования, а кубическая объемно-центрированная (пористость около 32%) – случаю литья парафинового шликера. Созданная модель позволяет оценить конечную пористость и размер пор в зависимости от давления газов в печи. Сделан расчет спекания прозрачной корундовой керамики в вакууме до беспористого состояния. Приведенные в литературе эмпирические уравнения кинетики термического старения некоторых видов оксидной керамики использовали для оценки среднего размера кристаллов, растущих на заключительной стадии спекания.

Важным дополнением модели является использование методов теории подобия для расчета скоростей нагрева и охлаждения керамики при обжиге. На основе формы и характеристического размера тела и температуропроводности материала (по справочным данным и с учетом пористости) рассчитывали продолжительности  $\tau$  выравнивания температур в теле при нагреве на величину допустимого перепада температур  $\Delta t$  в садке образцов или изделий. По данным литературы

выбрали величину  $\Delta t = 25^\circ\text{C}$ . Скорость нагрева и охлаждения как отношение  $\Delta t/\tau$  рассчитывали с учетом температурной зависимости температуропроводности для каждого интервала в  $25^\circ\text{C}$  до выбранной температуры выдержки.

Адекватность предложенной авторами модели спекания и применимость методики расчета режимов обжига на её основе были проверены как по результатам собственных экспериментов, так и с использованием данных литературы о спекании керамики из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{UO}_2$ . Расчеты спекания образцов и изделий провели: 1) для оксидной керамики – по механизму объемной диффузии, 2) для образцов из порошка тарного стекла – по механизму вязкого течения и 3) для стеклокристаллической композиции на основе электровакуумного стекла – по механизму вязкого течения, осложненного кристаллизацией.

Методика расчета режимов обжига на основе предлагаемой модели спекания без нарушения основных принципов и законов массопереноса вещества керамики допускает улучшение и развитие. Во-первых, модель следует дополнить теоретически обоснованными количественными описаниями физико-химических процессов, важных для формирования структуры керамических изделий. Во-вторых, нужно ввести более точное описание плотности отформованных заготовок, например, на основе более сложной упаковки частиц. В-третьих, необходимо учесть полидисперсность реальных порошков. В-четвертых, потребуются учесть возникающие вычислительные погрешности. Не менее важно для практики учесть взаимосвязь температурных полей в объеме тела и изменения структуры керамики в ходе обжига.

На основе этих и иных улучшений представляется возможным теоретически количественно оценить влияние дисперсного состава исходного порошка, неравноплотности заготовок, распределения температур в объеме изделия или садки в ходе обжига на неоднородность структуры материала изделия, а также на разброс свойств изделий в партии. Конечной целью расчетов является разработка оптимальных режимов обжига.

Даже в теперешнем виде модель позволяет использовать физически обоснованные уравнения роста кристаллов вместо примененных эмпирических, а также уравнения, описывающие другие процессы и дающие величины объемных долей фаз, размер и форму частиц фаз и т.д. Разработанная модель позволяет учесть явления, влияющие на структуру спекающейся керамики, только при условии, что их описания формализованы. Т.е. используемые совместно с данной моделью спекания или вводимые в неё в качестве уточнений и дополнений гипотезы и понятия должны содержать количественное описание геометрии структурных элементов и давать оценку величин кинетических и структурных параметров. Таких как соотношение коэффициентов объемной и поверхностной диффузии, изменение вязкости расплавов из-за изменения их химического состава или образования твердых фаз, скорость испарения или конденсации фаз, объемные доли фаз в результате химических реакций и т.д.

Разработанная пространственная модель спекания с одной стороны обеспечивает расчетные оценки режимов обжига керамики на основе справочных данных и с другой стороны может служить базой для введения физически обоснованных дополнений, касающихся формирования структуры спекающейся керамики.

## Секция 4. СТЕКЛО И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

### ОТ ЯВЛЕНИЙ В СТЕКЛЕ - К МИРОВЫМ КАТАКЛИЗМАМ

*В.Ф.Солинов* (ОАО “НИТС”, г. Москва, Россия)

Изучение механизма разрушения стекол при попадании высокоскоростных осколков, пуль, космических частиц (далее инденторов) позволило обнаружить явление эффекта взрывного характера сфокусированных отраженных ударных волн в круглых и полусферических заготовках, приводящих к разрушению материала.

Как простейший пример фокусировки акустических волн мы имеем разрушение в угле в образцах прямоугольной формы при воздействии индентора. Причиной его разрушения является фокусировка плоской отраженной ударной волны от боковых поверхностей образца, что увеличивает удельную мощность ударной волны.

При попадании индентора в пластину стекла или стеклянный композит имеют место 3 типа основного разрушения:

- сквозное пробитие,
- разрушение поверхностных слоев с вторичными осколками,
- частичное поверхностное разрушение с упругим поглощением энергии.

Как оказалось, при высокоскоростных выстрелах микрочастиц со скоростью более 3км/сек. имеет место 4-й тип разрушения – незначительное поверхностное разрушение, так как происходит трансформация значительной энергии в энергию ударной волны. В этом случае для образцов круглой формы (дисках) возникает вторичное дополнительное локальное двустороннее разрушение материала, связанное с взрывным эффектом отраженной ударной волны.

Для доказательства существования эффекта самофокусировки были изготовлены диски из стекла с краем зубчатой формы. В этом случае разрушения стекла не наблюдается, что объясняет тот факт, что происходит расфокусировка энергии ударной волны.

Были сформулированы основные закономерности 4-го механизма для вторичного разрушения тел, имеющих круглую форму:

- при любом импульсном ударе, вызывающем волновые процессы, возможна самофокусировка отраженной ударной волны;
- место фокусировки отраженной ударной волны не совпадает с местом удара (кроме удара, точно в центр диска), а находится на равном расстоянии по диаметру от края пластины (диска);
- в месте фокусировки ударной волны проявляется взрывной эффект, который при достаточно мощном первичном ударном импульсе может приводить к разрушению или даже выбросу осколков материалов, перпендикулярно двум плоскостям.

Анализируя обнаруженный эффект как модель применительно к явлениям, которые могут происходить в Земных условиях, а именно, катаклизмам (тайфунам, цунами, наводнениям и т.д.), можно построить правдоподобную гипотезу механизма их зарождения, проявления и объяснения последствий.

## **МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТЕКЛА В НАНО- И МИКРОМАСШТАБЕ И НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТЕКОЛ**

**В.Н.Сизаев** (Кафедра химической технологии стекла и ситаллов, Международная лаборатория функциональных материалов на основе стекла им. П.Д. Саркисова, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Древнейший материал стекло переживает в течение последних десятилетий необычайно бурное развитие, которое ниже иллюстрируется несколькими примерами хорошо известных внедрений и перспективных разработок:

1. Волоконно-оптические линии связи и интернет, созданию которых предшествовало развитие технологии сверхчистых высокооднородных стекол и выработки из них световодного волокна с оптическими потерями ниже 1 Дб/км;

2. Активные элементы сверхмощных лазеров на основе фосфатных стекол;

3. Стекла для оптоэлектроники, нелинейной оптики, фотоники (лазерные стекла, магнитооптические стекла, стекла с высокой оптической нелинейностью второго и третьего порядка, электрооптические стекла, проявляющие эффект Покельса и др.);

4. Прозрачная стеклокерамика с нулевым коэффициентом термического расширения – основа сверхточных оптических систем и гироскопов;

5. Гибридные нелинейно-оптические схемы «стекло/кристалл» в виде периодических решеток нано- и микрокристаллов, квазимонокристаллических волокон, разветвителей, планарных структур, получаемых локальной кристаллизацией стекла под действием лазерного излучения.

6. Портативная память с использованием стекла - 5D диски с объемом до 360 терабайт (эквивалентно более полумиллиону компакт-дисков того же диаметра) на основе наноструктурированного кварцевого стекла, которые могут храниться вечно при температурах до 1000°C.

Развитие новых стекольных и стеклокристаллических технологий подготовлено бурным прогрессом физических методов исследования и извлечения структурной информации в масштабе ближнего порядка, среднего порядка и в наномасштабе. В последние годы стало возможно управляемым образом варьировать наноструктуру стекол, в одних случаях, минимизируя ее и получая материалы высочайшей степени однородности, а в других - развивая нано- и микромасштабные фазовые неоднородности и формируя новые, ранее не наблюдавшиеся в стекле свойства.

Согласно определению Комиссии по терминологии АН СССР 1932 года «Стеклом называются все аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава независимо от их состава и температурной области затвердевания и обладающие в результате постепенного увеличения вязкости механическими свойствами твердых тел, причем процесс перехода из жидкого состояния в стеклообразное должен быть обратимым».

По существу, это определение является определением «классических» стекол, свойства которых при не слишком медленных скоростях нагрева или

охлаждения обратимы в интервале стеклования. К ним преимущественно относятся промышленные оксидные стекла. Данное определение стекла не включает множества новых видов некристаллических материалов. При высоких скоростях охлаждения не только из жидкой, но и из газообразной фазы может быть получено множество аморфных объектов, которые сегодня принято называть стеклами: металлические стекла, халькогенидные и фторидные стекла, сильно кристаллизующиеся оксидные стекла составов на границе области стеклообразования, аморфизированные реакторным излучением кристаллы, пленочные продукты осаждения из газовой фазы и пр.

Независимо от способа получения все некристаллические вещества обладают общими характерными чертами. Они рентгеноаморфны, изотропны (симметрия шара  $C_{\infty\infty}$ ), однородны на макро- и микроуровне. Однако сравнительно недавно установлено, что *неоднородность в нанометровом масштабе* – универсальное свойство стекол. Обычно под нанонеоднородным строением стекла понимают флуктуации химического состава, плотности и порядка в масштабе 1-10 нм. Неоднородность в нанометровом масштабе тесно связана с хорошо известными особенностями стекол: избыточным свободным объемом, наличием низкотемпературных аномалий теплоемкости и теплопроводности, аномалиями низкочастотного ( $\sim 10$ - $100$  см<sup>-1</sup>) колебательного спектра и пр. Независимо от способа получения свойства всех стекол зависят от скорости переохлаждения. При достаточно медленном прохождении интервала температур, в котором стекло из пластичного состояния превращается в хрупкое или наоборот, любое стекло обнаруживает в большей или меньшей степени признаки необратимости в виде кристаллизации или аморфного фазового разделения. Начальные стадии этих процессов порождают возникновение фазовых наномасштабных неоднородностей, которые могут существенно повлиять на свойства материала.

Классические модели строения стекла, предложенные В. Захариасеном и Е.А. Порай-Кошицем (рис. 1 и 2), в данном докладе обсуждаются в свете новейших данных нейтронографии, рентгенографии высокого разрешения, широкодиапазонной колебательной спектроскопии, EXAFS, малоуглового рассеяния тепловых нейтронов и рентгеновских лучей, электронной микроскопии, атомной силовой микроскопии. Накопленные экспериментальные данные позволяют прояснить, как устроены разные по происхождению аморфные вещества в наномасштабе, можно ли управлять наноструктурой стекла и к каким последствиям это может привести. В докладе будут обсуждены, в частности: возможности варьирования параметров наноструктуры однофазного стекла, влияние условий синтеза стекла на его ближний порядок, образование в стекле фазовых неоднородностей в виде сегнетоэлектрических и полярных несегнетоэлектрических нано- и микрокристаллов, возникновение и развитие в стекле нелинейно-оптических свойств, методы придания стеклу свойств активного диэлектрика.

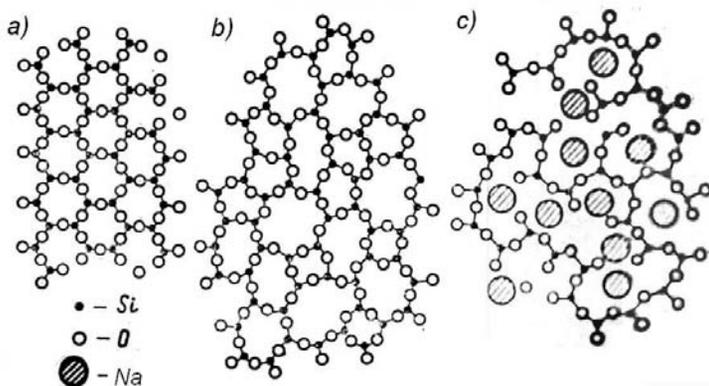


Рис. 1. Структура кварцевого и щелочносиликатного стекла по Захариасену:  
 а) кристаллический  $\text{SiO}_2$ , б) кварцевое стекло, в) щелочносиликатное стекло

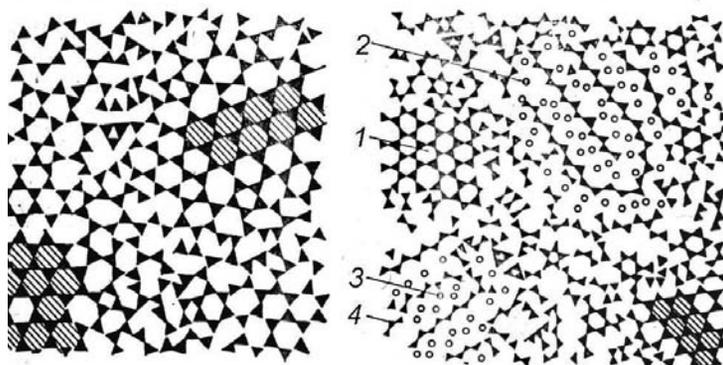


Рис. 2. Схематическое изображение структуры кварцевого и щелочносиликатного стекол по Е.А. Порай-Кошицу (1 – кристаллиты кварца, 2 – кристаллиты силиката натрия, 3 – ионы  $\text{Na}^+$ , 4 – тетраэдры  $\text{SiO}_4$ )

## ЛОКАЛЬНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ФОСФАТНОГО СТЕКЛА С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*А.С.Липатьев, С.В.Лотарев, Т.О.Гельманова, В.И.Савинков, Г.Ю.Шахгильдян, А.Палеари, В.Н.Сигаев*

(Международная лаборатория функциональных материалов на основе стекла им. П.Д. Саркисова, кафедра стекла и ситаллов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Оксидные стекла, содержащие наночастицы золота, серебра, меди, обладают высокими значениями нелинейной восприимчивости третьего порядка и в настоящее время рассматриваются в качестве перспективных материалов для

создания полностью оптических интегральных схем и нелинейных оптических комбинированных оптоэлектронных устройств [1]. Включение наночастиц металлов в стекломатрицу изменяет оптические свойства стекол, что, в частности, проявляется в виде широкой полосы поглощения в видимом диапазоне за счет явления поверхностного плазмонного резонанса.

Для получения стекол с наночастицами металлов было разработано множество методов, таких, как восстановление металлических наночастиц из солей при варке стекла, ионная имплантация, ионный обмен и др. Для создания локальных структур из ансамблей наночастиц металлов в объеме стекла перспективны методики облучения фемтосекундным лазерным пучком, перемещающимся по заданной траектории. Фемтосекундные лазеры позволяют получать в области фокусировки пучка высокие пиковые интенсивности, при которых заметную роль начинают играть нелинейные эффекты, и, прежде всего, нелинейное поглощение, протекающее по многофотонному механизму. Таким образом, можно проводить высокопрецизионную обработку стекла с микрометрическим разрешением. Большинство исследований по лазерному облучению стекол, легированных металлами, посвящено разработке двухстадийных методик формирования структур из наночастиц, где при воздействии сфокусированного пучка лазера металл (Au, Ag) восстанавливается до атомарного состояния. Последующая термообработка в печи приводит к агрегации и образованию металлических наночастиц [2]. Только использование фемтосекундных лазеров на титан-сапфире с высокой частотой следования импульсов, равной 250 кГц, за счет аккумуляции тепла позволило выделить наночастицы меди и серебра в одну стадию [3].

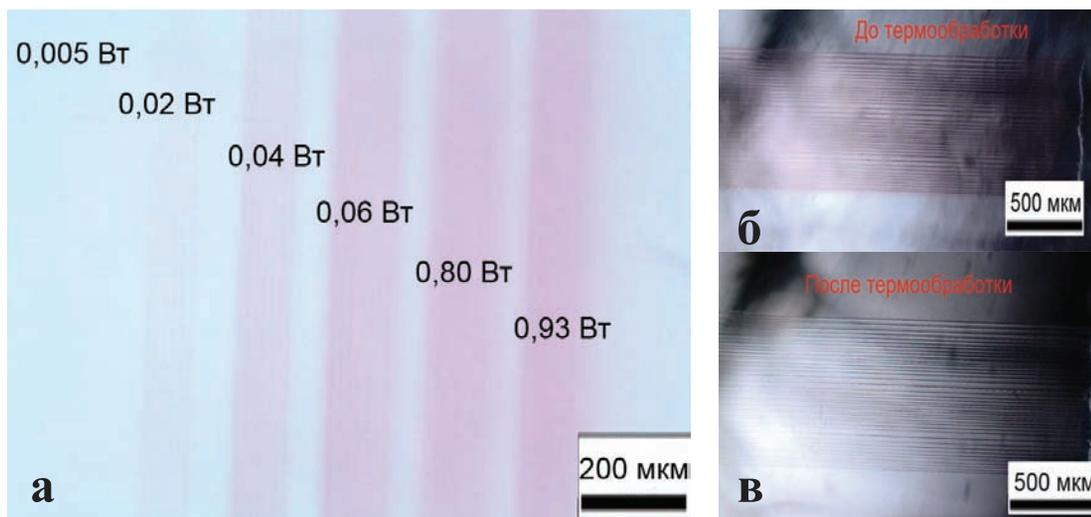


Рис. 1. Полосы с центрами окраски в объеме фосфатного стекла, образованные при воздействии лазерного излучения разной мощности с частотой следования импульсов 1 кГц (а); аналогичные полосы до (б) и после (в) термообработки в печи

В данной работе для осуществления локального формирования наночастиц золота в объеме фосфатного стекла оптического качества при комнатной температуре мы применили фемтосекундный регенеративный усилитель ТЕТА-

25 фирмы Авеста, излучающий на длине волны 1029 нм импульсы длительностью ~300 фс с энергией до 110 мкДж и относительно низкой частотой повторения (до 25 кГц). Луч лазера фокусировали вглубь стекла с помощью оптимизированного на ближний ИК диапазон объектива (X20, числовая апертура 0,45). Фосфатное стекло ранее разработанного в РХТУ им. Д.И. Менделеева состава  $64.49\text{P}_2\text{O}_5 - 8.82\text{K}_2\text{O} - 10.74\text{BaO} - 8.45\text{Al}_2\text{O}_3 - 4.80\text{B}_2\text{O}_3 - 2.38\text{SiO}_2 - 1.02\text{SnO}_2$ , легированное 0,01 масс.% Au, получали по технологии, описанной в [4]. Образцы для лазерного облучения помещались на моторизованный столик, перемещавшийся перпендикулярно пучку с заданной скоростью.

При последовательном сканировании лазерным пучком со скоростью 1 мм/с и частоте повторения импульсов 1 кГц на глубине ~600 мкм в стекле были получены площадки с измененным показателем преломления, имеющие в зависимости от средней мощности излучения розовую окраску (рис.1а). Окраска исчезала при выдержке образца в печи при температуре 300°C в течение 20 мин (рис. 1а,б). Аналогичные результаты были получены для стекла, не содержащего золота. Таким образом, появление полосы поглощения в видимом диапазоне не связано с выделением наночастиц металла, а обусловлено образованием дефектов (центров окраски) в структуре стекла под действием лазерного излучения с высокой интенсивностью [5].



Рис. 2. Продольный (а) и поперечный (б) вид полосы с наночастицами золота.

Продольный вид двух пересекающихся полос (в) с наночастицами золота

Облучение фосфатного стекла лазерным лучом с частотой следования импульсов 25 кГц и скорости перемещения образца 15 мкм/с привело к возникновению областей розового цвета по краям линии сканирования (рис. 2а,б). Розовая окраска не исчезала после термообработки при 300°C в течение 1 часа, что свидетельствует о выделении наночастиц золота. При этом розовая окраска возникает в периферийных областях, нагреваемых за счет теплопередачи, и, напротив, не появляется в центральной области, непосредственно подвергшейся облучению. Повторное сканирование лазерным пучком модифицированной области не приводило к выделению наночастиц (рис. 2в). Кроме того, как видно из рис. 2в, сфокусированный лазерный луч может растворять ранее сформированные наночастицы. При лазерном облучении стекла возникали высокие термические напряжения, которые обуславливали высокую вероятность его растрескивания.

Таким образом, впервые продемонстрирована возможность одностадийного локального выделения наночастиц золота в фосфатном стекле с помощью

фемтосекундного лазера. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант №11.G34.31.0027) и РФФИ (гранты №12-03-31490 и 13-03-01018).

#### Литература

1. Chakraborty P. // Journal of Material Science. – 1998. – V. 33, Iss. 9. – P. 2235-2249.
2. Shin J. et al. // Applied Physics A. – 2008. – V. 93, Iss. 4. – P. 923-927.
3. Teng Yu et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2011. – V. 357. – P. 2380–2383.
4. Савинков В.И. и др. // Стекло и керамика. – 2013. – №4. – С. 35-41.
5. Qiu J. et al. Angewandte Chemie Int. Edition. – 2004. – V. 43, Iss. 17. – P. 2230–2234.

## СПОСОБ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ОТБРАКОВАННЫХ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ОСТЕКЛЕНИЯ

*Д.Н.Петрачков, Е.В.Кузьмина, А.Е.Пигалев*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Актуальность способа модификации поверхности отбракованных электрообогреваемых изделий остекления заключается в сложности получения на стекле электропроводящего покрытия с переменным удельным поверхностным сопротивлением.

Установлено, что для получения требуемых конструкторской документацией параметров удельных поверхностных сопротивлений на поверхность стекла наносится токопроводящее покрытие, при этом большое количество стёкол, не соответствующих требованиям по удельному поверхностному сопротивлению, отбраковывается.

Токопроводящее покрытие получается при напылении на поверхность стекла, разогретого при высокой температуре, плёнкообразующего раствора, приведённого в состояние аэрозоля. При испарении растворителей на стекле образуется тонкая токопроводящая пленка, состоящая из двуокиси олова.

Для уменьшения количества отбракованных изделий предлагается осуществлять модификацию поверхности отбракованных стёкол с токопроводящим покрытием ионной бомбардировкой покрытия из двуокиси олова ионами аргона при их средней энергии 1500-1700 эВ и давлении  $(2-3) \cdot 10^{-2}$  Па.

Проведение такой модификации представляется возможным в вакуумной установке типа ВУ-1.5-О-ИП с использованием ионного источника с анодным слоем при высоковольтном режиме (с коллимированным пучком).

При ионном бомбардировании покрытия из двуокиси олова ионами аргона происходит уменьшение толщины покрытия, а следовательно, увеличение удельного поверхностного сопротивления.

Использование такого типа ионного источника позволяет рассчитать количество воздействий коллимированного пучка ионов аргона на поверхность покрытия из двуокиси олова, исходя из значений удельного поверхностного сопротивления отбракованного изделия и заданного для годного изделия.

Использование такого метода позволяет исключить технологические операции полного снятия покрытия на основе двуокиси олова и повторного нанесения этого покрытия на поверхность отбракованного изделия. Таким образом, трудоемкость и себестоимость изготовления изделий значительно снижаются примерно в 2 раза.

## **ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СТЕКОЛ И КЕРАМИКИ В УСЛОВИЯХ СОУДАРЕНИЯ СО СГУСТКАМИ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ**

*Ю.С. Ушеренко<sup>1</sup>, В.Г. Шарифзянов<sup>2</sup>, С.М. Ушеренко<sup>3</sup>* (<sup>1</sup>Институт повышения квалификации и переподготовки кадров БНТУ РБ; <sup>2</sup>ООО “Ростверк” РФ; <sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет РБ, г. Минск)

Процесс сверхглубокого проникания (СГП) сгустков пылевых частиц в преграды является одновременно комплексом физических эффектов и эффективным физическим инструментом для технологии создания новых материалов. Использование сверхглубокого проникания как технологической операции для воздействия на материалы не требует значительных затрат энергии.

### **Введение**

В качестве основного критерия проникания ударника в модуль традиционно используется эффект потери герметичности. При соударении с пылевыми объектами в режиме СГП разгерметизации не наблюдается. Особенностью взаимодействия в диапазоне режимов сверхглубокого проникновения (СГП) является возникновение в защитной преграде пульсирующего поля давления и, как результат этого, происходит захлопывание зон пробоя. Поэтому при СГП потеря герметичности металлических модулей отсутствует.

При сверхглубоком проникании существует барьерное ограничение в  $10^2$ - $10^4$  калибров ударников. Глубины проникания зависят от материала защитной преграды и от параметров пылевого сгустка. Материал защитной преграды из твердой фазы переходит в состояние плотной плазмы. За счет пульсации канальных элементов в поперечном сечении материал из этих зон формирует прямую и обратную струи. Струи движутся внутри преграды и инжектируются из нее. Интенсивное взаимодействие пылевых сгустков и материала защитной преграды в закрытом объеме приводит к сильным электрическим эффектам, которые за счет динамики процесса инициируют колебания магнитного поля. Внутри и вокруг преграды возникают сильные электрические и магнитные поля.

### **1. Повреждения стеклянных образцов в режиме сверхглубокого проникания**

Моделирование процесса получения пылевых сгустков и воздействие их на хрупкие материалы было выполнено на пушечном ускорителе. При этом параметры нагружения (скорость и время) определить легче, чем при использовании взрывных ускорителей. В этих экспериментах время воздействия сгустка на преграду составляло  $\approx 35$ - $50$  мкс. В качестве вещества сгустка дискретных частиц использовали порошок меди с плотностью  $5,5 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Сгусток с длиной  $20 \times 10^{-3}$ - $36 \times 10^3$  м и диаметром  $10^{-2}$  м разгоняли до скоростей  $0,95$ - $1,15$  м/с.

Моделировать поведение пластин из Si-монокристалла удобнее на основе изучения поведения пластин из стекла. Стекла также используют в качестве материала для защитного модуля.

Для исследования пластины использовался оптический микроскоп в режиме прямого освещения поверхности и в режиме обратного освещения. Поперечный размер отверстия после пробоя  $1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-5}$  м. Доказано наличие сквозного пробивания 3 мм стеклянной пластины, размещенной внутри защитной сборки.

Отношение толщины стекла  $3 \times 10^{-3}$  м к диаметру отверстия  $1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-5}$  м соответствует примерно  $(1,5-3) \times 10^{-2}$  калибров. Используем такое свойство стекла, как прозрачность. Наблюдаемые на рисунке треки находятся на некоторой глубине под поверхностью. Стекла были подвергнуты травлению при разном времени выдержки раствором плавиковой кислоты. Приведено изменение структуры стекла при различных режимах травления.

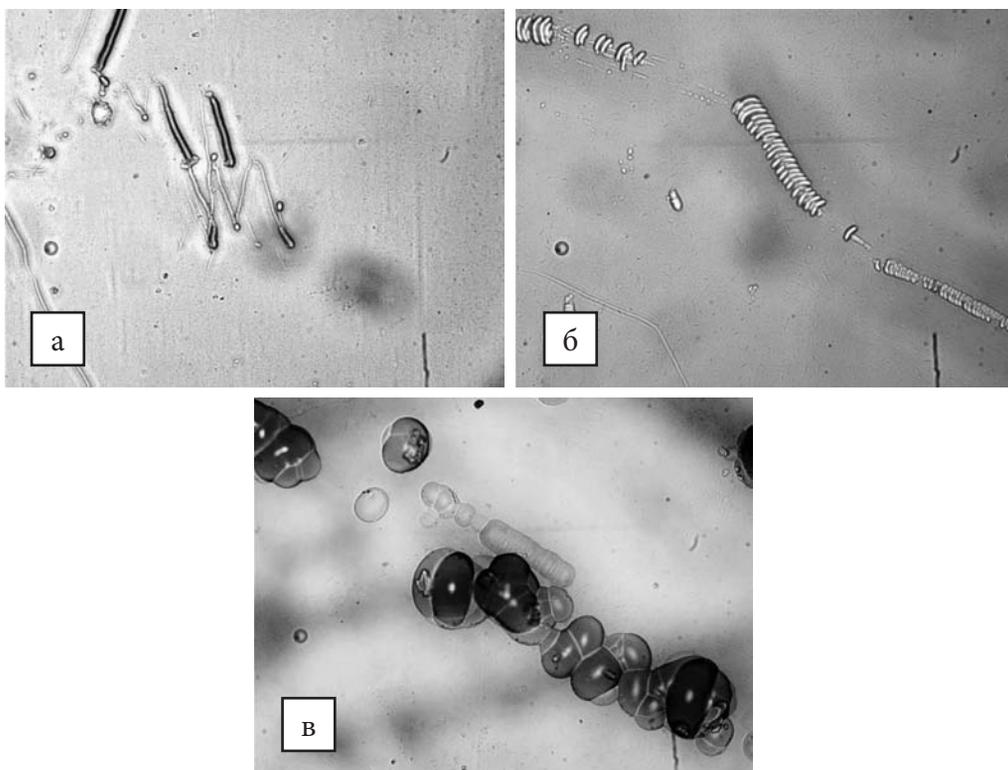


Рис. Структура обработанного в режиме СГП стекла после различных режимов травления  $\times 1000$ : а-30 с, б-60 с, в-120 с

Поперечная пульсация проявляется, как гофры (ребра) на внешней поверхности канальной зоны внутри стекла. В поперечном сечении вытравленная (канальная) зона достигает  $3 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6}$  м. После 2-минутного травления обработанного стеклянного образца дефектный материал внутри канальной зоны вытравливается (рис. в), границы зоны облучения (затемненные стенки канала) проявляются. В поперечном сечении канальная (вытравленная) зона достигает  $1,1 \times 10^{-5} - 1,5 \times 10^{-5}$  м. Таким образом, в результате последовательного травления канальных зон их диаметр меняется в 11-15 раз и формируется стеклянное пористое тело.

## 2. Повреждения образцов монокристалла кремния в режиме сверхглубокого проникания

Твердость монокристалла кремния настолько высока, что царапанье этой поверхности можно эффективно производить только с помощью алмазного инструмента. Так как микротвердость кремниевого кристалла превышает  $10^9 \text{Н/м}^2$ , тогда для создания поверхностных дефектов требуется высокое давление ударника на преграду.

Высокие скорости, давление и длина формирующихся в преграде микроструй, объясняют основные наблюдаемые при экспериментах результаты поражения материалов и микросхем, например, картину повреждения на поверхности монокристалла. Колебательный характер повреждений поверхности объясняется дополнительным действием на микрострую из плотной плазмы импульсного электромагнитного поля.

Сравнение кинетической энергии микроструи, затраченной на повреждение поверхности стекла и на повреждение поверхности кремниевого монокристалла с учетом разницы между этими материалами в твердости (характеристика прочности материала в первом приближении), позволяет выявить наличие энергетической аномалии  $E_g/E_{Si} \approx 8,4$  раз. Такую аномалию в данных условиях можно объяснить только за счет разницы во времени взаимодействия между струей и электрическим полем при рассматриваемых вариантах взаимодействия со стеклом и керамикой.

### Литература

1. The physics of superdeep penetration phenomenon. J. Owsik, K. Jach, S. Usherenko, Y. Usherenko, O. Figovsky, V. Sobolev. Journal of Technical Physics, J.Tech. Phys., 49, 1, 3–25, 2008. Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Technological Research, Warszawa. Military University of Technology, Warszawa.

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТЕКОЛ КОРДИЕРИТОВОГО СОСТАВА

*М.В.Воропаева, Л.А.Алексеева, Р.П.Келина* (ОАО “ОНПП “Технология, г. Обнинск, Россия); *Е.Е.Строганова, Л.А.Орлова, Д.О.Оглоблина* (РХТУ им. Д.И.Менделеева, г. Москва, Россия)

В настоящее время одной из основных задач ракетного материаловедения является обеспечение повышения эксплуатационной надежности и работоспособности объектов военной техники. Существенно возрастают требования к радиопрозрачным материалам по уровню рабочих температур и сохранению их основных характеристик при эксплуатации.

Цель настоящей работы – изучение фазовых превращений в процессе кристаллизации стекол кордиеритовых составов, в которых  $\text{SiO}_2$  изменяется в пределах 48,0-52,7 масс.%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 26,3-29,4 масс.%;  $\text{MgO}$  – 10,0-11,4 масс.%;  $\text{TiO}_2$  – 9,5-11,4 масс.%. В некоторые составы вводились оксиды цинка, церия и мышьяка.

Выбор бесщелочной алюмосиликатной ситаллообразующей системы

с оксидом титана в качестве катализатора кристаллизации обусловлен тем, что радиопрозрачные ситаллы с кордиеритом в качестве основной кристаллической фазы обладают благоприятным сочетанием свойств - имеют низкий тангенс угла диэлектрических потерь, термостабильную диэлектрическую постоянную, повышенную механическую прочность и улучшенные термические свойства.

Исследованы кристаллизационные свойства синтезируемых стекол методами ДТА, ДСК, РФА, SEM, градиентной и массовой кристаллизации.

Результаты изучения кристаллизационной способности стекол методами градиентной и массовой кристаллизации показали, что стекла в процессе термообработки подвергаются глубоким структурным изменениям, визуально сопровождающимся потемнением, опалесценцией, переходящей в объемно-закристаллизованный материал.

Стекла на основе кордиерита многофазны. Кривая ДСК (рис.) свидетельствует о сложном характере фазовых превращений. Кристаллизация кордиерита происходит через образование ряда промежуточных фаз.

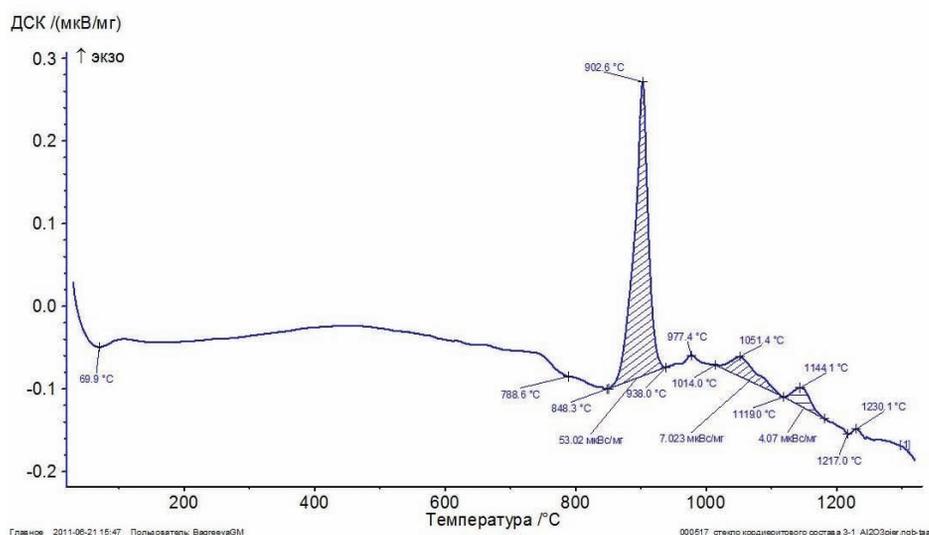


Рис. ДСК стекла кордиеритового состава

Проведенное изучение последовательности выделения кристаллических фаз показало, что в интервале температур  $850\text{-}900^{\circ}\text{C}$  в качестве первичной фазы выделяется  $\mu$ -кордиерит, при  $950^{\circ}\text{C}$  появляется алюмотитанат магния. При дальнейшем повышении температуры до  $1000^{\circ}\text{C}$   $\mu$ -кордиерит перекристаллизовывается в структуру  $\alpha$ -кордиерита. Начиная с  $1075^{\circ}\text{C}$ , в фазовом составе материала присутствуют две основные фазы: кордиерит и рутил.

В результате исследования определены температурно-временные параметры двухступенчатой термообработки магнийалюмосиликатных стекол. Ситаллы, полученные в результате термообработки по оптимальному режиму, обладают высокой степенью кристалличности, низкими диэлектрическими потерями вплоть до  $1200^{\circ}\text{C}$  и термостабильной диэлектрической проницаемостью ( $\Delta \epsilon$  в интервале температур  $20\text{-}1200^{\circ}\text{C}$ , % -  $\leq 2,0\%$ ).

Для синтезированных ситаллов были определены основные свойства в широком диапазоне температур от 20 до 1200°C.

Комплекс физико-механических свойств: термических, механических и диэлектрических делает данные радиопрозрачные материалы привлекательными для конструкторов и материаловедов.

## **ЛОКАЛЬНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЛАНТАНОБОРОГЕРМАНАТНОГО СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

*Т.О.Гельманова, С.В.Лотарев, А.С.Липатьев, В.Н.Сизаев*

(Международная лаборатория функциональных материалов на основе стекла им. П.Д. Саркисова, кафедра стекла и ситаллов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

В последние два десятилетия были разработаны методики локальной лазерной модификации стекол, позволяющие изменить показатель преломления в заданных областях или сформировать на поверхности или в объеме стекла кристаллические участки и структуры сложной формы, обладающие высокой квадратичной оптической восприимчивостью. Получаемые под действием сфокусированного пучка лазера структуры представляют большой интерес для разработки устройств нового поколения интегральной оптики, оптоэлектроники и фотоники. Весьма перспективным для локальной лазерной модификации стекол оказалось применение фемтосекундных лазеров. Главным их преимуществом является возможность достичь в фокальном пятне высочайших пиковых интенсивностей излучения на уровне  $\sim 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, при которых возникают эффекты нелинейного поглощения и фотоионизации [1]. Эти эффекты позволяют передавать энергию лазерного излучения любому стеклу независимо от наличия в нем линейного поглощения, а также обеспечивают высокую локализацию нагреваемой излучением области, ограничивая её исключительно точкой фокусировки пучка. Однако из-за быстрого рассеивания тепла, полученного от сверхкоротких импульсов, формирование кристаллов возможно только при высокой частоте следования импульсов, позволяющей добиться коллективного эффекта лазерного нагрева. В опубликованных на сегодня работах для этого требовались пучки с частотой следования импульсов не менее 200 кГц.

Стеклам лантаноборогерманатной (ЛБГ) системы вблизи стехиометрического состава  $25\text{La}_2\text{O}_3:25\text{B}_2\text{O}_3:50\text{GeO}_2$  сегнетоэлектрика  $\text{LaBGeO}_5$  со структурой стилвеллита посвящено множество исследований благодаря возможности путем термообработки или лазерного облучения выделить в них в той или иной форме нелинейно-оптические кристаллы. А. Stone и др. показали возможность формирования в объеме ЛБГ стекла пучком фемтосекундного титан-сапфирового лазера с высокой частотой следования импульсов (250 кГц) квазиоднокристаллических нелинейно-оптических каналов сложной геометрии, в которых полярная ось кристалла везде направлена вдоль кристаллического канала [2].

В данной работе с помощью фемтосекундного иттербиевого волоконного лазера ТЕТА-25 с длиной волны излучения 1029 нм и максимальной частотой следования импульсов 25 кГц была осуществлена локальная кристаллизация стекла  $25\text{La}_2\text{O}_3 \cdot 25\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 50\text{GeO}_2$  без и с добавкой 1 мол.%  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  за счет оксида лантана. Варку и отжиг стекла проводили в электрической печи при температуре 1200°C и 650°C в течение 20 мин и 10 ч, соответственно. Для предотвращения растрескивания образцов стёкол во время облучения фемтосекундным лазером они помещались в миниатюрную электропечь и подогревались до температуры 350-400°C. Пучок фокусировался в объём образца с помощью оптимизированного на ИК диапазон объектива с увеличением  $50^x$  (числовая апертура 0,65). Образец мог перемещаться в плоскости, перпендикулярной лазерному пучку, с заданной скоростью с помощью моторизованного трансляционного столика. Получение кристаллических каналов в объёме стекла фемтосекундным лазерным пучком начиналось с формирования и разращивания зародыша неподвижным пучком. Так как формирующийся кристалл обладает квадратичной оптической нелинейностью, о появлении и увеличении размеров зародыша можно было судить по интенсивности генерации второй гармоники. В случае недостаточно большого размера зародыша повышался риск обрыва кристаллической линии в процессе сканирования лазерным пучком. Стоит отметить, что возникновение зародыша имеет вероятностный характер и в ЛБГ стеклах с добавкой оксида неодима происходило быстрее и с меньшим разбросом по времени, чем для стекла без неодима. Так, для формирования зародыша в стекле с  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  требовалось в среднем около 1-3 минут при температуре  $\approx 400^\circ\text{C}$  и средней мощности излучения 0,7 Вт, а формирование зародыша в стекле без добавки занимало в среднем 2-6 минут при тех же условиях. Вероятно, это обусловлено увеличением дефектности стекла с введением в его структуру ионов  $\text{Nd}^{3+}$ .

Варьируя мощность излучения лазера и скорость сканирования, можно управлять не только размером получаемых кристаллических линий, но и их структурой. При высоких мощностях в линии образовывались крупные кристаллы, нарушая однородность полученных структур. Скорость сканирования лазерным пучком более 15 мкм/с при средней мощности излучения 0,7 Вт не позволяла сформировать кристаллическую линию, и наблюдалось лишь изменение показателя преломления стекла. Подбор условий (температура  $\approx 400^\circ\text{C}$ , мощность излучения 0,44 Вт, скорость сканирования 8 мкм/с) позволил получить протяженные кристаллические каналы шириной около 20 мкм с высокой однородностью, которые предположительно можно считать квазимонокристаллическими по аналогии с данными [2,3]. Микрофотография в скрещенных поляризаторах (рис.) показывает изменение цвета в разных частях сформированной линии, которое может быть связано с наличием напряжений в кристалле и существованием границ кристаллических зерен.



Рис. Микрофотография кристаллического канала в скрещенных поляризаторах

Полученные кристаллические линии были исследованы методом локальной спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) на конфокальном микроспектрометре «ИНТЕГРА Спектра» с аргоновым ионным лазером (488 нм) в качестве источника возбуждения. Поляризованные спектры КР, полученные для кристаллической линии, хорошо согласуются со спектрами КР монокристалла  $\text{LaVGeO}_5$  [4] и подтверждают выделение фазы  $\text{LaVGeO}_5$ . С помощью поляризованных спектров КР показано, что кристаллическая структура сформированной линии ориентирована так, что полярная ось совпадает с направлением сканирования, что также согласуется с [2].

Таким образом, на примере ЛБГ стекла, в том числе с добавкой оксида неодима, впервые осуществлена локальная кристаллизация стекла с помощью фемтосекундного лазера с частотой следования импульсов 25 кГц, на порядок более низкой, чем применявшиеся для этого до сих пор. Показано, что в сформированных кристаллических линиях полярная ось кристаллов ориентирована вдоль направления сканирования лазерным пучком. Полученные результаты будут использованы в дальнейшей разработке активных элементов и полностью оптических схем интегральной оптики и фотоники.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант №11.G34.31.0027) и РФФИ (гранты №12-03-31490 и 13-03-01018).

#### Литература

1. Eaton S.M. et al. // Topics in Applied Physics.– 2012.– Vol. 123.– P. 3-18.
2. Stone A. et al. // Optical Society of America.– 2009.– Vol. 17.– Iss. 25.– P. 23284 – 23289.
3. Sakakura M. et al. // Journal of Non-Crystalline Solids.– 2010. – Vol. 356. – P. 3059–3065.
4. Писарев Р.В., Серан М. // Физика твердого тела.– 1995.– Т.37, № 12.– С.3669-3680.

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С НАНОДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

*Л.А. Орлова, А.С. Чайникова, Н.В. Попович, \*Ю.Е. Лебедева, А.А. Степко*  
(РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия; \*ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия)

В последние годы все большее число работ, направленных на создание многофункциональных и конструкционных композитов, посвящено применению в качестве наполнителей углеродных нанотрубок (УНТ), отличающихся уникальными механическими, электрическими и теплофизическими свойствами. Кроме того, большой интерес среди нанодисперсных наполнителей представляют графен и детонационный наноалмаз (ДНА). В основном новая область материаловедения развивается за счет создания нанокомпозитов на основе полимерной матрицы, но повышающиеся требования к конструкциям авиационной и ракетно-космической техники, тепловой и атомной энергетики катализируют разработки в области высокотемпературных композитов на основе стекла и стеклокерамики (СККМ).

В отличие от полимерных, стекло- и стеклокристаллические матрицы обладают более высокими рабочими температурами, а также характеризуются более низкой плотностью, чем матрицы на основе металлов и сплавов, высокими механическими свойствами, термостойкостью, износостойкостью и стойкостью к воздействию агрессивных сред. Основной целью введения наполнителей в стекло и стеклокерамику является устранение их основного недостатка – хрупкости, т.е. повышение их трещиностойкости, которая характеризуется критическим коэффициентом интенсивности напряжений ( $K_{IC}$ ).

Обзор научно-технических и патентных данных свидетельствует о том, что среди большого многообразия систем для матриц СККМ большой интерес представляет система  $SrO-Al_2O_3-SiO_2$ . Это связано с тем, что стронцийалюмосиликатные стекла характеризуются высокими температурами размягчения, а основная фаза, кристаллизующаяся в данной системе –  $SrAl_2Si_2O_8$  – моноклинный стронциевый анортит, обладает высокой температурой плавления –  $1760^\circ C$ , хорошими механическими свойствами –  $E=100$  ГПа,  $\sigma_{изг}=100-120$  МПа и достаточно низким значением ТКЛР –  $26-48 \cdot 10^{-7} K^{-1}$ .

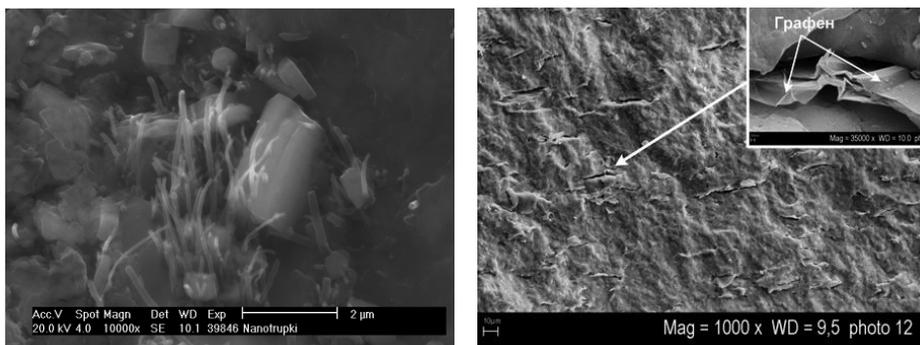
Целью данной работы являлось получение композитов на основе Sr-анортитовой стеклокерамики с введением в качестве наполнителей УНТ, графена и ДНА и изучение их свойств. Для получения матричного стеклопорошка был выбран состав стекла, содержащий SrO–20,  $Al_2O_3$ –30,  $SiO_2$ –40 и  $TiO_2$ –10 масс.% (SAS). Порошок синтезировали традиционным способом, путем варки стекла, получения стеклогранулята и его измельчения до дисперсности 8 мкм. Содержание наполнителей составило 1 масс.%. Порошки матрицы и наполнителей смешивали с помощью ультразвука и последующего механического перемешивания и подвергали горячему прессованию в среде аргона при давлении 30 МПа.

В качестве основных методов исследования в работе использовали лазерную гранулометрию, ДСК, РФА, дилатометрический метод определения усадки во время нагрева в среде аргона. Анализ микроструктуры материалов проводили с использованием растрового электронного микроскопа «JeolJSM–6480LV».

Измерение модуля упругости и микротвердости осуществляли по методу наноиндентирования (Nanohardness Tester, CSM Instruments). Для определения трещиностойкости использовали также метод индентирования. Измерение размеров трещин, распространяющихся от отпечатка индентора, осуществляли с помощью микротвердомера DuraScan 50 с оптической приставкой Emco-test после вдавливания пирамиды Виккерса при нагрузке 2-3 Н.

Исследование физико-химических процессов, происходящих при нагревании порошка стекла методами ДСК и РФА, и сопоставление полученных данных с кривыми непрерывной усадки композитов в процессе нагрева показало, что спекание материалов происходит в диапазоне температур 840-1060 °С и выше 1300°С, по механизму вязкого течения, за счет размягчения стеклофазы. В интервале 1060-1300°С уплотнение прекращается, что объясняется кристаллизацией стекла с выделением фаз триалита и моноклинного стронциевого анортита. На основании полученных данных для синтеза СККМ был выбран двухступенчатый режим горячего прессования с выдержкой при температурах 970 и 1100°С.

Полученные материалы характеризовались значениями относительной плотности 97-99%. По данным РФА преобладающей фазой в композитах являлся моноклинный стронциевый анортит. Результаты СЭМ показали, что УНТ обладают самой низкой агрегативной устойчивостью среди используемых наполнителей. Техника перемешивания путем воздействия УЗ и последующего механического перемешивания, используемая в данной работе, не позволила достичь высокой степени однородности их распределения в матрице (рис., а). В то же время природа графена и наноалмаза дала возможность добиться более эффективной их дезагрегации и обеспечила равномерное распределение (рис., б).



а б  
Рис. Снимки СЭМ композитов SAS/УНТ (а) и SAS/графен (б)

Значения физико-механических свойств исходной стеклокерамики и композитов на ее основе представлены в таблице. Было установлено, что применение нанодисперсных форм углерода, несмотря на экстремально высокие значения их модуля упругости ( $E \sim 1$  ТПа), существенно не сказалось на его величине, что обусловлено, вероятно, низкой концентрацией наполнителей в материалах (1 масс.%). При использовании УНТ и графена наблюдалось увеличение трещиностойкости матрицы более чем в 2 раза, в то время как введение наноалмаза практически не повлияло на  $K_{IC}$ .

Анализ полученных результатов показал, что среди основных параметров, определяющих эффективность армирования СККМ дискретными наполнителями, первоочередное значение имеет форма частиц. Несмотря на высокие значения удельной поверхности, прочности и модуля упругости, сферическая форма частиц наноалмаза не привела к повышению трещиностойкости матрицы. В то время как высокое характеристическое соотношение, свойственное УНТ и графену, в сочетании с их развитой поверхностью позволило достичь высоких значений  $K_{IC}$ .

Таблица

Фазовый состав и физико-механические свойства исходной стеклокерамики и композитов на ее основе

Наполнитель	$\rho_{отн.}, \%$	Фазовый состав	Е, ГПа	$H_v$ , ГПа	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
Без наполнителя	99,9	$SrAl_2Si_2O_8, Al_2TiO_5$	79±8	9,2±1,5	2,4±0,10
УНТ	97	$SrAl_2Si_2O_8, Al_2TiO_5$	81±9	8,5±1,1	5,1±0,10
графен	98	$SrAl_2Si_2O_8, Al_2TiO_5$	84±10	8,5±1,8	5,6±0,12
ДНА	99	$SrAl_2Si_2O_8, Al_2TiO_5$	81±9	8,5±1,1	2,9±0,13

Таким образом, в результате проделанной работы показана возможность синтеза композитов на основе Sr-анортитовой стеклокерамики с введением в качестве наполнителей УНТ, графена и ДНА. Отработаны технологические параметры получения высокоплотных композиционных материалов на основе высокотемпературной стеклокристаллической матрицы методом горячего прессования с использованием ультразвука на стадии перемешивания. Установлено, что использование УНТ и графена позволяет увеличить значение  $K_{IC}$  стронцийалюмосиликатной матрицы более чем в 2 раза.

## КВАРЦЕВОЕ СТЕКЛО, ЛЕГИРОВАННОЕ ХЛОРОМ И САМАРИЕМ

*Д.Н.Бондалетов, А.В.Климашин, В.А.Федорова*

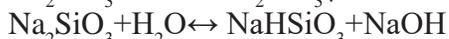
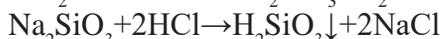
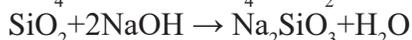
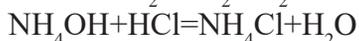
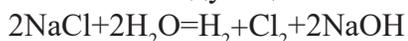
(ОАО «Гусевский стекольный завод им. Ф.Э.Дзержинского»,  
г. Гусь-Хрустальный, Россия)

Процесс легирования кварцевого стекла позволяет создать новые виды стекол с различными свойствами. ОАО «Гусевский стекольный завод им.Ф.Э.Дзержинского» имеет опыт производства легированных стекол марок КЛБ, КЛЖ и др. в состав которых входят редкоземельные элементы как отдельно, так и в сочетании с различными металлами.

В настоящее время продолжают работы по легированию стекол ионами хлора, самария, меди, ванадия и др. В данной работе рассматриваются процессы легирования хлором кварцевой крупки Кыштымского месторождения жилы 175 марки RQ2КС.

Кварцевое стекло, легированное хлорионом, плавилось в окислительной среде (кислородно-водородная плавка), а легирование самарием осуществлялось в восстановительной среде (электроввакуумное плавление).

Легирование кварцевой крупки проведено концентрацией 0,1 и 0,5% NaCl путем введения раствора соли на поверхность крупки с последующим закреплением раствора при температуре 350 и 400°C. Наплав кварцевой крупки производился на печи с кислородно-водородным обогревом. Отмечалась легкоплавкость легированной крупки с повышением скорости наплава с 1,3 до 1,5 кг/час при температуре 2000°C. В ходе подготовки шихты и наплавления стекла можно предположить следующие химические реакции:



Следует отметить, что в ходе наплавления крупки, легированной 0,5% соли, наблюдалось появление полупрозрачных хлопьев, а при охлаждении стекломасса резко побелела и стала непрозрачной, что, по-видимому, связано с кристаллизацией стекла. Известно, что кристаллизация происходит в том случае, когда в стекло, являющееся не стехиометрическим продуктом, вносятся химические компоненты, способные изменить систему, сдвигая ее к стехиометрии (кристаллизация). Таким компонентом может быть либо хлорион, либо катион натрия. Поэтому изучались стекла с другими концентрационными добавками хлориона и различными катионсоставляющими.

При активации поверхности крупки 0,1% NaCl стекломасса оставалась прозрачной как в период наплава, так и после охлаждения. Проведено определение массовой доли примесей железа и натрия в исходном и легированном стекле, которые изменились в следующем соотношении:

Таблица

Наименование стекла	Массовая доля примесей · 10 <sup>-4</sup> , %	
	Na	Fe
Исходное	9,87	2,7
Активированное 0,1%	12,07	0,6
Активированное 0,5%	17,2	1,7

Как видно из таблицы, легирование крупки хлорионом способствует повышению чистоты исходного материала, снижая содержание железа в 1,5-4 раза. Повышение примесей натрия способствовало изменению вязкости и повышению скорости наплава стекла с 1,3 до 1,5 кг/час.

Определены оптические характеристики исследуемых стекол в ультрафиолетовой и видимой частях спектра. Отмечается повышение

светопропускания кварцевого стекла, активированного хлорионом, особенно в ультрафиолетовой области спектра.

Промышленная плавка кварцевого стекла произведена с расходным коэффициентом наплава 1,18 при норме 1,3. Качество наплавленного блока относится к 1 категории. Вытянутая труба без кристаллизации и видимых свилей, стекло легко формуется и может быть рекомендовано для выдувных работ, например для изготовления оболочек высокоинтенсивных источников света.

Легирование самарием проводилось по вышеизложенной схеме. Для легирования использовались сернокислый 8-водный самарий импортного производства, отличающийся низким содержанием примесей. Для стабилизации центров окраски дополнительно вводился оксид алюминия через алюмоаммонийные квасцы при молярном соотношении  $Al_2O_3/Sm_2O_3$  0,5; 3,0; 5,0.

Подготовленная шихта помещалась в графитовые тигли и устанавливалась в электровакуумную печь. Температура плавления 2000°C. Основная масса стекла чистая, красного цвета, при этом интенсивность цвета наиболее характерна для стекла № 2.

Сваренное стекло было перетянуто на трубку диаметром 40 мм, из которой вырабатывалась аппаратура методом раздувки на станках при свободном формовании и с применением графитовой формы. Учитывая сложную конфигурацию аппаратуры проводилась также ее доработка с навивкой фланца, подрезкой и шлифовкой. Цвет стекла в процессе термической обработки оставался стабильным. Для достижения заданных цветовых характеристик планируется использование различных комбинаций легирующих добавок импортного и отечественного производства.

## **РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТОЙКОГО СИНЕ-ЗЕЛЕННОГО СТЕКЛА С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ БАНО С ПОКРЫТИЕМ**

*А.М.Каплунова, О.В.Рябина* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Актуальность разработки нового технологичного состава термостойкого сине-зеленого стекла с высоким коэффициентом светопропускания и требуемыми координатами цветности связана с необходимостью нанесения на изделия БАНО токопроводящего покрытия.

Установлено, что для получения требуемых светотехнических характеристик у изделия с покрытием синтезируемое стекло должно иметь спектр с максимальным пропусканием в диапазоне длин волн 490-510 нм и ограниченную область координат цветности.

Для получения требуемой спектральной кривой было исследовано влияние на спектральные и технологические характеристики базовой системы модификаторов, не применявшихся ранее,  $Li_2O$ ,  $Bi_2O_3$ ,  $P_2O_5$ .

Введение в состав 2-3 мас % оксида лития смещает спектральную кривую в коротковолновую область спектра и повышает коэффициент пропускания. При

этом значение координаты  $X$  значительно уменьшается. Более высокое содержание оксида лития увеличивает ТКЛР стекла и понижает его термостойкость.

Совместное присутствие в стекле оксидов лития и калия снижает его низкотемпературную вязкость, что важно при выработке сложнопрофильных изделий БАНУ.

Выявлено, что повышение температуры варки смещает равновесие между красящими комплексами в сторону образования зеленого 4-координированного комплекса меди с нежелательным увеличением координаты  $X$ . Поэтому необходимо вести синтез при более низких температурах.

Показано, что введение в стекло незначительных количеств  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (до 3 мас %) понижает температуру варки выбранной матрицы на 20-40°C при сохранении высокой термостойкости стекла и интегрального коэффициента светопропускания. При большей концентрации  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  снижается общее пропускание и происходит смещение максимума пропускания в длинноволновую область, что сопровождается увеличением координаты  $X$  и изменением цвета стекла.

Совместное введение в стекло оксидов лития и висмута увеличивает интегральный коэффициент светопропускания до 25-26 % и сдвигает спектральную кривую в коротковолновую область с максимумом пропускания на длине волны 490-510 нм. Это обеспечивает после нанесения покрытия сохранение координат в нужной цветовой области и их соответствие требованиям МКО.

Введение оксида фосфора отрицательно сказалось на светотехнических характеристиках и кристаллизационной способности стекла.

Проведенный комплекс исследований позволил предложить новый состав термостойкого сине-зеленого стекла с требуемыми характеристиками у изделий с покрытием, с расширенным интервалом выработки, высоким коэффициентом пропускания и достаточно низкой температурой варки (1520-1540°C).

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКОЛ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

*Е.В.Лопатина, В.Н.Сизаев* (Кафедра химической технологии стекла и ситаллов, Международная лаборатория функциональных материалов на основе стекла им. П.Д.Саркисова, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Разнообразие потребностей электронной техники требует реализации различных технологических подходов в получении активных диэлектриков с тем или иным комплексом свойств. Наряду с традиционными методами роста монокристаллов и монокристаллических тонких пленок, в последние годы все больший интерес приобретают попытки синтеза полярных диэлектриков из стеклообразного состояния вещества. Наиболее перспективным направлением исследований является получение стеклокристаллических текстурированных материалов с высоким содержанием кристаллов полярных соединений. Впервые возможность получения текстур из стекла показана в работе [1] на примере текстур

полярных кристаллов боратов лития и кремния с выраженными пьезоэлектрическими свойствами. Авторами [2-3] разработаны сегнетоэлектрические текстуры на основе титаната свинца, в [4-5] описаны методы получения высокоэффективных пьезоэлектрических текстур на основе кристаллов  $\text{LaVGeO}_5$ . Авторы [6] показали возможность управляемого формирования прозрачных текстурированных кристаллических слоев, перспективных для создания нелинейно-оптических планарных волноводов. Стёкла с тонкой пленкой кристаллической фазы  $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$  на поверхности образца были впервые получены кристаллизацией стекла состава (мол.%)  $15\text{TiO}_2\text{-}40\text{BaO}\text{-}45\text{B}_2\text{O}_3$  с использованием ультразвукового излучения [7]. Позже авторами [8] были изучены процессы поверхностной кристаллизации стекол систем  $\text{TiO}_2\text{-BaO}\text{-B}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2\text{-Ba}\text{-B}_2\text{O}_3$  под воздействием лазерного излучения. В большинстве случаев для формирования текстурированного слоя на поверхности стекла требовались длительные термообработки, до 60-80 ч, в сочетании с воздействием лазерного или ультразвукового излучения.

В данной работе осуществлено формирование ориентированных пленок  $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$  на поверхности стекол в системах  $\text{TiO}_2\text{-Ba}\text{-B}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2\text{-Ba}\text{-B}_2\text{O}_3$  методом градиентной кристаллизации. В качестве объектов исследования с учетом литературных данных были выбраны стекла составов (в мол. %)  $8\text{TiO}_2\text{-}43\text{BaO}\text{-}49\text{B}_2\text{O}_3$  (ТВВ) и  $8\text{SiO}_2\text{-}43\text{BaO}\text{-}49\text{B}_2\text{O}_3$  (SBB). Стекла получали по традиционной схеме: приготовление шихты, варка в платиновом тигле, отлив на металлическую пластину и прессование до толщины образца менее 1,5 мм и отжиг при  $550^\circ\text{C}$  с последующим медленным охлаждением до комнатной температуры.

Полированные стеклянные пластины с линейным размером  $\sim 10$  мм кристаллизовали двумя методами:

1. Изотермическая кристаллизация в области температур  $610\text{-}700^\circ\text{C}$  – метод, обычно использовавшийся ранее при создании текстур  $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$ ;

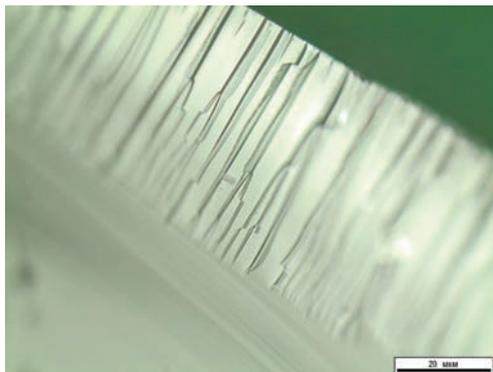
2. Кристаллизация в поле температурного градиента, ранее к текстурированию барий-боратных стекол не применявшаяся.

Длительная изотермическая кристаллизация (40-60 ч) стекол ТВВ и SBB приводит к образованию на поверхности образцов текстурированного слоя кристаллов  $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$  толщиной до 250 мкм, которая зависит от состава стекла и условий термической обработки. Увеличение длительности до 100 ч и более или повышение температуры термообработки часто сопровождается разрушением образцов. При аналогичных условиях термообработки слой текстурированных кристаллов на поверхности ТВВ стекол был на 20-30% толще, чем для стекол SBB.

Для создания в тонком образце градиента температуры необходим стационарный отток тепла от одной из граней образца. Сконструированная и изготовленная нами минипечь позволила достигать градиента температур до  $300^\circ\text{C}/\text{см}$  по высоте камеры печи с помощью двух нагревателей, расположенных в своде и днище печи (над и под образцом).

В поле температурного градиента кристаллизация исследованных стекол также носила характер текстуры, однако скорость роста текстуры была почти на порядок выше: в течение 2-3 ч в градиенте температур вырастали текстуры  $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$ , аналогичные по размерам текстурам, полученным при изотермической кристаллизации длительностью 30-60 ч, но с более высокой степенью

воспроизводимости и с более высокой степенью совершенства, о чем свидетельствуют рентгенографические данные. Характерная текстура, получаемая методом кристаллизации в поле температурного градиента, представлена на рисунке.



Характерная пленка текстуры  $\beta$ -BaV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> на поверхности стекла, полученная в поле температурного градиента

~200 мкм с высокой степенью воспроизводимости микроструктуры.

Высокая оптическая нелинейность второго порядка материалов на основе боратов бария, широкий диапазон пропускания, включая УФ область спектра, относит их к весьма перспективным и технологически привлекательным материалам для создания различных активных элементов оптических схем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (грант 11.G34.31.0027) и гранта РФФИ 13-03-01018.

#### Литература

1. G.J. Gardopee, R.E. Newnham, A.G. Halliyal, A.S. Bhalla // Appl. Phys. Lett.. 1980. № 36. PP. 817-821.
2. Glass A.M., Nassau K., Shiever J.W. // J. Appl. Phys. 1977. № 48 (12). PP. 5213-5216.
3. Михневич В.В., Шут В.Н.// Изв. АН СССР. Неорган. Матер. 1992. № 28 (3). С. 583-586.
4. V.N.Sigaev, E.V.Lopatina, P.D.Sarkisov, S.Yu.Stefanovich, V.I. Molev // Mater. Sci. Eng., B. 1997. № 48. PP. 254-260.
5. Сигаев В.Н., Лопатина Е.В., Саркисов П.Д., Стефанович С.Ю., Молев В.И. // Физ. хим. стекла. 1996. № 22 (2). С.153-163.
6. Takahashi Y., Benino Y., Dimitrov V. & Komatsu T. // J.Non-Cryst. Solids, 1999. № 260. PP.155-159.
7. A.L. Martinez, R. Lebullenger, C.A.C. Feitosa, A.C. Hernandez // J. Non-Cryst. Solids. 2005. № 351. PP.1372–1376.
8. C.A.C. Feitosa, V.R. Mastelaro, A.R. Zanatta, A.C. Hernandez, E.D. Zanotto // Opt. Mater. 2006. № 28 (8-9). PP.935-943.

## **ИОНООБМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТЕКЛА ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ В КАЛИЕВОЙ СЕЛИТРЕ И ХЛОРИДЕ АЛЮМИНИЯ**

*А.С.Липатьев, А.С.Плотникова, Ю.А.Спиридонов, В.Н.Сигаев*

(Международная лаборатория функциональных материалов на основе стекла им. П.Д. Саркисова, кафедра стекла и ситаллов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Во время работы космические аппараты подвергаются воздействию различных деградиционных факторов космического пространства: глубокого вакуума, термоциклирования, ионизирующего излучения различной природы. На низких околоземных орбитах атомарный кислород и УФ излучение являются основными агрессивными факторами. Космическая радиация и метеорная пыль вызывают эрозию поверхности элементов космических аппаратов и выход из строя жизненно важных систем космического аппарата (солнечных батарей, оптических приборов, антенн и т.д.) и сокращает время активного существования космического аппарата на орбите. Одним из условий нормального функционирования космического аппарата является поддержание в допустимых пределах теплового режима элементов его конструкции и бортовой научной аппаратуры. Эта функция частично или полностью возложена на пассивные системы терморегулирования – радиаторы, важным элементом которых являются терморегулирующие покрытия, представляющие собой тонкие пластины радиационно-стойкого стекла, содержащего оксид церия, с нанесенными отражающим и защитным слоями. Воздействие ионизирующих излучений приводит к появлению в стекле радиационных повреждений, которые создают перемещающиеся и захватываемые электроны, а также положительные дырки, возникающие при перемещении электронов. Ионы протектора в низшей валентной форме ( $\text{Ce}^{+3}$ ), поглощая дырки, устраниают их, в то время как ионы в высшей форме ( $\text{Ce}^{+4}$ ) улавливают электроны. Толщина стеклянных покрытий определяется специальными требованиями, одним из которых является высокое значение механической прочности. Необходимость высокой прочности стекла обусловлена не только тем, что терморегулирующие покрытия должны выдерживать воздействие метеорной пыли из космоса, но и проходить операции сборки и транспортировки. Кроме того, повышение прочности покрытий дает возможность снизить на 20-25% их толщину. Уменьшение толщины стеклянных пластин позволит увеличить массу полезной нагрузки космических аппаратов.

Ранее нами была введена в эксплуатацию установка вытяжки стеклянной ленты и разработана технология получения защитных покрытий толщиной менее 200 мкм из радиационно-стойкого стекла [1]. Целью данной работы являлся поиск оптимального метода упрочнения термозащитных покрытий.

В основе множества различных способов, разработанных для повышения прочности стеклянных изделий, лежит либо повышение качества их поверхности, либо модифицирование их поверхностного слоя с целью создания в нем остаточных сжимающих напряжений. Эффективным методом упрочнения пластин стекла

является метод низкотемпературного ионного обмена [2], позволяющий в несколько раз повысить механическую прочность при сохранении оптических характеристик. Низкотемпературный ионный обмен сводится к замещению щелочного иона в стекле на больший по размеру ион из расплава - обычно это обмен ионов натрия на ионы калия или ионов лития на ионы натрия. При этом в поверхностных слоях увеличивается удельный объем структуры и возникает тенденция к расширению, чему препятствуют внутренние слои стекла. В результате в поверхностном слое стекла образуются упрочняющие напряжения сжатия.

Проведенный анализ литературных данных [3-5] показал, что обработка в газовой фазе поверхности стекол продуктами термического разложения соединений алюминия приводит к улучшению химической стойкости стеклянных изделий, а также позволяет повысить в несколько раз значения их прочностных характеристик. Данный метод упрочнения был успешно опробован в производстве флоат-стекла и перспективен для применения к тонким термозащитным стеклянным покрытиям.

Для ионообменного упрочнения использовались образцы из стекла размером 40×40 мм и толщиной до 170 мкм. Упрочнение методом низкотемпературного ионного обмена проводилось в специально сконструированной печи (рис. 1). Камера печи заполнялась расплавом химически чистой калиевой селитры, внутрь которого погружались кассеты со стеклопластинами. Температуры выдержки в расплаве  $KNO_3$  были выбраны по литературным данным от 415 до 490°C с шагом 15°C. Длительность термообработок составляла от 15 до 60 минут с шагом 15 мин. Предел прочности при изгибе стеклянных образцов определяли по методике трехточечного изгиба с помощью универсальной разрывной машины Shimadzu AGS-X. Микротвердость стекла измеряли на микротвердомере ПМТ-3.



а



б

Рис. 1. Специальная печь для проведения низкотемпературного ионного обмена (а) и кассета с установленными для упрочнения стеклопластинами (б)

Полученная зависимость (рис. 2а) предела прочности при изгибе стеклопластин от температуры термообработки показывает увеличение предела прочности от  $153\pm 20$  до  $473\pm 50$  МПа с повышением температуры ионного обмена до  $460^\circ\text{C}$ , а при дальнейшем росте температуры - снижение прочности. Установлено, что длительность выдержки стеклянных образцов в расплаве калиевой селитры незначительно влияет на их прочностные характеристики (рис. 2б). Близким к оптимальному является режим ионного обмена с температурой  $460^\circ\text{C}$  и временем упрочнения, равным 30-45 мин. Необходимо также отметить рост микротвердости обработанных по вышеприведенному режиму стеклопластин в сравнении с исходными. Как можно видеть из таблицы, ионный обмен может быть эффективно применен для упрочнения стеклянных образцов с толщиной менее 170 мкм и стать важным этапом в совершенствовании технологии изготовления термозащитных покрытий.

Для упрочнения стеклянных покрытий нами опробован метод модифицирования поверхности хлоридом алюминия в газовой фазе. Стеклянные образцы нагревались в огнеупорном контейнере в печи до температур 580, 600 и  $610^\circ\text{C}$ . Затем в контейнер добавляли 40 г шестиводного хлорида алюминия и он закрывался крышкой. Контейнер со стеклянными покрытиями выдерживался в течение 1 ч. Повышение предела прочности при изгибе в 1,7 раза по сравнению со значениями для исходного стекла было достигнуто при  $600^\circ\text{C}$ . При более высокой температуре наблюдалась деформация стеклянных покрытий. Спектры поглощения стекла до и после обработки свидетельствуют о том, что модификация поверхности защитных покрытий не привела к ухудшению его оптических характеристик. Микротвердость обработанных стеклянных образцов возросла по сравнению с исходными стеклопластинами с  $7,1\pm 0,6$  до  $8,0\pm 0,7$  ГПа.

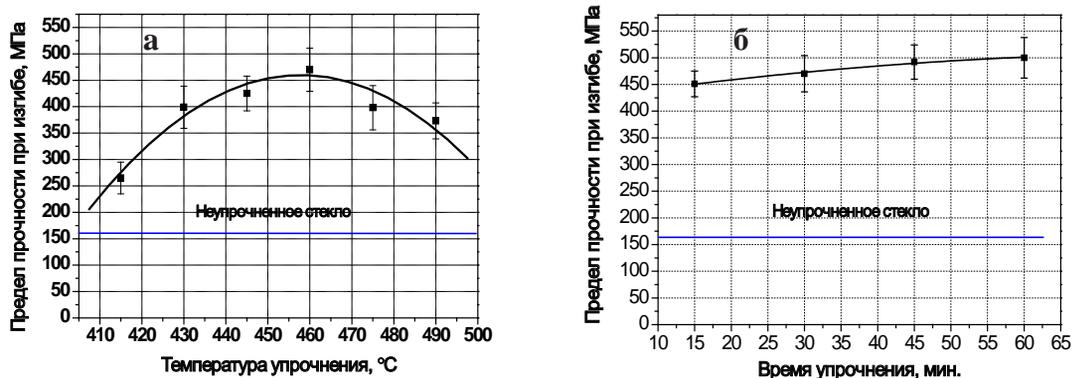


Рис. 2. Зависимость предела прочности при изгибе стеклопластин от температуры ионного обмена при времени выдержки 30 мин (а) и времени ионного обмена при  $460^\circ\text{C}$  (б)

Предел прочности при изгибе для стеклопластин разной толщины, упрочненных по режиму 460°C – 30 мин.

Толщина, мкм	Предел прочности при изгибе, МПа
130-140	503±67
150-160	537±71
160-170	473±50

Таким образом, подобран близкий к оптимальному режим ионообменного упрочнения стеклянных пластин в расплаве калиевой селитры, позволяющий повысить в 3 раза предел прочности при изгибе термозащитных покрытий. Модифицирование поверхности стекла в газовой фазе хлорида алюминия привело к росту предела прочности при изгибе в 1,7 раза, при этом более детальный подбор условий модифицирования, а также применение вакуумного магнетронного напыления нанослоя алюминия позволяют рассчитывать на дальнейшее многократное увеличение прочностных характеристик стеклянных покрытий.

#### Литература

1. Липатьев А.С., Мамаджанова Е.Х., Рыженков В.С., Вятлев П.А., Сысоев В.К., Сигаев В.Н. Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева.– 2011. Т. XXV, №5. С. 93-97.
2. Бутаев А.М. Прочность стекла, ионообменное упрочнение. – Махачкала: ДГУ. – 1997. – 133 с.
3. Гороховский А.В., Головач С.В., Поляков К. В. // Физика и химия стекла. – 1991. – Т. 17, № 3. – С. 499-503
4. US Patent 20070141349A1 Alkaline glasses with modified glass surfaces and process for the production thereof.
5. US Patent 20090148709A1 Method of making glass including surface treatment with aluminum chloride using combustion deposition prior to deposition of antireflective coating.

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ С ПЕРЕМЕННЫМ СВЕТОПРОПУСКАНИЕМ ДЛЯ СВЕТООГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

*В.П.Грачев<sup>1</sup>, С.М.Алдошин<sup>1</sup>, В.А.Барачевский<sup>2</sup>, О.А.Айт<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup>ИПХФ РАН, г. Черноголовка, Россия; <sup>2</sup>ЦФ РАН, г. Москва, Россия)

Защита жилых и производственных помещений, а также различных транспортных средств от солнечного излучения летом, особенно в регионах с жарким климатом, является серьезной проблемой, и работы в этом направлении интенсивно ведутся во всем мире. Перспективным направлением для решения рассматриваемой проблемы является создание солнцезащитных полимерных

пленочных материалов. В мире производятся пленочные электрохромные устройства, изменяющие степень поглощения света в видимой области спектра при пропускании тока. К недостаткам существующих устройств относится высокая цена и невысокое качество изделий на данный момент.

В данной работе рассматривается возможность создания многослойных фотохромных полимерных пленочных покрытий (МФППП), состоящих из прозрачной подложки (например, лавсановой пленки), на одну сторону которой нанесен оптически прозрачный металлсодержащий слой, отражающий инфракрасное (ИК) излучение, а на другую – фотохромный нанокомпозитный полимерный слой, поглощающий в фотовозбужденном (окрашенном) состоянии ультрафиолетовое и видимое излучение (рис.).

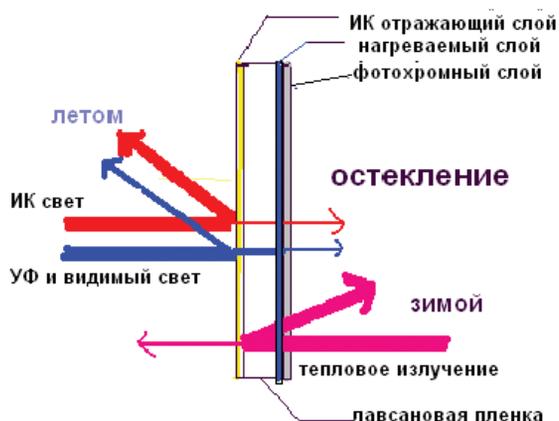


Рис. Конструкция полифункциональной многослойной фотохромной пленки и ее функциональные возможности

МФППП может крепиться с помощью клеевого слоя или специальных зажимов на существующее и новое остекление строительных объектов, а также транспортных средств как гражданского, так и оборонного назначения, в том числе авиации. Экспертные оценки показывают, что использование таких покрытий позволит экономить на кондиционировании и отоплении до 40 % энергии.

В ИПХФ РАН совместно с ЦФ РАН уже в течение нескольких лет ведутся работы по созданию МФППП. Исследован большой ряд фотохромных соединений и отобраны образцы и композиции, обеспечивающие широкий спектр поглощения (400-700 нм) в фотовозбужденном состоянии. Найдены полимерные матрицы, хорошо совместимые с фотохромными соединениями и обладающие хорошей адгезией к полимерной подложке. Изготовлены экспериментальные образцы МФППП размером 100x100мм и испытаны с положительным результатом. Светопропускание фотохромного слоя в видимой области не ниже 85 %, а после облучения УФ светом (360 нм) снижается до 10 %. Совместно с КЗТО «Радиатор» ведутся работы по созданию ИК-отражающего слоя с приемлемыми характеристиками (отражение в ИК- области спектра до 80 %, пропускание в видимой области не менее 70 %).

## **СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ СОЗДАНИЯ СЛОЖНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ**

*О.Ф.Просовский, А.Б.Гвоздев, А.Н.Исамов, Г.Ю.Просовская*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

В работе уделяется внимание области физики, изучающей распространение электромагнитной волны в слоистой среде. Данные явления – яркий пример высокой степени совпадения математического описания физических процессов и их практической реализации. Особенности формирования слоистых сред, о которых идет речь – тонких пленок для получения интерференционных структур – на современном этапе развития техники и технологии характеризуются высокой степенью повторяемости физических параметров и технологических условий, в которых происходит нанесение покрытий. Данный факт имеет логическое продолжение в виде получения стабильных результатов оптических констант получаемых тонких пленок веществ. Стабильность получаемых результатов позволяет при большом количестве экспериментальных данных выстраивать математические модели, которые позволяют на результатах анализа отдельных пленок веществ проводить синтез оптических конструкций с большим числом слоев. В работе приводятся примеры использования модуля математических вычислительных программ OptiLayer для синтеза и ре-анализа получаемых оптических покрытий. Показан процесс ре-анализа полученных одиночных пленок напыляемых веществ, моделирование оптических конструкций на основе экспериментальных данных. Представлена важность выбора технологического оборудования для практической реализации математических моделей конструкций интерференционных светофильтров с большим числом слоев. Показан механизм формирования атмосферы остаточных газов в вакуумной камере, проводится анализ влияния динамики газовых процессов на воспроизводимость оптических параметров интерференционных светофильтров. Рассматриваются технические решения и практические методы стабилизации условий роста вакуумных конденсатов для снижения влияния атмосферы остаточных газов на оптические параметры интерференционных светофильтров при серийном производстве изделий.

## **МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК ОКСИДОВ ВЕЩЕСТВ С НИЗКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

*А.Б.Гвоздев, А.Н.Исамов, О.Ф.Просовский, Г.Ю.Просовская*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Создание диэлектрических интерференционных светофильтров с количеством слоев в оптической конструкции более 20 требует необходимости получать оптические пленки с низкими потерями проходящего через них

излучения. Коэффициент поглощения, приемлемый для получения многослойных диэлектрических покрытий, должен составлять величину меньше чем  $1 \cdot 2 \cdot 10^{-4}$ . Получение тонких пленок с низким коэффициентом поглощения является достаточно сложной технологической задачей. В наших работах по созданию интерференционных покрытий используются два основных метода формирования тонких пленок – электронно-лучевой метод и метод реактивного магнетронного распыления. К более сложному, но при этом и более перспективному методу магнетронного реактивного распыления проявляется больший интерес. Реактивный процесс плазменного нанесения покрытий для оптических приложений стал перспективным в свете последних достижений вычислительной техники и систем автоматического и интеллектуального регулирования. В то же время получение магнетронным способом тонких оптических пленок с низким коэффициентом поглощения является сложной задачей. Физический принцип получения оксидов веществ магнетронным способом (при использовании магнетронов постоянного тока и металлических мишеней) заключается в многостадийном формировании пленки окисла в атмосфере рабочего и реактивного газов. В то же время полностью избавиться от компоненты металлической составляющей не просто. Применение экспериментально-аналитического комплекса, позволяющего математически моделировать свойства покрытий и осуществлять математический ре-анализ оптических свойств тонких слоев распыляемых веществ дало возможность с высокой точностью определять коэффициент поглощения одиночных пленок наносимых тонких пленок веществ. Использование метода ионного асистирувания реактивного процесса нанесения оксидов веществ существенно снижает потери в пленках, но окончательно не решает проблемы получения покрытий для использования в конструкции многослойных интерференционных светофильтров. Для решения этой проблемы предложен метод получения пленок оксидов веществ посредством доокисления тонких слоев. Получены удовлетворительные результаты при распылении металлических мишеней алюминия для формирования пленок  $Al_2O_3$ .

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ПЛЕНКАХ ОКСИДОВ ВЕЩЕСТВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ДООКИСЛЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ**

*А.Н.Исамов, А.Б.Гвоздев, О.Ф.Просовский, Г.Ю.Просовская*  
(ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Перспективным методом нанесения сложных интерференционных структур в последнее время признан метод плазменного магнетронного распыления металлических мишеней в атмосфере рабочего и реактивного газов. Однако получение оптических тонких пленок с низким коэффициентом поглощения для их использования в многослойных интерференционных светофильтрах сопряжено с рядом сложностей. Для их преодоления применение ионного асистирувания реактивного процесса нанесения оксидов веществ – один из вариантов решения.

Ионное асистирирование существенно снижает оптические потери в пленках, но окончательно не решает проблемы получения покрытий, для использования в конструкции многослойных интерференционных светофильтров. Для решения этой проблемы предложен метод получения пленок оксидов веществ посредством доокисления тонких слоев. Получены удовлетворительные результаты при распылении металлических мишеней веществ для формирования пленок  $Al_2O_3$ , ITO. Проведены исследования влияния технологических параметров на коэффициент поглощения в пленках оксидов веществ, полученных магнетронным распылением. Суть исследований влияния технологических параметров заключалась в следующем: с помощью анализа цвета плазменного разряда стабилизировались параметры напуска рабочего и реактивного газов в вакуумную камеру при проведении процесса нанесения покрытий, изменяя скорость вращения подложкодержателя и скорость распыления металлических мишеней, проводилось напыление покрытия на стеклянную пластину. Измерение спектра пропускания и последующий ре-анализ с помощью математического аппарата позволяет определить показатель преломления пленки, ее коэффициент поглощения и геометрическую толщину. В ходе выполнения эксперимента установлены зависимости влияния толщины тонкого слоя на коэффициент поглощения пленки в целом.

## **ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ЛАКОВ НА ОСНОВЕ АЛКОКСИСИЛАНОВ**

*П.А.Стороженко, А.Н.Поливанов, Т.И.Федотова, А.В.Левчук, В.А.Власова, Н.В.Тюрикова, Ю.А.Старостина*  
(ГНЦ РФ ФГУП “ГНИИХТЭОС”, г. Москва, Россия)

Кремнийорганические лаки и смолы благодаря уникальным потребительским свойствам незаменимы как в специальных (ракетно-космическая, авиационная, специальное машиностроение, ядерная энергетика), так и гражданских отраслях промышленности. Существующие в настоящее время технологии получения кремнийорганических связующих основаны на использовании высокореакционноспособных и агрессивных мономеров – органохлорсиланов и имеют существенные недостатки: высокую пожаро- и взрывоопасность производств и большое количество отходов (кислые стоки, промывные воды). Требования к экологической чистоте современных технологических процессов, безопасности и минимизации отходов обуславливают необходимость создания прогрессивной безотходной технологии получения кремнийорганических пленкообразующих.

Данная работа посвящена синтезу кремнийорганических пленкообразующих на базе алкоксисиланов по реакции гидролитической сополиконденсации. Алкоксисиланы достаточно реакционноспособны, не столь агрессивны, как органохлорсиланы, и не дают большого количества не утилизируемых отходов в процессе промышленного производства.

В рамках настоящего исследования изучалось влияние химической природы катализаторов и растворителей, а также концентрации реагентов реакционной

смеси, температурных и временных параметров синтеза на физико-химические свойства покрытий, полученных на базе синтезированных образцов лаков. В качестве алкоксисиланов в синтезе использовали тетраэтоксисилан, метил-, винил-, глицидоксипропилалкоксисиланы и их смеси.

Все экспериментальные образцы лаков были нанесены на пластинки из нержавеющей стали 1X18H10T методами налива и окунания, согласно ГОСТ 19007-73, высушены и отверждены. Поверхность пластинок предварительно подготавливали. Согласно ГОСТ 4765-73. Установлено, что время высыхания покрытий на воздухе в нормальных условиях изменяется в достаточно широком интервале температур 80-200 °С, что определяется составом реакционной смеси и условиями синтеза экспериментальных образцов лака.

Полученные таким образом покрытия испытывались на износостойкость, химстойкость и наличие адгезии к стальной подложке. Наилучший результат показали покрытия, полученные на образцах лака, синтезированных на смеси винил-, метилалкоксисиланов.

Разработанный метод синтеза, предполагаемый как основа промышленной технологии, позволяет сократить число стадий процесса до минимума и существенно уменьшить количество отходов (таблица).

Таблица

Наименование продукта	Используемое сырье	Отходы производства, т/т
Экспериментальные образцы лаков	алкоксисиланы	0,05 (твердый осадок, может быть использован в качестве наполнителя при изготовлении резин)

## **ТЕРМООТВЕРЖДАЕМЫЙ СИЛОКСАНОВЫЙ ЛАК, ПОЛУЧЕННЫЙ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ОРГАНИЧЕСКОГО (ПММА) ОСТЕКЛЕНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

*П.А.Стороженко, А.Н.Поливанов, Т.И.Федотова, А.В.Левчук, В.А.Власова, К.Е.Смирнова, В.И.Самсонов, И.Ю.Овсянникова*  
(ГНЦ РФ ФГУП “ГНИИХТЭОС”, г. Москва, Россия; ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Органические стекла на основе полиметилметакрилата (ПММА) достаточно широко используются в качестве конструкционного материала для изготовления изделий остекления различного назначения, поскольку обладают необходимым для этого комплексом свойств: прозрачностью, ударостойкостью, низкой удельной массой, атмосферостойкостью и пр.

Замена традиционного материала остекления - силикатного стекла - на легко формуемые органические пластики позволяет не только внести усовершенствования

в технологию получения изделий остекления, но и существенно улучшить их эксплуатационные характеристики. Однако при этом возникает проблема повышения устойчивости поверхности остекления к различным механическим воздействиям. Одним из способов устранения этих недостатков является модификация поверхности органического остекления путем нанесения защитных лаковых покрытий. Модификация поверхности ПММА позволяет обеспечить защиту остекления от внешних воздействующих факторов и повысить его механическую прочность, влагостойкость, устойчивость к воздействию растворителей, стабильность оптических и прочностных характеристик.

Особый интерес в этом плане представляет покрытие поверхности ПММА жидкими кремнийорганическими составами, полученными золь-гель методом.

В настоящее время ФГУП ГНИИХТЭОС проводит исследования с целью разработки золь-гель технологии органосилсесквиоксанов. Использование алкоксисиланов в качестве основного сырья в разрабатываемом золь-гель варианте позволяет создавать современные малоотходные, малоэнергоёмкие технологии термоотверждаемых силоксановых лаков.

В рамках настоящего исследования разработаны рецептуры и методы синтеза термоотверждаемого силоксанового лака (ТСЛ), позволяющего получать покрытия на органические стекла с весьма высокими эксплуатационными характеристиками, такими, как: твердость и устойчивость к царапанию, агрессивным средам, запотеванию и загрязнениям, устойчивость к перепадам температур и др. Синтезированы экспериментальные образцы лака, исследованы их физико-химические свойства. Изучены массово-концентрационные и температурно-временные параметры процесса. Разработаны аппаратурно-технологическая схема и необходимая технологическая документация, создана экспериментальная установка. Нароботаны экспериментальные партии продукта. Совместно с ФГУП «ВИАМ» и ОАО «ОНПП «Технология» проведены исследования свойств получаемого на основе ТСЛ покрытия и влияния лака на свойства оргстекла. Разработаны способ нанесения лака на плоские и формованные изделия из органического стекла, программа и методы проведения испытаний изделий остекления из оргстекла с лаковыми покрытиями. Установлено, что коэффициенты светопропускания и отражения, адгезия и механическая прочность лакового покрытия соответствуют лучшим зарубежным аналогам. Абразивостойкость лакового покрытия, полученного на основе отечественных экспериментальных образцов термоотверждаемого силоксанового лака, превосходит зарубежные аналоги. Проведенные исследования показывают, что данное направление представляет безусловный научный интерес, а полученный в результате проведения работы опыт может быть использован при создании износостойких покрытий для органических стекол другой химической природы (ПК, ПУ, ПЭТФ и т.д.).

## РАЗРАБОТКА БЕЗОБЖИГОВОГО СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА И ДОМЕННОГО ШЛАКА

*Н.Н.Клименко, Н.Ю.Михайленко* (Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

В настоящее время в связи с возникшей проблемой рационального использования минерально-сырьевой базы строительной индустрии повышенный интерес вызывают дешевые и ресурсоэффективные материалы. Среди сырьевых материалов, используемых в промышленности строительных изделий, особое место занимает доменный шлак. Шлаки широко используют при производстве шлакового цемента и шлакоситаллов в качестве основного сырьевого компонента, при производстве шлакопортландцемента в качестве активной минеральной добавки. Гидравлическая активность, близость химического состава доменного шлака к химическому составу портландцемента и стекловидное состояние, обеспечивающее его дополнительную активность, предопределили использование шлака в качестве вяжущего компонента. Поскольку доменный шлак проявляет высокую химическую активность при взаимодействии с жидким стеклом, на его основе возможно получение прочного камня без высокотемпературной обработки. Это свойство доменного шлака используется при производстве шлакощелочных материалов [1].

Целью работы являлась разработка энерго- и ресурсоэффективного строительного материала в системе «кварцевый песок – доменный шлак – жидкое стекло» с удовлетворительными эксплуатационными свойствами.

Условием повышения эксплуатационных свойств композитов является оптимальное соотношение исходных компонентов в сырьевой смеси. Для моделирования сырьевой смеси по составу в системе «кварцевый песок – доменный шлак – жидкое стекло» использовали метод симплекс-решетчатого планирования эксперимента, который часто применяют при исследовании зависимости свойств материала от содержания индивидуальных компонентов [2]. Целью оптимизации состава являлось получение материала с максимальной прочностью, поэтому в качестве параметра оптимизации выбран предел прочности при сжатии. В соответствии с проведенными предварительными экспериментами содержание жидкого стекла в смеси ограничили следующими пределами: максимальное содержание не превышает 30 %, минимальное содержание – не ниже 15 %. Поскольку необходимым условием для применения метода симплекс-решетчатого планирования является равенство суммы всех компонентов 100 %, то диапазон содержания кварцевого песка и доменного шлака соответственно составил 0-85 %. Таким образом, выбранная область исследования располагалась в интервале концентраций: кварцевый песок – 0–85%, доменный шлак – 0-85 %, жидкое стекло – 15-30 %.

Поскольку выбранная область представляет собой четырехугольник, а для двумерного пространства симплексом является треугольник, то указанная область была разделена на два симплекса, т. е. на два треугольника.

Для описания свойств в исследуемой системе выбрано уравнение регрессии

неполного третьего порядка, которое чаще всего используется в аналогичных случаях [2]. Уравнения регрессии имеют следующий вид для верхнего (1) и нижнего (2) треугольников, соответственно:

$$Y = 17z_1 + 90z_2 + 24z_3 + 30z_1z_2 + 164z_2z_3 - 2z_1z_3 + 17z_1z_2z_3 \quad (1)$$

$$Y = 23z_1 + 90z_2 + 74z_3 + 166z_1z_2 - 2z_1z_3 + 993z_1z_2z_3 \quad (2)$$

В соответствии с матрицей планирования синтезированы образцы, на которых определяли предел прочности при сжатии. После проверки адекватности уравнений по критерию Стьюдента были построены поверхности отклика на симплекс, т. е. изолинии механической прочности композитов. Для этого по полученным уравнениям регрессии (1, 2) рассчитали значения прочности на сжатие во внутренней области симплексов с шагом 0,1 % по псевдокоординатам и точки с одинаковыми значениями соединили изолиниями (рис.). Согласно полученным результатам, область оптимальных составов с максимальными значениями прочности на сжатие (110 - 120 МПа) ограничивается следующими концентрациями компонентов: кварцевый песок 15–30 мас.%, доменный шлак 45-65 мас. %, жидкое стекло 20-25 мас. %.

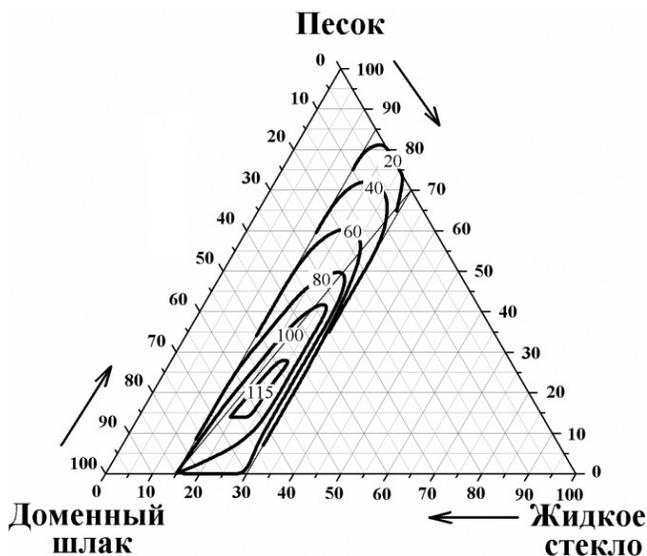


Рис. Изолинии предела прочности при сжатии композитов в системе «кварцевый песок – доменный шлак – жидкое стекло»

Повышение содержания песка в сырьевой смеси приводит к снижению прочности на сжатие, однако полное исключение песка из состава также приводит к уменьшению прочности композиций. Это связано с природой кварцевого песка, который, благодаря повышенной прочности и микротвердости зерен, выступает в роли армирующего компонента вяжущей композиции, состоящей из доменного шлака и жидкого стекла. В этом случае основным компонентом, обеспечивающим набор прочности синтезируемых материалов, является доменный шлак, который в условиях тепловлажностной обработки проявляет гидравлическую активность, т. е. способность к самопроизвольному отвердеванию с получением искусственного

камня. Жидкое стекло выступает в роли щелочного активатора доменного шлака, тем самым повышая его реакционную способность. В результате формируется прочный материал, армирование которого кварцевым песком позволяет повысить прочность еще на 20 %.

Таким образом, в результате проведенного моделирования сырьевой смеси по составу в трехкомпонентной системе «кварцевый песок – доменный шлак – жидкое стекло» с использованием математического планирования эксперимента показана возможность получения материалов с максимальной прочностью на сжатие до 110-120 МПа при содержании 15-30 мас.% кварцевого песка, 45-65 мас.% доменного шлака и 20-25 мас.% жидкого стекла. Выявлено, что основной набор прочности идет за счет проявления доменным шлаком гидравлической активности. Жидкое стекло в данном случае выступает в роли щелочного активатора.

#### Литература

1. Глуховский В.Д. Шлакощелочные цементы и бетоны / В.Д. Глуховский, В.А. Пахомов. - Киев: Будівельник, 1987. – 184 с.
2. Лисовская Г.П. Планирование эксперимента в технологии стекла. / Г.П. Лисовская. М.: Моск. хим.-технол. ин-т им. Д. И. Менделеева, 1979. – 48 с.

### **РАЗРАБОТКА СФЕРОИДИЗОВАННЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ $Y_2O_3$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ**

*Г.Н.Апрощенко, Г.Ю.Шахгильдян, В.И.Савинков, А.Палеари, В.Н.Сигаев*  
(Международная лаборатория функциональных материалов на основе стекла им. П.Д. Саркисова, кафедра стекла и ситаллов РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Ядерная медицина находится на этапе бурного развития. Разрабатывается множество средств доставки радиации к внутренним органам человека с использованием широкой совокупности изотопов и матриц – полимерных, стеклянных и кристаллических. Особый интерес представляют сфероидизованные стеклообразные материалы, позволяющие плавно и целенаправленно изменять составы стекол и соответственно их свойства, в широких пределах модифицировать микро- и наноструктуру, создавать пористые матрицы, вводить в состав стекла радиоизотопы в широкой области концентраций. Некоторые разработки уже нашли широкое медицинское применение. Микросферы иттрийалюмосиликатной (YAS) системы, разработанные канадской фирмой “Nordion” [1-3], успешно применяются на Западе благодаря высокоэффективному терапевтическому эффекту, достигаемому за счет изотопа  $^{90}Y$ . После облучения YAS микросфер в атомном реакторе в них образуется короткоживущий  $\beta$ -излучатель – изотоп  $^{90}Y$  с периодом полураспада 64,1 часа, достаточным для осуществления доставки препарата в клинику и проведения локальной радиотерапии. Введение микросфер в организм человека осуществляется

внутриартериальным способом, в результате чего происходит их избирательное накопление в опухоли и поражение опухолевых очагов. Основные достоинства этого метода лечения: малоинвазивный процесс введения; минимальные повреждения здоровой ткани; поражение сразу всех очагов и метастазов опухоли; возможность доставить в опухоль практически любую дозу излучения. В Российской Федерации подобные методы лечения находятся на начальной стадии.

Нами предложены, запатентованы и реализованы на практике способы получения YAS микрошариков с заданным распределением по размерам (рис.), с повышенным объемным содержанием оксида иттрия при полном отсутствии радионуклида в поверхностном слое [4-6]. Изготовлена опытно-промышленная линия, включающая высокотемпературные печи для варки и выработки тугоплавких стекол, средства измельчения и классификации порошков, плазматрон. Разработанная нами технология предусматривает изготовление микрошариков из стекла, сваренного при температуре порядка 1600°C в платиновом тигле из особо чистых реактивов.

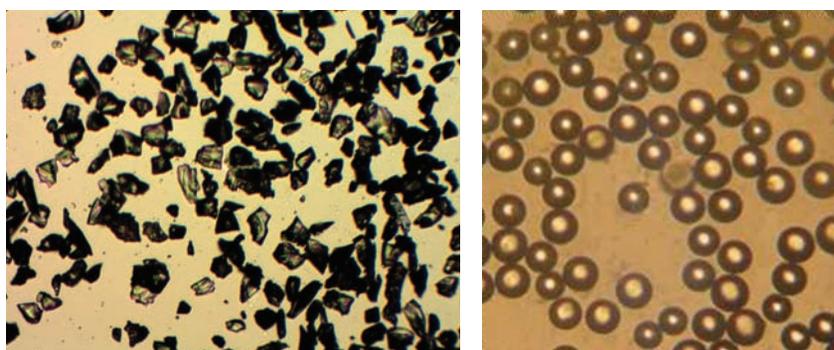


Рис. Исходный порошок YAS стекла и микрошарики размером 20-32 мкм

Высокая скорость охлаждения расплава (прессованием или пропусканием расплава через быстро вращающиеся охлаждаемые водой валки) позволяет получать стекла с повышенным содержанием оксида иттрия (до 23 мол.%  $Y_2O_3$  вместо 17 мол.% в зарубежных микрошариках [1-3]), полностью подавить кристаллизационные процессы и избежать загрязнения стекла кристаллическими частицами.

Совместно с ООО «Бибиг» проведены токсикологические, радиологические и клинические испытания микрошариков, получено регистрационное удостоверение ФСР 2011/11568, согласно которому разработанные микрошарики разрешены к производству, продаже и применению в России. В целях исключения возможности попадания радионуклида из микросфер YAS стекла с высоким содержанием  $Y_2O_3$  в ткани проведены эксперименты по модифицированию поверхности с целью обеднения поверхностного слоя по иттрию путем травления микросфер в растворе HCl. Результаты конфокальной КР-спектроскопии свидетельствуют о том, что глубина модифицирования стекла после 30 дней травления в HCl составляет 25 мкм, и, следовательно, этот параметр можно варьировать в широких пределах. Изучение выщелачивания в 1% растворе NaCl при 37°C показало, что микрошарики с модифицированной поверхностью характеризуются нулевым выходом иттрия в раствор при любой длительности испытаний.

## Литература

1. Day D.E. et al. Nucl. Med. Biol. 987. №14.233-242.
2. Day D.E. et al. Microspheres for radiation therapy: U.S. Patent 5,302,369.
3. Day D.E. et al. Int. J. Appl. Glass Science. 2010. №1. 104-117.
4. Атрощенко Г.Н., Савинков В.И., Палеари А. и др. Стекло и керамика. 2012. №2. 3-7.
5. Сигаев В.Н., Голубев Н.В., Лотарев С.В., Савинков В.И., Атрощенко Г.Н., Саркисов П.Д., Синюков И.В., Левчук А.В. Микрошарики из иттрийалюмосиликатного стекла для радиотерапии и способ их получения. Патент РФ на изобретение № 2454377.
6. Sigaev V.N, Atroschenko G.N., Savinkov V.I., et al. Materials Chemistry and Physics.2012. 133 (1). 24-28.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МАЛОЩЕЛОЧНЫХ ГАЛЛИЕВОСИЛИКОГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ ЗА СЧЕТ УСЛОВИЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

*Е.С.Игнатьева<sup>1</sup>, Н.В.Голубев<sup>1</sup>, Г.Е.Малашкевич<sup>2</sup>, В.Н.Сигаев<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup> Международная лаборатория функциональных материалов на основе стекла им. П.Д. Саркисова, кафедра стекла и ситаллов РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия; <sup>2</sup> Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)

Недавно показана возможность получения широкополосной люминесценции в ближней ИК-области на примере малощелочных галлиевосиликогерманатных стекол за счет выделения в них нанокристаллов  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, допированных ионами Ni<sup>2+</sup>, но квантовый выход люминесценции полученного стеклокристаллического материала не превышал 10% [1, 2]. Увеличение эффективности люминесценции возможно при выделении в указанных стеклах фазы LiGa<sub>5</sub>O<sub>8</sub>:Ni, обладающей ~100% квантовым выходом при комнатной температуре [3]. Исследование процессов фазового разделения этих стекол выявило, что потеря прозрачности образцов сопровождается кристаллизацией фазы LiGa<sub>5</sub>O<sub>8</sub> [4], выделение которой при сохранении прозрачности образцов возможно за счет подбора условий термообработки. Действительно, стекла, термообработанные 18 ч при 600°C и затем 5 ч при 663°C, оставались прозрачными, а соотношение между интенсивностями брэгговских отражений при 36,2° и 64,2° на рентгенограмме стекла, термообработанного по этому двухступенчатому режиму, смещается в сторону картотечных данных для фазы LiGa<sub>5</sub>O<sub>8</sub> (рис. 1). При этом на спектрах люминесценции наблюдается рост ее интенсивности для образца после двухступенчатого прогрева (рис. 2), что свидетельствует о перспективности дальнейшей оптимизации режима термообработки в целях повышения эффективности люминесценции.

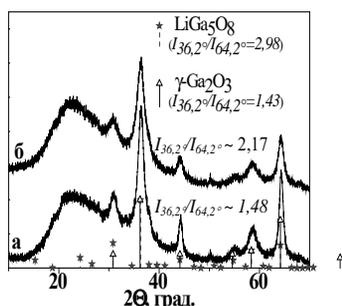


Рис. 1. Рентгенограммы порошков малощелочного галлиевосиликогерманатного стекла, термообработанного по режиму: а) 685°C-5ч, б) 600°C-18ч + 663°C-5ч и штрих-диаграммы  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ICDD PDF2 №00-020-0426) и LiGa<sub>5</sub>O<sub>8</sub> (ICDD PDF2 №01-076-0199)

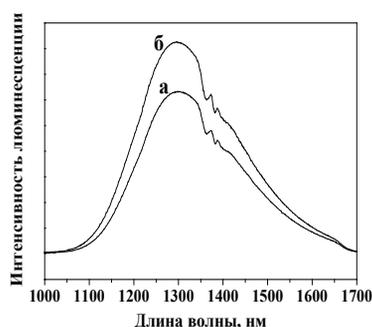


Рис. 2. Спектры люминесценции малощелочного галлиевосиликогерманатного стекла, термообработанного по режиму: а) 685°C-5ч, б) 600°C-18ч + 663°C-5ч

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (грант 11.G34.31.0027) грантов РФФИ.

#### Литература

1. Голубев Н.В., Игнатьева Е.С., Лоренци Р. И др. //Стекло и керамика. 2013. № 4. С.14-20.
2. Sigaev V.N., Golubev N.V., Ignat'eva и др. //Nanotechnology. 2012. № 23. Article number 015708 (7pp).
3. Suzuki T., Arai Y., Ohishi Y. J. //Luminescence. 2008. № 128. PP. 603-609.

## КОМПОЗИТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ Pt – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СТЕКОЛ

*А.А.Бочегов<sup>1</sup>, А.В.Ермаков<sup>1</sup>, С.В.Никифоров<sup>1</sup>, И.В.Вандышева<sup>2</sup>*

(<sup>1</sup> ЗАО “УРАЛИНТЕХ”, <sup>2</sup> ФГАОУ ВПО “УРФУ”, г. Екатеринбург, Россия)

Снижение металлоемкости изделий и уменьшение безвозвратных потерь как в процессе производства, так и при последующей эксплуатации особенно актуально, когда речь идет о металлах платиновой группы. Особенности технологии производства оптических и других специальных стекол, выращивания монокристаллов требуют использования тиглей и технологической оснастки из платины. Однако в процессе стекловарения платина существенно выгорает, что приводит к потерям драгметаллов и ряд высокотемпературных технологий не может быть реализован вследствие температурных ограничений для платины и ее сплавов. Одним из направлений в работе по повышению служебных характеристик и снижению безвозвратных потерь при высокотемпературной эксплуатации изделий из металлов платиновой группы является использование композитных материалов на основе платины.

Спектр материалов, которые могут защитить платиновую основу от коррозии в агрессивных средах при варке стекол, от высокотемпературной атмосферной коррозии и вместе с тем противостоять высокотемпературной ползучести металлов платиновой группы, достаточно узок, ограничивается рядом оксидов, силицидов, нитридов металлов –  $WSi_2$ ,  $MoSi_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $BN$ ,  $Si_3N_4$  [1]. Одна из возможных технологий для создания композита - технология плазменного напыления, позволяющая получить плотный плазменно-керамический слой, обладающий высокой адгезией к платиновой основе.

В ЗАО «УРАЛИНТЕХ» разработана и усовершенствована технология производства композитных двуслойных изделий на основе металлов платиновой группы и корундовой плазموкерамики, получен опыт успешной промышленной эксплуатации композитных изделий в условиях ОАО «ЛЗОС» при выработке стекол типа С48-3. Для обеспечения химической стойкости металлическая основа тигля АЦО 0622-8359СБ была выполнена из технической чистой платины толщиной  $(0,7 \pm 0,05)$  мм, механическую прочность обеспечивал внешний слой корундовой плазмокерамики толщиной 5 мм. После окончания кампании, в ходе которой тигель не потерял герметичности, были проведены исследования структуры платины вблизи переходного слоя  $Pt - Al_2O_3$ . Они показали, что после высокотемпературной эксплуатации: наработка составила 1320 часов, в том числе 1100 часов при температуре  $1520^\circ C$  и разряжении до 0,05 атм., к тому же тигель четырежды был подвергнут перефутеровке, отсутствует хрупкое разрушение платины, не обнаруживаются признаки межкристаллитной коррозии, границы зерен, как правило, ориентированы вдоль выделенных кристаллографических направлений, присутствует субструктура со средним размером субзерна 900 нм. Такие изделия допускают использование в условиях индукционного и резистивного нагрева.

Использование композита позволяет в 4-6 раз снизить его металлоемкость по сравнению с цельнометаллическим изделием такого же объема. Экономия драгметалла достигается за счет подавления процесса возгонки металла с наружной стороны тигля. Выбор оксида для создания наружной жаропрочной конструкции основывается на анализе физико-механических свойств пары металл – керамика, прежде всего, важен коэффициент термического расширения. Для  $Pt$  наиболее удачным компаньоном является  $Al_2O_3$ .

Таким образом, корундовый плазмокерамический каркас не только позволяет значительно снизить потребление металлов платиновой группы, увеличить жаропрочность изделий, но и приводит к снижению темпов межкристаллитной коррозии металла.

#### Литература

1. Исследование поведения многокомпонентных покрытий в агрессивных средах в процессе варки оптических стекол / А.В. Сагалович, В.А. Бабенко, С.Ф. Дудник и др. // ФИП PSE, 2006.– Т.4, № 1-2.– С. 110-116.

# НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ГАЛЛИЕВОГЕРМАНОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ С АКТИВАЦИЕЙ СИНЕЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

*С.В.Лотарев, А.С.Липатьев, Н.В.Голубев, Е.С.Игнатьева, А.Палеари, В.Н.Сигаев* (Международная лаборатория функциональных материалов на основе стекла им. П.Д. Саркисова, кафедра стекла и ситаллов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Прозрачные стеклокристаллические материалы благодаря совмещению свойств кристаллической и аморфной фаз открывают принципиально новые возможности применения по сравнению с однородным стеклом. Основным методом получения стеклокристаллических материалов является термообработка исходных стекол при температурах выше температуры начала стеклования. Однако в последние годы все большее количество исследований направлено на разработку методики локального модифицирования структуры стекол при помощи лазерного излучения. Недавно была показана возможность наноструктурирования галлиевогерманосиликатного стекла, легированного оксидом никеля, с помощью лазера на парах меди. В результате облучения в стекле формировались наноструктурированные каналы, в которых за счет выделения шпинелеподобной фазы  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$  и встраивания в ее решетку ионов  $\text{Ni}^{2+}$  возникала широкополосная ИК люминесценция с наибольшей интенсивностью в области 1300-1450 нм [1]. Нанокристаллизация сопровождалась ростом показателя преломления, обеспечивавшим возможность волноводного эффекта. Установлено также, что коллоидные нанокристаллы  $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$  обладают люминесценцией в синей области спектра при УФ возбуждении [2].

В настоящей работе впервые предпринята попытка локального формирования нанокристаллов оксида галлия лазерным излучением в оксидном стекле без использования легирующих добавок и получения в них аналогичного эффекта люминесценции в синей области видимого диапазона. Объектом исследования послужило стекло состава  $7,5\text{Li}_2\text{O}-2,5\text{Na}_2\text{O}-20\text{Ga}_2\text{O}_3-45\text{GeO}_2-25\text{SiO}_2$ . Выбор состава обусловлен пониженной температурой варки по сравнению с аналогичными силикатными стеклами и пониженной кристаллизационной способностью, что позволяет получать для этого состава высокооднородные стекла оптического качества. Варка стекла производилась в платиновом тигле при температуре  $1480^\circ\text{C}$  с бурлением расплава кислородом в течение 1 ч. Полученное стекло было бесцветным и не поглощало излучение видимого диапазона. Для облучения образцов применялся импульсный лазер на парах меди с нелинейным преобразователем частоты на кристалле  $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$ , излучающий суммарную частоту зеленой и желтой линий лазера на длине волны 271 нм со средней мощностью 250 мВт, длительностью импульса 15 нс и максимальной частотой следования импульсов до 12,5 кГц. Для предотвращения растрескивания при облучении и облегчения кристаллизации образцы помещались в миниатюрную электрическую печь с крышкой из кварцевого стекла и предварительно нагревались до  $540\text{-}555^\circ\text{C}$ . Печь с образцом помещалась на моторизованный трансляционный

столик с компьютерным управлением. При облучении сфокусированным пучком на поверхности образцов образовывались каналы с визуальным различием изменением показателя преломления. При освещении образца ксеноновой лампой на длине волны 254 нм, выделенной с помощью монохроматора, эти полосы светятся синим цветом.

Спектры люминесценции исходного и облученного стекла измерялись на спектрофлуориметре производства SOLAR на базе монохроматора MS3405i. при возбуждении на той же длине волны 254 нм (рис. 1). Для увеличения сигнала люминесценции был подготовлен образец, на котором последовательным сканированием была облучена площадка с размерами около 4x12 мм, которая при измерении спектра люминесценции перекрывала практически весь возбуждающий пучок (рис. 1, врезка). Спектр люминесценции облученного стекла показал наличие широкополосной люминесценции с максимумом около 460 нм и шириной на полувысоте ~150 нм. Это хорошо согласуется со спектрами фотолюминесценции, полученными для коллоидных нанокристаллов  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [2]. Чтобы подтвердить связь люминесценции в облученных участках с выпадением нанокристаллов оксида галлия, для тех же образцов, на которых измерялись спектры люминесценции, был выполнен рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser. Рентгенофазовый анализ образцов (рис. 2) демонстрирует присутствие фазы  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в облученном стекле (карточка №00-020-0426 базы данных JCPDS) и тем самым подтверждает связь люминесценции в облученных участках с выпадением нанокристаллов оксида галлия.

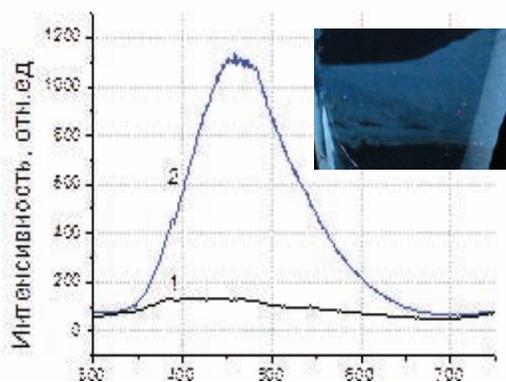


Рис. 1. Спектры люминесценции исходного стекла (1) и облученного лазером участка (2) при возбуждении на длине волны 254 нм; микрофотография участка, для которого получен спектр (2), в УФ свете

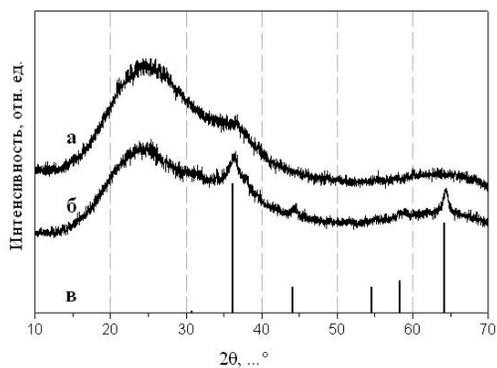


Рис. 2. Рентгенограммы исходного стекла (а), стекла с облученным участком (б) и порошковая штрих-рентгенограмма кристалла  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (карточка №00-020-0426 базы данных JCPDS)

Обращает на себя внимание присутствие сравнительно слабой люминесценции и в исходном стекле до облучения. В свою очередь рентгенограмма исходного стекла содержит слабый широкий пик, по-видимому, связанный с присутствием зародышей кристаллов  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, возникших уже в ходе выработки стекла, что подтверждается литературными данными [3]. При любых скоростях перемещения

лазерного пучка ширина люминесцирующей полосы заметно превышает диаметр перетяжки лазерного пучка, и значит, изменение структуры стекла определяется не непосредственным воздействием УФ пучка, а разогревом за счет поглощенной энергии УФ излучения. Глубина люминесцирующей области при сканировании лазерным пучком со скоростью 100 мкм/с по данным микроскопии оценивается в 70 мкм. Это связано с быстрым убыванием интенсивности пучка при прохождении через поглощающий образец.

Таким образом, использование суммарной частоты лазера на парах меди (271 нм) позволяет осуществлять локальную нанокристаллизацию галлиевогерманосиликатных стекол, не обладающих поглощением в видимой области спектра. Полученные наноструктуры обладают широкополосной люминесценцией в синей области спектра при возбуждении на 254 нм и представляют интерес для разработки устройств визуализации и детектирования УФ излучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант №11.G34.31.0027) и РФФИ (гранты №12-03-31490 и 13-03-01018).

#### Литература

1. Lotarev S.V. et al. // Optics Letters. – 2013. – V.38, №. 4. – P. 492-494.
2. Wang T. et al. // J. Amer. Chem. Soc. – 2010. – V. 132. – P.9250-9252.
3. Sigaev V.N. et al. // Nanotechnology – 2012. – V. 23. – P.015708.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАРЦСОДЕРЖАЩИХ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ В СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Д.В.Гербер, Л.Д.Коновалова, Н.Ю.Михайленко, В.Н.Сигаев* (Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева, г. Москва, Россия)

В настоящее время в стекольной промышленности наметилась тенденция использования нетрадиционных сырьевых материалов – местных песков, горных пород, доменных шлаков, отходов обогащения руд. Эта тенденция характерна для производства крупнотоннажных видов стекол и в первую очередь обусловлена стремлением производителей снизить себестоимость выпускаемой продукции. Определенную роль играет и необходимость решения экологических проблем регионов путем утилизации отходов промышленного производства.

В данной работе использовался природный минерал порцеланит, относящийся к группе осадочных и вулканогенно-осадочных пород, состоящих более чем на 50% из обводненного или свободного кремнезёма в той или иной степени закристаллизованности [1].

Порцеланит – комплексное природное сырьё, содержащее оксиды кремния, кальция, магния, фосфора. Типичный химический состав порцеланита приведен в табл. 1. Присутствие в его составе оксида железа в количестве до ~ 0,5% ограничивает область применения этого материала в стекольной промышленности.

Таблица 1

## Химический состав порцеланита, масс. %

	ППП 950°C	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO
Порцеланит	5,96	0,79	0,78	1,03	79,70	0,12	8,15	0,06	<0,01	0,51	0,36	<0,01	0,03

Оптимальной областью применения данного сырьевого материала, исходя из его состава, является производство окрашенного тарного стекла, типовой состав которого (табл. 2) в данной работе по ГОСТ Р 52022–2003 [2] взят в качестве базового.

Таблица 2

## Химический состав стекла, применяемый в стеклотарной промышленности (масс. %)

Компонент Состав	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
«ЗТ-1» зеленое по ГОСТ Р 52022–2003	71,0	3,5	11 (сумма)		14 (сумма)		0,3	-	0,2

Синтез стекол проводили при различных температурно-временных условиях в лабораторной электрической печи с карбидокремниевыми нагревателями и автоматическим регулированием температуры в корундовых тиглях объемом 100 мл при максимальной температуре варки 1450°C.

Физико-химические свойства стекол измеряли по стандартным методикам на образцах удовлетворительного качества (рис. 1, 2, табл. 3).

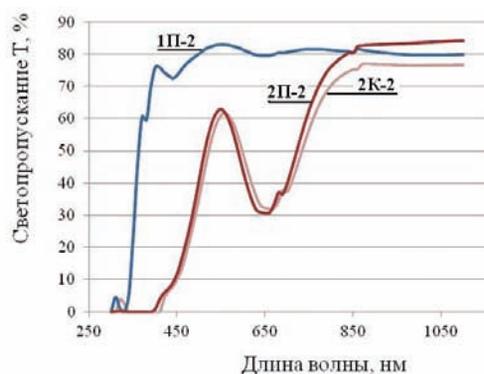


Рис. 1. Сопоставление дилатометрических кривых синтезированных стекол на основе порцеланита и кварцевого песка

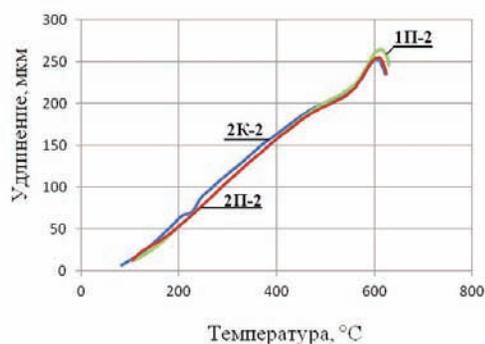


Рис. 2. Спектры пропускания стекол на основе порцеланита и на основе кварцевого песка

Образцы 1П-2 и 2П-2 - составы стекол на основе порцеланита с красителем и без него соответственно. 2К-2 - на основе кварцевого стекла с красителем

Экспериментальные значения свойств стекол на основе  
порцеланита и кварцевого песка

Стекло	ТКЛР $\alpha \cdot 10^7 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (20 – 300 $^\circ\text{C}$ )	Водостойкость, мл/г	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
на порцеланите	94,6	2,24 (3 г.класс)	2510
на кварцевом песке	90,2	2,80 (3 г.класс)	2530

Из приведенных выше данных следует вывод о возможности применения порцеланита в стеклоделии в качестве кремнезем- и кальцийсодержащего сырья. Полученный на основе этого нетрадиционного сырьевого материала стекольный расплав не подвержен вспениванию, кристаллизации, образованию пороков и при соответствующих температурно-временных условиях варки образует качественную стекломассу, допускающую формование методами стекольной технологии. Уровень физико-химических свойств стекол на основе порцеланита (ТКЛР, температура размягчения по Литлтону, химическая стойкость, плотность) соответствует уровню основных эксплуатационных свойств тарного стекла.

#### Литература

1. ГОСТ Р 52022–2003 «Тара стеклянная для пищевой и парфюмерно-косметической продукции. Марки стекла».
2. Дистанова У.Г. //»Кремнистые породы СССР», Каз., 1976 .– 236 с.
3. Аппен А.А. //Химия стекла.– Л: Химия, 1984. – 200 с.
4. Алехин Ю.А. Зарубежный опыт использования вторичных материальных ресурсов в строительной индустрии // Обзорная информация.–М.: ЦНИИТЭИМС, 1988.- Вып. 2.– 48 с.

## Секция 5. УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

### КЛАСТЕРНАЯ ПОЛИТИКА КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В РЕГИОНЕ

*А.А.Сотников, И.И.Новикова*

(ОАО “Агентство инновационного развития – центр кластерного развития Калужской области”, г. Обнинск, Россия)

Опыт экономически развитых и конкурентоспособных стран мира показывает, что одним из наиболее действенных механизмов, способствующих повышению устойчивости территорий, является реализация кластерной политики.

Калужская область в 2009 году приняла стратегию социально-экономического развития до 2030 года, в которой кластерный подход принят в качестве основной модели развития региона.

Успех кластерной политики Калужской области определяет чёткая и понятная инвестиционная философия, набор принципов, транслируемых по всей вертикали власти. Регион предлагает инвесторам уникальные условия размещения в индустриальных парках, обеспечивающих всю необходимую инфраструктуру, максимально упрощает процедуры согласования, гарантирует инвесторам юридические права и практически полностью освобождает их от инфраструктурных рисков. Сегодня восемь индустриальных парков предлагают условия, опережающие потребности инвестора. Для компаний, которым экономически рискованно вкладываться в строительство в России, регион предоставляет возможность арендовать площади в уже построенных В-парках или выбрать готовое помещение в существующих браунфилдах со всеми коммуникациями. Система институтов развития – ОАО «Корпорация развития Калужской области», ОАО «Агентство инновационного развития – центр кластерного развития Калужской области», ГАУ КО «Агентство регионального развития Калужской области», оказывает всестороннюю поддержку инвесторам на всех этапах реализации инвестиционных и инновационных проектов в регионе.

Эта система и выделение приоритетов развития региона позволили создать уникальные для Российской Федерации возможности по скорости реализации инвестиционных проектов и привлечь в регион крупнейших мировых производителей, ставших флагманами развития экономики региона, вокруг которых формируются территориальные кластеры. Крупные производители сегодня притягивают все больше средних и малых глобальных и локальных компаний, формируя с ними эффективные технологические цепочки.

На сегодняшний день в Калужской области реально сформированы четыре кластера: автомобильный, логистический, фармацевтический и информационно-коммуникационных технологий. Идет формирование кластера энергоэффективных и энергосберегающих технологий, изучаются возможности и есть группа инициаторов по созданию кластера неметаллических материалов.

Модельным для нас является опыт Калужской области в создании фармацевтического кластера, вошедшего по итогам конкурса, проведенного

Министерством экономического развития РФ в 2012 году, в число 14 пилотных территориальных инновационных кластеров.

Достоинством региона по оценке экспертов стало то, что проект Калужского фармацевтического кластера включает хорошо сбалансированные основные компоненты: промышленное производство готовых лекарственных форм, исследования и разработки оригинальных фармсредств и «активных молекул», обучение и подготовку специалистов для фармацевтической промышленности, а также имеет уже формализованную организацию управления кластером. Ядром кластера стали крупнейшие мировые производители лекарственных средств – группа компаний STADA CIS, «Берлин-Хеми/Менарини» (Италия), «Ново Нордиск» (Дания), AstraZeneca (Великобритания), которые входят в топ-50 фирм-производителей готовых лекарственных средств по объему продаж на коммерческом рынке, а также российские компании «НИАРМЕДИК» и «Сфера-фарм».

В состав фармкластера входят более 20 малых и средних инновационных профильных предприятий, общий объем произведенной продукции которых в 2012 году составил более 1,5 млрд. рублей. На сегодняшний день на предприятиях кластера выпускают более 50 наименований лекарственных средств почти на 5 млрд. рублей, 10 находится в стадии регистрации. Доля товаров и услуг кластера (оценочно на 2012 год) на российском рынке – 2,8% (по ряду позиций от 10% до 50%). К 2016 году объем совокупной выручки предприятий-участников кластера от продажи на внутреннем и внешнем рынке достигнет 49 млрд. рублей, а доля товаров и услуг кластера на российском рынке фармацевтики, биомедицины и биотехнологий составит не менее 5%, а к 2020 году эта доля достигнет 10% при объеме продаж более 140 млрд рублей.

Кластер эффективно использует большой научный потенциал региона, прежде всего г.Обнинска - первого наукограда России. В регионе функционирует 33 научно-исследовательских института, в том числе – ведущий в России Медицинский радиологический научный центр Министерства здравоохранения Российской Федерации. Поэтому одним из основных направлений деятельности кластера является разработка и внедрение фармацевтических субстанций, а также проведение доклинических и клинических исследований. Специалисты кластера занимаются разработкой, синтезом и внедрением в производство инновационных фармацевтических субстанций, производством пилотных партий новых формуляций, разрабатывают аналитические методы контроля качества и идентичности, формируют досье на лекарственные средства. Отличительной особенностью кластера является его высокая инновационная активность, доля инновационных компаний среди резидентов кластера составляет более 70%.

Создание сбалансированной модели развития кластера стало возможным благодаря активному взаимодействию участников Калужского фармацевтического кластера с органами государственного управления, реализации целостной инвестиционной политики, механизмам частно-государственного партнерства, которое реализуется через Координационный совет при Губернаторе Калужской области по развитию фармацевтического кластера, и некоммерческое партнерство «Калужский фармацевтический кластер», которое осуществляет разработку и координацию совместных проектов и инициатив участников кластера, оказывает информационную, маркетинговую и другую необходимую поддержку участникам кластера, способствует расширению возможностей научного, производственного и социального развития членов партнерства.

Именно модель фармацевтического кластера может стать основой для формирования кластера неметаллических материалов: у нас в регионе есть мощное якорное предприятие и центр притяжения участников кластера – ОАО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», определяющее высокий научно-технический и инновационный потенциал этой отрасли, есть более 20 работающих в этой сфере малых и средних компаний и, главное, есть реальный интерес к созданию такого кластера.

Эффективность создания кластера определяется тремя ключевыми аспектами:

- резким ростом потенциала лоббирования интересов участников кластера в региональных и федеральных органах власти;

- объединением усилий с органами власти и образовательными структурами в решении вопросов подготовки высококвалифицированных профессиональных кадров;

- реализацией совместных исследовательских, инфраструктурных и других проектов участников кластера, несущих им позитивный синергетический эффект и имеющих сегодня высокий приоритет при реализации федеральных целевых и государственных программ.

Развёртывание в Калужской области сети кластеров, мы надеемся, позволит приблизить фундаментальную и прикладную науку региона к промышленности, быстрее превращать научные результаты в экономически выгодные рыночные продукты.

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФГУП «НИФХИ ИМ. Л.Я. КАРПОВА» И ЛАБОРАТОРИИ ООО «СИСТЕМЫ ДЛЯ МИКРОСКОПИИ И АНАЛИЗА» – СОТРУДНИЧЕСТВО ВО ИМЯ ПРОГРЕССА РОССИЙСКИХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И ОБРАЗОВАНИЯ**

*А.С.Смолянский<sup>1</sup>, С.Н.Хаханов<sup>2</sup>, В.Я.Шкловер<sup>2</sup>, Л.Ю.Ляшко<sup>3</sup>, С.Г.Лакеев<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup>ФГУП «НИФХИ им. Л.Я.Карпова», Москва, Россия; <sup>2</sup>ООО «СМА», Москва, Россия; <sup>3</sup>НП «Обнинский полис», г. Обнинск, Россия)

Произошедшие в конце XX века смена модели экономического развития России наряду со «второй информационной революцией» [1], успехами и достижениями в развитии нанотехнологий вызывают необходимость создания и развития новых форм существования науки в стране, а также образовательных технологий отбора и привлечения обучаемых к занятиям научной деятельностью в области естественных наук. Кризисное состояние современной российской и мировой науки вызывает необходимость ускорения различных процессов, определяющих эволюцию научного сообщества в целях его приспособления к изменившимся внешним условиям.

Создание и успешное функционирование в период с 1985 года до настоящего времени образовательной технологии «Юность. Наука. Культура», нацеленной на отбор и привлечение лучших представителей молодёжи России и стран СНГ к занятиям научной деятельностью, находится в русле отмеченных выше тенденций развития науки на рубеже веков. Одним из наиболее успешных проектов технологии

«Юность. Наука. Культура» является взаимодействие с одним из ведущих научных центров страны в области физической химии и нанотехнологий – Федеральным государственным унитарным предприятием «ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательским физико-химическим институтом имени Л.Я. Карпова» (ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»), которое особенно интенсивно начало развиваться после 2005 года. За прошедшие годы в рамках различных Федеральных целевых программ было реализовано более 15 государственных контрактов, а также проектов РФФИ и РГНФ [2]. Результаты выполненных работ позволяют обосновать и практически доказывают необходимость «раннего старта» обучаемых в науке посредством привлечения к участию в выполнении НИОКР, проводимых учёными НИИ (в частности, ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»).

В результате многолетних усилий основателей образовательной технологии «Юность. Наука. Культура», педагогов страны, сотрудников НИИ удалось создать эффективно функционирующую систему дополнительного образования обучаемых России: например, в течение 2012 – 2013 учебного года в рамках программы «Научно-творческий потенциал России» было проведено более 50 различных мероприятий (конкурсы, викторины, конференции и проч.), в которых приняло участие свыше 120 тысяч обучаемых из всех регионов страны в возрасте от 7 до 17 лет.

Таким образом, необходимость обучения элементам исследовательской деятельности уже на стадии учёбы в средней школе в настоящее время не вызывает сомнений, что было подтверждено в последней редакции закона об образовании.

Однако возникает проблема повышения качества учебно-исследовательских работ (УИР), выполняемых в средней и высшей школе. Опыт проведения всероссийских конференций «Научный потенциал – XXI» показывает огромную разницу в уровне УИР, выполняемых обучаемыми Москвы, Санкт-Петербурга, по сравнению с УИР, выполняемыми обучаемыми из других регионов страны в области естественных наук. Очевидно, потеря конкурентного характера отбора молодых талантов приводит к потере интереса к занятиям научной деятельностью у обучаемых с периферии и в итоге – к потере перспективных научных кадров, способных в ближайшее время влиться в коллективы НИИ и начать научную деятельность.

Особенно тяжёлая ситуация складывается в регионах, где обучаемые практически не имеют возможности доступа к современным средствам измерения, не могут постоянно контактировать по теме УИР с учёными и специалистами, проводящими НИОКР по аналогичной тематике. Назревает необходимость качественного скачка в методологическом и научно-техническом обеспечении УИР.

Рост уровня УИР, выполняющихся в области физической химии и нанотехнологий, может быть обеспечен за счёт применения современных методов исследования, а именно, растровой (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), рентгеновского энергодисперсионного анализа (РЭА) и т.д. Указанные средства измерений, как правило, сосредоточены в составе Центров коллективного пользования (ЦКП), действующих в составе ведущих НИИ в стране. К сожалению,

в настоящее время не разработаны механизмы взаимодействия обучаемых с ЦКП, среди педагогов страны не распространяется информация о возможностях контактов с ЦКП, стоимости выполнения измерений с использованием оборудования ЦКП.



Рис. 1. Участники Всероссийской конференции «Научный потенциал – XXI» слушают лекцию специалистов лаборатории применения аналитического оборудования компании ООО «СМА» во время посещения 19 апреля 2013 года

Формирующееся в настоящее время взаимодействие между ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» и лабораторией применения аналитического оборудования компании ООО «Системы для микроскопии и анализа» (ООО «СМА») является уникальным примером эффективного сотрудничества, реально способствующего выполнению НИР аспирантов и молодых учёных Карповского института на современном оборудовании, не имеющем аналогов в стране. Лаборатория применения аналитического оборудования компании ООО «СМА» проводит исследования по следующим направлениям:

- нанопрототипирование;
- создание и реконструкция 3D-объектов;
- приготовление образцов;
- исследование морфологии в РЭМ;
- количественное определение элементного состава, получение карт распределения элементов на заданном участке образца (chemical mapping);
- исследование структуры и морфологии объектов в ПЭМ;
- анализ и обработка изображений, полученных с помощью ПЭМ;
- исследование образцов в оптическом диапазоне;
- статистическая обработка массивов частиц;
- анализ поверхности и тонких плёнок;
- структурный анализ.

#### **Список и возможности оборудования ООО «СМА»:**

##### **1. Сканирующий просвечивающий электронный микроскоп FEI Tecnai™ G2 F20 + GIF:**

- S/ТЕМ: структурные исследования с пространственным разрешением 0,14-0,19 нм; кристаллографический/фазовый микро-/нано-анализ методами

электронной дифракции;

- STEM+EDX: картирование / профилирование элементного состава с разрешением  $< 1$  нм;

- EFTEM, EELS: анализ химсостава с субнанометровым разрешением; получение общих и эластичных светлопольных / темнопольных изображений + низкие дозы (элементно- и структурно-чувствительный контраст).

2. Двухлучевая аналитическая система FEI Helios 650 Nanolab для растровой электронно-ионной микроскопии:

- РЭМ: Микроскопия поверхности с разрешением менее 0,7 нм;

- EDS: Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ, картирование поверхности по элементному составу;

- ФИП: Ионная микроскопия ( $< 4$  нм). Локальное напыление (ФИП+ГИС) и травление материалов, резка поверхности с нанометровой точностью. Объемная микроскопия. Нанопрототипирование. Реконструкция 3D-объектов.

3. Двухлучевая аналитическая система FEI Quanta 3D FEG для растровой электронно-ионной микроскопии:

- РЭМ: Высокий вакуум - микроскопия поверхности с разрешением менее 1,2 нм. Низкий вакуум – диэлектрики без пробоподготовки. Естественная среда – влажные, газящие, биологические объекты в нативном состоянии, динамические эксперименты in situ (замораживание/оттаивание, растворение/кристаллизация, капиллярные процессы, абсорбция жидкостей и пр.).

- EDS: Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ, картирование поверхности по элементному составу.

- ФИП: Ионная микроскопия ( $< 7$  нм). Локальное напыление (ФИП + ГИС) и травление материалов, резка поверхности с нанометровой точностью. Объемная микроскопия. Нанопрототипирование. Реконструкция 3D-объектов.

- ФИП + Микроманипулятор: Изготовление образцов для ПЭМ.

4. Рентгеновский микроскоп / микротомограф Xradia VersaXRM-500:

- Неразрушающий метод исследования объемной микроструктуры (с разрешением до  $< 0,7$  мкм);

- Широкий спектр применений: материаловедение, биомедицинские исследования, геология, микроэлектроника;

- Постановка динамических in situ экспериментов.

5. Сканирующий микрозонд для фотоэлектронной спектроскопии PHI VersaProbe II:

- Исследование любых вакуум-совместимых образцов;

- Качественный и количественный химический анализ поверхностных слоев ( $< 10$  нм), картирование поверхности с пространственным разрешением  $> 10$  мкм;

- Профилирование элементного состава по глубине с разрешением  $< 10$  нм с послойным травлением ионами аргона.

6. Рентгенофлуоресцентный спектрометр EDAX Orbis Micro-XRF Analyser:

- Неразрушающий экспрессный метод определения элементного состава от Na до U;

- Пространственное разрешение от 100 мкм;

- Анализ на воздухе или в вакууме;

- Любые образцы, включая жидкости;

- Отсутствие пробоподготовки.

7. Анализатор концентрации, формы и размера частиц Ambivalue EyeTech:

- Комбинированный видео и лазерный канал, одновременное получение данных о концентрации, размерах и форме частиц;

- Модульный дизайн для анализа частиц в жидкой среде, эмульсиях, сухих порошках, волокнах, магнитных частицах, горячих жидкостях и аэрозолях.

8. Универсальный световой исследовательский микроскоп Leica DM LB2 с системой цифровой съёмки и специализированным метрологическим программным обеспечением для обработки изображений ImageScore-M:

- Световая микроскопия в прошедшем/отраженном свете, светлое/темное поле, фазовый контраст, люминесценция;

- ImageScore M: Ввод, сохранение, шивка, обработка и анализ растровых изображений; автоматические и ручные измерения, анализ объектов по 40 расчетным признакам; накопление, статистическая обработка результатов измерений; свидетельство об аттестации на соответствие метрологическим требованиям.

9. Настольный растровый электронный микроскоп FEI Phenom.

Важным достоинством следует считать наличие в составе лаборатории применения аналитического оборудования компании ООО «СМА» высококвалифицированных специалистов в области методов электронно-микроскопического анализа и обслуживания уникальной экспериментальной базы, постоянное поступление новых усовершенствованных средств измерения, обладающих уникальными эксплуатационными характеристиками.

В течение 2011 – 2013 г.г. молодыми сотрудниками ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» и обучаемыми из числа лауреатов мероприятий образовательной технологии «Юность. Наука. Культура» был выполнен ряд УИР, результаты которых были направлены для опубликования в редакции ведущих российских журналов из списка ВАК (Физика твёрдого тела, Физическая химия и проч.).

Таким образом, первые итоги взаимодействия между ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» и лабораторией применения аналитического оборудования компании ООО «СМА» свидетельствуют об исключительно эффективном и плодотворном характере такого сотрудничества, которое позволяет вывести на передовые рубежи исследований в области нанотехнологий обучаемых прямо со школьной скамьи, позволяет сформировать научно-технический задел и предметный интерес к научному направлению, в рамках которого выполняется УИР. В итоге появляются реальные предпосылки решения основной задачи образовательной технологии «Юность. Наука. Культура» – закрепления юных дарований в возрасте 15 – 20 лет в науке, на переднем крае исследований в области физической химии и нанотехнологий, подготовки нового поколения научных кадров для НИИ России.

## Литература

1. Громов Г.Р. Очерки информационной технологии. - М.: ИнфоАрт, 1992. - 336 с.

2. Сорокин Ю.А., Смолянский А.С., Ляшко Л.Ю., Ляшко Т.В., Федоровская Е.О., Литвиненко Н.С., Ширяев В.К., Рыбин А.А. Отбор и подготовка к научной

деятельности обучающихся Обнинска и Калужской области в новых социально-экономических условиях России: проектирование интенсивных образовательных технологий : труды регионального конкурса научных проектов в области гуманитарных наук.– Калуга: Полиграф-Информ, 2006.– Вып. 9.

## **ОПЫТ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ КООРДИНАЦИИ ТЕМАТИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ НАУЧНЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ С ПРОБЛЕМАМИ ОСВОЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНО- И МИКРОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ**

*В.С.Медведко<sup>1</sup>, О.В.Медведко<sup>1</sup>, М.И.Фихман<sup>1</sup>, О.П.Солоненко<sup>2</sup>, В.М.Фомин<sup>2</sup>*  
(<sup>1</sup> ЗАО “НЭВЗ-Керамикс”; <sup>2</sup> ИТиПМ СО РАН, г. Новосибирск, Россия)

В ноябре 2009 г. создан Научно-Производственный Комплекс «Сибирская Керамика» в форме некоммерческого партнерства при поддержке администрации НСО. Цель – создание механизма консолидации усилий участников по разработке новых видов керамических материалов и изделий, повышение эффективности использования имеющегося технологического и научного оборудования и человеческого потенциала.

Стратегическое управление НП НПК «Сибирская керамика» осуществляет Наблюдательный совет, обеспечивая взаимодействие органов исполнительной власти, академической, вузовской науки, производства и потребителей, формирование целей и утверждение программ исследований, организационное и финансовое обеспечение, путем проведения регулярных (ежеквартальных) рабочих заседаний. Председатель наблюдательного совета – Министр правительства Новосибирской области.

Решение вопросов научно–технического сотрудничества участников обеспечивает координационный Совет НП НПК «Сибирская керамика» (КС НП НПК). Председатель НТС - зам. председателя СО РАН. Члены совета – уполномоченные и заинтересованные представители участников некоммерческого партнерства. Исполнительная дирекция стремится обеспечить ежемесячное проведение и обсуждение (мониторинг) состояния работ по проблематике создания промышленных технологий. Разработаны базовые документы, регламентирующие работу некоммерческого партнерства «Сибирская керамика». Для реализации работ по конкретным направлениям созданы две рабочие группы – технической и медицинской керамики.

Приоритетные направления кооперации участников кластера:

- **алюмооксидная керамика** (на основе матрицы  $Al_2O_3$ ), предназначенная для: изоляторов электронно-оптических преобразователей (ЭОП), изоляторов вакуумных дугогасительных камер (ВДК), керамических подложек (металлизированных и неметаллизированных);

- **ударопрочная алюмооксидная бронекерамика** различной геометрической формы, применяемая в бронеэлементах для пулевой и осколочной защиты;

- **нитридная керамика** (на основе матрицы AlN) для производства керамических подложек (металлизированных и неметаллизированных), применяемых в термоэлектрических модулях (элементах Пельтье), светодиодах, силовых полупроводниковых приборах;

- **карбидная керамика** (на основе SiC b B4C) для керамических элементов для бронезащиты личного состава и бронезащиты наземных, воздушных и морских средств военной техники;

- **циркониевая керамика** (на основе ZrO2) для производства элементов износо-, коррозионно- и химически стойкой запорной арматуры, применяемой в химической и нефтегазовой промышленности;

- различные виды **биосовместимой керамики** для эндопротезирования с целью восстановления и компенсации утраченных вследствие заболеваний функций тазобедренного сустава; имплантаты, применяемые в вертебрологии для фиксации, заместительного восстановления опороспособности при патологических изменениях позвоночника; имплантаты для стоматологии.

Под эгидой НП НПК «Сибирская керамика» регулярно проводятся международные научно-практические конференции «Керамсиб».

Исполнительные органы партнерства обеспечили разработку и принятие программы совместных работ СО РАН, ОАО ХК «НЭВЗ-СОЮЗ», Правительства НСО; разработку программы развития ИННОВАЦИОННОГО ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО КЛАСТЕРА «Современные керамические материалы и нанотехнологии» «Сибирская керамика» для участия в конкурсе, проводимом МинЭкономРазвития РФ, бизнес плана для ВЭБ Создание инжинирингового центра «Сибирская керамика» на базе территориального кластера.

Опыт координации тематики научных исследований институтов СО РАН, ВУЗов г. Новосибирска и г. Томска, организаций медицинского профиля Сибирского Федерального округа с проблемами освоения производства высокотехнологичной композитной керамики с добавлением нано- и микроразмерных материалов в рамках некоммерческого партнерства «Сибирская керамика» привел к созданию новых изделий, переданных в освоение в серийном производстве ЗАО «НЭВЗ-Керамикс»:

- бронекерамических элементов для баллистической защиты военной техники и личного состава;

- износостойких элементов запорной арматуры;

- биокерамических имплантатов различных типов для травматологии, ортопедии и стоматологии;

- подложек и корпусов на основе нитридной теплопроводящей керамики для силовой электроники и светотехники.

Партнерство «Сибирская керамика» сегодня - эффективный научно-производственный кластер по созданию инновационных продуктов из наноструктурированной керамики для высокотехнологичных отраслей.

## **КЛЮЧЕВЫЕ ВОПРОСЫ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

*О.В.Коваль* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Научно-производственные предприятия являются ключевым звеном национальной инновационной системы страны и крайне эффективно интегрируют процессы создания, коммерциализации и использования объектов интеллектуальной собственности. Деятельность таких предприятий направлена не просто на получение новых научных знаний, но и на внедрение новшеств в экономический оборот [1]. Поскольку собственные разработки внедряются на собственных производственных площадях, отсутствуют организационно-финансовые барьеры между разработчиками инновационной продукции и ее производителями.

Процесс вовлечения в экономический оборот научных и (или) научно-технических результатов и получения дохода от их использования может осуществляться различными способами.

Например, Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», являющееся Государственным научным центром Российской Федерации, процесс преобразования результатов научных исследований и разработок в инновационные продукты реализует с помощью трех основных механизмов.

Первый механизм заключается в организации участков серийного производства на собственной территории. Реализация данного механизма коммерциализации возможна, так как в организационном плане ОАО «ОНПП «Технология» представляет собой объединенные вместе научно-экспериментальную базу и производственную площадку как с опытным, так и с серийным производством. По данной схеме внедряются разработки, выполняемые для основных (профильных) рынков предприятия – авиационной, ракетно-космической и военной техники, железнодорожного транспорта. Этот механизм позволяет достаточно быстро превратить результаты проведенных предметно-ориентированных прикладных исследований и разработок в реальную, востребованную на рынке, наукоемкую продукцию.

Второй механизм основывается на передаче части научных разработок в производство комплектующих узлов и деталей на серийные заводы головных организаций – разработчиков образцов авиационной, ракетно-космической и военной техники. Такая схема актуальна для профильных разработок, реализация которых на собственных производственных площадях не возможна по техническим причинам либо не оправдана экономически.

Третий механизм заключается в коммерциализации сопутствующих результатов (не профильных), получаемых во время проведения основной научной деятельности путем передачи прав на результаты интеллектуальной деятельности сторонней фирме по лицензионному договору, либо создания совместного малого предприятия в целях внедрения в хозяйственный оборот результатов инновационного проекта.

При реализации вышеназванных направлений возникает ряд проблем

управленческого характера. Как правило, на предприятиях отсутствует прозрачная централизованная система управления инновационными разработками, не формируется экономически оправданный портфель инновационных проектов, не отлажена система мониторинга за их результатами. Кроме того, перед открытием НИОКР не оценивается объем предполагаемых доходов предприятия от внедрения данных разработок в производство, отсутствует система бизнес-планирования НИОКР, не в должной мере оцениваются возможности предприятия по привлечению собственных средств на проект в условиях софинансирования, сопутствующие разработки, как правило, не внедряются в хозяйственный оборот и не приносят прибыль, а у руководства предприятия отсутствует полная, экономически обоснованная, достоверная информация об инновационных проектах как текущих, так и планируемых к реализации.

Решить вышеперечисленные проблемы и эффективно управлять исследованиями и разработками с последующей коммерциализацией их результатов можно путем внедрения на предприятии специальной инновационной инфраструктуры (системы), обеспечивающей планирование, финансирование, контроль и другие задачи управления инновационными проектами. Такая структура должна включать в себя регламенты и процедуры, обеспечивающие четкое функционирование бизнес-процессов, связанных с инновационной деятельностью и соответствующих стратегии развития предприятия на долгосрочную перспективу [2].

Для построения данной системы необходимо последовательно реализовать несколько этапов:

1. Создать систему мониторинга инновационных разработок;
2. Организовать работу экспертов с целью анализа результатов проведенных НИОКР по заданным критериям, предусматривающую, в том числе, классификацию результатов НИОКР на «профильные» и «сопутствующие»;
3. Разработать бизнес-план и принять решение о целесообразности реализации проекта;
4. Организовать работу по каждой группе проектов: для эффективных профильных – найти источник финансирования; для эффективных сопутствующих – подобрать схему коммерциализации за пределами предприятия.

Как показывает опыт ОНПП «Технология» оценка научно-технического уровня проекта не вызывает трудностей. Сложности возникают при расчете экономических показателей эффективности проекта и разработке бизнес-плана с учетом специфики инновационной деятельности [3]. Кроме того, у большинства российских научно-производственных предприятий, как правило, отсутствует опыт взаимодействия с организациями малого и среднего бизнеса, что вызывает трудности организационного плана.

Таким образом, успех коммерциализации новшества во многом зависит от системы управления инновациями, применяющейся на предприятии, ее совершенствования и развития. Эффективное введение в состав имущества научно-производственного предприятия новых объектов интеллектуальной собственности, создаваемых в результате проведения научных исследований и разработок, существенно влияет на рост его рыночной стоимости и позволяет

поддерживать конкурентоспособность предприятия на высоком уровне. А вывод из бизнеса непрофильных активов, не связанных с основным производством, помогает существенно сократить постоянные затраты, оптимизировать структуру персонала, повысить производительность труда, рентабельность инвестиций и прибыльность.

#### Литература

1. Ромашов А.В., Баранов В.В. Научно-производственные предприятия как форма интеграции науки и производства // *Фундаментальные исследования*. 2009. № 1. С. 84-86.
2. Коваль О.В. Особенности организации управления инновационными разработками на крупном научно-производственном предприятии // *Интеграл*. 2013. № 1,2 (69-70). С. 88.
3. Веретенова М.С. Метод оценки интегрального показателя инновационной активности предприятия// *Инновации*. 2012. № 2 (160). С. 93 – 97.

## **ПРАВОВАЯ ОХРАНА ИННОВАЦИЙ КАК СЛУЖЕБНЫХ ОБЪЕКТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

*Н.И.Ершова* (ОАО “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

В обеспечении качества выпускаемой продукции доминирующую роль играют достижения предприятия, постоянное проведение НИОКР, включая патентные исследования и охрану объектов интеллектуальной собственности (ОИС). На сегодняшний день большая часть наиболее значимых ОИС создается в организациях, занимающихся научно-производственной деятельностью. Подобные ОИС в соответствии с действующим законодательством признаются служебными.

В соответствии со ст. 1370 Гражданского кодекса РФ (ГК) служебным признается изобретение, созданное работником в связи с выполнением своих трудовых обязанностей или конкретного задания работодателя. Аналогичная формулировка относится и к другим ОИС, например, к секрету производства (ст. 1470 ГК).

Одним из факторов, способствующих созданию конкурентоспособных научно-технических разработок, является стимулирование и поощрение авторов положенных в основу таких разработок охраноспособных результатов интеллектуальной деятельности. Отношения между автором и работодателем, касающиеся выплаты авторского вознаграждения, регулируются гражданско-правовым договором о выплате авторского вознаграждения, существенным условием которого является размер вознаграждения.

При получении работодателем патента на свое имя договор о выплате авторских вознаграждений заключается между ним и автором. При отчуждении работодателем исключительного права на изобретение новый патентообладатель обязан заключить договор о выплате авторского вознаграждения с автором. Вопрос о размере авторского вознаграждения за использование служебных изобретений рассматривается в законе СССР от 31 мая 1991 года № 2213-1 «Об изобретениях в СССР».

В соответствии со ст. 1358 ГК изобретение признается использованным в продукте или способе, если продукт содержит, а в способе использован каждый признак изобретения, приведенный в независимом пункте формулы изобретения, либо признак, эквивалентный ему. Самым узким местом расчетов является выбор методики по определению доли себестоимости продукции, приходящейся на изобретение, ввиду отсутствия нормативного регулирования данного вопроса.

При принятии работодателем решения о сохранении информации об изобретении в тайне авторское вознаграждение также будет выплачиваться за использование соответствующего технического решения. В этом случае оно должно быть признано служебным секретом производства (ноу-хау) (ст. 1470 ГК). В законе СССР «Об изобретениях в СССР» содержится также положение о поощрительном вознаграждении, выплачиваемом автору изобретения, патент на которое выдан предприятию.

Анализ законодательства позволяет выделить три группы вопросов, по которым организации целесообразно разработать локальные акты: последовательность и документационное обеспечение действий работника и работодателя при создании служебного объекта интеллектуальной собственности; порядок выплаты вознаграждения за создание и использование служебных объектов интеллектуальной собственности; перечень сведений и режим охраны нераскрытой информации (коммерческой тайны) организации.

В ОНПП «Технология» действует локальная нормативная база - стандарт предприятия «Порядок составления и подачи заявки на выдачу патента на служебное изобретение и выплаты вознаграждения». Что касается ОИС, охраняемых в режиме коммерческой тайны, разработано Положение об охране созданных в ОАО «ОНПП «Технология» результатов научно-технической деятельности в форме ноу-хау, которое регламентирует, в том числе, порядок и размер выплаты единовременного вознаграждения за создание ноу-хау.

## **ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОПРОСОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПРАВ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ПРИ ФИНАНСИРОВАНИИ ИЗ ФЕДЕРАЛЬНОГО БЮДЖЕТА**

*И.А.Дудов* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

В свете провозглашённого Президентом и Правительством России стратегического курса на модернизацию и построение инновационной экономики особое значение приобретает создание эффективной системы правового регулирования отношений, связанных с созданием и использованием объектов интеллектуальной собственности (далее – ОИС), а также распоряжением правами на них. В первую очередь речь идёт об объектах патентного права.

Важнейшим из объектов патентного права является изобретение, представляющее собой наиболее сложное техническое решение, отвечающее критериям абсолютной мировой новизны и изобретательского уровня и способное обладать высоким инновационным потенциалом.

Согласно данным Роспатента наиболее значимые изобретения в современной России создаются в рамках государственных контрактов на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (далее – НИОКР и ТР), финансируемых за счёт средств федерального бюджета [1]. Именно такие изобретения выступают и в перспективе будут выступать главной технологической основой модернизации экономики России, чрезвычайно необходимой сегодня для обеспечения наиболее полной реализации потенциала развития страны и форсированного преодоления её технологического отставания.

Сегодня нормативно-правовая база в данной сфере включает такие основные нормативно-правовые акты, как Гражданский кодекс Российской Федерации (ГК РФ), постановление Правительства Российской Федерации «О некоторых вопросах регулирования закрепления прав на результаты научно-технической деятельности» от 22.04.2009 № 342, постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил осуществления государственными заказчиками управления правами Российской Федерации на результаты интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения» от 22.03.2012 № 233.

Основополагающие нормы содержатся в ст.1373 ГК РФ, предусматривающей три возможных варианта распределения прав: исполнителю, совместно исполнителю и публично-правовому образованию (Российской Федерации, субъекту федерации, муниципальному образованию) либо исключительно публично-правовому образованию.

Данное правило само по себе носит диспозитивный характер. Однако следует учитывать, что законодательство предусматривает перечень случаев, когда права на изобретения в обязательном порядке закрепляются за государством либо совместно за государством и исполнителем (п.1 постановления Правительства Российской Федерации «О некоторых вопросах регулирования закрепления прав на результаты научно-технической деятельности»). Кроме того, следует отметить, что существующий порядок заключения государственных контрактов ставит исполнителя в заведомо неравное положение в аспекте согласования условий контракта, в том числе и условий о правах на создаваемые ОИС.

Для зарубежных развитых стран характерна практика закрепления прав на создаваемые за счёт средств государственного бюджета ОИС за разработчиками. В США в 1980 году был принят так называемый Закон Бэя-Доула (Bayh-Dole Act), предоставивший организациям-разработчикам права на ОИС, созданные ими за счёт бюджетных средств, при условии обязанности таких организаций содействовать процессу коммерциализации разработок путём предоставления лицензии на использование ОИС заинтересованным коммерческим предприятиям. Указанный закон успешно достиг своей цели.

Отечественные государственные заказчики склонны предусматривать в государственных контрактах условие о принадлежности прав Российской Федерации, даже если законодательство допускает оформление совместного правообладания с исполнителем.

Следует отметить также отсутствие легальной возможности закрепления прав за соисполнителями, привлекаемыми головными исполнителями для осуществления части работ по государственным контрактам. Представляется

целесообразным внести в ст.1373 ГК РФ соответствующую поправку, «уравнивающую в правах» головных исполнителей и соисполнителей.

В конце 2012 года Минобрнауки России предложило осуществить поэтапную замену системы государственных контрактов на выполнение НИОКР и ТР системой грантов.

Легальное определение гранта содержится в Федеральном законе «О науке и государственной научно-технической политике» от 23.09.1996 № 127-ФЗ. Правовое регулирование грантов на сегодняшний день носит весьма фрагментарный характер. Нет ясности относительно договорной конструкции, опосредующей предоставление гранта.

Использование гранта в качестве инструмента финансирования НИОКР и ТР в целом открывает для грантополучателей более широкие возможности по закреплению исключительных прав на создаваемые изобретения за собой. Если в договоре о предоставлении гранта вообще не содержатся условия о распределении прав, то грантополучатель вправе оформлять их на своё имя.

Как свидетельствует сложившаяся практика, ведущие государственные фонды, выделяющие гранты на проведение научных исследований (РФФИ, РГНФ, Фонд «Сколково»), предусматривают в своих типовых договорах принадлежность исключительных прав на создаваемые ОИС грантополучателям.

Важное значение имеет вопрос эффективности управления правами на ОИС, принадлежащими государству. Существенным шагом в совершенствовании данной системы стало принятие постановления Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил осуществления государственными заказчиками управления правами Российской Федерации на результаты интеллектуальной деятельности гражданского, военного, специального и двойного назначения» от 22.03.2012 № 233 и особенно изменений в него, вступающих в силу 01.10.2013 и предусматривающих возможность для исполнителей государственных контрактов и иных заинтересованных лиц безвозмездно получить исключительные права на ОИС, созданные за счёт федерального бюджета, или права их использования.

#### Литература

1. Рекомендации парламентских слушаний «Проблемы правового регулирования отношений в сфере правовой охраны и использования результатов интеллектуальной деятельности, созданных за счёт средств федерального бюджета» // Официальный сайт Свердловской областной общественной организации ВОИР:

<http://www.sv-voir.ru/рекомендации-парламентских-слушаний>.

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ И ПРОДУКЦИИ

*М.В.Кобзев, Д.А.Бубало* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

## **Введение**

В ОАО «ОНПП «Технология» все этапы жизненного цикла крупногабаритных изделий из композиционных материалов (КМ) с каждым годом получают все более мощную информационную поддержку. Это обеспечивается за счет созданной на предприятии и постоянно развивающейся интегрированной информационной среды (ИИС), одним из главных звеньев которой является система управления данными изделия PDM STEP Suite (PSS), а также своевременного обновления парка аппаратного и программного обеспечения.

В настоящей работе приведены сведения о реализованных и перспективных проектах по информационной поддержке входного контроля материалов и контроля качества готовой продукции.

## **Текущее состояние**

В данный момент на предприятии функционирует ряд автоматизированных систем (АС) по регистрации и обработке результатов контроля качества. Часть АС (охватывающих такие направления деятельности, как входной контроль материалов и полуфабрикатов и контроль качества изделий из КМ) находятся в локальной вычислительной сети (ЛВС) предприятия, интегрированы в ИИС и имеют механизмы обмена данными с системой PSS. Автоматизация контроля качества в других направлениях деятельности (например, производство изделий из керамики, стекла, полимеров) либо имеет локальный характер, либо не была остро востребована до настоящего момента. Хранилищем информации АС, интегрированных в ИИС, является СУБД Oracle. Информация из хранилищ АС может быть интегрирована с информацией о материалах/изделиях в системе PSS на основе разработанной и успешно апробированной методики.

*Автоматизированная система регистрации результатов входного контроля* была разработана и успешно функционирует на предприятии более 10 лет. АС хранит информацию о химических (органических и неорганических) и физико-механических испытаниях материалов и полуфабрикатов, используемых в производстве. Модули АС результатов входного контроля установлены на 7 рабочих станциях испытательной лаборатории. Ежегодно хранилище АС пополняется более чем на 2000 испытаний. Всего имеется информация о 26000 испытаний. Результаты контроля из АС могут автоматически передаваться в систему PSS.

*Автоматизированная система разрушающего контроля (АСРК) изделий из КМ* была сдана в промышленную эксплуатацию в 2006 году.

Задачи, решаемые системой:

- хранение результатов испытаний в единой БД;
- синхронизация результатов контроля с информацией об изделиях в системе PSS;
- автоматизация ввода измеряемых параметров;

- автоматический расчет контролируемых характеристик;
- формирование отчетной документации;
- генерация выборок результатов контроля на основании различных критериев с последующей возможностью экспорта в программы статистической обработки.

Модули АСРК установлены на 5 рабочих станциях испытательной лаборатории. В БД системы накоплена информация о более чем 23000 испытаний. Результаты статистической обработки выборок, полученных при помощи АСРК, активно используются технологическими подразделениями для оптимизации качества выпускаемой продукции.

*Автоматизированная система неразрушающего контроля (АСНК)* была создана на предприятии в 2007-2008 гг.

АСНК включает в себя две подсистемы: толщинометрии и дефектоскопии. Каждая из подсистем состоит из двух автоматизированных рабочих мест (АРМ):

- АРМ редактирования шаблонов испытаний, которое служит для создания и редактирования шаблонов испытаний различных типов изделий;
- АРМ регистрации результатов испытаний, предназначенное для ввода данных испытания по выбранному шаблону, расчета необходимых параметров и формирования отчетной документации.

Модули АСНК тесно интегрированы с программными продуктами Microsoft Excel и Autodesk AutoCAD.

### **Эффект от внедрения информационной поддержки контроля качества материалов и готовой продукции**

Внедрение АС контроля качества, интегрированных в ИИС предприятия, позволило достичь следующих результатов:

- классификация и упорядочивание материалов входного контроля;
- систематизация испытаний изделий из КМ;
- сокращение трудоемкости при вводе данных и оформлении отчетной документации к испытанию (например, при контроле толщины - примерно на 30% от общих трудозатрат на испытание);
- повышение достоверности контроля за счет исключения ошибок при вводе, расчете и оформлении результатов;
- повышение точности расчетов;
- знания, полученные при анализе информации, накопленной в БД систем, позволяют оптимизировать технологические процессы и повысить качество готовой продукции.

### **Перспективы развития**

В настоящее время наиболее приоритетными путями развития информационной поддержки контроля качества материалов и продукции являются:

- внедрение информационной поддержки контроля качества продукции во всех направлениях деятельности предприятия;
- интеграция существующих автоматизированных систем контроля качества в ИИС предприятия;
- разработка и реализация методик обмена данными между испытательными БД и PSS;

– более широкое использование статистического анализа накопленных данных испытаний для оптимизации конструкции и технологии при производстве изделий;

– максимальное применение испытательного оборудования, не предполагающего ручную передачу данных контроля (например, цифровые индикаторы при проведении толщинометрии); это позволит исключить использование рукописных журналов и передавать результаты контроля непосредственно в испытательные АС в электронном виде.

## **ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПАСПОРТОВ ИЗДЕЛИЙ НА ПЛАТФОРМЕ PLM**

*В.Б.Петров, Д.А.Бубало* (ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия)

Управление качеством в широком смысле следует понимать как управление процессами, направленное на повышение их результативности. Суть данного подхода заключается в управлении предприятием через управление качеством. В контексте PLM (Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом изделия) методы и технологии управления качеством получают новое развитие. Применение интегрированной информационной среды (ИИС) обеспечивает информационную поддержку и интеграцию процессов предприятия, т.е. возможность использования электронных данных, созданных в ходе различных процессов, для задач управления качеством продукции [1].

Применение PLM становится необходимостью в жестких условиях конкурентной борьбы за получение заказов на изготовление высокотехнологичных изделий. При участии в таких проектах, как SAM-146, Т-50, МС-21 одним из основных требований заказчиков является наличие электронной документации на изделие, использование электронного обмена данными. Эти задачи успешно решаются в рамках PLM. Ведущие разработчики программного обеспечения в данной области предлагают готовые к внедрению решения в сфере конструкторско-технологической подготовки производства, однако автоматизация процессов на стадии производства изделий требует больших усилий по настройке и адаптации с учетом особенностей конкретного предприятия.

При использовании технологий PLM на стадиях производства, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделия возникает необходимость в информационном описании экземпляров изделий. На стадии производства PLM позволяет создать «электронный паспорт на изделие» (ЭПИ), содержащий маршрутно-операционные сведения об изготовленной партии или экземпляре изделия [1]:

- место размещения производства (цех, производственный участок);
- показатели микроклимата производственных помещений (температура, влажность, запыленность);
- контролируемые параметры выполнения операции;
- исходные материалы, материальные затраты на производство;

- экземпляры и партии изделий, входящие в состав изготавливаемого изделия;
- используемое оборудование, режимы работы;
- статусы операций (выполнено, пропущено), даты начала и окончания операций;
- показатели качества изготовления изделия на контролируемых операциях;
- электронные подписи ответственных исполнителей, мастеров, контроллеров ОТК, приемки изделия.

На предприятии существует давно уже сложившаяся практика сопровождения изготавливаемых изделий технологическим паспортом (ПТ) на твердом носителе, в котором фиксируются технологические параметры при производстве изделий. ПТ предназначен для указания последовательности и содержания операций, выполняемых при изготовлении изделия, включая операционный и приемочный контроль. Учитывая общность характера хранимой информации, можно утверждать, что ЭПИ является электронным аналогом ПТ, поскольку содержит аналогичную информацию в электронном виде. Помимо информации о ПТ ЭПИ также может содержать дополнительные параметры, необходимые для достижения различных целей в сфере контроля исполнительской дисциплины, мониторинга загрузки оборудования, поиска оптимальных решений для усовершенствования технологического процесса, оптимизации экономических затрат на производство, ведения рабочих журналов производственных участков и т.д.

Для получения достоверной информации с производственных участков используются различные механизмы верификации данных. Самый распространенный способ – проверка валидности по типу вносимых данных: число, строка, список допустимых значений, дата-время. По возможности применяется маска ввода с подстановочными символами.

Значительный позитивный эффект дает использование механизма контроля допустимых значений технологического процесса. При получении параметра, значение которого не вписывается в заданный интервал, срабатывает настроенная соответствующим образом сигнализация и параметр помечается как недопустимый; возможна блокировка ввода других параметров и ожидание реакции лиц с более высоким уровнем ответственности.

Существенным преимуществом при ведении ЭПИ является возможность автоматизированного сбора некоторых параметров с помощью съема данных с измерительных датчиков или вычисления значения параметра из набора известных значений.

При сборе технологических параметров производства изделий очень важно иметь возможность установить авторство введенной информации. Для этого используется встроенный механизм электронной подписи. Согласно концепции PLM, информация о параметрах производства хранится с использованием механизма версионности. Создаваемые электронные подписи удостоверяют текущую актуальную версию подписанных данных. История изменений информационного объекта сохраняется в виде цепочки версий, связанных с электронными подписями. Таким образом, осуществляется защита информации от изменений, обеспечивая такие качественные характеристики информации, как подлинность, целостность, неотрицание авторства.

Применение ЭПИ на производстве позволяет получить значительный выигрыш во времени при заполнении набора паспортов, когда при выполнении одной технологической операции над множеством экземпляров изделий необходимо последовательно внести однотипную информацию в ряд паспортов. Для этого используется механизм параллельной обработки данных: возможность получить доступ сразу к нескольким ЭПИ и редактировать их все одновременно.

Внедрение ЭПИ на предприятии преследует цель реализации технологии безбумажного обмена данными как основного принципа организации ИИС. Однако в текущем переходном периоде необходима поддержка действующей традиционной системы документооборота на бумажных носителях. Для этого разработаны соответствующие нормы, в которых вводится понятие электронного паспорта и его твердой копии. Созданы представления данных ЭПИ для вывода на печать технологического паспорта на изделие и документов, входящих в него. Механизм параллельной обработки ЭПИ позволяет получать твердые копии комплектов документов для заданного набора ЭПИ.

Технология ведения ЭПИ является базовым фундаментом построения PLM на предприятии. Получаемые данные представляют собой основу для формирования аналитики, статистики, отчетов технического, экономического, управленческого характера. Осуществляемый в реальном времени мониторинг процессов производства позволяет оперативно удовлетворять цеховые потребности в плане снабжения, перевооружения, масштабирования, оптимизации. Преимущество нового технологического уклада по сравнению с предыдущим заключается в повышении гибкости производства и осуществлении тесного взаимодействия в рамках кооперации с предприятиями-партнерами в области технологий, контроля качества продукции, планирования инноваций.

#### Литература

1. Судов Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции// Принципы. Технологии. Методы. Модели. – М., 2003. – 263 с.

### **СОТРУДНИЧЕСТВО МЕЖДУ УНИВЕРСИТЕТАМИ И БИЗНЕС-СТРУКТУРАМИ, ПРИМЕР: JYVÄSKYLÄ BUSINESS AND INNOVATION FACTORY (BIF)**

*H. Malinen, P. Raiskinmäki, R. Ahmaniemi, H. Pusa*

(JAMK Университет Прикладных Наук, г. Ювяскюля, Финляндия)

С 2011 года JAMK занимается разработкой новой концепции “JAMK Generator”, объединяющей средства поддержки инновационной деятельности и предпринимательства. Наиболее важными функциями “JAMK Generator” являются: а) подготовка к предпринимательской деятельности в рамках учебных программ; б) подход «От идей к инновациям», помогающий оценить коммерческий потенциал идей и коммерциализации; в) бизнес-инкубатор, помогающий

студентам в развитии их собственного бизнеса в период обучения, а также в рамках обучения; и г) «Фабрика обслуживания», объединяющая идеи представителей рабочих профессий и нашего персонала и студентов для создания инноваций в сфере обслуживания.

Таким образом, «JAMK Generator» идёт по пути от начальной идеи к конкретным проектам, предпринимательству, патентам и лицензированию. На данный момент результаты многообещающие, и увеличивается число новых компаний, а также патентов и лицензий.

JAMK Университет Прикладных Наук также является частью крупной инновационной системы в данной области. Была проведена оценка всей инновационной системы, и в 2012 году была запущена новая модель сотрудничества - Jyväskylä Business and Innovation Factory (BIF). Эта модель помогает нам выполнять работу более эффективно и с меньшими затратами за счёт развития общей концепции обслуживания вместе с нашими партнёрами и обеспечения наилучшего качества обслуживания для всех наших клиентов.

Развитие нового бизнеса и инноваций является целью многих организаций в Jyväskylä. Потенциальные предприниматели не всегда имеют представление о наилучших путях развития от идеи до успешного бизнеса. В связи с этим некоторые наиболее важные организации приняли решение объединить свои силы для развития общей концепции обслуживания и обеспечения наилучшего качества обслуживания для всех клиентов.

Основными клиентами BIF являются студенты, аспиранты и научные сотрудники университетов, а также другие люди, заинтересованные в создании или развитии собственного бизнеса.

Учредительными организациями BIF являются Региональная компания по развитию в г. Jyväskylä Jykes Ltd, Jyväskylä Innovation Ltd, JAMK Университет Прикладных Наук, Университет Jyväskylä, финские предпринимательские структуры и Бизнес-инкубатор Jyväskylä, управляемый Suomen Yrityskehitys Oy.

Каждая из вышеупомянутых организаций ранее имела, в определённой степени, свой собственный подход к обучению предпринимательской деятельности, созданию инноваций и развитию. Одновременно с основанием BIF планировалась общая концепция обслуживания, и выбирались средства обслуживания. Функции и обязанности каждой из организаций будут подробнее разъяснены в ближайшем будущем.

BIF представляет собой новую концепцию, разработанную в Jyväskylä. Целью является привлечение ежегодно примерно 1000 человек. Ожидаемый результат предполагает ежегодное создание значительного числа новых компаний и рост 10 – 15 предприятий.

Другие важные цели BIF включают ускорение процесса «от идеи до новой компании», обеспечение лучшего качества обслуживания для клиентов и усовершенствование подхода, ориентированного на клиента. Это позволит достичь дополнительной цели – сделать процесс более эффективным и экономичным.

## СПИСОК УЧАСТНИКОВ

<i>Ahmaniemi R.</i>	423	<i>Богаев А.А.</i>	255
<i>Malinen H.</i>	423	<i>Богачев Е.А.</i>	245
<i>Pusa H.</i>	423	<i>Бойко Л.И.</i>	140,142,145
<i>Raiskinmäki P.</i>	423	<i>Бойков С.Ю.</i>	225
<b>А</b>		<i>Болгов В.В.</i>	128
<i>Айт О.А.</i>	385	<i>Бондалетов Д.Н.</i>	376
<i>Аккуратов И.Л.</i>	100	<i>Бородай С.П.</i>	247
<i>Алдошин С.М.</i>	385	<i>Бородулин А.С.</i>	130
<i>Александров А.А.</i>	50	<i>Бочегов А.А.</i>	262,397
<i>Александров Н.Г.</i>	134	<i>Брыков С.И.</i>	111
<i>Алексян Р.А.</i>	160	<i>Бубало Д.А.</i>	419,421
<i>Алексеев Д.В.</i>	299,299	<i>Булгаков Д.А.</i>	88
<i>Алексеев М.К.</i>	322,323	<i>Бухаров С.В.</i>	94,122,124,131, 213
<i>Алексеева Л.А.</i>	369	<i>Буюкова С.П.</i>	273,275,276, 330,332
<i>Алимов М.А.</i>	91,154	<b>В</b>	
<i>Алямовский А.И.</i>	100	<i>Вандрай С.Н.</i>	258
<i>Андреев П.В.</i>	82	<i>Вандышева И.В.</i>	262,397
<i>Андросова Н.И.</i>	213	<i>Василенко В.В.</i>	149
<i>Антипов В.В.</i>	72	<i>Васюков М.В.</i>	301
<i>Аракчеев А.В.</i>	230,327,334	<i>Верченко А.В.</i>	353
<i>Арсланова Н.И.</i>	250,251	<i>Викулин В.В.</i>	105,344
<i>Артемьев А.В.</i>	117	<i>Власова В.А.</i>	389,390
<i>Асеева Т.П.</i>	157	<i>Вовк А.В.</i>	356
<i>Атрощенко Г.Н.</i>	394	<i>Войлочников А.И.</i>	98
<i>Атрощенко И.Г.</i>	282	<i>Волков В.С.</i>	85, 86, 158, 163,187
<i>Афанасьев В.А.</i>	252	<i>Волков Д.А.</i>	93
<b>Б</b>		<i>Волбуева Н.Б.</i>	105
<i>Бабин А.Д.</i>	202	<i>Волощенко Г.Н.</i>	228
<i>Бабкина И.О.</i>	85,158	<i>Ворвуль С.В.</i>	120,140,163,174
<i>Бабошин А.В.</i>	240	<i>Воробьев В.Н.</i>	280
<i>Бажеряну В.В.</i>	209	<i>Воробьев С.Б.</i>	286,301
<i>Бакланова Н.И.</i>	227	<i>Воропаева М.В.</i>	369
<i>Балабанов С.С.</i>	235	<i>Вотинов Д.И.</i>	112
<i>Баранов А.А.</i>	113	<i>Выморков Н.В.</i>	103
<i>Барачевский В.А.</i>	385	<b>Г</b>	
<i>Басынина Е.А.</i>	209	<i>Гаврилко В.В.</i>	164
<i>Беляков А.В.</i>	288	<i>Гайдачук В.Е.</i>	73, 75
<i>Берлин А.А.</i>	115	<i>Гайдукова С.М.</i>	95
<i>Беспалов И.А.</i>	327	<i>Галганова А.Л.</i>	236
<i>Бизин И.Н.</i>	239,240,322, 325,340		
<i>Билалов Б.А.</i>	290,293		

<i>Ганичев А.И.</i>	242,345	<i>Ермаков А.В.</i>	262,397
<i>Гарипов О.Ф.</i>	303	<i>Ермолаев А.С.</i>	265,289
<i>Гвоздев А.Б.</i>	387,387,388	<i>Ершова Н.И.</i>	415
<i>Гельманова Т.О.</i>	363,371	<b>Ж</b>	
<i>Гербер Д.В.</i>	404	<i>Жабин А.П.</i>	252
<i>Голубев Н.В.</i>	396,399	<i>Желтова А.В.</i>	176
<i>Голубева Н.А.</i>	327	<i>Жирнов А.А.</i>	150
<i>Гончаренко Е.А.</i>	311	<i>Жуков А.А.</i>	322, 239, 340
<i>Гончаров К.А.</i>	82	<b>З</b>	
<i>Горелова Е.В.</i>	263	<i>Забезжайлов А.О.</i>	242,345
<i>Горенберг А.Я.</i>	88	<i>Забезжайлов М.О.</i>	106,247
<i>Горчакова Л.И.</i>	239,327	<i>Задорожная О.Ю.</i>	255
<i>Горынин Г.Л.</i>	318	<i>Зайцев О.В.</i>	117
<i>Грачев В.П.</i>	385	<i>Зайцева Е.Ю.</i>	157
<i>Григорьев М.В.</i>	271,276,332	<i>Зайченко И.В.</i>	209
<i>Гриценко М.В.</i>	85	<i>Зайчук Т.В.</i>	258,260
<i>Грудинин Г.Н.</i>	128	<i>Закоржевский В.В.</i>	334
<i>Губанов А.И.</i>	342	<i>Запруднов Д.М.</i>	100
<i>Губин С.Г.</i>	122	<i>Захаров А.Г.</i>	112
<i>Гуламова Д.Д.</i>	168	<i>Зевако В.С.</i>	190
<i>Гуняев Г.М.</i>	65	<i>Зельнев В.Н.</i>	79,160
<i>Гуняева А.Г.</i>	65,122	<i>Злобин Н.Г.</i>	192
<i>Гусев Р.М.</i>	299	<b>И</b>	
<b>Д</b>		<i>Иваницкий А.С.</i>	145
<i>Давыдов Д.Я.</i>	100	<i>Иванов В.Н.</i>	111
<i>Дедова Е.С.</i>	342	<i>Иванов В.С.</i>	157
<i>Демченко А.В.</i>	190	<i>Иванов Г.И.</i>	252
<i>Денисова Е.В.</i>	85,86,158, 163,187	<i>Иванова С.М.</i>	143
<i>Дидин Г.Н.</i>	125	<i>Игнатьева Е.С.</i>	396,399
<i>Дин Кай Цзянь</i>	89	<i>Иким М.И.</i>	176,180,188
<i>Добрецова И.Н.</i>	98	<i>Исамов А.Н.</i>	387,387,388
<i>Долгова М.И.</i>	124	<b>К</b>	
<i>Долматов С.А.</i>	204	<i>Каблов Е.Н.</i>	38
<i>Дубкова В.И.</i>	166	<i>Калатур Е.С.</i>	330
<i>Дудов И.А.</i>	416	<i>Камалов А.Д.</i>	250,251
<i>Думанский А.М.</i>	91,152,154,295	<i>Каплунова А.М.</i>	378
<i>Дьяконов В.А.</i>	250,251	<i>Кардашова Г.Д.</i>	290,293
<i>Дякин П.В.</i>	321	<i>Карпикова О.А.</i>	190
<i>Дякина А.П.</i>	339	<i>Карпов Я.С.</i>	69
<i>Дякина М.П.</i>	306	<i>Касимовский А.А.</i>	230
<i>Дятлова Я.Г.</i>	225,337	<i>Катаева Е.Ю.</i>	192
<b>Е</b>		<i>Кашкарова Е.М.</i>	278
<i>Елисеев О.А.</i>	161		
<i>Еремин А.Г.</i>	82		

<i>Келина И.Ю.</i>	230,242,267, 269,327,334	<i>Кулиш В.Г.</i>	149
<i>Келина Р.П.</i>	369	<i>Кульков С.Н.</i>	244,271,273,275, 276,330,332,342
<i>Ким Р.Б.</i>	168	<i>Куперман А.М.</i>	88
<i>Кириченко В.В.</i>	73	<i>Курская И.Н.</i>	242,267,345
<i>Киришина Н.В.</i>	308	<i>Куфтырев Р.Ю.</i>	288
<i>Климакова Л.А.</i>	77,79,93	<i>Куцевич К.Е.</i>	67
<i>Климашин А.В.</i>	376		
<i>Клименко Н.Н.</i>	392	<b>Л</b>	
<i>Кобзев М.В.</i>	419	<i>Лазарев В.А.</i>	150
<i>Коваленко В.А.</i>	73, 75	<i>Лакеев С.Г.</i>	176,406
<i>Коваленко П.В.</i>	344	<i>Лаптев М.Ю.</i>	194
<i>Коваль О.В.</i>	413	<i>Ларионов Н.В.</i>	245,317
<i>Ковеленов Н.Ю.</i>	337	<i>Ларькова А.М.</i>	93
<i>Козерацкая Е.П.</i>	95	<i>Ласыченков Ю.Я.</i>	303
<i>Козлова Н.В.</i>	188	<i>Латыш С.И.</i>	301
<i>Койтов С.А.</i>	195,198,200	<i>Лахин А.В.</i>	245,317
<i>Колоколов Л.И.</i>	286	<i>Леба С.</i>	206
<i>Комаров Г.В.</i>	213	<i>Лебедев А.К.</i>	94
<i>Комиссар О.Н.</i>	46	<i>Лебедева Ю.Е.</i>	374
<i>Комиссарова И.Н.</i>	182	<i>Левчук А.В.</i>	389,390
<i>Кондратьев А.В.</i>	73, 75, 84	<i>Лепикаш Е.Р.</i>	98,113,162,182
<i>Кондрашов Э.К.</i>	333	<i>Лимонов С.В.</i>	202
<i>Коновалова Л.Д.</i>	404	<i>Липатьев А.С.</i>	363,371,382,399
<i>Коньшев И.А.</i>	112	<i>Литицкая В.А.</i>	93
<i>Копьл Н.И.</i>	100	<i>Лозанов В.В.</i>	227
<i>Копьлов Ю.Л.</i>	266	<i>Лопатина Е.В.</i>	379
<i>Кораблева Е.А.</i>	228,243,265,312	<i>Лорян В.Э.</i>	334
<i>Корнейчук А.Н.</i>	86,163	<i>Лотарев С.В.</i>	363,371,399
<i>Корнейчук С.А.</i>	176,180	<i>Лохов А.А.</i>	109
<i>Котухова А.М.</i>	145	<i>Лужкова А.П.</i>	225
<i>Кравченко В.Б.</i>	266	<i>Ляшко Л.Ю.</i>	406
<i>Кравчик А.Е.</i>	233		
<i>Красенков Я.Н.</i>	131	<b>М</b>	
<i>Красный А.Б.</i>	236	<i>Мазур В.В.</i>	105,160
<i>Красный Б.Л.</i>	224,236	<i>Майзик М.А.</i>	312
<i>Кривцова О.С.</i>	109	<i>Макаренко В.В.</i>	352
<i>Крылов В.П.</i>	267,282,313	<i>Малашкевич Г.Е.</i>	396
<i>Крюков А.М.</i>	187	<i>Малова Н.Е.</i>	333
<i>Кужель М.П.</i>	252	<i>Манина И.Н.</i>	225
<i>Кузнецов Ю.В.</i>	202	<i>Маркин О.В.</i>	170
<i>Кузнецова И.Г.</i>	288	<i>Маслова Е.И.</i>	142,174
<i>Кузнецова Н.В.</i>	337	<i>Матыцин Я.Г.</i>	236
<i>Кузьмина Е.В.</i>	366	<i>Матюшевский Н.В.</i>	146
<i>Кулагина И.В.</i>	85,86,158	<i>Матюшин К.С.</i>	230
<i>Куликова Г.И.</i>	240,299,323,340	<i>Медведко В.С.</i>	411

<i>Медведко О.В.</i>	411
<i>Мельников В.Н.</i>	198
<i>Мельников Д.А.</i>	282
<i>Метлева А.П.</i>	242
<i>Мийченко И.П.</i>	124
<i>Миронов Р.А.</i>	247
<i>Миронова Е.В.</i>	106,142,296
<i>Митякова А.В.</i>	93
<i>Михайленко Н.Ю.</i>	392,404
<i>Михальчик И.Л.</i>	230,267,327,334
<i>Михеев П.В.</i>	115,117,125,150
<i>Молотова В.А.</i>	333
<i>Морозов Б.Б.</i>	214
<i>Морозова З.В.</i>	162,182
<i>Морозова Н.Б.</i>	227
<i>Мосин Ю.М.</i>	357
<i>Мосиук В.Н.</i>	120
<i>Мурзакова А.Р.</i>	311
<i>Мухин Н.В.</i>	134
<i>Мякушев К.В.</i>	125

## **Н**

<i>Насонов Ф.А.</i>	214
<i>Нелюб В.А.</i>	150,173
<i>Неповинных В.И.</i>	295
<i>Непочатов Ю.К.</i>	255
<i>Нечепуренко А.С.</i>	303
<i>Никитин Б.М.</i>	111
<i>Никифоров С.В.</i>	262,397
<i>Нисс В.С.</i>	166
<i>Новикова И.И.</i>	404

## **О**

<i>Обухова Н.С. 4</i>	98,113,162,182
<i>Овсиенко А.И.</i>	225
<i>Овсянникова И.Ю.</i>	390
<i>Овчинников В.И.</i>	346
<i>Оглоблина Д.О.</i>	369
<i>Оленин И.Г.</i>	134
<i>Орданьян С.С.</i>	225,321,337
<i>Орлов А.А.</i>	260
<i>Орлова Л.А.</i>	369,374
<i>Осадчий Н.В.</i>	122
<i>Осипова М.Е.</i>	265
<i>Осмаков А.С.</i>	225,233,337
<i>Осокин В.М.</i>	136

## **П**

<i>Павлова В.П.</i>	278
<i>Палеари А.</i>	363,394,399
<i>Пахомов В.П.</i>	228
<i>Перевислов С.Н.</i>	257
<i>Пермин Д.А.</i>	235
<i>Першиков С.А.</i>	357
<i>Петрачков Д.Н.</i>	366
<i>Петров В.Б.</i>	421
<i>Петропольский В.С.</i>	95
<i>Петушков Д.В.</i>	166
<i>Петюшик Е.Е.</i>	308
<i>Пивинский Ю.Е.</i>	321
<i>Пигалев А.Е.</i>	366
<i>Плотникова А.С.</i>	382
<i>Пляскина Л.А.</i>	280
<i>Плясункова Л.А.</i>	230,265,334
<i>Пнев А.Б.</i>	150
<i>Поletaев М.Е.</i>	286
<i>Поливанов А.Н.</i>	389,390
<i>Половый А.О.</i>	79, 93
<i>Полонская И.Р.</i>	103
<i>Попов А.Г.</i>	138,146
<i>Попова Д.А.</i>	112
<i>Попович Н.В.</i>	374
<i>Портнова Я.М.</i>	120,174
<i>Постнов В.И.</i>	210
<i>Потапов А.М.</i>	75
<i>Потапова Г.Ф.</i>	180,188
<i>Прасолов А.Н.</i>	301
<i>Промахов В.В.</i>	273,275
<i>Пронин Б.Ф.</i>	250,251,316
<i>Просовская Г.Ю.</i>	387,387,388
<i>Просовский О.Ф.</i>	387,387,388
<i>Прямилова Е.Н.</i>	355

## **Р**

<i>Радциг Н.М.</i>	233
<i>Радченко А.А.</i>	154
<i>Райлян В.С.</i>	299,299
<i>Раскутин А.Е.</i>	65, 67
<i>Резник С.В.</i>	284
<i>Рзынкин В.В.</i>	131
<i>Рогов Д.А.</i>	106,286,301,344, 350
<i>Родиновский Ю.В.</i>	316

<i>Рожко И.Н.</i>	356	<i>Солинов В.Ф.</i>	360
<i>Рожкова Т.И.</i>	278,280	<i>Солнцев С.С.</i>	216
<i>Ролецкая Н.А.</i>	149	<i>Солоненко О.П.</i>	411
<i>Роман О.В.</i>	308	<i>Сотников А.А.</i>	404
<i>Романов А.А.</i>	100	<i>Спиридонов Ю.А.</i>	382
<i>Рудькина В.Н.</i>	242,267,345	<i>Станкой М.А.</i>	124
<i>Румянцев В.И.</i>	225,233,337	<i>Старостина Ю.А.</i>	389
<i>Руппель В.</i>	206	<i>Степанов К.В.</i>	150
<i>Русин М.Ю. 4</i>	228,240,312,323	<i>Степанов Н.В.</i>	157,160
<i>Русланцев А.Н.</i>	170	<i>Степанов П.А.</i>	149,282,286
<i>Рындя С.М.</i>	176,180	<i>Степко А.А.</i>	374
<i>Рябина О.В.</i>	378	<i>Стороженко П.А.</i>	389,390
<b>С</b>		<i>Стрельников С.В.</i>	210
<i>Саванина Н.Н.</i>	228,240,265, 312,340	<i>Строганова Е.Е.</i>	369
<i>Савельев Д.И.</i>	138	<i>Ступакова Н.П.</i>	251,316
<i>Савинков В.И.</i>	363,394	<i>Судник Л.В.</i>	166,308
<i>Садикова Н.А.</i>	187	<i>Суздальцев Е.И.</i>	258,260,263, 289,296
<i>Саиетова А.Р.</i>	355	<i>Сухов С.Г.</i>	109
<i>Салиенко Н.В.</i>	89	<b>Т</b>	
<i>Самак С.</i>	90	<i>Тайгин В.Б.</i>	128
<i>Самакоски Б.</i>	90	<i>Тарасовский В.П.</i>	236
<i>Самсонов В.И.</i>	390	<i>Татарников О.В.</i>	350
<i>Санин А.Ф.</i>	84	<i>Телегин С.В.</i>	134
<i>Санников А.А.</i>	195, 200	<i>Терехин А.В.</i>	295
<i>Сапарова А.А.</i>	282	<i>Тимофеев А.Н.</i>	245
<i>Сапронов Д.В.</i>	284	<i>Тиунова О.В.</i>	255
<i>Сафаралиев Г.К.</i>	290,293	<i>Товстокожая И.П.</i>	356
<i>Селина Л.С.</i>	93	<i>Токунов С.Г.</i>	168
<i>Семченко Г.Д.</i>	352,356	<i>Томчани О.В.</i>	120,140,142,143, 174,278,280
<i>Сенаторова О.Г.</i>	72	<i>Торопицина А.В.</i>	194
<i>Сеньковский А.Н.</i>	100	<i>Трахтенберг Л.И.</i>	176,180
<i>Серазединов М.В.</i>	157	<i>Тюльменков В.А.</i>	100
<i>Сигаев В.Н.</i>	361,363,371,379, 382,394,396,399, 401	<i>Тюрикова Н.В.</i>	389
<i>Сидельников В.В.</i>	72	<b>У</b>	
<i>Сидоренко М.А.</i>	120	<i>Устинова Ю.С.</i>	258,260
<i>Синенков А.Н.</i>	105	<i>Ушеренко С.М.</i>	367
<i>Сироткин О.С.</i>	45	<i>Ушеренко Ю.С.</i>	367
<i>Сливинский В.И.</i>	84	<b>Ф</b>	
<i>Смирнова К.Е.</i>	390	<i>Фатеев В.Н.</i>	228
<i>Смолянский А.С.</i>	176,180,188,406	<i>Федоров М.Ю.</i>	82
<i>Соколов И.И.</i>	67	<i>Федорова В.А.</i>	376
<i>Соколова А.В.</i>	160	<i>Федотова Т.И.</i>	389,390

<i>Фетисов В.С.</i>	350	<i>Шкатов П.Н.</i>	125
<i>Филатов Е.Н.</i>	250	<i>Шкиркова Л.М.</i>	182
<i>Фихман М.И.</i>	411	<i>Шкловер В.Я.</i>	406
<i>Фокин В.И.</i>	299,299	<i>Шкодкин А.В.</i>	255
<i>Фомин В.М.</i>	411	<i>Шмурадко В.Т.</i>	308
<b>Х</b>		<i>Шугаев М.В.</i>	280
<i>Хабенко А.В.</i>	143,185	<i>Шуль Г.С.</i>	86,113,158, 185,278
<i>Халиков Р.М.</i>	311	<i>Шульдешова П.М.</i>	67
<i>Харитонов Д.В.</i>	289	<i>Шульц А.М.</i>	85,86
<i>Харченко В.В.</i>	190	<i>Шуткина О.В.</i>	282
<i>Харченко М.Е.</i>	84	<b>Щ</b>	
<i>Хаханов С.Н.</i>	406	<i>Щетанов Б.В.</i>	217
<i>Хмельницкий А.К.</i>	134	<b>Ю</b>	
<i>Хмельницкий Я.А.</i>	82	<i>Юдаева Е.И.</i>	163
<i>Храновская Т.М.</i>	299	<i>Юдина Л.В.</i>	140,142,143, 145,185
<b>Ч</b>		<b>Я</b>	
<i>Чайникова А.С.</i>	374	<i>Яковлев А.Л.</i>	72
<i>Чевыкалова Л.А.</i>	230,267,269, 327,334	<i>Якушкин П.Ю.</i>	106
<i>Чернышев С.Л.</i>	35	<i>Якушкина В.С.</i>	265
<i>Чернявский А.Г.</i>	100		
<i>Черфас Л.В.</i>	62		
<i>Чуднов И.В.</i>	81		
<i>Чупов В.Д.</i>	257		
<b>Ш</b>			
<i>Шабанов С.Ш.</i>	290,293		
<i>Шабанов Ш.Ш.</i>	290,293		
<i>Шадрин В.С.</i>	342		
<i>Шамшетдинов К.Б.</i>	269		
<i>Шарифзянов В.Г.</i>	367		
<i>Шаронова Е.Ю.</i>	337		
<i>Шаталин А.С.</i>	267		
<i>Шахгильдян Г.Ю.</i>	363,394		
<i>Шаяхметов У.Ш.</i>	311		
<i>Шебалов А.В.</i>	252		
<i>Шевченко В.П.</i>	168		
<i>Шемама Р.</i>	206		
<i>Шер Н.Е.</i>	239,240		
<i>Шестов В.В.</i>	72		
<i>Ширина О.В.</i>	82		
<i>Ширко А.А.</i>	98		
<i>Шкарупа И.Л.</i>	344		



## «STEVIK SAS»

10, Улица Гранд Урс  
95800 Сержи  
Франция  
Тел.: +33 130 329 325  
Факс: +33 970 069 650  
[www.stevik.fr](http://www.stevik.fr)  
[sales@stevik.fr](mailto:sales@stevik.fr)

**По вопросам приобретения на территории РФ обращайтесь:**

### «ВИСТ-КОМПОЗИТ»

141102, Россия, Московская обл.  
г. Щелково, ул. Первомайская, д. 31  
Тел.: +7(495)763-63-35  
[www.vist-composite.ru](http://www.vist-composite.ru)  
[sales@vist-composite.ru](mailto:sales@vist-composite.ru)

### Разработка и поставка производственного и ремонтного спецоборудования:

- ▶ Автоклавы
- ▶ Печи для полимеризации
- ▶ Термоинфузионные автоматические центры
- ▶ Оборудование для ремонта конструкций из ПКМ
- ▶ Инжекционные установки
- ▶ Плетельно-прошивочно-раскройные комплексы
- ▶ Плетельное оборудование
- ▶ Прошивочно-армирующие установки
- ▶ Оборудование для ультразвуковой резки
- ▶ Лазерные проекторы
- ▶ Прессы для РТМ и термокомпрессии препрегов

### Технологические материалы и принадлежности STEVIK®

- ▶ Вакуумные плёнки
- ▶ Разделительные плёнки
- ▶ Герметизирующие жгуты
- ▶ Дренажные материалы
- ▶ Разделительные/жертвенные ткани
- ▶ Липкие ленты
- ▶ Резина
- ▶ Инфузионные материалы
- ▶ Разделительные жидкости
- ▶ Раскройное, измерительное оборудование
- ▶ Материалы и технологии для производства мастер-моделей и оснастки
- ▶ Разработка и изготовление мастер-моделей и оснастки по чертежам заказчика



## «AIRTECH»

Zone industrielle Haneboesch  
L-4562 Differdange *LUXEMBOURG*  
Tel. +352 58 22 82  
Fax +352 58 49 35  
[www.airtech.lu](http://www.airtech.lu)  
[sales@airtech.lu](mailto:sales@airtech.lu)

Компания «Airtech»- мировой производитель и поставщик вспомогательных материалов для вакуумных процессов и материалов для изготовления композитной оснастки, используемых в авиационно-космической отрасли, ветроэнергетике, автомобилестроении и общей композитной индустрии.

Мы предлагаем вакуумные пленки различной ширины, а также многослойные, разделительные пленки, жертвенные ткани, дренажное волокно, вакуумные шланги и штуцера, герметизирующие жгуты, резину, материалы для композитной оснастки для автоклавных процессов, вакуумной пропитки и wet lay-up.

Компания «Airtech» сертифицирована по стандартам ISO 9001-2008 и EN/AS 2009-2013.

**XXI Международная научно-техническая конференция:  
«Конструкции и технологии получения изделий  
из неметаллических материалов»**

Уважаемые коллеги!

Приглашаем вас принять участие в XXI Международной научно-технической конференции, которая состоится на базе Государственного научного центра Обнинского научно-производственного предприятия «Технология» по адресу: г. Обнинск, Киевское шоссе, 15

Тезисы докладов будут опубликованы в сборнике.

**Основные тематические направления:**

1. Полимерные композиционные материалы и конструкции.
2. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов.
3. Керамические материалы и конструкции.
4. Стекло и оптические покрытия.
5. Управление инновационными процессами.

*Официальные языки конференции – русский и английский.*

**Контактные данные:**

249031, г. Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе, 15

ОАО «ОНПП «Технология»

Тел. (48439) 9-68-54 – Кузнецова Антонина Александровна

Тел. (48439) 9-67-72 – Ершова Наталья Ивановна

Факс: (48439) 6-45-75

E-mail: [patent@technologiya.ru](mailto:patent@technologiya.ru)







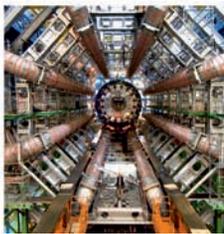
**Ростех**  
*РТ-Химкомпозит*



Обнинское научно-производственное предприятие

**"Технология"**

Государственный научный центр РФ



**Комиссар Олег Николаевич**  
**генеральный директор,**  
*кандидат технических наук,*  
*академик РИА,*  
*член SAMPE*



Государственный научный центр Российской Федерации ОАО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», образованное в 1959 году, с 2010 года входит в состав холдинга «РТ-Химкомпозит» Государственной корпорации «Ростех».

Предприятие относится к числу крупных научно-производственных центров России, занимающих передовые позиции в области создания высококачественной наукоемкой продукции для авиационной, ракетно-космической техники, транспорта и других отраслей промышленности.

Основные виды деятельности - проведение прикладных исследований и инновационных разработок в области создания новых материалов, уникальных конструкций, технологий, серийного производства продукции из полимерных композиционных, керамических и стеклообразных материалов.

Глубокие исследования в области технологии полимерных композиционных материалов позволяют разрабатывать и производить углепластиковые оболочки головных обтекателей, ступеней ракет-носителей; размеростабильные конструкции и высокоточные панели систем терморегулирования космических аппаратов; интегральные агрегаты фюзеляжа, крыла, хвостового оперения самолетов; звукопоглощающие конструкции для авиационных двигателей.

«ОНПП «Технология» проводит комплексные исследования и разработку радиопрозрачных материалов с характеристиками, сравнимыми с зарубежными аналогами; разработку и производство носовых радиопрозрачных обтекателей для гражданских самолетов и вертолетов, радиопрозрачных укрытий, деталей радиотехнического назначения.

Достижения предприятия в области разработки конструкций и технологий производства стеклообразных материалов позволяют обеспечить современные требования к остеклению воздушного и наземного транспорта по весовым, прочностным, оптическим, противообледенительным и другим функциональным характеристикам.

Создание новых функциональных полимерных материалов, сотовых наполнителей, препрегов, технологий их производства является важным конкурентным преимуществом предприятия.

Высокое качество разрабатываемой и серийно выпускаемой продукции гарантировано наличием на предприятии системы менеджмента качества ГОСТ ISO 9001-2011, а соответствие международным аэрокосмическим стандартам AS/EN 9100 подтверждено сертификатом Bureau Veritas.



## **Миссия**

Формировать будущее в области создания материалов и конструкций для высокотехнологичных отраслей промышленности.

## **Видение**

Ведущий в мире центр компетенций в области исследования, разработки производства конструкций из полимерных композитов, керамики и стекла, предоставляющий разработчикам современной техники возможности кардинального улучшения эксплуатационных свойств своей продукции.

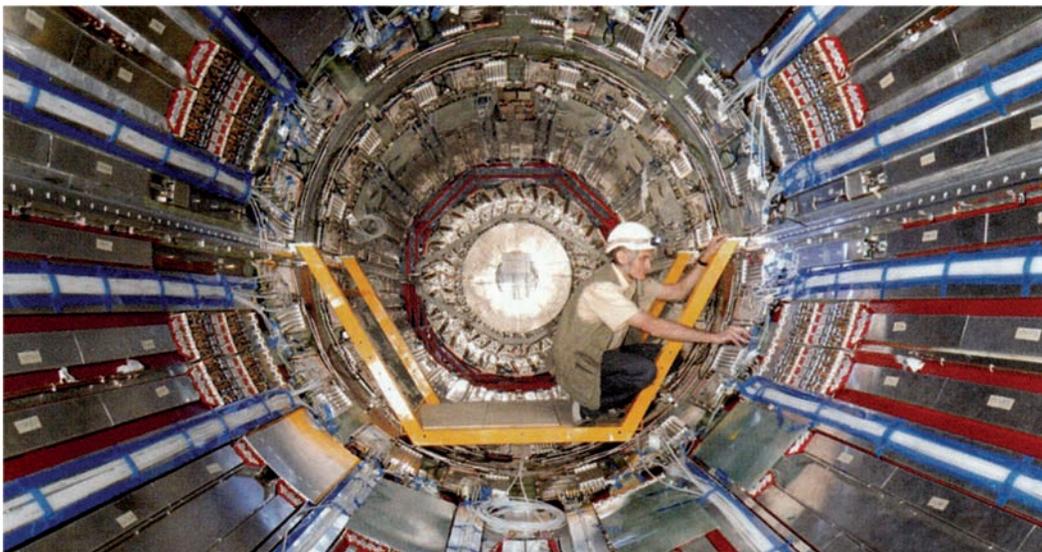
## **История**

Обнинское научно-производственное предприятие “Технология” основано в 1959 году. Статус Государственного научного центра Российской Федерации присвоен в июне 1994 года Указом Президента Российской Федерации №939 от 22 июня 1993 года “О Государственных научных центрах Российской Федерации”.

В 2011 году ФГУП ОНПП “Технология” преобразовано в открытое акционерное общество и в настоящее время входит в состав холдинговой компании ОАО “РТ-Химические технологии и композиционные материалы государственной корпорации “Ростехнологии”.

ОНПП “Технология” относится к числу крупных государственных научных центров России, определяющих научно-техническую политику в области создания высококачественной наукоемкой продукции для авиационной, ракетно-космической, военной техники и вооружения.

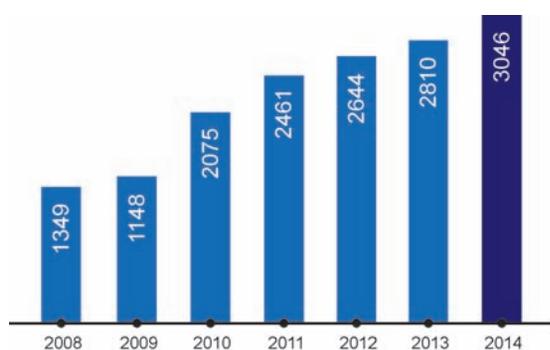
Основные виды деятельности центра — проведение научных прикладных исследований и инновационных разработок в области создания новых материалов, уникальных конструкций, технологий, серийного производства продукции из полимерных композиционных, керамических и стеклообразных материалов, в т.ч. с использованием нанотехнологий и наноматериалов. За заслуги в создании авиационной техники в 1985 году предприятие награждено орденом Трудового Красного Знамени.



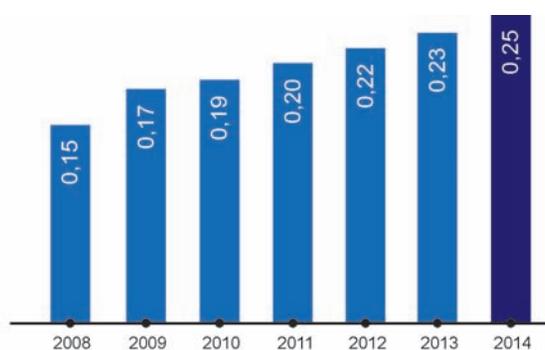
## Инновации - на шаг впереди

Инновационная деятельность предприятия направлена на проведение опережающих прикладных исследований, результаты которых в короткие сроки внедряются в реальную продукцию и способствуют повышению ее конкурентных качеств. Тесное сотрудничество с отечественными предприятиями-разработчиками техники, а также хорошее знание уровня новейших разработок зарубежных компаний, позволяет предприятию уверенно прогнозировать тенденции развития и совершенствования технологий и изготовления наукоемкой продукции высоко ответственных узлов и деталей из полимерных композиционных материалов.

Предприятие обладает уникальной научноисследовательской, экспериментальной и производственной базой, высококвалифицированными научными кадрами. За время существования предприятия разработано свыше 1000 материалов, технологических процессов и изделий, внедренных непосредственно в производство для улучшения эксплуатационных показателей продукции и повышения её конкурентных преимуществ.



Выручка по договорам НИОКР в расчете на одного сотрудника (тыс.рублей/чел.)



Число объектов интеллектуальной собственности в расчете на одного научного сотрудника

