

XXIII международная
научно-техническая конференция

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

Тезисы докладов

Обнинск 2024

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

Секция I	КЕРАМИКА СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ
Секция II	ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ
Секция III	СТЕКЛО И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ
Секция IV	УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ И ИНФОРМАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

В рамках конференции проводятся круглые столы:

**УСЛОВИЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ НА
ИННОВАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА. РАЗВИТИЕ В УСЛОВИЯХ
ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ**

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ I

КЕРАМИКА СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

В.И. Колпаков, А.Л. Галиновский, М.И. Абашин, З.С. Терентьева Диагностика конструкционной керамики на основе нанопорошка бемита	26
Ф.Ф. Галиев, И.В. Сайков, К.С. Перваков, В.А. Власенко, М.И. Алымов Применение метода горячей газовой экструзии для получения стержней на основе MgV_2 в стальной оболочке	28
А.М. Поскотинова, Б.Л. Красный, К.И. Иконников, А.Л. Галганова, Д.И. Вершинин, О.И. Родимов, Д.Д. Бернт, А.С. Сизова Получение крупноформатных корундовых огнеупоров повышенной плотности с использованием виброформования и технологии соспекания	30
А.В. Медведев, М.Я. Гофин Прошивные маты из кварцевых материалов низкой плотности	32
М.А. Трубицын, Н.А. Воловичева, В.В. Лисняк, В.И. Кузин, Н.А. Морозова, Г.П. Зайцев Отечественный реактивный глинозем СМАЛОКС-М как перспективное сырье для производства плотной корундовой керамики	34
С.В. Резник, П.В. Просунцов, Р.А. Миронов, М.О. Забейжайлов Расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование теплопроводности высокопористых материалов с наполнителем из аэрогеля	36
Н.Е. Шер, Г.И. Куликова, М.К. Алексеев, И.Н. Бизин, Д.В. Харитонов Применение микропорошков электрокорунда для получения керамических материалов	38
М.М. Новиков, М.А. Марков, С.А. Черобыло, О.С. Антонова, И.В. Фадеева, А.Б. Лисафин Изготовление керамических изделий сложной геометрической формы с помощью аддитивного производства	40
Е.А. Балабанова, Н.Г. Тюрнина, З.Г. Тюрнина, А.В. Тумаркин Синтез и свойства керамик на основе системы $StO-Al_2O_3-SiO_2$ для получения высокотемпературных материалов с улучшенными электрическими свойствами	42
П.В. Дякин, Ю.Е. Пивинский, С.В. Вихман ВКВС высокоглиноземистого состава и керамобетоны на их основе	44
М.В. Корнюшин, Ю.Д. Ивакин, А.А. Холодкова, А.В. Смирнов Исследование процесса холодного спекания оксидной керамики	46

<i>Т.О. Оболкина, С.В. Смирнов, М.А. Гольдберг, Д.Р. Хайрутдинова, О.С. Антонова, Д.А. Уткин, С.М. Баринов, В.С. Комлев</i> Материалы на основе диоксида циркония для аддитивного производства изделий	48
<i>А.С. Смирнов, Н.А. Грибченкова, К.Г. Сморгачев, А.С. Алиханян</i> Термодинамика парообразования системы $ZnO-WO_3$ по данным высокотемпературной масс-спектрометрии	50
<i>В.В. Дубов, П.В. Карпюк, И.Ю. Комендо, А.Г. Бондарев, М.В. Коржик, В.А. Пустоваров</i> Влияние ионов-активаторов на сцинтилляционные характеристики прозрачной керамики, полученной на основе сложных оксидов структурного типа граната	52
<i>Е.А. Кораблева, Р.А. Пимкин, А.А. Анашкина, А.А. Улановский</i> Получение керамических материалов на основе оксида гафния и изделий на их основе для высокотемпературного применения	54
<i>А.В. Уткин, Я.М. Шершов, Р.А. Орбант, М.А. Голосов, Д.А. Банных, Н.И. Бакланова</i> Керамоматричные композиты на основе карбида кремния и диборида циркония, армированные непрерывным волокном, полученные методом предкерамических препрегов	56
<i>С.П. Буякова, Ю.А. Мировой, А.Г. Бурлаченко, А.С. Буяков, В.В. Шмаков</i> Увеличение трещиностойкости керамик через организации синергетического действия диссипативных механизмов	57
<i>А.Г. Бурлаченко, С.П. Буякова</i> Кинетика залечивания высокотемпературных композиционных материалов ZrB_2-SiC	59
<i>А.С. Буяков, В.В. Шмаков, С.П. Буякова</i> «Композит в композите» – подход к увеличению механических параметров через управление структурой на примере системы ZrB_2-TaB_2-SiC	60
<i>Ш.Ш. Шабанов, Г.Д. Кардашова</i> Свойства керамических материалов $SiC-NbC$	61
<i>М.В. Репина, В.В. Суслин, Ю.Д. Ходжаев</i> Методы измерения температуры выше 2000 °С в вакуумно-углеродной агрессивной среде и управления радиационным нагревом элементов конструкций ЛА	63
<i>Б.Л. Красный, К.И. Иконников, М.А. Вартамян, Д.Д. Бернт, О.И. Родимов, А.Л. Галганова, А.С. Сизова, А.М. Поскотинова</i> Влияние температуры обжига и количества кордиерит-сподуменового связующего на физико-механические свойства пористой керамики на основе карбида кремния	65

Л.П. Руденко, В.И. Румянцев, С.В. Агафонов, О.Н. Булатов Технология режущего тугоплавкого композиционного материала на основе кубического нитрида бора со связкой из соединений титана	67
Д.А. Дюскина Получение керамических изделий сложной геометрии из реакционно-спеченного карбида кремния	69
М.А. Мезенцев, Б. Мыктыбеков, Д.С. Пальчиков, А.А. Луппов, Д.В. Афанасьев, С.В. Воробьев Исследования экспериментальных методов испытания и определения свойств керамических композиционных материалов	70
А.Е. Ершов, Т.С. Строганова, Д.В. Прохоров, И.М. Шмытько Получение пористых биоморфных C/HfC/Hf ₂ SnC и C/HfC керамических материалов путем инфильтрации гафния через расплав олова	72
Е.Б. Кашкаров, А.В. Абдульменова, Д.Г. Кроткевич Разработка ламинированных металлокерамических композитов из прекерамических бумаг на основе МАХ-фазы Ti ₃ Al(Si)C ₂ и тугоплавких металлических фольг	74
Г.Д. Кардашова, Г.К. Сафаралиев, С.М. Магомедов, А.Р. Абдуллаев Исследование взаимосвязи в ряду «состав и параметры SPS спекания – плотность и свойства керамики на основе SiC»	75
Ю.М. Михайлов, В.В. Алешин, А. В. Бакешко, В.С. Смирнов Получение специальных композиционных керамических материалов в волне горения	77
В.В. Котунов, А.Е. Ливанов, Ю.В. Усачев, И.Ю. Усачев Исследования возможностей инновационной технологии получения субмикронных порошков карбида кремния в вакууме	79
Н.А. Грибченкова, А.С. Смирнов, А.С. Алиханян Кнудсеновская эффузионная масс-спектрометрия для исследования термодинамики парообразования керамических систем	80
Е.А. Башкиров, А.Ю. Потанин, Ю.С. Погожев, С.И. Рупасов, Е.А. Левашов Перспективная технология получения функциональной керамики на основе МАВ-фазы Fe ₂ AlV ₂ , обладающей магнитокалорическим эффектом вблизи комнатной температуры	81
В.В. Загоржевский, И.В. Шибakov, В.Э. Лорян Влияние ZrO ₂ на состав оксидных фаз при СВС композиций Si ₃ N ₄ -Yb ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄ -Y ₂ O ₃	83
Н.К. Георгиу, Е.С. Жукова, А.И. Жмурин, А.И. Ганичев, М.Г. Лисаченко, М.Ю. Русин Механические свойства спеченного нитрида кремния с добавкой Yb ₂ O ₃	84

<i>А.Л. Ткачя, А.Б. Дубовский</i> Композитные материалы с магнитным наполнителем	86
<i>А.А. Холодкова, Ю.Д. Ивакин, В.Е. Базарова, И.Д. Акинъшин, Л.А. Арбанас, А.Н. Хрусталева, М.В. Корнюшин, А.В. Смирнов</i> Синтез станната кальция как компонента конденсаторной керамики	87
<i>Ю.Р. Рассолова, А.М. Мурашко, Я.Ю. Филиппов, Е.С. Климашина</i> Биорезорбируемые материалы на основе фосфатов магния, полученных с помощью метода пиролиза аэрозоля	88
<i>Н.С. Лазарев, Е.И. Соломатина, Н.А. Голубева, А.О. Забежайлов, М.Г. Лисаченко, Л.А. Плясункова</i> Разработка технологии изготовления высокотемпературной керамики на основе диборида циркония методом свободного спекания	89
<i>И.Г. Михайлов, В.С. Зайцев, А.П. Возняк, Е.И. Соломатина, А.О. Забежайлов, М.Г. Лисаченко</i> Получение керамики на основе диборида циркония аддитивным способом	91
<i>К.В. Печенкин, И.А. Антошина, М.О. Забежайлов</i> Разработка компьютерной модели процессов получения кварцевой керамики на основе экспериментальных данных	93
<i>В.С. Райлян, А.В. Терехин</i> Исследования по созданию «умных» нагревательных панелей для наземных испытаний керамических обтекателей	95
<i>А.В. Терехин, Д.В. Алексеев, С.В. Маслов</i> Разработка методики и лабораторного комплекса для определения коэффициента газопроницаемости керамических материалов	97
<i>В.С. Райлян, В.И. Фокин, А.В. Терехин, Д.А. Тетеревенков</i> Исследование источников излучения для создания установки радиационного нагрева на основе инфракрасных направленных излучателей	99
<i>Р.А. Миронов, М.О. Забежайлов, С.В. Резник, П.В. Просунов</i> Измерение теплопроводности теплоизоляционных материалов методом квазистационарного теплового режима с учетом температурной усадки	101
<i>О.В. Томчани, И.М. Зайцев, Е.М. Кашкарова, С.В. Ворвуль, О.Ш. Джумбекова</i> Теплоизоляционный материал для элементов теплоизоляции тепловых источников тока	103
<i>Б.Л. Красный, К.И. Иконников, А.С. Сизова, А.Л. Галганова, О.И. Родимов, Д.Д. Бернт, А.М. Поскотинова</i> Изготовление высокотемпературных фильтрующих элементов на основе алюмосиликатных волокон с применением разных методов сушки	105

А.Г. Налогин, А.А. Алексеев, П.Г. Петров, А.В. Цыберт, Е.С. Ермакова, В.Р. Чернышев Ферриты для СВЧ с высокой диэлектрической проницаемостью	107
Ю.А. Мировой, Н.Д. Кулагин, С.П. Буякова Оценка трещиностойкости и износостойкости композитов ZrC–C / h-BN	109
Ю.Я. Ласыченков, А.С. Нечепуренко, О.Ф. Гарипов, М.В. Ротермель Карбид бора как сырье для изготовления керамических материалов для баллистической защиты	111
В.И. Румянцев, С.В. Агафонов, О.Н. Булатов, М.В. Горбачева, М.А. Юрков, А.В. Глебов, Ф.В. Макаров Многослойная оболочка ТВЭЛ на основе волокнисто-армированных керамоматричных композиционных материалов SiC/SiC	113
Н.Р. Запотько, И.А. Кабаев Методика и стенд для контроля качества пьезокерамических элементов методом исследования их амплитудно-частотных характеристик	115
О.Ю. Сорокин, А.С. Чайникова, М.Л. Ваганова, Ю.Е. Лебедева, Н.Е. Щеголева, В.Г. Бабашов, А.В. Истомин, А.А. Луговой Керамические конструкционные, теплозащитные и теплоизоляционные материалы для высокотехнологичных отраслей промышленности	117
А.С. Протасов, М.О. Сенина, Д.О. Лемешев Модифицированный золь-гель метод получения порошков иттрий-алюминиевого граната с добавкой оксида скандия	118
В.С. Кузьмин, А.В. Мясников, А.Г. Налогин, И.А. Налогин, А.А. Алексеев, Г.Г. Щучкин, М.П. Пархоменко, Д.С. Каленов, В.В. Паришин Метрологическое обеспечение производства ферритовых и керамических материалов	120
Д.Н. Полозов, Ю.И. Тодосечук, Д. А. Бурлакова, В.М. Коломин., В.С. Горяйнов, А.Л. Курапова Практика применения отечественной системы керамики-пасты для изготовления изделий по технологии LTCC	122
Е.С. Климашина, А.К. Пупанова, Ю.Р. Рассолова, А.С. Бирюков, И.И. Преображенский, А.М. Мурашко, Я.Ю. Филиппов, В.И. Путляев 3D-печать керамических материалов из фосфатов магния, синтезированных современными методами, со специальными биомедицинскими свойствами	123
Е.А. Федорова, И.В. Фадеева, Г.А. Давыдова, И.И. Селезнева, А.В. Кнотько, Д.В. Рау Керамика с антибактериальными свойствами из трикальцийфосфата, допированная катионами стронция, гадолиния и меди	125
А.Ю. Колмогоров, О.Ю. Сорокин, М.Л. Ваганова, А.С. Чайникова Исследование зависимости насыпной плотности многофракционных смесей SiC порошков от их дисперсного состава	127

<i>Р.А. Чирков, А.Е. Жителев, В.П. Крылов, Р.А. Миронов, М.О. Забежайлов, Н.А. Горшков, В.С. Петухов, О.В. Неповинных, А.П. Шадрин</i> Специальный комплекс для исследования радиотехнических характеристик материалов и конструкций в диапазоне 4-40 ГГц	128
<i>А.Е. Жителев, Р.А. Чирков, Р.А. Миронов, М.О. Забежайлов, И.Г. Михайлов, В.С. Зайцев, А.О. Забежайлов, М.Г. Лисаченко</i> Применение моделей эффективной среды при решении задач широкополосной радиопрозрачности многослойных сложнопрофильных стенок	130
<i>Н.Н. Исакович, Д.Г. Булавко, И.Н. Вошко, А.А. Дыдо, Д.А. Кондрашов, И.С. Сурвило</i> Разведывательный приемник диапазона 1-18 ГГц	132
<i>А.В. Ворошень, А.И. Волковец, Д.А. Кондрашов, Я.В. Рошупкин, А.В. Турло</i> Способы построения устройств ближней радиолокации на основе сигналов с частотной модуляцией	133
<i>П.И. Оргиш, С.А. Горшков, В.Н. Завиженец, А.И. Волковец</i> Способ взаимной привязки передающих и приемной позиций малобазовой многопозиционной РЛС по времени, частоте и начальной фазе, устранение слепых скоростей в системах СДЦ	134
<i>Д.В. Архипенков, И.И. Забеньков</i> Алгоритмы распознавания и идентификационная матрица сигнальных портретов радиолокаторов	135
<i>В.П. Бондаренко, И.А. Захаров, М.А. Боровская, А.А. Попов, С.В. Редько</i> Измерительный гармонический смеситель в миллиметровом диапазоне длин волн	136
<i>И.В. Чегирь, П.В. Иванишин, С.А. Горшков, С.Ю. Седышев, В.Н. Завиженец</i> Формирование результирующей оценки по совокупности неоднозначных в условиях априорной неопределённости и радиоэлектронное подавление радиоэлектронных средств	138
<i>А.А. Копшай</i> Проектирования волноводного делителя мощности	139
<i>А.В. Гусинский, С.А. Лукашевич, С.С. Солонович</i> Способы построения устройств ближней радиолокации на основе сигналов с частотной модуляцией	140
<i>М.С. Орабей, А.Н. Луферов</i> Совершенствование термоэлектрического преобразователя мощности	141
<i>С.А. Габец, С.Ю. Седышев, С.В. Козлов, П.В. Иванишин</i> Адаптивный обнаружитель сигнала, оптимальный по весовому критерию	142
<i>И.И. Забеньков, С.С. Солонович</i> Синтезатор радиолокационных сигналов в диапазоне частот 1-18 (18-37) ГГц	143

<i>А.П. Белошицкий, В.Ю. Цветков, В.Т. Ревин</i> Выбор метода интерполяции для повышения пространственного разрешения радиолокационных изображений	144
<i>А.Б. Лисафин, Р.Ю. Куфтырев</i> Материалы и изделия на основе $ZrO_2-Y_2O_3$ для высокотемпературного применения	146
<i>Е.И. Чернов, Д.С. Конкин, С.В. Паршин, М.Ю. Рассадин, Л.О. Епрмян</i> Разработка узкополосных датчиков кислорода и технологии изготовления элементов их конструкции для автомобильных двигателей	147
<i>Д.С. Конкин, М.Ю. Рассадин, Е.И. Чернов</i> Разработка широкополосного датчика кислорода и технологии изготовления элементов его конструкции для автомобильных двигателей	148
<i>О.В. Лаврова, М.Е. Чернов</i> Термодинамика и процесс синтеза оксидных систем	149
<i>А.В. Кулебякин, Е.Е. Ломонова, Н.Ю. Табачкова, А.С. Числов</i> Механические свойства кристаллов ZrO_2 , частично стабилизированных Y_2O_3 , Gd_2O_3 или Sm_2O_3	150
<i>Л.В. Ермакова, В.Г. Смылова, П.В. Карпюк, О.Ю. Коваль, И.Ю. Комендо, П.С. Соколов</i> Многокомпонентные оксиды со структурой граната $(Gd,Y,Ce,Tb)_3Ga_3Al_2O_{12}$: получение прозрачной керамики стереолитографической 3D печатью	152
<i>А.А. Алексеев, А.Г. Налогин, Г.Е. Лепилов, М.О. Малышев, П.М. Ветошко, А.Н. Кузьмичев, С.А. Евстигнеева</i> Технология изготовления подложек для ЭКБ СВЧ-электроники	153
<i>Д.В. Алексеев, А.В. Терехин, В.Д. Малыгин, С.В. Маслов</i> Способ оптимизации высоковакуумной системы обезгаживания электровакуумных приборов для контроля элементов конструкций летательных аппаратов	155
<i>В.И. Румянцев, Л.Н. Кочерга, Д.М. Алешунин</i> Подходы к определению микропримесей в пиролитическом нитриде бора	157
<i>Е.С. Твердохлеб (Антонова), Н.А. Голубева, М.Г. Лисаченко, Л.А. Плясункова</i> Высокотемпературный керамический материал на основе карбида кремния с добавкой оксида эрбия	158
<i>В.В. Кирюшина, Ю.Ю. Ковалева, И.Ф. Георгиу, А.В. Корулин, Т.Е. Быкова, И.А. Антошина, М.О. Забежайлов</i> Контроль качества технологических процессов с использованием контрольных карт	159

- Н.А. Голубева, Н.И. Ершова, Л.А. Плясункова, М.Г. Лисаченко, А.С. Нечепуренко**
Исследование применимости отечественных порошков карбида бора для изготовления ударопрочной керамики 161
- Л.И. Горчакова, Ю.А. Перкин, Д.В. Харитонов**
Влияние структуры порошков природного волластонита и спекающих добавок на физико-технические свойства керамики 163
- Н.А. Грибченкова, А.С. Смирнов, А.С. Алиханян**
Побочные процессы при исследовании керамических систем по данным высокотемпературной масс-спектрометрии 165
- Д.В. Данилов, Е.В. Маслова, Е.В. Миронова, А.А. Анашкина**
Изучение влияния технологических параметров сборки на прочность клеевого соединения в системе «металл – герметик – керамика» 166
- П.В. Дякин, Ю.Е. Пивинский, С.В. Вихман**
Фазовый состав, структура наночастиц матричной системы на основе ВКВС боксита композиционного состава 168
- Я.Л. Жуковская, Д.А. Мельников, Д.С. Рюмин, И.А. Антошина, П.А. Степанов**
Разработка термостойких композиционных материалов для высоконагруженных конструкций 170
- А.А. Журавлев, К.Б. Шамшетдинов, Н.К. Георгиу, М.Г. Лисаченко**
Разработка технологии получения материала на основе спеченного нитрида кремния с добавками оксида иттрия и оксида алюминия для гибридных высокоскоростных подшипников 171
- М.О. Забежайлов, Р.А. Миронов, К.В. Клемазов, П.Ю. Якушкин**
Определение прочностных и упругих характеристик деструктурирующих материалов при высокоскоростном нагреве 173
- В.С. Зайцев, И.Г. Михайлов, А.П. Возняк, А.О. Забежайлов, М.Г. Лисаченко**
Получение реакционносвязанного нитрида кремния аддитивным методом экструзии материала и исследование его свойств 175
- О.В. Томчани, И.М. Зайцев, А.П. Шадрин**
Теплозащитные радиопрозрачные антенные укрытия из волокнистых теплоизоляционных материалов 177
- В.И. Фокин, В.С. Райлян, А.В. Терехин, Д.Е. Казарин**
Совершенствование технических средств контроля перемещений в процессе наземных теплопрочностных испытаний радиопрозрачных обтекателей 179
- В.В. Кирюшина, Т.В. Зайчук, И.А. Северенков, А.А. Анашкина, М.О. Забежайлов, М.Ю. Русин**
Современный уровень потребительских свойств керамических и стеклокерамических материалов в условиях возрастания объемов производства 181

Р.А. Миронов, П.В. Коваленко, С.Б. Воробьев, В.В. Антонов, О.В. Томчани Перспектива применения материала на основе пирогенного диоксида кремния в теплозащитных экранах ЛА	183
В.П. Крылов Сравнение погрешностей измерения диэлектрических свойств твердых материалов на сверхвысоких частотах различными резонансными методами	185
Г.Б. Куншина, И.В. Бочарова Высокотемпературные сложнооксидные керамики с литий-ионной проводимостью	187
А.И. Богданов, С.Ю. Курочкин, В.И. Румянцев Новый композиционный материал твердый сплав-графит для производства трибологической продукции	188
В.Д. Малыгин, М.Ю. Русин, А.В. Терехин Технологические особенности изготовления ДТП для высокотемпературных испытаний керамических изделий	189
А.В. Медведев, С.М. Кубахов, А.Н. Прасолов, В.В. Кирюшина, С.Б. Воробьев, В.В. Антонов Обеспечение высокого уровня надежности радиопрозрачных элементов защиты антенных устройств	191
С.М. Кубахов, М.Ю. Русин, А.Н. Хора, Д.А. Рогов, С.Б. Воробьев, А.В. Медведев Конструкция антенного обтекателя с увеличенной несущей способностью	192
С.И. Паскробка, В.Ю. Цветков, В.И. Брилевский Оценка влияния траектории развертки на сверхразрешение радиолокационных изображений	194
Т.К. Толочко, А.В. Сайков, А.А. Салява, Е.А. Скачок, И.В. Чернов, О.В. Руховец, А.А. Попов, С.М. Лапшин, В.В. Кузьма, Е.С. Кедо, М.М. Касперович, К.С. Ерохин Алгоритмы калибровки векторных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн	196
С.С. Гурский, М.С. Свирид, В.В. Иванец, В.В. Коледа, Д.А. Лисов Автоматизированная система тестирования радиотехнических систем	197
А.С. Волынец, Т.К. Толочко, М.М. Касперович, Н.А. Певнева, А.Е. Байко, М.А. Гончарик, А.Н. Кузюков, С.М. Лапшин, И.В. Чернов, Ю.В. Шевалдина Метрологическое обеспечение средств измерений миллиметрового диапазона длин волн	198
Н.А. Михалевская, М.К. Алексеев, А.А. Анашкина, Г.И. Куликова Термостойкий керамический материал кордиеритового состава	200

В.И. Антипов, А.Г. Колмаков, Ю.Э. Мухина, Е.Е. Баранов Получение наноструктурных керамических порошков для дентальной имплантологии	202
В.И. Антипов, А.Г. Колмаков, Ю.Э. Мухина, Е.Е. Баранов Изготовление неагломерирующихся керамических нанопорошков методом ультразвукового распылительного пиролиза	204
И.Б. Опарина Спекание прозрачной керамики на основе оксинитрида алюминия	206
А.И. Огарков, И.А. Ковалев, Г.П. Кочанов, А.В. Шокодъко, Д.П. Шорников, Б.А. Тарасов, С.В. Шевцов, Л.О. Львов, Е.А. Шокодъко, А.Н. Рогова, А.А. Половинкин, С.С. Стрельникова, А.С. Чернявский, К.А. Солнцев Разработка фундаментальных основ нового технологического процесса синтеза нитридной керамики на основе твердых растворов Zr–U, Zr–Nb	207
О.Д. Пашков, Д.В. Харитонов, Д.А. Михалевский Влияние гранулированного наполнителя на скорость набора при шликерном литье	208
Ю.А. Перкин, Д.В. Харитонов, Д.А. Михалевский, Л.И. Горчакова Интенсификация шликерного литья в технологии получения специальных волластонитовых огнеупоров	209
Р.А. Пимкин, Е.А. Кораблева, Д.В. Харитонов Исследование закономерностей получения газоплотных твердых электролитов в системе ZrO ₂ –Y ₂ O ₃ –Sc ₂ O ₃ для твердооксидных топливных элементов	211
В.В. Антонов, С.Б. Воробьев, П.В. Коваленко, В.Г. Кулиш, С.И. Латыш, М.Е. Полетаев Разработка головного радиопрозрачного обтекателя для высокоскоростного летательного аппарата	213
Я.Г. Дятлова, Н.П. Булатова, А.И. Овсиенко, С.Ю. Бойков, В.И. Румянцева Технология спеченного карбида бора	215
А.А. Рамазанова, В.В. Кирюшина Анализ стабильности технологического процесса производства изделий из керамических материалов с помощью контрольных карт альтернативного вида	217
А.П. Рыжов, И.В. Фадеева, А.В. Кнотько, Н.А. Андреева, И.И. Селезнева Керамика из трикальцийфосфатов, допированных марганцем и стронцием	219
А.С. Смирнов, Н.А. Грибченкова, К.Г. Сморгачев, А.С. Алиханян Высокотемпературное масс-спектральное исследование термодинамики парообразования системы ZnO–Nb ₂ O ₅	221
Е.И. Соломатина, Н.А. Голубева, Н.С. Лазарев, М.Г. Лисаченко, Л.А. Плясункова, А.С. Нечепуренко Исследования по разработке горячепрессованного материала на основе нитрида бора	222

Л.В. Судник, А.Р. Лученок, А.Ф. Ильющенко, Н.В. Гапоненко, А.В. Семченко Ударноволновое нагружение в производстве комплектующих магнетронных распылительных систем	224
И.Ю. Тимохин, Е.А. Кораблева, Д.В. Харитонов Исследование влияния механической обработки на физико-механические свойства керамики на основе диоксида циркония	226
М.М. Новиков, И.В. Фадеева, О.С. Антонова, И.И. Селезнева, Н.М. Марков Керамика из трикальцийфосфата, полученная с использованием аддитивных технологий	227
Н.В. Филатова, Н.Ф. Косенко, М.С. Малоиван Алюмооксидные композиционные материалы на основе бентонитфосфатной связки	229
И.А. Шибаков, В.В. Загоржевский Влияние оксида скандия и оксида лютеция на фазовый состав СВС композиций на основе нитрида кремния	230
Л.Н. Кочерга, Д.М. Алешунин, Я.А. Назарова, А.А. Берг, А.А. Шелемей Пиролитический нитрид бора в виде трубок для нагревателей эмиссионных узлов	231
С.И. Минин, А.В. Терехин, Д.И. Чулков, А.А. Филатов Совершенствование применяемых и разработка новых методов и специальных технических средств для неразрушающего контроля изделий из керамических и полимерно-композиционных материалов	233
С.И. Минин, А.В. Терехин, Д.И. Чулков, А.А. Филатов Способ контроля высоты поверхностных трещин в изделиях из конструкционной керамики при помощи дифракции ультразвуковых волн	235
А.В. Терехин, С.И. Минин, Д.И. Чулков, А.А. Филатов, В.С. Разкевич Разработка комбинированного ультразвукового метода контроля многослойных клеевых соединений узла заделки РПО высокоскоростных ЛА	237
А.В. Терехин, В.С. Райлян, В.И. Фокин, А.С. Усеня, К.В. Корольков Автоматизированная система теплопрочностных испытаний керамических изделий на основе отечественных модулей	239
В.И. Фокин, А.В. Терехин, В.С. Райлян, М.Ю. Русин Исследование высокотемпературных поглощающих покрытий для наземных тепловых испытаний элементов конструкций высокоскоростных летательных аппаратов на стендах радиационного нагрева	241
С.А. Мешков, К.А. Шошин, В.В. Антонов, С.Б. Воробьев, И.Е. Суханов, М.Г. Лисаченко Пресс-форма для формования заготовок лопаток турбин перспективных газотурбинных двигателей	243

Е.Б. Брызгина, Е.Н. Павлова

Технология изделий из частично стабилизированного диоксида циркония для импортозамещающих комплектующих твердоэлектролитных сенсоров

244

СЕКЦИЯ II

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ

А.А. Склезнев

Применение несущих анизотридных конструкций на основе технологии мокрой автоматизированной намотки в силовых элементах летательных аппаратов

246

В.В. Якунин

Выкладка композитных изделий в точный размер

247

И.А. Беспалов

Современные композитные материалы в бронезащите

248

М.В. Киселев, А.М. Киселев

Разработки ООО НПО «Программируемые композиты» в области 3D ткачества

250

Д.А. Стекольников, О.Г. Лайкова

Влияние остаточных температурных напряжений на прочность композитных элементов конструкций

252

А.М. Думанский, М.А. Алимов

Методы построения определяющих соотношений для вязкоупругих сред

253

А.А. Алексеев, А.А. Климов, М.Ю. Корниенко, А.А. Носов

Влияние процесса уплотнения на свойства полимерных композиционных материалов

254

Н.В. Степанов, А.А. Смирнов, В.О. Петров

Конструктивно-технологические особенности при проектировании и изготовлении локальных зон усиления в крупногабаритных трехслойных изделиях из полимерных композиционных материалов

255

О.А. Белов, А.П. Белоглазов, А.В. Верстаков, А.Г. Еремин

Создание крупногабаритных ферм, разворачиваемых в космическом пространстве из трансформируемых углепластиковых элементов

257

Д.А. Волков, А.В. Горлов, А.В. Осауленко, И.В. Поздеева, А.А. Шаяхметов

Разработка технологии изготовления панели прирабатываемой сложной геометрической формы ДУ ПД-14 с подбором материалов отечественного производства

259

Г.С. Кулагина, Г.Ф. Железина, Н.А. Соловьева, А.Ч. Кан, Д.С. Кондрашова, Т.Р. Аюпов

Органопластики на основе арамидных волокон, технологические особенности применения при изготовлении элементов конструкций

260

П.В. Корниенко, В.П. Луконин Новые разработки АО «НИИ полимеров» в области полимерных материалов	262
В.Н. Кондратьев Применение конструкционных клеев ИТЕКМА в авиакосмической отрасли	264
П.А. Журавлев, М.А. Солдатов, Е.В. Миронова, А.В. Будаев Лакокрасочные покрытия на основе полиорганосилоксанов, модифицированных синтетическими термостойкими низкомолекулярными каучуками	266
А.И. Старков, К.Е. Куцевич Клеевые препреги пониженной горючести	268
В.Н. Мосиук, М.В. Ерёмин, О.В. Томчани Влияние режима отверждения на физико-механические свойства бисмалеимидного пленочного клея	270
Н.Б. Арзуманова, Н.Т. Кахраманов Влияние диоксида титана на течение расплава полипропиленовых композитов, наполненных скорлупой фундука	272
Д.А. Волков, А.В. Горлов, И.В. Зельнева, Е.А. Хандорина, С.А. Гусев Опыт отработки нового термостойкого ПКМ на основе фталонитрильного связующего на примере детали авиационного двигателя	274
А.Н. Сафонов, И.А. Шалагинова, П.В. Корниенко Конструкционные полиглутаримидные пенопласты на основе (со)полимеров акрилонитрила и метакриловой кислоты	275
О.С. Морозов, А.В. Иванченко, В.Н. Кондратьев, А.А. Кондратьева, М.С. Лобанова, А.В. Кепман Разработка полимерных композиционных материалов с фталонитрильной матрицей для длительной эксплуатации изделий при 300 °С	276
М.С. Иванов, Н.Г. Павлюкович Термопластичный полимерный композиционный материал на основе полиэфирэфиркетона для термоформования деталей мотогондолы авиационного двигателя	278
Е.Е. Беспалова Технологии получения термопластичных полимерных композиционных материалов на основе углеродного волокна и их применение	280
А.А. Степашкин, Н.Ю. Никитин Регрессионное и нейросетевое моделирование предела прочности термопластичных однонаправленных стержней «углеродное волокно – полисульфон»	282
Е.А. Рогожина, А.В. Чернов Исследование возможности создания композитных конструкций с программируемым трикотажным армированием	284

<i>Н.М. Демина, А.Н. Трофимов, К.Э. Разумеев</i> Химическая обработка поверхности стеклянных волокон для оптимизации межфазного взаимодействия в стеклопластике	286
<i>В.С. Анишин, А.А. Политико, А.В. Пузанов</i> Сферопластики пониженной плотности для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов	288
<i>П.И. Богомолов, П.А. Корнев</i> Оценка эффективной теплопроводности ворсовых теплозащитных материалов на основе углеродных волокон	289
<i>Н.С. Татаринцев, К.К. Ибришев</i> Изучение особенностей распространения объемных ультразвуковых волн в слоистых углепластиках с использованием моделирования методом конечных элементов	290
<i>М.А. Капустянская, А.В. Коваленко, Н.К. Сидельников</i> Разработки НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ в области полимерных синтактных заполнителей-сферопластиков для местного упрочнения участков сотовых конструкций	292
<i>С.А. Чугунов, А.Н. Корнейчук, Н.В. Рыбакова, Е.В. Романова</i> Разработка технологии изготовления облегченного стеклопластикового сотового заполнителя для панелей шумоглушения двигателя Д-18Т	293
<i>П.В. Серый, С.Н. Трошкин, В.Л. Лебедев, В.Ю. Косульников, А.А. Ломзакова</i> Разработка легковесного заполнителя для подводной техники с глубинами эксплуатации до 3 км	294
<i>Е.В. Романова, Н.В. Рыбакова, А.П. Шадрин, А.Н. Корнейчук</i> Исследование влияния углеродных наночастиц на радиотехнические свойства стеклопластиковых сотовых заполнителей	295
<i>В.А. Жуков, А.С. Магрицкий, Г.М. Разина</i> Модификация полимерного заполнителя ПЗ-2 с целью увеличения весовой эффективности летательных аппаратов	296
<i>А.Е. Кованов</i> Технологические особенности механической обработки сотового заполнителя и исследование их влияния на качество сотовой структуры	298
<i>С.В. Кузнецов, А.В. Мамонов, Д.Ю. Русаков, В.А. Чернушин</i> Экспресс-метод оценки состояния сотовых конструкций авиационного назначения после ударного воздействия	299
<i>И.Г. Атрощенко, П.А. Степанов, В.В. Антонов, М.Н. Кордо, И.И. Клюева, К.В. Печенкин, Л.А. Плясункова, П.Ю. Якушкин</i> Композиционный материал на основе алюмоборфосфатного связующего для изделий радиотехнического назначения	301

<i>А.А. Баранов, Г.С. Шуль, А.А. Ширко, А.П. Шадрин, Р.М. Гуськов</i> К вопросу разработки стеклопластиковых радиопрозрачных укрытий мобильных радиолокационных станций	302
<i>П.А. Степанов, В.П. Крылов, К.В. Печенкин, Р.А. Чирков, А.П. Шадрин, П.А. Андреева</i> Влияние лакокрасочного покрытия на радиотехнические характеристики полимерно-композиционных радиопрозрачных изделий различного направления	304
<i>А.В. Терехин, С.И. Минин, Д.И. Чулков, А.А. Филатов</i> Исследования по разработке методики активного тепловизионного контроля расслоений в стеклопластиковых элементах конструкций летательных аппаратов	306
<i>П.Ю. Якушкин, Р.А. Миронов, М.О. Забейжайлов, К.В. Клемазов</i> Определение и прогнозирование механических и теплофизических характеристик композиционного материала на основе фенолформальдегидного связующего после начала деструкции	308
<i>А.В. Бакланов, П.Н. Гордеев, С.В. Лисовский, В.Н. Личманова, А.Г. Налогин, С.В. Сальников, Н.А. Шарапов</i> Полимерные фотолюминесцентные плёнки для светодиодов	310
<i>Н.В. Степанов, А.Ю. Сеницын, Е.Ю. Куприкова, В.И. Смирнова</i> Разработка и оптимизация технологии выкладки обшивок из ПКМ обечайки ракетоносителя «Ангара»	312
<i>В.А. Проценко, А.А. Степаненко, В.В. Кирюшина, П.А. Степанов</i> Обеспечение технологической надежности изделий из ПКМ, изготавливаемых методом ППД	314
<i>М.А. Кольцов, И.В. Панпурина</i> Разработка метода обеспечения высокого качества поверхности крупногабаритных деталей авиационного назначения из ПКМ, формируемых при повышенной температуре	315
<i>С.В. Никонов, В.В. Батраков</i> Применение аддитивных технологий при изготовлении оснастки для сетчатых конструкций	316
<i>Е.А. Пузырецкий, Л.П. Шабалин, Д.В. Савинов, Н.Ф. Салихов</i> Комплекс технологической оснастки и программно-аппаратных средств для создания и уточнения валидационного базиса технологических процессов изготовления изделий из композиционных материалов	318
<i>В.В. Фоменко, М.А. Кольцов, А.В. Серебряков, Е.А. Лизунова</i> Разработка комбинированной многоцветной цулаги переменной жесткости для формирования деталей сложной конфигурации из ПКМ	320

<i>Н.В. Корейво, В.А. Стриканов, Е.Д. Филин</i> Исследование применения модельного пластика и описание особенностей его использования в процессе изготовления мастер-модели	321
<i>А.Д. Ахмадишин</i> Метрологическое сопровождение при проектировании, изготовлении и эксплуатации формообразующей оснастки с применением различных высокоточных систем и методов измерения	322
<i>А.О. Половый, Н.В. Матюшевский, Н.Г. Лисаченко</i> Сравнительный анализ диаграмм деформирования при сдвиге в плоскости листа однонаправленных и ортогонально-армированных полимерных композиционных материалов	324
<i>А.О. Половый, Н.Г. Лисаченко</i> Аппроксимация кривых деформирования при сдвиге в плоскости листа однонаправленных и ортогонально-армированных полимерных композиционных материалов	326
<i>Е.А. Номеровский</i> Систематическое применение метода Цифровой корреляции Изображений (ЦКИ) в разработке и сертификации авиационных материалов и конструкций	328
<i>Е.И. Фомина</i> Наследственное определяющее соотношение для однонаправленных углепластиков при малом числе циклов нагружения	329
<i>Н.В. Матюшевский, Д.И. Савельев, А.Г. Попов</i> Анализ и выбор методов определения деформаций при проведении механических испытаний стандартных образцов из ПКМ	331
<i>И.В. Гуцко, С.А. Тимошенко</i> Оборудование автоматизации трансферных технологий в композитной отрасли (производство ПКМ) для процессов инъекции (RTM), вакуумной инфузии, пропитки, намотки, пултрузии	333
<i>С.Ю. Тузова, А.А. Полякова, Е.О. Клочкова</i> Патент как оружие в конкурентной борьбе	335
<i>Г.А. Галанов, Д.Ю. Русаков</i> Определение достоверности алгоритма безэталонной настройки акустического дефектоскопа ИД-92МН v.2	336
<i>Д.И. Савельев, А.Г. Попов, М.С. Гурьева</i> Расчетно-экспериментальное обоснование оптимальной конфигурации стандартного образца на растяжение для аттестации обшивок	338
<i>А.Д. Байрамгельдыев, Н.В. Шишканов, Е.Д. Филин, А.И. Ирошников</i> Преимущества использования ультразвуковой резки на станках ЧПУ	339

<i>И.Н. Вихарева</i> Получение гибридного сополимера и исследование его физико-химических характеристик	340
<i>А.Ф. Мустафина, Н.М. Демина</i> Определение химического состава стеклянных волокон для прогнозирования свойств стекловолоконистого армирующего материала	342
<i>А.А. Курятин, Д.В. Ловков</i> Оптимизация процесса толщинометрии крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов с применением цифровых алгоритмов обработки и регистрации результатов контроля	343
<i>А.А. Алпатов, В.В. Молоканов, А.В. Крутилин, П.П. Умнов, Т.Р. Чуева, Н.Д. Бахтеева, Н.В. Гамурар, Е.В. Тодорова</i> «Умные» композиты на основе аморфных ферромагнитных микропроводов	345
<i>А.В. Денисов, Д.А. Стекольников, О.Г. Лайкова, Н.А. Люлина, В.А. Минеева</i> Термостойкий композиционный материал на основе хромалюмофосфатного связующего для элементов летательных аппаратов	347
<i>Ю.В. Зорин, А.П. Богданов, Д.А. Волков, М.А. Кольцов, В.В. Семкин, В.В. Фоменко</i> Разработка конструктивно-технологических решений по автоматизации процесса изготовления крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов авиационного назначения	349
<i>В.И. Румянцев, С.В. Агафонов, О.Н. Булатов, М.А. Юрков, Г.А. Пономаренко, А.А. Федоткова</i> Антифрикционные углепластики для узлов трения насосно-компрессорной техники	351
<i>О.Л. Петрова, Н.Г. Лисаченко, И.Е. Перова, А.Г. Попов</i> Исследование прочностных и упругих характеристик алюминиевого сотового наполнителя различной плотности	353
<i>Н.Х. Гюльмагомедов, К.С. Харлампьев, Д.А. Евсеев</i> Влияние клеевого соединения на радиотехнические характеристики антенных обтекателей	354
<i>А.Ф. Ильющенко, С.Г. Барай, А.И. Лецко, Ю.А. Реутенок, Н.В. Насонова</i> Радиопоглотители на основе полимерных композитных сотовых сэндвич структур	356
<i>А.Е. Константинов</i> Применение герметизирующих материалов Абрис А при производстве изделий из ПКМ	358
<i>А.П. Белоглазов, М.А. Горшенин, В.Д. Ерошенко, Н.В. Меньшутина</i> Высокотеплопроводный полимерный композиционный материал на основе графита и его практическое применение	359

<i>Т.С. Гормакова, А.Н. Корнейчук, И.О. Бабкина, В.С. Волков, А.В. Бабкин</i> Исследование возможности применения фталонитрильного связующего для получения термостойких стеклопластиковых сотовых наполнителей	360
<i>Д.И. Чулков, А.В. Терехин, С.И. Минин, М.Ю. Русин, А.А. Филатов</i> Разработка способа определения глубины дефектов типа «складка» в сложнопрофильных изделиях из стеклопластиков	361
<i>М.В. Васюков, С.Б. Воробьев, А.Н. Гурьев, Т.А. Духова, С.И. Латыш</i> Конструкция антенного обтекателя с интегрированным креплением антенной аппаратуры	363
<i>Л.А. Климакова, Д.А. Волков</i> Влияние технологических дефектов в радиусной зоне на прочность композитного лонжерона	365
<i>А.М. Икаев, Д.А. Лавров, О.С. Баврина</i> Синтез пигмента для терморегулирующих покрытий	367
<i>Е.Д. Филин, А.И. Ирошников, Е.А. Троценко, Н.В. Шишканов</i> Разработка, проектирование и изготовление оснастки из полимерных композиционных материалов для крупногабаритных стрингерных панелей	368
<i>А.Ю. Сеницын, А.В. Гайворонский, А.А. Ширко, П.Г. Бабаевский, В.В. Мазур</i> Локальная межслоевая прочность при отрыве 3D-армированных прошивкой углекомпозитных материалов	370
<i>Е.И. Маслова, Л.И. Бойко, О.В. Томчани</i> Исследования по разработке электроизоляционного кремнийорганического компаунда	371

СЕКЦИЯ III

СТЕКЛО И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

<i>А.И. Непомнящих, И.А. Елисеев, А.П. Жабоедов, А.М. Федоров, В.С. Романов</i> Кварцевые концентраты на основе высокочистых кварцитов Восточного Саяна	373
<i>А.К. Лесников, П.А. Лесников, З.Г. Тюрнина</i> Формирование оптических заготовок из объемно-однородного кварцевого стекла	375
<i>А.П. Семенов, А.Д. Тамбовский, М.А. Абдулкадыров, В.Е. Патрикеев, В.Н. Кудиков, Е.В. Куракина, А.В. Маркин, Д.А. Бригаднов</i> Астроситалл и карбид кремния в производстве астрономической и космической оптики	376
<i>Д.Н. Бондалетов, Р. Ш. Насыров</i> Препарирование слитков кварцевого стекла и изготовление оптических образцов	378

- Н.Ю. Цымбалюк, Д.Н. Петрачков, Н.В. Шаталин, А.М. Розман,
О.Ф. Просовский, А.Н. Исамов, И.Н. Лёвкин**
Особенности разработки изделий авиационного остекления на основе полимерных материалов 380
- И.А. Шалагинова, П.В. Корниенко**
Перспективные направления разработки теплостойкого и термостабильного органического стекла для изделий конструкционной оптики 382
- П.Н. Чижов, Д.Н. Петрачков, Н.Ю. Цымбалюк, Д.Е. Чечин, Н.В. Шаталин,
М.Ю. Чумбаров**
Влияние способа формования поликарбонатного листа на оптические характеристики изделий авиационного остекления 383
- Д.Е. Чечин, М.П. Данилаев, М.Ю. Чумбаров, Д.Н. Петрачков**
Исследование влияния качества формообразующей поверхности на величину оптических искажений при изготовлении изделий авиационного остекления из монолитного поликарбоната 385
- Ю.Р. Шевцова, С.В. Степанов, Д.Н. Петрачков, Е.В. Кузьмина,
Ф.И. Паршин**
Огабариченное формование ориентированных органических стекол авиационного назначения 386
- С.Э. Логвинов, Д.Н. Петрачков, Е.В. Кузьмина, С.Д. Николаев**
Формирование равномерного температурного поля в изделиях остекления 387
- С.Б. Галелюк, Д.Н. Петрачков, А.А. Красильников, М.Ю. Чумбаров,
Н.Ю. Цымбалюк**
О некоторых практических аспектах испытаний остекления летательных аппаратов на прочность при соударении с птицей 389
- Н.Ю. Цымбалюк, Д.Н. Петрачков, М.Ю. Чумбаров, Н.В. Шаталин,
Д.А. Остролицкий, П.Н. Чижов**
Влияние способов крепления авиационного остекления из поликарбоната в каркасы на результат натурных испытаний по оценке динамической прочности 391
- К.С. Новикова, А.С. Купряков, Д. П. Княжев**
Инновационное умное электрохромное устройство для авиации 393
- О.Ф. Просовский, А.И. Опарин, Д.Н. Петрачков**
Развитие направления тонкопленочных покрытий в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» 394
- В.В. Азарова**
Многослойные оксидные интерференционные оптические покрытия для высокоотражающих лазерных зеркал. Метрологические особенности их создания 396
- Е.А. Игнатов, Ю.И. Машир, Б.Б. Мешков**
Градиентные прозрачные электропроводящие покрытия для изделий конструкционной оптики 397

<i>А.Ю. Буднев, Д.Н. Петрачков, О.Ф. Просовский, А.Н. Исамов, Ю.О. Просовский, В.А. Смольянинов</i>	
Методы корректировки резистивных параметров токопроводящих оптических покрытий на базе ИТО с применением источника ионов с замкнутым дрейфом электронов	398
<i>Е.О. Козлова, Н.А. Рукавичкин, А.Е. Пигалев, Н.В. Остролицкая, Ф.И. Паршин, Д.Н. Петрачков</i>	
Подбор режима упрочнения защитных стекол методом низкотемпературного ионного обмена	400
<i>Д.А. Лавров, А.М. Икаев, Д.И. Селиверстов, О.С. Баврина</i>	
Неорганическое терморегулирующее покрытие	402
<i>О.А. Синеокова, О.С. Сивохиной, Н.А. Бондаренко</i>	
УФ-отверждаемые защитно-упрочняющие покрытия для оптических кварцевых волокон	403
<i>И.Г. Полякова, Н.Г. Тюрнина, З.Г. Тюрнина, Е.О. Лушникова</i>	
Кристаллизация стекол в диборатном разрезе $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 - \text{BaO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$	405
<i>Р.А. Татьяна, Ю.И. Машир, Е.Х. Мамаджанова, Е.К. Яблонский</i>	
Исследование стекла с высоким содержанием Al_2O_3	407
<i>А.А. Бойко, Е.Н. Подденежный, М.Ф.С.Х. Аль-Камали</i>	
Золь-гель синтез оксидных неорганических материалов	408
<i>О.Ф. Просовский, Ю.О. Просовский, А.Н. Исамов, А.Ю. Буднев, В.А. Смольянинов</i>	
О методах исследования оптических констант пленок металлов	410
<i>А.Н. Исамов, Ю.О. Просовский, О.Ф. Просовский, А.Ю. Буднев, В.А. Смольянинов</i>	
Исследование оптических постоянных полупрозрачных тонких пленок алюминия, полученных методом электронно-лучевого испарения	411
<i>В.П. Тимошенко</i>	
Проектирование и экспериментальная отработка термостойких иллюминаторов орбитального корабля «Буран»	413
<i>Н.Р. Запотылько, А.В. Власов</i>	
Дилатометрические измерения в лазерной гироскопии	415
<i>Д.Г. Денисов</i>	
Когерентные методы и аппаратура контроля качества профилей крупногабаритных оптических поверхностей на основе анализа статистических характеристик рассеянного лазерного излучения	417
<i>Ю.О. Просовский, О.Ф. Просовский, Д.Г. Денисов, А.Ю. Буднев, А.Н. Исамов, В.А. Смольянинов</i>	
Отечественная бюджетная система прямого монохроматического контроля толщины наносимых оптических покрытий высокой точности	419

В.А. Смольянинов, Ю.О. Просовский, О.Ф. Просовский, А.Н. Исамов, А.Ю. Буднев, И.Н. Левкин Сравнительный анализ адгезии лакового покрытия к тонким плёнкам оксидов металлов	421
Ф.И. Паршин, Н.А. Рукавичкин, О.В. Левкина, Д.Н. Петрачков, Е.В. Кузьмина Исследование адгезии кремнийорганического герметика «Герсиласт АК-28» к силикатному и органическому стеклу	423
Е.И. Алексеева, И.Ю. Рускол, Е.В. Соколюк, А.А. Малахов, П.А. Стороженко Силиконовые компаунды для оптики	424
Н.Р. Глембовский, Д.Н. Петрачков, Н.В. Шаталин, Д.А. Остролуцкий, П.Н. Чижов, Н.В. Садкова, В.А. Роговицкий, Н.С. Скрылев Технологические аспекты нанесения клея МТК	426
А.И. Кузьмин, М.В. Воропаева, И.А. Северенков, Ф.И. Паршин Влияние модифицирующих добавок на варочные, кристаллизационные свойства и фазовые превращения при синтезе стекол в стронцийалюмосиликатной системе	428

СЕКЦИЯ IV

УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ И ИНФОРМАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

О.В. Коваль, О.Н. Комиссар, Е.А. Алешина Государственная поддержка деятельности государственных научных центров Российской Федерации	430
С.В. Баушев, А.Г. Сайбель, В.В. Ермакович Обобщенная публикационная активность и воспроизводство кадров высшей квалификации	432
Н.И. Ершова, Н.В. Горбунова, О.Н. Комиссар, О.А. Кирилец Система мотивации научной деятельности на инновационном предприятии	433
И.А. Дудов Управление интеллектуальной собственностью в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»	435
М.А. Вартамян Опыт актуализации информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям производства керамических изделия	437
А.В. Гусинский, Н.А. Певнева Подготовка специалистов по направлению «Сверхвысокочастотные системы»	439
Н.И. Ершова, О.Н. Комиссар Система управления подготовкой научных работ на соискание ученой степени кандидата наук	440

<i>В.В. Байдала, Т.Е. Раецкая</i> Методика отбора малых научно-производственных предприятий для целей научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ	442
<i>И.С. Атрохин, Н.И. Ершова</i> Управление публикационной активностью в научно-производственной организации	443
<i>Д.А. Рогов, А.Н. Прасолов, В.А. Грачев, В.В. Кирюшина, П.В. Бондаренко</i> Опыт импортозамещения на примере тестирования многофункционального программного комплекса ЛОГОС	445
<i>Д.А. Анашкин, И.С. Атрохин, А.Н. Блинов</i> Актуальность внедрения концепции бережливого производства в процесс управления научной деятельностью организации	447

Секция I
КЕРАМИКА СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Диагностика конструкционной керамики на основе нанопорошка бемита

В.И. Колпаков, **А.Л. Галиновский**, М.И. Абашин, З.С. Терентьева
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия
E-mail: galcomputer@mail.ru

Актуальность темы исследования связана с необходимостью иметь в техническом арсенале технологов методы экспресс-диагностики, которые будут возможно применять на этапе технологической подготовки производства конструкционной керамики (КК). Их отсутствие заметно усложняет отработку технологии и препятствует получению оперативной информации об эксплуатационных динамических свойствах данного материала, важность которых нельзя недооценивать.

В работе приведено сравнение результатов анализа микроморфологии сколов КК после статического и динамического воздействия. Дано обоснование эффективности ультразвуковых методов диагностики, рассмотрены перспективы его применения на практике в производстве изделий из КК. Применение этой технологии оказалось крайне актуальным при производстве изделий из композиционной конструкционной керамики (ККК). Причины этого связаны со множеством варьируемых параметров, встречающихся на всех этапах технологического процесса: дозировка компонентов керамики, метод прессования, режимы сушки и спекания.

Последние исследования показали, что повышение качества ККК возможно за счет применения в технологическом процессе на этапе подготовки шихты нанопорошка бемита ($\text{AlO}(\text{OH})$). Одним из вопросов, возникших в ходе проведения экспериментов было определение оптимального значения его концентрации в основной массе глинозема. При этом целевым ориентиром являлось повышение баллистических свойств ККК.

Традиционно для оценки этих свойств используются методы, основанные на высокоскоростном ударе твердотельного сердечника с образцом, характеризующиеся рядом недостатков, связанных, прежде всего, с затратами времени, дороговизной, трудоемкостью. Кроме того, учитывая не всегда значительные различия в динамических характеристиках ККК (твердость, пористость, прочность на изгиб, трещиностойкость и т.д.) и случайную варьируемость скорости ударника, на практике не всегда возможно объективно оценить реальное качество материала. Решение этой проблемы состоит в увеличении числа экспериментальных исследований, что связано с высокой стоимостью испытаний.

Данные недостатки практически отсутствуют в ультразвуковой диагностике (УСД). Ультразвуковое диагностирование обеспечивает сопоставимость результатов полномасштабному исследованию физико-механических свойств и ресурсно-эксплуатационным испытаниям.

По этой причине метод УСД был взят за основу для технологической подготовки производства ККК с нанодобавками бемита. В ходе проведения экспериментальных исследований были изготовлены партии образцов с различным процентным содержанием нанопорошка (от 5% до 30% с шагом в 5%).

При этом следует понимать, что при температуре около 500 °С бемит теряет кристаллизационную воду, превращаясь в безводный глинозем ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$). При дальнейшем нагревании $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ превращается в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – корунд.

В ходе проведения испытаний выявлено, что нанопорошок заполняет пространство между кристаллами основной массы порошкового материала, повышает его плотность, снижает количество пор. В конечном итоге это позволяет повысить его трещиностойкость и обеспечить более высокую динамическую прочность (при баллистических испытаниях).

Были проведены экспериментальные исследования, показывающие, что методы статических испытаний керамики и динамических (ультразвук, отстрел) неэквивалентны друг другу. Данный вывод был сделан на основе анализа микроструктуры сколов

керамических образцов после каждого из трёх видов воздействия. Выявлено, что в случае статической нагрузки структура не имеет характерных для динамической нагрузки участков смятия и долома, края кристаллов ровные, недеформированные.

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что ультразвуковое и баллистическое воздействие эквивалентны друг другу в плане картины деформации в зоне воздействия и имеют заметное отличие от случая статической нагрузки.

В результате проведенных исследований были установлены оптимальные значения концентрации нанодобавки бемита. Результаты опираются на данные о минимальном уносе массы ККК при применении УСД. Этот факт нашел свое подтверждение в результате баллистических испытаний.

На рисунке 1 показаны результаты экспериментальных данных, полученных на основе серии опытов, проведенных на ультразвуковой установке с целью определения величины уноса массы керамики после ультразвукового воздействия при различных концентрациях наночастиц в керамике.

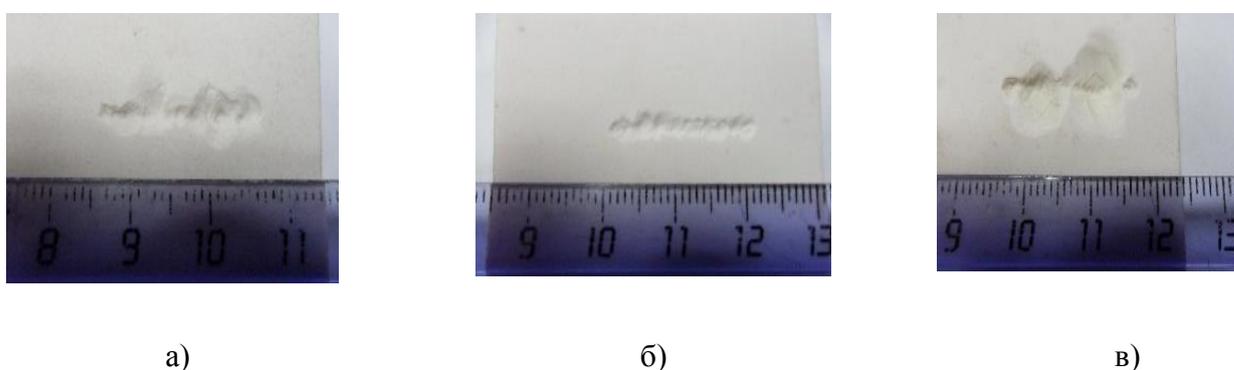


Рис. 1. Зависимость величины уноса массы керамики от концентрации в ней наночастиц:
(а) содержание наночастиц 0%, унос массы керамики $\Delta M=0,104$ г;
(б) содержание наночастиц 10%, унос массы керамики $\Delta M=0,072$ г;
(в) содержание наночастиц 20%, унос массы керамики $\Delta M=0,094$ г

По результатам коррелирующих друг с другом экспериментальных данных, полученных в ходе УСД и баллистических испытаний, были выполнены теоретические исследования, основанные на изучении морфологии поверхности рассмотренных образцов.

На основе полученных данных экспериментальных и теоретических исследований были разработаны упрощенные математические модели данной группы материалов, позволяющие оперативно получать данные об их баллистических свойствах.

Математическое моделирование процесса ударного взаимодействия с керамикой проводилось методом конечных элементов.

В заключении отметим, что предложенные подходы к совершенствованию этапов технологической подготовки производства ККК могут быть эффективно использованы и для решения аналогичных задач при создании другой группы образцов и материалов.

В настоящее время проводятся исследования по обогащению образцов из высокомолекулярного полиэтилена нанопорошком бемита, поиск оптимальной концентрации которого является также актуальной научно-практической задачей.

Работа выполнена в рамках программы государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций (Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» при МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Применение метода горячей газовой экструзии для получения стержней на основе MgB_2 в стальной оболочке

Ф.Ф. Галиев¹, И.В. Сайков¹, К.С. Перваков², В.А. Власенко², М.И. Алымов¹

¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН), г. Черноголовка, Россия; ²Физический институт РАН (ФИАН), г. Москва, Россия

E-mail: fanis.galiev@mail.ru

Диборид магния (MgB_2) – это сверхпроводник второго рода с критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние в монокристалле, равной 39 К. Сверхпроводники на основе MgB_2 не теряют своей актуальности на фоне сверхпроводников с более высокой критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние благодаря своей простоте получения методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Температура начала СВС в порошковой смеси выше лежит в диапазоне от 925 до 975 К. Энтальпия реакции синтеза MgB_2 довольно низкая, из-за чего затруднено инициирование СВС в режиме волны горения. Диборид магния при помощи методов СВС чаще всего получают в режиме теплового взрыва.

Наиболее популярным способом получения сверхпроводников на основе MgB_2 является деформация на прокатном и волочильном стане металлической трубки с MgB_2 в виде порошка или элементных порошков ($Mg+2B$) с дальнейшим синтезом сверхпроводящей фазы в процессе конечной термообработки. Из-за последовательных стадий прокатки и волочения с промежуточной термообработкой эффективность традиционных методов остается низкой. Для повышения энергоэффективности применяется совмещение синтеза материалов и методов обработки давлением. Для получения сверхпроводников на основе MgB_2 перспективно совмещать синтез сверхпроводящей фазы одновременно с деформацией методом горячей газовой экструзии (ГГЭ). ГГЭ – это один из методов обработки давлением, в котором исходный материал выдавливается под действием высокого изостатического давления инертного газа и одновременного локального нагрева в области деформации. В рамках работы были получены и исследованы стержни на основе MgB_2 в стальной оболочке, полученные методом ГГЭ порошковой смеси Mg–B в стальной ампуле.

Порошковая смесь Mg–B была получена сухим смешиванием порошков магния и аморфного бора, взятых в соотношении 1:2, соответственно. Таблетки из порошковой смеси были получены одноосным прессованием в ручном прессе. Относительная плотность, полученных таблеток была около 70 %. Перед прессованием таблеток из порошковой смеси, проводилась их сушка и дегазация в вакуумном термощкафу. Таблетки помещались внутрь специальной стальной ампулы сохранения и подвергались ГГЭ. Локальный нагрев в процессе ГГЭ инициировал реакцию синтеза в порошковой смеси. В результате экспериментов были получены стержни с керамической сердцевины по 3 разным режимам, которые определяются давлением инертного газа (Р) и температурой начала экструзии (Т). Режимы ГГЭ и результаты количественного рентгенофазового анализа (РФА) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы ГГЭ и данные количественного РФА

№	Р, МПа	Т, °С	Количественный РФА, мас. %
1	220	670	Mg–9; MgB_2 –61; MgO–21; MgH_2 –7.
2	250	615	Mg–23; MgB_2 –33; MgO–25; MgH_2 –19.
3	280	645	Mg–62; MgB_2 –15; MgO–23.

Согласно таблице, Т в стержне № 2 ниже, чем в стержне № 3, однако содержание MgB_2 выше. Объясняется это тем, что при ГГЭ стержня № 2 давление упало с 320 МПа до 240–250 МПа. Конструкция установки для газовой экструзии позволяет измерить температуру

только до начала ГГЭ, поэтому было зафиксирована температура в 890 К. Поскольку параметры ГГЭ являются взаимозависимыми, предполагается, что снижение давления ГГЭ повлекло повышение температуры экструзии, что в свою очередь привело к повышению полноты синтеза порошковой смеси.

Наибольшее содержание MgB_2 обнаружено в стержне № 1, полученном при 220 МПа и 945 К. Наличие оксидов и гидридов магния указывает на недостаточную стерильность подготовки порошковой смеси и необходимость в более длительной сушке. Исходный аморфный бор был обнаружен при исследовании микроструктуры сердцевин стержней на электронном микроскопе. Образование высших боридов (MgB_4 , MgB_7 и др.) исключено тем, что соответствующие им пики не были обнаружены как при Т, равной 890 К, так и при более высоких температурах.

Диаметр всех стержней после ГГЭ меняется по длине, что связано с накоплением газов между сердцевиной и оболочкой во время локального нагрева в процессе ГГЭ. Предполагается, что газы состоят преимущественно из паров воды, адсорбированных аморфным бором. Наличие воды также повлияло на фазовый состав сердцевин стержней, в которых кроме MgO обнаружен также MgH_2 . В стержне № 3 обнаружено перетекание магния в процессе газовой экструзии. Магний содержится в виде переходного слоя между сердцевиной и оболочкой, а также в виде узких каналов, по которым происходило перетекание.

Наиболее высокое значение критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние (T_C), равное 38 К, обнаружено в стержне № 1. В стержне № 2, содержащем 33 мас. % фазы MgB_2 , T_C достигает 32 К, а в № 3 (15 мас. % фазы MgB_2) – 33 К. На рис. 1 представлены графики изменения магнитной восприимчивости сердцевин стержней (χ') при охлаждении в сосуде Дьюара с жидким гелием до температуры 4,2 К. Магнитная восприимчивость является безразмерной величиной.

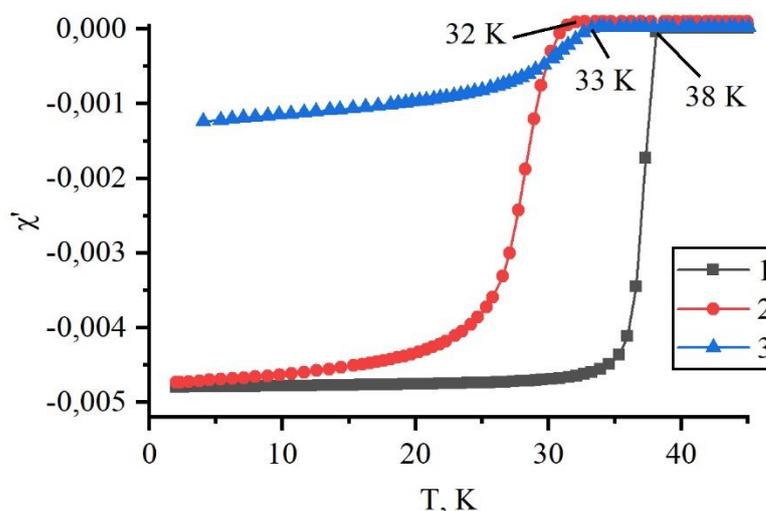


Рис. 1. Зависимость магнитного момента сердцевин стержней от температуры

Разница по T_C в стержнях № 2 и 3 объясняется тем, что примесные фазы в стержне № 2 больше влияют на T_C , чем содержание MgB_2 и исходный магний. Плотность критического тока для сердцевин стержней № 1 и 2 при 4,2 К достигает 4584 и -3915 А/см², соответственно.

Наиболее предпочтительными параметрами для получения сверхпроводников на основе MgB_2 методом горячей газовой экструзии элементарных порошков в стальной оболочке является давление газа 220 МПа и температура начал ГГЭ около 945 К. Для повышения содержания сверхпроводящей фазы и снижения содержания примесных фаз необходима более высокая стерильность подготовки исходных материалов с промежуточной дегазацией.

Получение крупноформатных корундовых огнеупоров повышенной плотности с использованием виброформования и технологии соспекания

А.М. Поскотинова^{1,2}, Б.Л. Красный², **К.И. Иконников²**, А.Л. Галганова², Д.И. Вершинин¹,
О.И. Родимов², Д.Д. Бернт², А.С. Сизова²

¹РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия; ²ООО «НТЦ «Бакор», г. Щербинка,
г. Москва, Россия

Email: konst@ntcbakor.ru

В настоящее время актуален вопрос получения крупноформатных корундовых огнеупоров повышенной плотности (ККОПП) методом, отличным от плавленнолитого, в силу наличия у последнего ряда существенных недостатков, таких как: энергоемкость, малый объем производств на территории РФ, загрязнение расплава материалами электродов, а также появление усадочных раковин, утяжин, расporов и других дефектов, сопутствующих формированию отливок.

В работе рассмотрен альтернативный способ получения ККОПП методом вибрационного формования с использованием технологии соспекания. Предполагается, что указанный способ позволит уменьшить энергозатраты, производить огнеупорные изделия, в том числе крупноформатные, с содержанием $Al_2O_3 > 99\%$. Так как технология предполагает наличие вибрационного формования, необходимо получить бетонную массу, состоящую из недоспеченного заполнителя и тонкодисперсной связки. Таким образом, в ходе работы был проведен сравнительный анализ и подбор глиноземистого сырья и дефлокулирующей добавки для получения связки, а также способ формования брикета заполнителя, на основе которого удалось получить огнеупор с плотной структурой.

Исходное сырье представлено глиноземами марок: ГРТ, Смалокс А БМ и CL370. Для порошков определяли $S_{уд}$ и исследовали морфологию частиц. Шликеры готовили перемешиванием в валковой мельнице в течение 20 мин. Реологические свойства суспензий исследовали на вискозиметре ВЗ-246. По результатам измерения $S_{уд}$ глинозема Смалокс А БМ составляет 9225 г/см^2 , CL370 – 8793 г/см^2 , а ГРТ – 12941 г/см^2 . Микроструктура порошков показана на рис. 1.

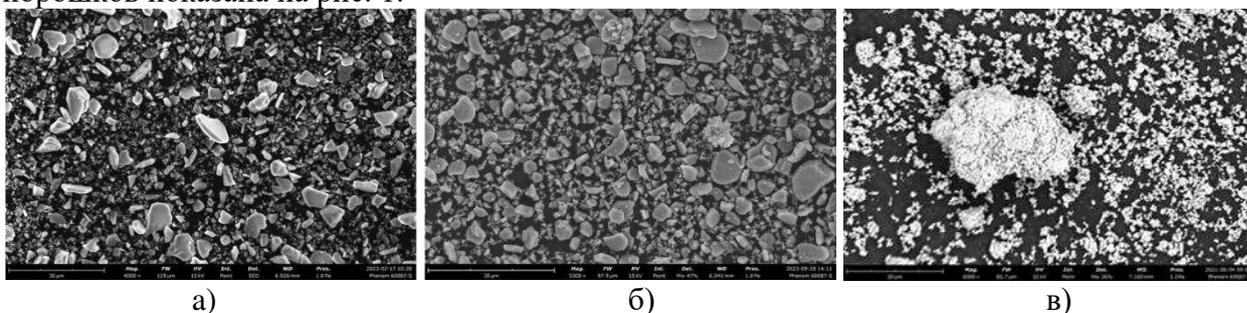


Рис. 1. Изображения микроструктуры порошков глиноземов марок:
а – Смалокс А БМ; б – CL370; в – ГРТ

Высокодисперсные частицы глинозема ГРТ (рис. 1, в) склонны к образованию агрегатов размером до 30 мкм. Порошки Смалокс А БМ (рис.1, а) и CL370 (рис.1, б) представлены частицами неправильной формы размером преимущественно от 5 до 10 мкм.

Проанализировав зависимости времени истечения шликера от влажности, сделали вывод, что суспензия на основе глинозема Смалокс А БМ имеет меньшее время истечения, а, соответственно, меньшую вязкость, при большем содержании твердой фазы, что объясняется лучшим гранулометрическим составом исходного порошка. Далее в суспензию на основе Смалокс А БМ вводили пластификаторы – полиакрилатные (Клеон РА, Клеон SP36), полиэтиленгликолевые (Castament FS 10) и поликарбоксилатные (Кратасол FC), в количестве 0,05-0,5 мас. %.

Зависимость времени истечения шликера от концентрации добавок оценивали при его постоянной влажности 20%. Из полученных результатов видно, что шликер, содержащий Кратасол ФС, на основе поликарбоксилатного эфира, при прочих равных параметрах имеет меньшее время истечения, следовательно, применение данной добавки позволяет повысить текучесть шликера наиболее эффективно. Также установлено, что наиболее оптимальной концентрацией добавки является 0,2 мас. %.

Брикет заполнителя формовали из шликера, полученного различными методами (табл. 1, 2). Исходя их концепции технологии спекания, заполнитель в недоспеченном состоянии должен обеспечивать капиллярный эффект (минимальный размер пор), после конечного обжига спекаться до значений открытой пористости <1% при минимальной усадке и максимальной плотности. Результаты измерения структурных характеристик образцов, обожженных при 1200 и 1600 °С представлены соответственно в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Структурные свойства брикетов, обожженных при 1200 °С

Метод формования	Линейная усадка, $\Delta l/l$, %	Открытая пористость, P_o , %	Кажущаяся плотность, $\rho_{ср}$, г/см ³	Средний размер пор, мкм
Полусухое прессование	4,01	26,6	2,89	0,945
Пресс-фильтрация	2,39	31,4	2,70	0,867
Литье шликера в гипсовую форму	7,39	25,4	2,91	2,640
Литье шликера беспористую форму	5,80	28,6	2,70	1,650

Таблица 2. Структурные свойства брикетов, обожженных при 1600 °С

Метод формования	Линейная усадка, $\Delta l/l$, %	Открытая пористость, P_o , %	Кажущаяся плотность, $\rho_{ср}$, г/см ³
Полусухое прессование	10,07	0,5	3,75
Пресс-фильтрация	12,82	11,9	3,51
Литье шликера в гипсовую форму	11,74	0,5	3,68
Литье шликера беспористую форму	15,79	0,7	3,71

По совокупности факторов полусухое прессование – наиболее оптимальный способ формования заполнителя.

На рисунке 2 представлена фотография микроструктуры огнеупора, заполнитель для которого получен дроблением прессованного брикета. После обжига образуется плотное тело с размером кристаллов до 50 мкм, формированием закрытой внутри- и межкристаллической пористости. Сравнение среднего значения структурных свойств образца и некоторых марок плавеннолитых огнеупоров представлено в таблице 3.

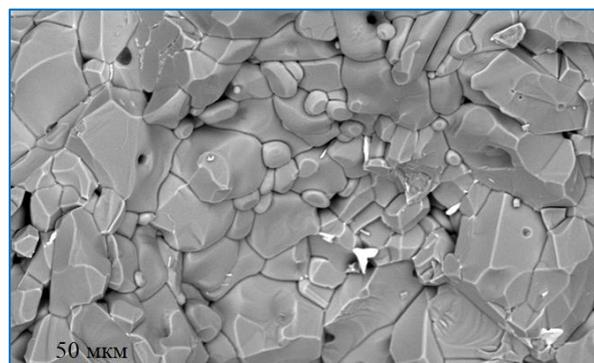


Рис. 2. Изображение микроструктуры полученного огнеупора

Таблица 3. Сравнение структурных свойств полученного огнеупора, и марок плавеннолитых огнеупоров

Огнеупор	Опытный образец	Monofrax A	Monofrax H	МК-1	МК-4
$\rho_{ср}$, г/см ³	3,61	3,76	3,06	3,37	3,5
P_o , %	2,8	1,06	4,04	3,5	3,4

Полученные значения попадают в интервал рабочих характеристик указанных марок, значит полученный огнеупор перспективен для использования в условиях эксплуатации, характерных для плавеннолитых огнеупоров.

Прошивные маты из кварцевых материалов низкой плотности

А.В. Медведев¹, М.Я. Гофин²

¹АО «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова», РП Андреевка, Московская обл., Россия

²МАИ (НИУ), г. Москва, Россия

Гибкая тепловая защита и изоляция (ГТЗИ) из прошивных матов широко применяется в металлургической и энергетической отраслях промышленности. Прошивной мат состоит из нетканого материала (войлока), облицованного тканью и прошитого нитью. Материал прошивных матов: базальт, кремнезем, кварц, оксид алюминия. Преимуществом материалов на основе оксида алюминия является более высокая температура эксплуатации, чем у кварцевых материалов. Однако их более высокая плотность, 2,7 г/см³ для Nextel™ 312 и 3,05 г/см³ для Nextel™ 440, против 2,2 г/см³ у кварцевых материалов снижает указанное преимущество за счет большей поверхностной массы готового прошивного мата.

Целью работы является исследование механических и теплофизических свойств материалов для прошивных матов низкой плотности из кварцевых материалов.

Исходя из требований к волокнистым наполнителям прошивных матов, предлагается использовать мат кварцевый низкой плотности. Мат кварцевый низкой плотности (МКНП) представляет собой многослойный материал, состоящий из отдельных холстов, содержащих штапельные волокна из диоксида кремния. Свойства мата кварцевого низкой плотности представлены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства мата кварцевого низкой плотности

Химический состав	Диаметр волокна, мкм	Поверхностная плотность, г/м ²	Плотность, кг/м ³	Длина волокна, мм
SiO ₂ ≤ 99,95%	3-7	200-225	10-20	25-35

Распределение волокон в МКНП по диаметру представлено на рисунке 1.

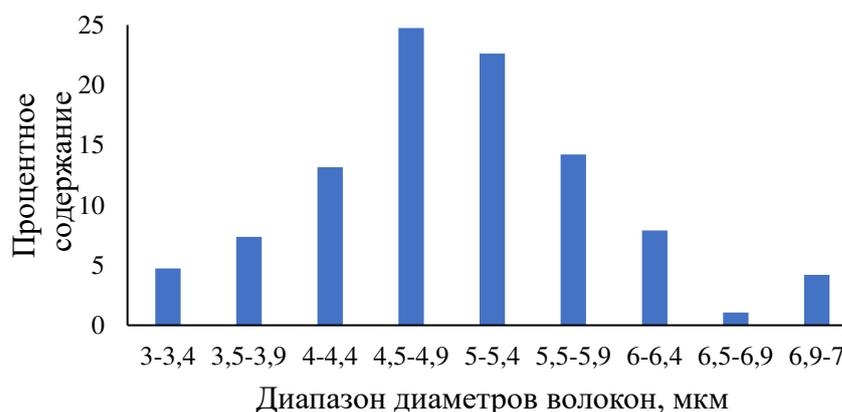


Рис. 1. Распределение волокон в МКНП по диаметру

Прошивные маты из кварцевых материалов предназначены для работы в диапазоне температур 500-800 °С. В таблице 3 представлена зависимость относительной деформации и плотности образцов МКНП от удельного давления:

- образец №1 контрольный, не подвергался нагреву
- образец №2 нагрев до 500 °С, время экспозиции 60 мин

- образец №3 нагрев до 600 °С, время экспозиции 60 мин
- образец №4 нагрев до 700 °С, время экспозиции 60 мин
- образец №5 нагрев до 800 °С, время экспозиции 60 мин

Таблица 3. Зависимость относительной деформации и плотности образцов МКНП от удельной нагрузки

Удельная нагрузка, кПа	Относительная деформация, %					Плотность, кг/м ³				
	№1	№2	№3	№4	№5	№1	№2	№3	№4	№5
0,7	70,08	44,72	57,52	53,67	52,39	40	39	38	35	38
2,1	73,74	60,08	62,10	54,36	53,12	45	70	89	75	71
3,5	80,69	70,06	66,48	67,43	65,75	61	98	100	76	77
7,0	83,85	75,24	65,71	71,56	69,41	73	131	113	106	110
10,5	81,60	75,43	67,05	71,10	70,56	64	158	110	122	118
14,0	88,90	77,35	74,29	73,85	73,46	107	160	115	132	124
17,0	90,45	76,97	75,62	74,70	75,22	124	167	147	137	138
21,0	93,24	75,02	77,46	78,48	79,89	159	170	155	148	152

Теплофизические свойства МКНП представлены в таблице 4.

Таблица 4. Теплофизические свойства МКНП

№ обр.	Толщина, мм	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К (20 °С)	Тепловое сопротивление, м ² ·К/Вт
1	19	10	0,0328	0,593
2	14	15	0,0298	0,482
3	10	20	0,0258	0,400

При измерении эффективной теплопроводности и теплового сопротивления прибором ИТП-МГ4-100 минимальная толщина образца должна составлять три миллиметра. В связи с этим были подготовлены образцы из кварцевой ткани ТС-8/3-ТО и кремнеземных тканей КТ-11-ТО и КТ11-8/3-ТО с необходимым количеством слоев. Теплофизические свойства тканей представлены в таблице 5.

Таблица 5. Теплофизические свойства тканей из диоксида кремния

Марка ткани	Количество слоев ткани в пакете, шт.	Толщина пакета, мм	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К (20 °С)	Тепловое сопротивление, м ² ·К/Вт
ТС-8/3	12	3,40	0,0136	0,261
КТ-11-ТО	8	3,52	0,0358	0,089
КТ-8/3-ТО	5	3,40	0,0356	0,097

Теплофизические свойства прошивного мата из МКНП, облицованного тканью КТ-11-ТО и прошитого нитью КС11-180 представлены в таблице 6.

Таблица 6. Теплофизические свойства прошивного мата

Номер образца	Толщина прошивного мата, мм	Плотность прошивного мата, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К (20 °С)	Тепловое сопротивление, м ² ·К/Вт
1	7,8	168	0,0408	0,100
2	8,5	159	0,0468	0,086

Отечественный реактивный глинозем СМАЛОКС-М как перспективное сырье для производства плотной корундовой керамики

М.А. Трубицын¹, Н.А. Воловичева¹, В.В. Лисняк¹, В.И. Кузин², Н.А. Морозова², Г.П. Зайцев³

¹НИУ «БелГУ», г. Белгород, Россия, ²ЗАО «ПКФ «НК»», г. Старый Оскол, Россия,

³ООО «Алокс», г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru

В настоящее время в различных областях техники широкое применение находит плотная корундовая керамика. Это обусловлено комплексом уникальных свойств подобной керамики, таких как высокие диэлектрические свойства, механическая прочность, твердость, ударная вязкость, износостойкость, огнеупорность, химическая стойкость. Важным преимуществом корундовой керамики является оптимальное соотношение «цена-качество» в сравнении с керамикой из карбида бора или композитных материалов. В последние годы, в связи с возросшей потребностью в высококачественных корундовых изделиях, стоит задача в значительном увеличении объемов выпуска такой продукции.

В России одним из ведущих производителей плотной корундовой керамики является компания ООО «Алокс» (г. Санкт-Петербург), которая разработала и внедрила оригинальную технологию, базирующуюся на отечественных сырьевых материалах. Достоинствами разработанной технологии являются высокие физико-механические характеристики корундовых изделий: плотность не менее $3,85 \text{ г/см}^3$, прочность на изгиб $\sigma_{\text{изг}} = 250\text{-}300 \text{ МПа}$, модуль упругости $E_{\text{ср}} = 340\text{-}345 \text{ ГПа}$, ударная вязкость $3,8\text{-}4,2 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, которые достигаются при более низких температурах обжига полуфабриката (менее $1400 \text{ }^\circ\text{C}$) по сравнению с другими технологиями. При этом технические характеристики корундовых керамических материалов в значительной степени зависят от вида основного компонента шихты – α -глинозема и микроструктуры керамического материала. Однако вместе с растущим спросом на рынке существует проблема дефицита отечественного сырья – α -глинозема, пригодного для производства качественных корундовых материалов.

Целью данной работы являлось выявление возможности использования тонкодисперсных порошков α -глинозема компании ЗАО «ПКФ «НК»» (СМАЛОКС-М), изготовленных по технологии НИУ «БелГУ», в технологическом процессе компании ООО «Алокс».

В период с февраля по март 2024 г с использованием порошков реактивного глинозема СМАЛОКС-М на технологической линии ООО «АЛОКС» была выпущена опытная партия корундовой керамики. Из опытных корундовых изделий были вырезаны образцы в виде балочек размерами $50\times 9\times 5 \text{ мм}$ и плиток $50\times 50\times 9 \text{ мм}$, и переданы в НИУ «БелГУ» для проведения исследований.

В центре коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ» для представленных керамических образцов были выполнены следующие виды испытаний: исследование микроструктуры, определение кажущейся плотности и открытой пористости, модуля упругости, твердости и микротвердости по Виккерсу, трещиностойкости, прочности на изгиб.

Микроструктуру образцов изучали на шлифованных образцах методом сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе FEI Quanta 600 FEG (рис. 1).

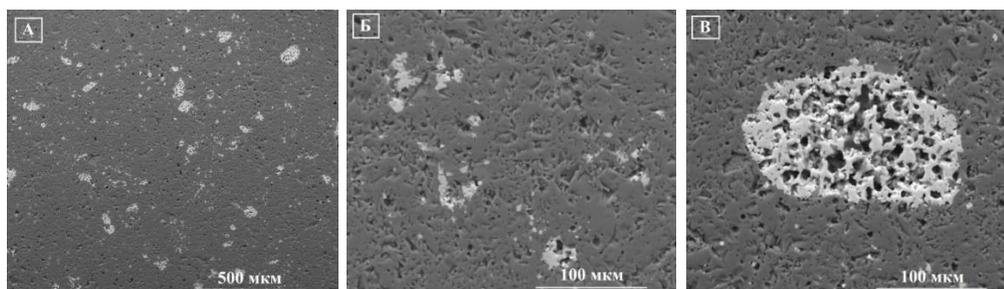


Рис. 1. СЭМ-микрофотографии образцов корундовой керамики

При анализе СЭМ-изображений установлено, что образцы корундовой керамики имеют неоднородную микроструктуру. Обращает на себя внимание присутствие в микроструктуре светлых областей со средним размером от 5 до 100 мкм, расположенных в хаотичном порядке. Такие области занимают примерно 1,8-2,5% поверхности образцов на шлифе (рис. 1а). Присутствие светлых областей в микроструктуре указывает на наличие включений второй фазы и является следствием плохой гомогенизации субмикронного порошка реактивного глинозема со спекающей добавкой в процессе смешения. Также отчетливо фиксируется дифференциация областей с рыхлой и хорошо уплотненной структурой (рис. 1б, 1в). Это свидетельствует о неравномерности уплотнения сырца и, как следствие, высокой неоднородности микроструктуры образцов после обжига.

Для исследованных образцов характерна умеренная пористость, однако распределение пор по всему объему неравномерно. Размер и форма пор также различны. Например, характерно присутствие отдельных крупных пор преимущественно сферической формы размером от 7 до 16 мкм. По нашему мнению, их образование связано с запрессовкой воздуха при уплотнении высокодисперсных порошков.

При определении водопоглощения, кажущейся пористости и плотности керамических образцов выявлено, что образцы-балочки характеризуются практически нулевой открытой пористостью, а на образцах-плитках величина открытой пористости находится в диапазоне 0,2-0,3%. По нашему мнению, это различие связано с масштабным фактором, т.к. образцы-балочки имели заметно меньший объем, а также были получены путем распила исходных образцов-плиток. Вместе с тем значения кажущейся плотности для всех типов испытанных образцов практически одинаковы и составляют 3,86-3,90 г/см³.

Результаты физико-механических испытаний образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Физико-механические характеристики образцов корундовой керамики

Характеристика		Значение
Модуль упругости $E_{ср}$, ГПа		325,0
Твердость по Виккерсу, ГПа	HV0,5	13,36
	HV3	11,07
	HV10	15,12
Микротвердость _{ср} , ГПа	HV0,2	17,19
	HV0,3	16,54
Коэффициент трещиностойкости K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	HV0,2	3,24
Прочность на изгиб $\sigma_{изг ср}$, МПа		258

По результатам проведенных испытаний показана принципиальная возможность использования тонкодисперсных порошков реактивного глинозема СМАЛОКС-М в производстве высокоплотной корундовой керамики в технологическом процессе ООО «АЛОКС». Однако требуется доработка отдельных технологических операций, прежде всего в части смешения и уплотнения.

Расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование теплопроводности высокопористых материалов с наполнителем из аэрогеля

С.В. Резник^{1,2}, П.В. Просунцов^{1,2}, Р.А. Миронов², М.О. Забежайлов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), г. Москва, Россия;

²АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Основу тепловой защиты многоразовых космических аппаратов составляют высокопористые теплоизоляционные материалы. Наиболее яркими и известными их представителями являются материалы ТЗМК-10 (СССР-Россия) и LI-900 (США), которые использовались в аппаратах «Буран» и «Space Shuttle» соответственно. Эти материалы относятся к классу высокопористой кварцевой керамики. Их основной эксплуатационной характеристикой, во многом определяющей весовое совершенство тепловой защиты, является коэффициент теплопроводности. Данный класс материалов отличается экстремально малым значением теплопроводности при комнатной температуре – 0,02-0,05 Вт/(м·К), которая, однако, достаточно быстро растет при повышении температуры и при 1250 °С достигает уже величины 0,30-0,35 Вт/(м·К). Этот рост связан с тем, что в высокопористой кварцевой керамике при высоких температурах преобладающим механизмом переноса тепла становится радиационный теплообмен в частично прозрачных кварцевых волокнах и поровом пространстве. В связи с этим магистральным путем совершенствования высокопористых материалов является разработка мер по блокированию радиационного переноса тепла.

К настоящему времени предложено несколько путей решения этой проблемы. Так, рассматривались варианты нанесения непрозрачных покрытий на поверхность кварцевых волокон, введения непрозрачных частиц и красителей в их объем, насыщения порового пространства непрозрачными включениями и, наконец, внедрения в поровое пространство аэрогеля. И именно последнее направление считается наиболее перспективным. Ячейки аэрогеля выступают в данном случае в качестве своеобразных «ловушек» теплового излучения, в которых происходит его многократное переотражение. Целью настоящей работы являлось расчетно-теоретическое обоснование эффективности использования аэрогеля в составе материалов тепловой изоляции и экспериментальная проверка полученных результатов.

При теоретическом исследовании теплопроводности высокопористого материала с наполнителем в виде аэрогеля применялся многомасштабный подход. При этом на наноуровне строилась геометрическая модель представительного элемента объема (ПЭО) аэрогеля, которая включала в себя от 50 до 100 ячеек (рис.1).

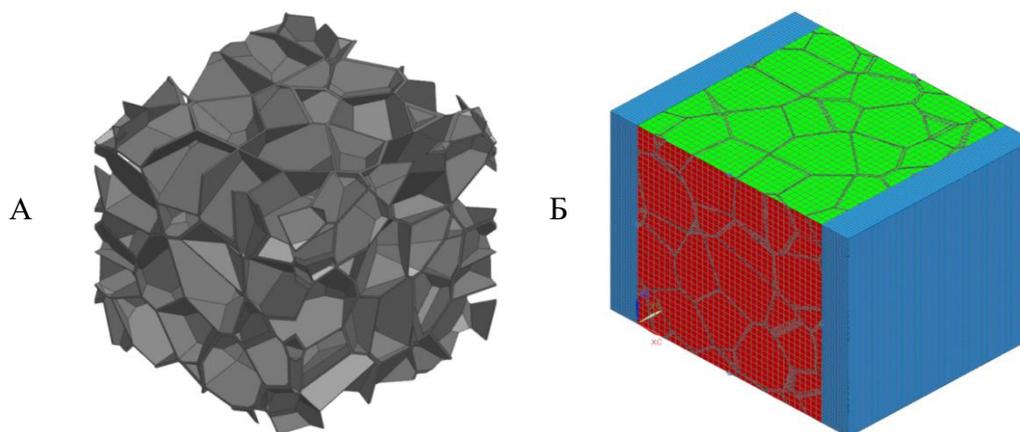


Рис. 1. Пример представительного элемента объема аэрогеля (А) и его конечно-элементная модель (Б)

Далее этот ПЭО заключался между двумя непрозрачными высокотеплопроводными обкладками, а его боковые грани закрывались зеркальными поверхностями, предназначенными для блокирования радиационного отвода тепла. Варьируя среднее значение температуры обкладок при сохранении малого перепада температуры между ними, исследовался радиационно-кондуктивный перенос тепла в ПЭО во всем диапазоне температур. Далее по определенной расчетным путем плотности суммарного потока тепла через ПЭО определялся эффективный коэффициент теплопроводности аэрогеля.

Для волокнистого материала, наполненного аэрогелем, ПЭО представлял собой несколько десятков кварцевых волокон каркаса материала и аэрогель в поровом пространстве (рис.2). При этом теплопроводность аэрогеля наследовалась с наноуровня. Моделирование радиационно-кондуктивного переноса в ПЭО и определение эффективной теплопроводности волокнистого материала с аэрогелем в качестве наполнителя проводились аналогично наноуровню.

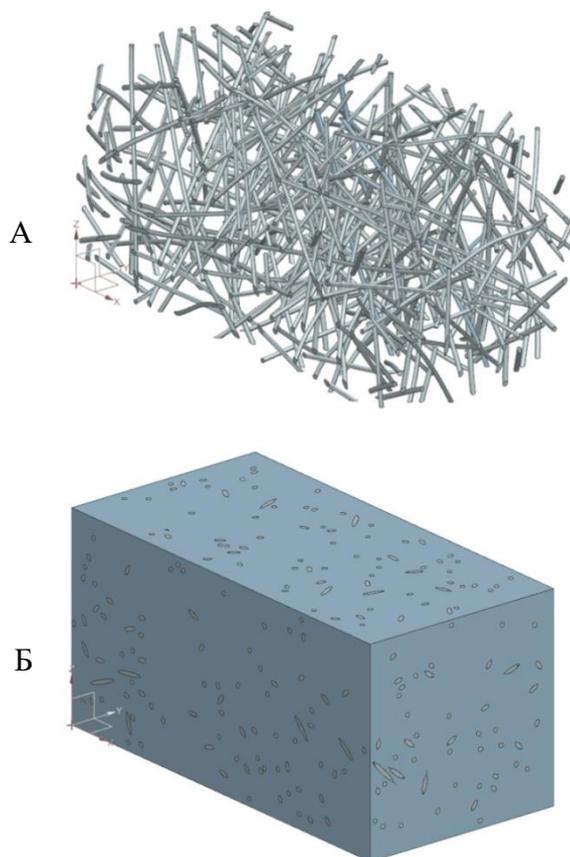


Рис. 2. Пример представительного элемента объема волокнистого материала: до (А) и после (Б) заполнения порового пространства аэрогелем

Анализ полученных расчетно-теоретических данных по теплопроводности волокнистого материала с аэрогелем показал, что его характеристики существенно лучше по сравнению с аналогами. Для верификации полученных результатов было проведено экспериментальное исследование теплопроводности высокопористой волокнистой кварцевой керамики с наполнителем в виде аэрогеля. Полученные результаты показали совпадение с расчетно-теоретическими оценками. Для обоснования эффективности применения аэрогеля как наполнителя порового пространства волокнистого материала были проведены измерения оптических характеристик аэрогеля и далее по ним были определены коэффициенты его поглощения и рассеяния. Это позволило расчетным путем выделить радиационную составляющую коэффициента теплопроводности и стало дополнительным подтверждением правильности полученных результатов.

Применение микропорошков электрокорунда для получения керамических материалов

Н.Е. Шер, Г.И. Куликова, М.К. Алексеев, И.Н. Бизин, Д.В. Харитонов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Среди широкого спектра керамических материалов корундовая керамика является одной из самых востребованных в различных отраслях промышленности и сферах жизнедеятельности. Благодаря совокупности уникальных химических, электрофизических и механических свойств, доступности и сравнительно низкой стоимости, научно-практический интерес к ней в последнее время только возрастает.

Наиболее распространенными видами сырья, применяемыми для изготовления корундовой керамики, являются неметаллургические и металлургические глиноземы, которые состоят из двух основных кристаллических модификаций оксида алюминия: α - и γ -формы в различном соотношении. α -модификация является высокотемпературной и стабильной формой, переход в которую из γ - фазы происходит необратимо при температуре выше 1200 °С и сопровождается уменьшением объема материала на 14%. Поэтому такое сырье перед применением подвергается дополнительной высокотемпературной обработке с целью перевода оксида алюминия в α -форму.

Одним из видов сырья с содержанием α -фазы, близким к 100 мас. %, является электрокорунд, что делает его перспективным для применения в керамической технологии без предварительной термообработки. Среди промышленных порошков электроплавленного корунда наибольший интерес представляет микропорошок субмикронных и микронных размеров марки F1500.

Изучение его спекания проводили на образцах-плитках размерами 100×100×(14-16) мм, которые получали путем прессования порошка, увлажненного 2% раствором неионогенного ПАВ «Синтаמיד 5К», при давлении 40-60 МПа и последующего обжига при 1600 °С. Установлено, что заготовки из чистого порошка электрокорунда F1500 спекаются до плотности 3,62 г/см³, однако конструкционные корундовые материалы, как правило, имеют более высокие ее значения. С целью повышения плотности была использована эффективная спекающая добавка системы MgO-SiO₂-Al₂O₃. В качестве прекурсоров спекающей добавки использовали алюмомагниевою шпинель марки AMS-78 и электроплавленный муллит ПМЛП-3 в массовом соотношении 1 : 4, соответственно, которые измельчали методом совместного сухого помола до удельной поверхности 3200-3400 см²/г.

На основании результатов исследований зависимостей основных свойств материала от количества спекающей добавки, давления прессования и температуры обжига определено, что высокие показатели плотности керамики 3,81-3,83 г/см³, прочности при изгибе 370±30 МПа и микротвердости по Виккерсу 13,8-15,5 ГПа достигаются при использовании спекающей добавки в количестве 5,0-8,0 мас. %, давлении прессования 50-60 МПа и температуре обжига 1600 °С. На основе серийно производимого микропорошка электрокорунда F1500 разработана ресурсосберегающая технология корундового керамического материала, в которой высокотемпературная операция синтеза спекающей добавки совмещена с процессом обжига материала. Материал паспортизован под маркой ОТМ-943.

По разработанной технологии изготовлена партия бронеэлементов цилиндрической формы в количестве 1500 шт. для керамокомпозитных защитных панелей (рис. 1), которые выдержали без пробития по 6 обстрелов патронами калибра 7,62×54 мм с пулями Б-32 при испытаниях в АО «ЦНИИТОЧМАШ».

Электрокорунд F1500 перспективен также для использования в производстве корундомуллитовых огнеупоров, получаемых на основе комбинации крупнозернистых и тонкомолотых фракций корунда и муллита. Благодаря высокой активности к спеканию он

способствует образованию прочной керамической связки между зернами наполнителя с формированием фрагментарной структуры, обеспечивая тем самым высокую термостойкость огнеупорного материала.



Рис. 1. Керамические бронезлементы (а) и сборка керамокомпозитной бронепанели (б)

С использованием порошков электрокорунда F1500 разработаны технологии изготовления целого ряда термостойких корундомуллитовых изделий (рис. 2): тигли для плавки никелевых сплавов (а), теплозащитные плитки для камер сгорания (б), керамическая оснастка для высокотемпературных испытательных установок (в), футеровочные элементы электропечей (г), подкладные плиты для обжига керамики (д), печная огнеупорная футеровка для стекловаренных печей (е).

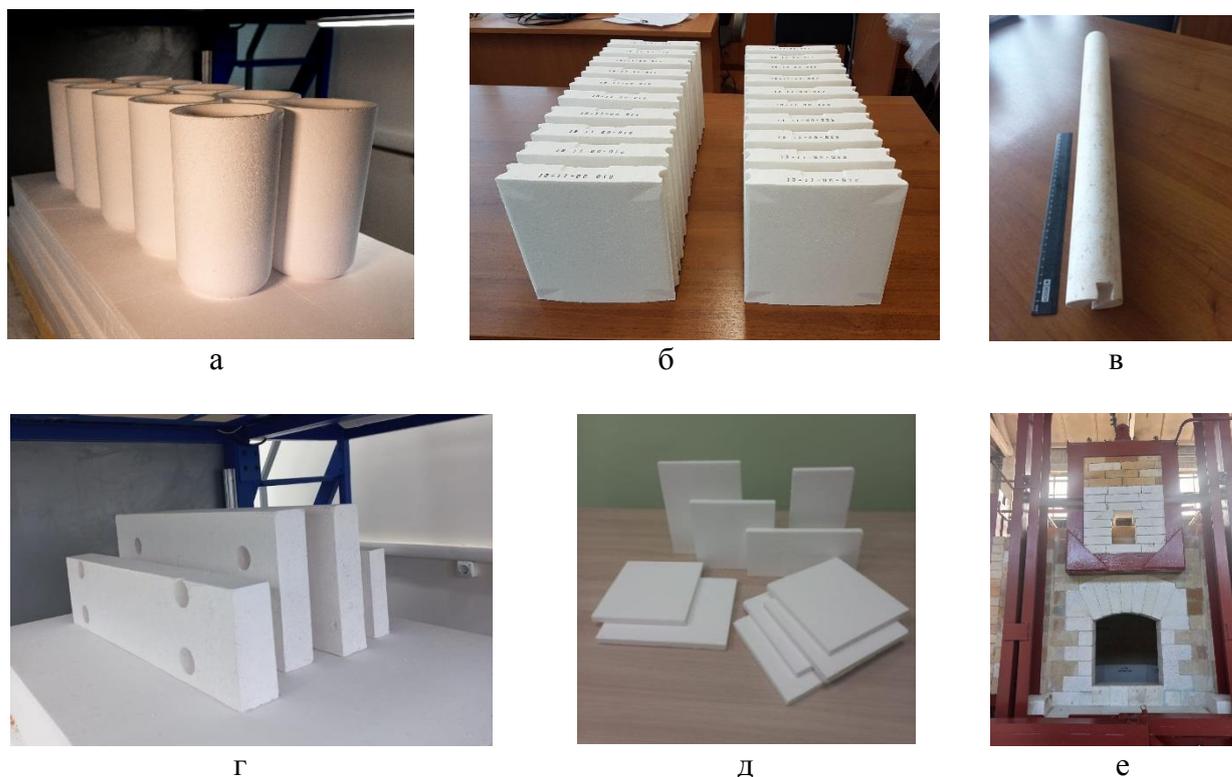


Рис. 2. Фотографии корундомуллитовых огнеупорных изделий, изготовленных с использованием электрокорунда F1500

Изготовление керамических изделий сложной геометрической формы с помощью аддитивного производства

М.М. Новиков¹, М.А. Марков¹, С.А. Черобыло¹, О.С. Антонова², И.В. Фадеева²,
А.Б. Лисафин³

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия;

³ООО «Технокерамика», Верховье, Калужская обл., Россия

E-mail: novikov@rambler.ru

Аддитивное производство (АП) предлагает новые возможности для изготовления керамических деталей без дорогостоящей оснастки, тем самым снижая производственные затраты и время изготовления, при этом значительно увеличивая свободу проектирования. Метод АП – стереолитография, который в основном используется для изготовления трехмерных полимерных деталей, показал свою эффективность в получении сложных керамических изделий с конечными свойствами (механическими, термическими, электрическими), близкими к свойствам изделий, получаемым классическими методами обработки. Большое значение для этого метода имеет разработка специальных керамических паст на основе фотополимеров и мелкодисперсных порошковых наполнителей. Основными требованиями, предъявляемыми к таким композициям, являются высокая наполняемость керамическими частицами и вязкость, приемлемая для осуществления процесса стереолитографии. Для изготовления тестовых изделий применялся 3D-принтер проекционной печати на LCD-дисплее, модернизированный приводом ленточной подачи материала. Для оптимизации процесса и увеличения фоточувствительности керамических паст была проведена модернизация фотополимеризующейся композиции для лазерной стереолитографии (патент РФ № 2685211) с помощью фотоинициатора Irgacure 819, который имеет более широкую область спектра поглощения, включающей 405 нм (рабочая длина волны проекционных принтеров LCD и DLP).

В качестве биоинертной керамики использовались порошки диоксида циркония. Порошок № 1 – электроплавленный диоксид циркония производства фирмы ООО «Технокерамика» (<https://www.technokeramika.ru/>), стабилизированный оксидом иттрия 5,0 мас. % (СТО 68051575.027-2023). Порошок состоит из частиц произвольной формы размером 0-10 мкм, где $d_{50}=10$ мкм. Порошок № 2 марки TZ-3Y-E, фирмы Tosoh (Япония), представляет собой частично стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония с 3 моль % Y_2O_3 , морфологический состав – сферические гранулы, 40 нм. Порошок отличается высокой удельной поверхностью (16 ± 3 м²/г) и используется при изготовлении тонкой керамики.

В качестве биорезорбируемой керамики применялись порошки из фосфатов кальция, в частности, из трикальцийфосфата (ТКФ, $Ca_3(PO_4)_2$) (порошок № 3). ТКФ синтезировали в институте ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова методом осаждения из водных растворов с последующей термообработкой при 900 °С. Для этого использовали водные растворы нитрата кальция и двухзамещенного фосфата аммония концентрации 0,5 моль/л. Согласно данным дифрактометра, синтезированный порошок является однофазным со структурой витлокита.

На основе этих порошков были изготовлены экспериментальные керамические пасты для аддитивного производства методом стереолитографии. Проведенные исследования реологического поведения экспериментальных керамических паст на основе модернизированной фотополимерной композиции показали хорошие результаты, заключающиеся в практически полном отсутствии расслоения в течение времени наблюдения (несколько месяцев). В пастах с порошком № 1 получена максимальная концентрация наполнителя 83 мас. % без диспергирующих добавок. С порошками № 2 и № 3 получаются

более вязкие пасты даже при концентрации наполнителя в 60 мас. % и 50 мас. %, соответственно.

Проведены исследования параметров отверждения керамических паст в зависимости от концентрации порошкового наполнителя. На рисунке 1 изображена зависимость толщины отвержденного слоя от дозы облучения для разной концентрации наполнителя (порошок № 1).



Рис. 1 Зависимости толщины отвержденной пленки h (мм) от экспозиционной дозы лазерного излучения ($\lambda=405$ нм) E (мДж/см²) с разной концентрацией (мас. %) наполнителя

Показано падение основных параметров отверждения фотополимерных и керамических композиций в зависимости от концентрации наполнителя, что требует проведения оптимизации фотополимерной композиции и увеличения концентрации фотосенсибилизатора и фотоинициатора. При концентрации диоксида циркония более 70 мас. % наблюдается быстрое насыщение, и глубина отверждения не превышает 100 мкм даже при больших дозах облучения.

Подобраны специальные режимы нагрева полимер-керамических образцов для выжигания полимерного связующего без нарушения геометрии тестового объекта. Проведено спекание керамических изделий после выжигания связующего: для ТКФ-керамики при температуре 1200 °С в течение 1 ч в трубчатой печи с нихромовыми нагревателями, для керамики из оксида циркония при температуре 1600 °С в течение 2 ч в печи с нагревателями из хромита лантана на воздухе.

Были изготовлены с помощью аддитивного производства тестовые объекты для медицинских исследований *in vitro* и *in vivo* (рис. 2).

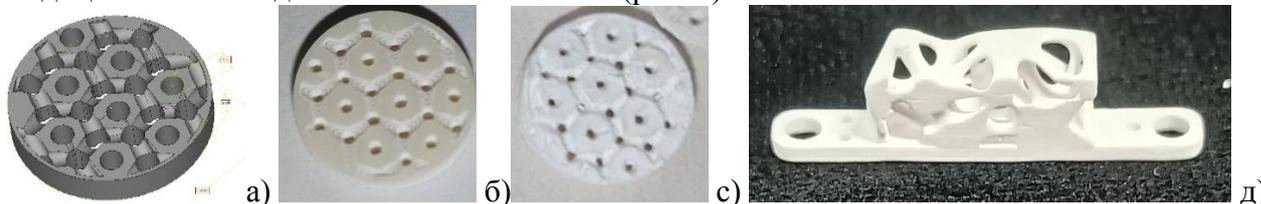


Рис. 2 а) 3D-модель, б) полимер-керамический образец; в) биорезорбируемая керамика ТКФ для *in vitro*; г) керамический имплантат из оксида циркония для *in vivo*

Зависимости качества спеченной керамики от толщины слоя изготовления образцов не обнаружено.

Синтез и изучение биорезорбируемой керамики проводились при финансовой поддержке Министерства науки и образования, грант № 075-00320-24-00. Стереолитографическая 3D-печать проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Синтез и свойства керамик на основе системы SrO–Al₂O₃–SiO₂ для получения высокотемпературных материалов с улучшенными электрическими свойствами

Е.А. Балабанова¹, Н.Г. Тюрнина¹, З.Г. Тюрнина¹, А.В. Тумаркин²

¹НИЦ «Курчатовский институт» – Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), г. Санкт-Петербург, Россия; ²ЛЭТИ, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: balabanova.e.a@yandex.ru

Высокотемпературные радиопрозрачные керамические материалы, на основе системы SrO–Al₂O₃–SiO₂, представляют собой объект активных исследований в области разработки материалов для экстремальных условий, включая применение в радиочастотной области. Знание диэлектрических свойств материалов имеет важное значение при проектировании и использовании материалов в авиационно-космической отрасли по нескольким причинам:

1. Диэлектрическая проницаемость материалов влияет на их способность пропускать радиоволны.

2. Материал изделий авиационно-космической отрасли должен сохранять свои диэлектрические свойства при экстремальных условиях тепла, которые могут возникать при входе в атмосферу.

3. Диэлектрические свойства материала также могут обеспечивать необходимую электрическую изоляцию в случае наличия электрически заряженных частей внутри изделий авиационно-космической отрасли.

В данной исследовательской работе были использован метод твердофазного синтеза, ТФС. Температура термообработки составила 1250 °С, выдержка 12 и 24 ч. Было синтезировано 68 образцов: в мольном соотношении (Al₂O₃)/(SiO₂), равном 3/2, 1/1 и 1/2, а также при различных концентрациях SrO. Для определения кристаллических фаз в полученных образцах применялся метод рентгенофазового анализа (РФА). Для проверки достижения равновесия в системе SAS образцы были подвергнуты повторному отжигу при 1250 °С в течение 24 ч. Оценка количественного состава была выполнена методом Ритвельда с помощью программы RietToTensor.

Анализ элементного состава образцов и равномерности распределения элементов проводился с применением сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Melytec SM-32, оборудованном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром (EDS) - Oxford Instruments. Для снятия наведенного заряда на исследуемую поверхность образцов осаждали тонкий слой углерода.

Электрические характеристики образцов, такие как диэлектрическая проницаемость (ϵ), и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$), измерялись при 20 °С на частоте 1 ГГц. Измерения ϵ и $\text{tg } \delta$ проводились на образцах в виде дисков диаметром 6 мм и толщиной ~ 2,1-3,2 мм методом неразрушающего контроля (резонансным методом).

Определение температур плавления керамических образцов на основе SrO–Al₂O₃–SiO₂ проводилось на высокотемпературном микроскопе методом визуального термического анализа. Исследуемый образец прикреплялся к петельке диаметром 0,25 мм, изготовленной из иридиевой проволоки. Нагрев проволоки с образцом осуществлялся переменным электрическим током, регулируемым автотрансформатором ЛАТР-9. Температура измерялась платина-платинородиевой термопарой. Измерение температуры плавления каждого образца осуществлялось дважды для получения более корректного значения. Наблюдение за процессом нагрева образца осуществлялось визуально при помощи высокотемпературного микроскопа до тех пор, пока образец не начинал плавиться и полностью заполнял петлю в виде тонкой пленки, прозрачной для поляризованного света. При достижении температуры начала плавления и окончания плавления образца фиксировались напряжения переменного тока, подаваемые на проволоку. Полученные данные позволяли определить температуру плавления с помощью градуировочного графика.

Таблица 1. Фазовый состав и свойства керамических образцов, синтезированных при температуре 1250 °С в течение 12 ч

N	Химический состав по синтезу и анализу, моль %.			Качественный РФА	Количественный РФА, %	Плотность кажущаяся, г/см ³	Модуль Юнга, ГПа	Т ликвидуса, °С	ТКЛР (720-30) °С (охлаждение), ×10 ⁻⁶	Открытая пористость, %	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь
	SrO	Al ₂ O ₃	SiO ₂									
1	25 (25,30)	25 (22,47)	50 (52,24)	SrAl ₂ Si ₂ O ₈	100	2,747	76	1647	5,37	26	1,5	0,002
2	35,3 (36,03)	52,93 (50,61)	11,77 (13,36)	Sr ₆ Al ₁₈ Si ₂ O ₃₇ SrAl ₂ O ₄ SrSiO ₃	19 65 16	3,248	81	1625	8,72	36	2,1	0,018
3	50 (48,65)	25 (24,36)	25 (27,00)	SrAl ₂ O ₄ SrSiO ₃ Sr ₂ SiO ₄	53 26 21	3,397	50	1624	10,55	25	2,2	0,011
4	33,3 (32,92)	33,3 (31,70)	33,34 (35,37)	SrSiO ₃ SrAl ₂ Si ₂ O ₈ Sr ₂ Al ₂ SiO ₇	29 64 7	3,141	80	1564	7,94	32	1,9	0,009
5	37,5 (38,18)	37,5 (33,86)	25 (27,96)	SrAl ₂ O ₄ SrSiO ₃ Sr ₂ Al ₂ SiO ₇	52 38 10	3,271	85	1577	8,82	32	2,1	0,005

Все анализируемые образцы характеризуются высокими значениями температуры ликвидуса (выше 1500 °С). При разработке керамических материалов для использования в авиационно-космической отрасли, важным фактором является относительно низкая плотность этих материалов. Установлено, что кажущаяся плотность образцов варьируется от 2,747 г/см³ до 3,397 г/см³. Модуль Юнга находится в пределах от 50 ГПа до 85 ГПа. Температура ликвидуса образцов находится в интервале от 1564 до 1647 °С. Коэффициент термического расширения (ТКЛР) варьируется от 5,37×10⁻⁶ до 10,55×10⁻⁶. Открытая пористость образцов составляет от 25% до 36%. Значения диэлектрической проницаемости находятся в диапазоне от 1,5 до 2,2, а тангенс угла диэлектрических потерь варьируется от 0,002 до 0,018.

Керамические материалы на основе системы SAS вызывают значительный интерес, благодаря сочетанию диэлектрических свойств с повышенной термостойкостью при невысокой плотности. Полученные значения физико-химических характеристик свидетельствуют о потенциальной возможности использования исследованных керамических образцов в качестве функциональных материалов в авиационно-космической технике и электронике.

ВКВС высокоглиноземистого состава и керамобетоны на их основе

П.В. Дякин^{1,2}, Ю.Е. Пивинский¹, С.В. Вихман²

¹ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор», г. Санкт-Петербург, Россия, ²СПбГТИ (ТУ),

г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dyakin@mail.ru

Высококонтрированные керамические вяжущие суспензии (ВКВС) на основе спеченного китайского боксита нашли широкое применение в производстве как формованных, так и неформованных керамобетонов в системах: $Al_2O_3-SiO_2$; $Al_2O_3-SiO_2-SiC-C$ для черной металлургии (муллитокорундовые изделия марки МКТП-85 для футеровки сталеразливочных ковшей, бойные плиты, горелочные камни, желобные массы оксиднокарбидноуглеродистого состава и др.). Целью настоящей работы является разработка новых и совершенствование существующих составов ВКВС высокоглиноземистого состава. Исходные материалы: спеченный боксит марки Rota HD (Al_2O_3 88,5%), плавленный корунд (Al_2O_3 не менее 95,5%, SiO_2 не более 0,5%, TiO_2 2-3%), высокодисперсное кварцевое стекло – ВДКС (SiO_2 98,9%, Al_2O_3 0,7%).

Матричная система на основе ВКВС боксита композиционного состава. Получены и изучены свойства образцов на основе ВКВС композиционного состава, состоящего из 66,5 мас.% спеченного боксита марки Rota HD, 22% плавленного корунда и 11,5% высокодисперсного плавленного кварца ВДКС. Изучено влияние температуры обжига в интервале 800-1640 °С на изменение фазового состава, структуры и некоторых свойств образцов материала, полученного на основе ВКВС композиционного состава, а также с дополнительным содержанием 15% SiC ($d_m = 27,4$ мкм). Посредством дилатометрических исследований при скорости неизотермического нагрева 300 °С/ч установлено четыре характерных интервала температур, соответствующих обычному тепловому расширению (до 800 °С), спекания, сопровождаемого усадкой (800-1150 °С), муллитизации, сопровождаемой ростом (1150-1400 °С), спеканием замуллитизированного материала (1400-1500 °С). С применением комплекса методов исследований (РФА, дилатометрического анализа, оптической и электронной микроскопии) охарактеризованы фазовый состав и структура материалов в отмеченных интервалах температур обжига. После обжига при температурах 1400-1640 °С материал характеризуется содержанием муллита в пределах 38-42%, корунда – 50-55%, остальное – стеклофаза и соединения титана. На рисунке 1 показаны рентгенограммы образцов исходного состава после сушки при 120 °С, обжига при 1150 °С и образцов, обожженных в туннельной печи (ТП), а также образцов с 15% SiC (рис. 1б). Фазовый состав образцов представлен корундом, муллитом, соединениями на основе титана и дополнительно карбидом кремния для образцов с SiC (рис. 1б).

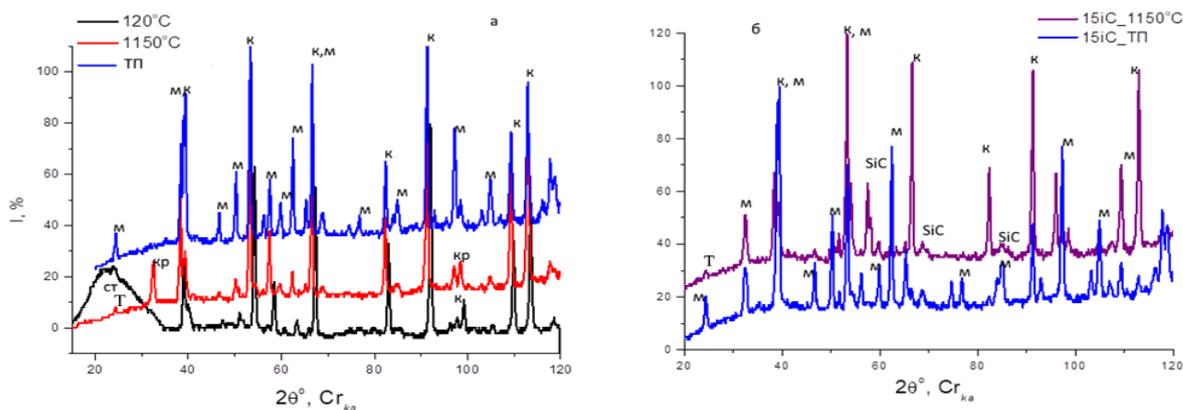


Рис. 1. Рентгенограммы образцов исходного состава (а) и с 15 % SiC (б):

М – муллит, К – корунд, Т – титалит, Кр – кристобалит, SiC

Установлено, что для исходного состава (рис. 1а) в интервале 1150-1400 °С основным процессом является образование вторичного муллита. После обжига в туннельной печи содержание муллита увеличивается в 4,1 раза (от 8 до 33%), содержание корунда уменьшается в 1,3 раза (от 72 до 55%). В образцах, содержащих SiC (рис. 1б), после обжига в интервале 1150-1400 °С последовательно за процессом окисления SiC протекает процесс муллитизации за счет взаимодействия новообразованного SiO₂ в форме кристобалита с Al₂O₃ боксита. Как и в исходном составе, основным является процесс образования вторичного муллита, приводящий к образованию «замуллитизированной» матрицы. Длительная выдержка в ТП приводит к рекристаллизации муллита, размер кристаллов увеличивается примерно в 10 раз – от 0,5 до 6 мкм (по длине призматических кристаллов).

Изучены некоторые свойства образцов керамобетонов композиционного состава в системе Al₂O₃–SiO₂–SiC–C, полученных способом пневмотрамбования (желобные массы доменного производства). Охарактеризован состав и свойства исходных ВКВС как матричная система бетонов. Изучено влияние температуры обжига в интервале температур 1000-1400 °С и продолжительной (50-100 ч) термообработки в ТП образцов в интервале температур 1300-1390 °С на показатели их линейных размеров, пористости и прочности. Охарактеризован фазовый состав материалов после длительной термообработки, обнаружен существенный прирост их массы, обусловленный процессом высокотемпературного окисления карбида кремния. Охарактеризовано зональное строение керамобетонов в процессе их продолжительной эксплуатации в монолитных футеровках желобов доменных печей.

Матричная система на основе электрокорунда. Методом совместного мокрого измельчения впервые были получены ВКВС смешанного состава на основе электроплавленного корунда (89%) и высокодисперсного кварцевого стекла ВДКС (11%), характеризующиеся высокими реотехнологическими свойствами, что позволило получить отливки с пористостью 17,5-20%. С использованием ВКВС этого состава получены образцы прессованных и вибролитых керамобетонов. Способом вибролитья и литья из саморастекающихся бетонных смесей с влажностью 3,8-4,2% получены образцы корундовых керамобетонов с открытой пористостью 11-15% и пределом прочности при сжатии до 160 МПа. На рисунке 2 представлены электронные снимки структуры матричной системы после сушки при 120 °С (рис. 2а) и обжига при 1400 °С (рис. 2б).

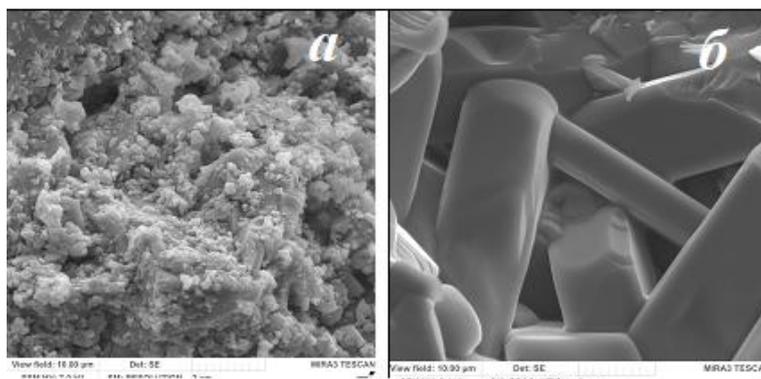


Рис. 2. Электронные снимки структуры матричной системы после сушки при 120 °С (а) и обжига при 1400 °С (б)

Из рисунка 2 следует, что основным процессом при $T_{\text{обж}} = 1400$ °С является образования кристаллов вторичного муллита призматической формы (рис.2 б).

Опытные партии разработанных желобных масс прошли успешные испытания на Магнитогорском металлургическом комбинате.

Исследование процесса холодного спекания оксидной керамики

М.В. Корнюшин¹, Ю.Д. Ивакин², А.А. Холодкова^{1,2}, А.В. Смирнов¹

¹РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия;

²МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

E-mail: kornyushin@mirea.ru

В последние 50 лет снижение температуры спекания керамических материалов является одной из актуальных научно-исследовательских задач, что связано не только со значительным расходом электроэнергии и вредными выбросами в атмосферу, но и с ускоренным выходом из строя дорогостоящих комплектующих: огнеупорной изоляции печей и нагревательных элементов. Кроме того, высокотемпературный обжиг зачастую сопровождается значительным ростом зерен, из-за чего функциональные свойства керамики могут ухудшаться. Например, размер зерен имеет решающее значение при изготовлении многослойных керамических конденсаторов, где толщина диэлектрика может составлять менее одного микрона.

Наиболее перспективным с точки зрения снижения температуры обжига является процесс холодного спекания (ХС). Механизм данного процесса находится в стадии изучения. Особенность ХС заключается в совмещенном воздействии на исходный порошковый материал высокого давления одноосного прессования (до 500 МПа) и температуры (до 300-450 °С) в присутствии водосодержащей фазы (как правило, воды или водного раствора солей или кислот, иногда кристаллогидратов).

В настоящей работе на примере ZnO изучено влияния способа введения активирующей добавки и условий герметизации пресс-формы на плотность и микроструктуру керамики. Активирующие добавки $Zn(CH_3COO)_2$ и NH_4Cl вводили двумя способами: (1) простое нанесение активатора пропиткой и сушкой порошка (пропитка – П) и (2) – с последующей обработкой пропитанного порошка в парах воды (термопаровая обработка – ТПО). ХС проводили при температуре 244 °С, давлении 395 МПа и изотермической выдержке 1 ч. Влияние условий ХС ZnO на относительную плотность керамики представлено на рисунке 1.

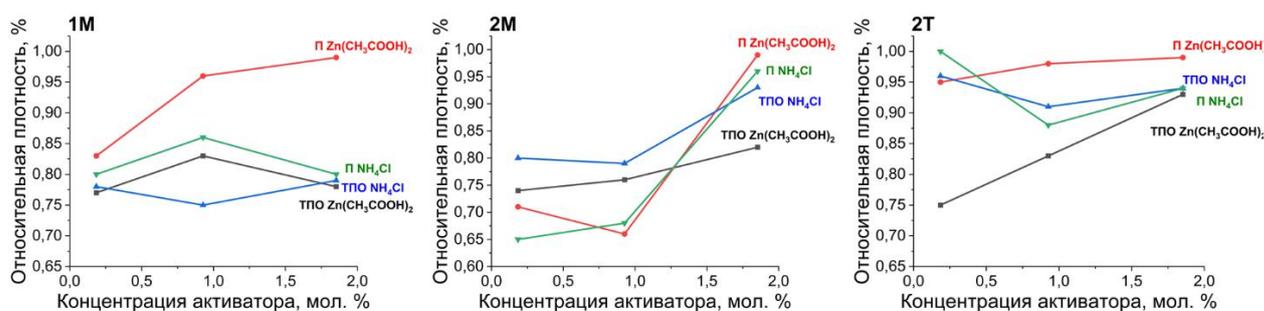


Рис. 1. Влияние условий ХС на относительную плотность керамики ZnO

Увеличение содержания обоих видов активатора сопровождается уплотнением керамических образцов. Наибольший эффект достигается в случае активации порошка способом пропитки. NH_4Cl обладает более слабым активирующим действием, но размер зерен керамики оказывается в 1,5-2 раза меньше, чем при использовании $Zn(CH_3COO)_2$ (рис. 2).

Двойное медное уплотнение (2М) надежно обеспечивает герметизацию рабочего объема и препятствует удалению влаги из межзеренного пространства в процессе спекания. При использовании негерметичной пресс-формы порошок уплотнялся, но давление пара снижалось в рабочем объеме, из-за чего относительная плотность образцов керамики в большинстве случаев не превышала 86%. Герметизация пресс-формы двумя тефлоновыми уплотнительными кольцами (2Т) оказалась наиболее эффективной для достижения наибольшей относительной плотности от 90 до 99%.

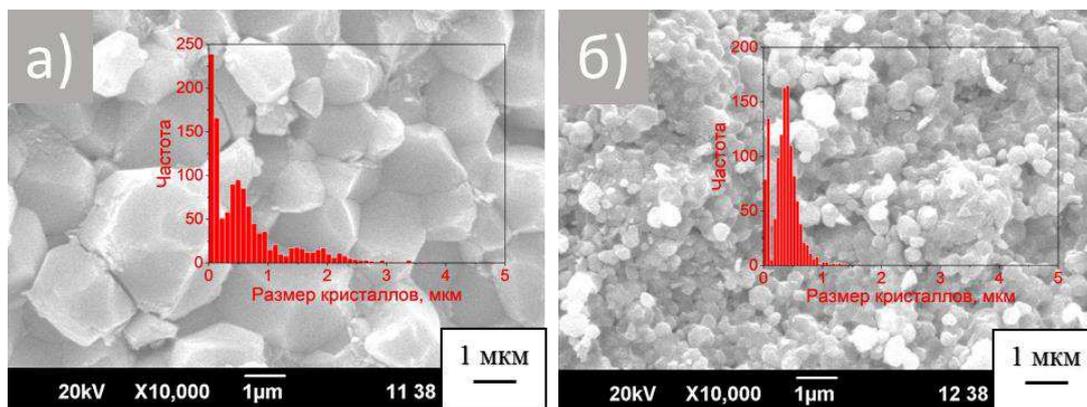


Рис. 2. СЭМ-изображения керамики ХС ZnO с добавкой 1,82 моль % Zn(CH₃COO)₂ (а) и 1,82 моль % NH₄Cl (б)

Результаты ХС ZnO продемонстрировали значение герметизации пресс-формы в процессе уплотнения керамики. Проведенное исследование по ХС BaTiO₃ при температурах от 200 °С до 400 °С, давлении 220 МПа и изотермической выдержке 1 ч продемонстрировало, что с герметизацией пресс-формы медными кольцами керамика с относительной плотностью выше 91% формируется уже при 250 °С, а без герметизации только при 300 °С и выше. Отличие структуры керамики BaTiO₃, изготовленной при температуре 250 °С с герметизацией и без герметизации пресс-формы, представлено на рисунке 3. Результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости образцов керамики ХС, спеченных при температурах 300 °С и 400 °С при герметизации пресс-формы и без герметизации, демонстрируют сопоставимые значения. В зависимости от условий ХС значения относительной диэлектрической проницаемости варьировались от 2311 до 2820 при комнатной температуре на частоте приложенного поля 1 кГц. Таким образом, метод ХС может быть применен для изготовления высокочастотных конденсаторных материалов на основе BaTiO₃.

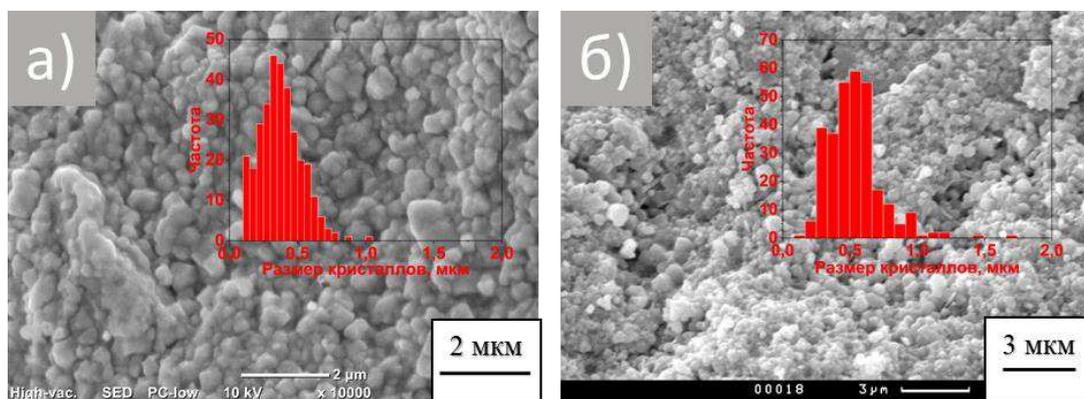


Рис. 3. СЭМ-изображения керамики ХС BaTiO₃ изготовленной с герметизацией (а) и без герметизации пресс-формы (б) при температуре 250 °С

Процессы, происходящие при обработке порошка в парах воды в автоклаве и при ХС, могут иметь схожие механизмы и связаны с проявлением твердофазной подвижности кристаллической структуры оксидов при взаимодействии с водной средой.

Работа выполнена в рамках учета индикаторов по проектам, финансируемым из госбюджета или других внешних источников: Национальный проект «Наука и университеты» для достижения результата «Создание новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей (нарастающий итог)». FSFZ-2022-0003.

Материалы на основе диоксида циркония для аддитивного производства изделий

Т.О. Оболкина, С.В. Смирнов, М.А. Гольдберг, Д.Р. Хайрутдинова, О.С. Антонова, Д.А. Уткин, С.М. Баринов, В.С. Комлев
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН),
г. Москва, Россия
E-mail: obolkina11@gmail.com

Диоксид циркония и композиции на его основе являются перспективными материалами для изготовления деталей методами аддитивных технологий. Среди различных технологий аддитивного производства метод цифровой светодиодной проекции (ЦСП) позволяет производить структуры с высоким разрешением. Также главными преимуществами данной технологии являются высокая скорость и простота процесса печати. При этом процессе светочувствительные керамические суспензии, которые готовятся путем смешивания порошка с фотополимерной смолой, избирательно отверждаются под воздействием ультрафиолетового излучения (УФ). В процессах ЦСП глубина и избыточная ширина отверждения зависят от светопоглощающей способности материала. Обеспечить оптимальную светопоглощающую способность порошков возможно путем применения добавок, придающих окраску материалу за счет поглощения света с определенной длиной волны. Количество работ, посвященных разработке и исследованию материалов на основе диоксида циркония и его композитов, содержащих окрашивающие добавки, для трехмерной печати, ограничено. Поэтому актуальной задачей является разработка материалов на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3$ (Alumina toughened zirconia, ATZ) адаптированных для трехмерной печати методом ЦСП. В этой работе было исследовано влияние состава порошков на поглощающую способность, свойства суспензий на их основе, а также был проведен анализ микроструктуры и механические испытания спеченных деталей, изготовленных с помощью ЦСП.

Исследования порошковых материалов методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) были проведены на микроскопе JEM 2100 (Jeol, Япония). Исследование микроструктуры обожженных изделий проводилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Tescan Vega II (Tescan, Чехия). Микротвердость образцов определяли на микротвердомере 401/402-MVD (Instron Wolpert Wilson Instruments, США) по методу Виккерса.

Порошки ATZ (содержание Y_2O_3 – 3 моль %, Al_2O_3 до 10 мас. %) получали химическим методом соосаждения. По данным ПЭМ порошки состоят из округлых частиц размером менее 10 нм. В готовые порошки вводили водные растворы солей: $CoCl_2$, $(NH_4)Fe(SO_4)$ или $Mn(CH_3COO)_2$. Количество солей брали из такого расчета, что после их термического разложения при обжиге образуются MnO , Fe_2O_3 или CoO . При введении добавок в исходный порошок происходит усиление насыщенности цвета материалов от белого до насыщенного цвета, например, для материалов, содержащих железо до желтого. Насыпная плотность порошков составляет $0,33 \text{ г/см}^3$.

Для установления влияния цвета порошка на его полимеризационную активность были получены спектры диффузного отражения. Коэффициенты диффузного отражения измеряли при помощи ультрафиолетового миниспектрометра (Eye-OnePro 2, X-Rite, США) в диапазоне 380-730 нм с шагом 10 нм. Затем рассчитывали значения функции Кубелки-Мунка (F) по уравнению $F(R) = (1-R)^2 / 2R$, где R – коэффициент диффузного отражения. Для порошков без добавок пиков поглощения не наблюдается. Анализ кобальтсодержащих порошков (ATZ-Co) показал наличие полос поглощения при 530 нм и широкого пика, имеющего поглощение при 625 и 685 нм, характерное для синих оттенков спектра. Марганецсодержащие порошки (ATZ-Mn) имели полосы поглощения при длинах волн 432, 480, 560 и 625 нм.

Полученные порошки смешивали с фотополимерной смолой до получения однородной суспензии. Анализ устойчивости суспензий проводили путем визуального наблюдения во времени за движением границы расслоения между порошком и жидкой фазой суспензии. По результатам анализа было выявлено, что подготовленные суспензии до 6 суток сохраняли устойчивость, осаждение частиц порошка для всех составов не было зарегистрировано. Для оценки влияния состава порошков на полимеризационную активность подготовленные суспензии подвергали воздействию УФ с длиной волны 405 нм в течение различного времени. После воздействия излучения измеряли толщину отвержденного слоя. Анализ полученных данных показал, что для марганецсодержащих суспензий снижение толщины отвержденного слоя в процессе фотополимеризации практически в 2 раза больше по сравнению с суспензиями из материалов без добавок.

Печать изделий выполнялась на 3D-принтере Photon S (Китай) с длиной волны $\lambda=405$ нм. Для удаления фотополимера напечатанные изделия обрабатывали методом низкотемпературного пиролиза в атмосфере азота. Полученные неплотно спеченные изделия обжигали в интервале температур 1450-1500 °С на воздухе.

Методом ЦСП были изготовлены различные керамические изделия. На рисунке 1 представлены: модельное изделие шестеренка (рис. 1 А), зубной имплантат (рис. 1 Б), фрагмент костной ткани (рис. 1 В) после термической обработки. Доля порошка в суспензии составляла 59,0 мас. % для всех составов – это максимальное количество твердой фазы, при которой вязкость суспензии составляет ~ 1200 мПа·с.

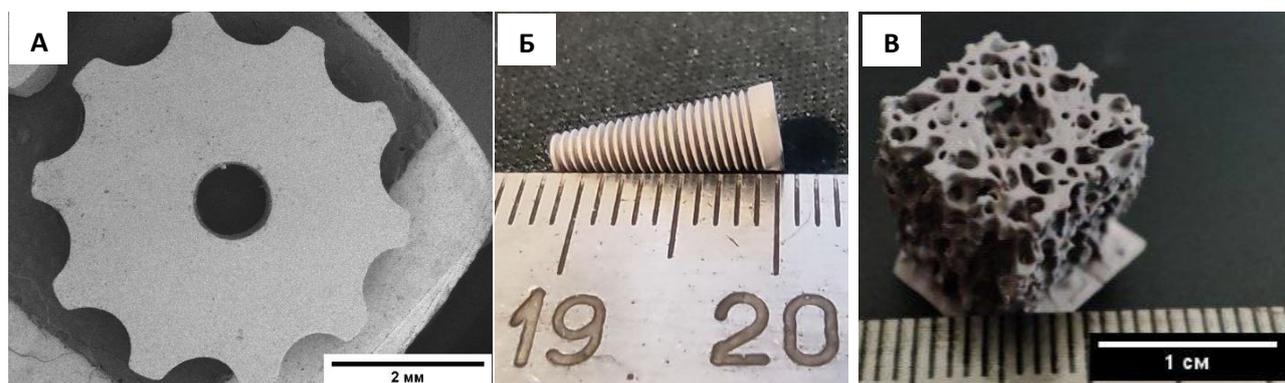


Рис. 1. Цифровые фотографии керамических изделий, полученных с помощью 3D-печати с последующей термообработкой

Согласно данным РЭМ, изделия, содержащие MnO, после обжига характеризуются более плотной микроструктурой, чем изделия без MnO, равномерной пористостью и также отсутствием трещин (рис. 2). Микротвердость изделий достигает $8,5 \pm 0,4$ ГПа для ATZ, $12,0 \pm 0,6$ ГПа для ATZ-Co, для ATZ-Mn – $11,7 \pm 0,6$ ГПа.

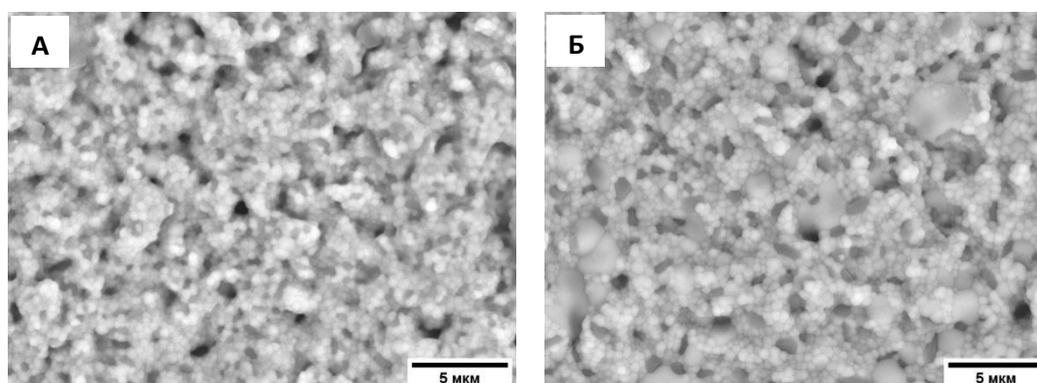


Рис. 2. РЭМ-изображения изделий составов: ATZ (А), ATZ-Mn (Б)

Работа выполнена в рамках государственного задания 075-00320-24-01.

Термодинамика парообразования системы ZnO-WO₃ по данным высокотемпературной масс-спектрометрии

А.С. Смирнов, Н.А. Грибченкова, К.Г. Сморгчов, А.С. Алиханян
Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (ИОНХ РАН),
г. Москва, Россия
E-mail: smirnovas@igic.ras.ru

Вольфрамат цинка (ZnWO₄) проявляет сцинтилляционные свойства, что в совокупности с радиационной чистотой и высокой чувствительностью к ионизирующему излучению делает его весьма перспективным материалом детекторов в различных областях техники и медицины. Получение материалов различной морфологии на основе ZnWO₄, как правило, связано с высокими температурами, при которых возможны нежелательные побочные процессы, приводящие к изменению свойств материалов: неконтролируемое испарение компонентов, и, как следствие, изменение фазового состава материала; взаимодействие с материалом рабочей камеры и потеря химической чистоты. В связи с этим для оптимального выбора метода получения материала, подавления нежелательных побочных процессов при синтезе, определения термической стабильности будущих изделий необходимы термодинамические характеристики соединений, входящих в состав материала, а также термодинамическое описание фазовых равновесий и процессов парообразования.

Исследование термодинамики различных процессов, протекающих при высоких температурах, является специфической задачей, которую можно решить с помощью весьма ограниченного числа методов физико-химического анализа. Одним из таких методов уникальным по объёму получаемой информации является метод высокотемпературной масс-спектрометрии, который сочетает эффузионный метод Кнудсена и масс-спектральный анализ газовой фазы. Данный метод позволяет определить состав насыщенного пара, парциальные давления компонентов пара, активности компонентов конденсированной фазы, стандартные энергии Гиббса и энтальпии реакций и стандартные энтальпии образования соединений. В данной работе впервые методом высокотемпературной масс-спектрометрии исследована система ZnO-WO₃.

Согласно данным литературы в системе ZnO-WO₃ существует одно термодинамически стабильное соединение ZnWO₄ и гетерогенные области [WO₃ + ZnWO₄] и [ZnWO₄ + ZnO] (рис. 1).

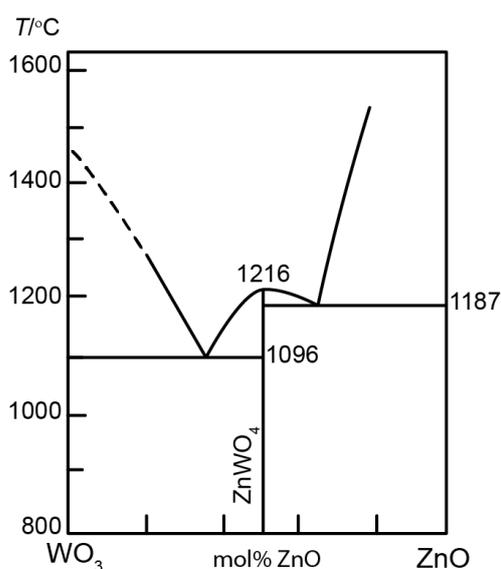
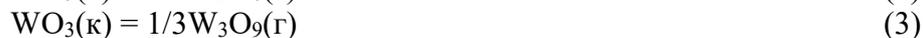


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы ZnO-WO₃

В данной системе методом твердофазного синтеза на воздухе при температуре 1000 °C были получены образцы ряда составов. По данным рентгенофазового анализа полученные

образцы соответствовали равновесной фазовой диаграмме. Процессы парообразования образцов исследовали на высокотемпературном магнитном масс-спектрометре МС-1301 с использованием кварцевых эффузионных камер в диапазоне температур 952-1242 °С.

Масс-спектральный анализ насыщенного пара над ZnO показал наличие только атомов Zn и молекул O₂ (1). В свою очередь газовая фаза над WO₃ представлена газообразными оксидами вольфрама: W₂O₆, W₃O₈, W₃O₉ и W₃O₁₂ (2-5).

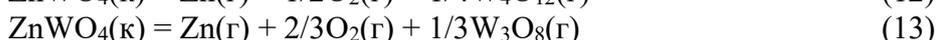
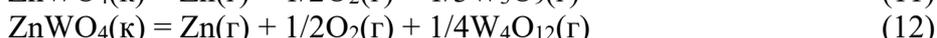
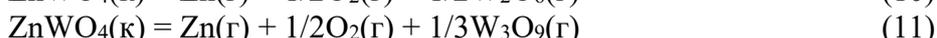


В газовой фазе системы ZnO–WO₃ во всем диапазоне составов в исследуемом температурном интервале присутствовали только продукты сублимации ZnO и WO₃ в различных соотношениях, газообразные смешанные оксиды не были обнаружены. Установлено, что сублимация твердой фазы системы во всем диапазоне составов происходит инконгруэнтно с преобладанием в насыщенном паре продуктов сублимации ZnO. В связи с этим происходит обогащение конденсированной фазы менее летучим компонентом WO₃, и фигуративная точка системы смещается в фазовом пространстве в сторону оксида вольфрама. Таким образом, при сублимации соединения ZnWO₄ в интервале температур 1096-1216 °С выделяется вторая фаза – расплав, а фигуративная точка системы перемещается в гетерогенную область [ZnWO₄ + расплав]. В изотермических экспериментах по испарению образцов начального состава ZnWO₄ выше температуры ликвидуса было обнаружено, что парообразование происходит при равенстве составов конденсированной и газовой фаз, что дало основания сделать вывод о существовании азеотропа в области расплава, а также определить его состав: 49,8±2,4 моль % ZnO при температуре 1242 °С.

На основании значений парциальных давлений компонентов пара были определены термодинамические активности компонентов системы ZnO–WO₃ во всем диапазоне составов. Анализ температурных зависимостей активностей компонентов позволил определить температуры солидуса и ликвидуса для состава 49,9 моль % ZnO, 1094±3 °С и 1190±3 °С, соответственно. Полученные значения согласуются с данными термического анализа. Изучение реакций (6-8), протекающих в газовой фазе над расплавом и гетерогенной областью [ZnWO₄ + расплав] с участием газообразных оксидов вольфрама и кислорода, дало возможность вычислить энтальпию образования W₃O₈, равную 1771,7±130,1 кДж/моль.



Величины констант равновесия реакций сублимации ZnWO₄ (9-13) при разных температурах были использованы для расчета стандартных энтальпий этих реакций по «второму и третьему законам термодинамики».



На основании найденных значений энтальпий реакций с использованием справочных данных была определена величина стандартной энтальпии образования ZnWO₄, которая составляет 1235,1±31,8 кДж/моль.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 21-13-00086. Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

Влияние ионов-активаторов на сцинтилляционные характеристики прозрачной керамики, полученной на основе сложных оксидов структурного типа граната

В.В. Дубов¹, П.В. Карпюк¹, И.Ю. Комендо¹, А.Г. Бондарев², М.В. Коржик^{1,2},
В.А. Пустоваров³

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²Институт ядерных проблем БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь; ³УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

E-mail: valery_dubov@mail.ru

Оксиды структурного типа граната применяются в качестве люминофоров и сцинтилляторов, высвечивающих в видимой и ближней ИК-областях. В данном классе соединений наилучшими функциональными характеристиками обладают многокомпонентные составы $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}$, $(Gd,Y)_3(Al,Ga)_5O_{12}$, $(Gd,Lu)_3(Al,Ga)_5O_{12}$ и другие. При их активации ионами Ce^{3+} могут быть достигнуты значительные величины световых выходов сцинтилляций (десятки тысяч фот./МэВ) и быстрая кинетика высвечивания (десятки нс). Варьирование типа и количества элементов матрицы, элементов-активаторов позволяет управлять свойствами и оптимизировать их для различных задач: радиометрии, медицинской визуализации, исследований в области физики высоких энергий и других. Получение гранатов сложных составов в монокристаллической форме затруднено из-за испарения галлия при нагревании сырья и неоднородного распределения компонентов при кристаллизации. Это мотивирует развивать альтернативный подход – изготовление материалов в керамическом (поликристаллическом) виде. К преимуществам керамики относятся сниженная температура технологического процесса, упрощённый контроль форм, размеров изделий и их механической обработки, фазовая стабильность многокомпонентных составов.

В данной работе синтезировали порошки оксидов $(Gd,Y)_3(Al,Ga)_5O_{12}$ (GYAGG), активированных ионами Ce^{3+} , Tb^{3+} , Yb^{3+} , и на их основе изготавливали керамику одноосным прессованием и спеканием в кислородной атмосфере при температурах свыше 1600 °С. Получение исходных порошков осуществляли методом совместного осаждения гидрокарбонатом аммония NH_4HCO_3 из смесевых азотнокислых растворов металлов $Me(NO_3)_3$ с последующей термической обработкой гидрокарбонатных осадков при 800 °С и выше для перевода прекурсора в оксидную форму и образования фазы граната. Такой подход обеспечивает смешение компонентов на уровне ионов и позволяет получать однофазные порошки с первичными частицами размером около 50 нм, способные спекаться в прозрачный керамический материал (рис. 1а).

Керамика GYAGG:Ce, содержащая ионы Ce^{3+} в количестве 0,015 ф.е., обладает световым выходом сцинтилляций около 39 000 фот./МэВ, что установили измерением амплитудных спектров γ -квантов с энергией 662 кэВ. Среднее время затухания, определённое методом стробоскопической электронно-оптической хронографии при возбуждении рентгеновским излучением, составляет около 35 нс. Соактивация данного состава ионами Yb^{3+} в количестве 0,3 ф.е. способствует снижению времени затухания до $0,8 \pm 0,2$ нс при снижении величины световых выходов до ~ 150 фот./МэВ. Это делает материал сопоставимым по характеристикам с кросс-люминесцентными УФ-излучающими сцинтилляторами, например, с BaF_2 . Но у GYAGG:Ce, Yb спектр высвечивания расположен в видимом диапазоне длин волн с максимумом порядка 530 нм, что способствует лучшей совместимости с большинством фотодетекторов. Снижение содержания Yb^{3+} до 0,1 ф.е. позволяет увеличить интенсивность рентгенолюминесценции (РЛ) как в видимой, так и ближней ИК-областях, однако в ИК-диапазоне она выше на 1,5-2 порядка. Введение ионов Tb^{3+} (0,15 ф.е.) наряду с остальными активаторами даёт возможность повысить интенсивность РЛ в видимой области до сопоставимых с ИК-диапазоном значений (рис. 1б).

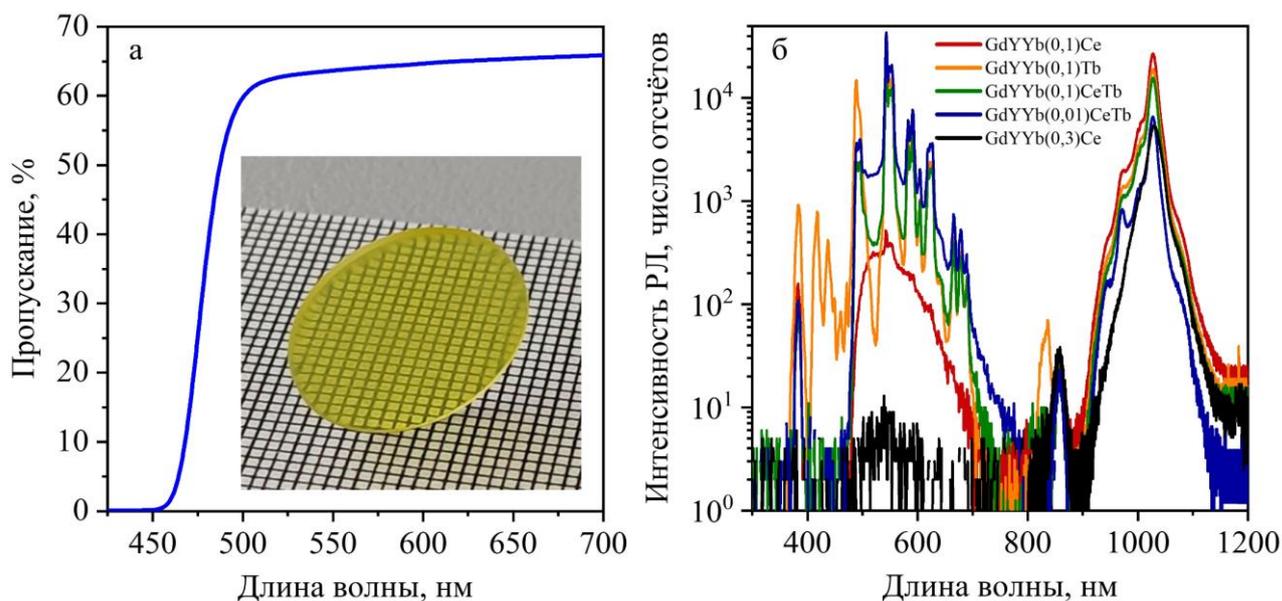


Рис. 1. Спектр пропускания и изображение типичного образца (а), спектры рентгенолюминесценции керамик с различными активаторами (б)

Составы GYAGG:Ce,Tb,Yb при возбуждении γ -квантами с энергией 662 кэВ демонстрируют световыход до 200 000 фот./МэВ. Расширение спектра высвечивания имеет важное прикладное значение, т. к. повышается эффективность взаимодействия сцинтилляционного света с полупроводниковыми детекторами, области чувствительности которых включают в себя видимый и ближний ИК-диапазоны. Похожий результат наблюдается и для составов GYAGG:Tb,Yb, но в отсутствие ионов Ce^{3+} спектр в видимой области представляет собой набор узких линий переходов от $^5D_{3,4}$ уровней ионов Tb^{3+} , а не сплошную полосу.

По вышеописанной методике также получали керамику состава $(Gd,Y,Lu)_3(Al,Ga)_5O_{12}$ (GYLAGG), активированные ионами Ce^{3+} и Mg^{2+} . Данный материал объединяет в себе преимущества хорошо изученных гранатов $(Gd,Y)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ (сравнительно быструю кинетику и значительный световыход) и $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$, $(Gd,Lu)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ (высокую плотность). Введение ионов Lu^{3+} способствует увеличению эффективного заряда соединения, плотности и тормозной способности, но ведёт к появлению медленных компонент в кинетике сцинтилляций. Для минимизации их влияния материал дополнительно соактивировали ионами Mg^{2+} в количестве до 100 ppm и исследовали его сцинтилляционные свойства в зависимости от содержания соактиватора. Оценку световыхода проводили, измеряя амплитудные спектры γ -квантов с энергией 662 кэВ; кинетические спектры сцинтилляций и спектры временного разрешения совпадений записывали с применением аннигиляционных γ -квантов с энергией 511 кэВ. Установили, что введение 50 ppm ионов Mg^{2+} приводит к снижению среднего времени высвечивания с 95 до 55 нс (на ~ 40%), при этом медленная компонента уменьшается с 290 до 115 нс (на ~ 60%). Ускорение кинетики сопровождается снижением световыхода на ~ 20% (с 33 500 до 27 300 фот./МэВ). Полуширина измеренного спектра временного разрешения совпадений составляет менее 100 пс, что для материала структурного типа граната наблюдали впервые. Таким образом, материал GYLAGG:Ce,Mg можно рассматривать в качестве сцинтиллятора, перспективного для использования в ПЭТ-сканерах нового поколения.

Аналитические исследования проведены с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт». Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Получение керамических материалов на основе оксида гафния и изделий на их основе для высокотемпературного применения

Е.А. Кораблева¹, Р.А. Пимкин^{1,3}, А.А. Анашкина^{1,3}, А. А. Улановский²

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²ООО «Обнинская термоэлектрическая компания», г. Обнинск, Россия; ³РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Керамические материалы на основе тугоплавкого оксида гафния являются перспективными для высокотемпературного применения свыше 2500 °С. Оксид гафния обладает высокой температурой плавления 2790 °С. Наиболее успешно свойства керамики на основе оксида гафния применяются в отраслях промышленности, где требуется сочетание сверхвысоких рабочих температур с химической инертностью. Такие свойства керамики на основе оксида гафния, как высокая огнеупорность, устойчивость к термоудару при эксплуатации, высокая химическая инертность, делают керамику незаменимым и единственным возможным высокотемпературным материалом для ряда применений. Одно из них – это изоляторы в виде трубок с одним или двумя каналами диаметром 0,6-0,8 мм для средств измерения высоких температур в различных средах.

Известно, что оксид гафния, стабилизированный оксидами Y_2O_3 , Gd_2O_3 , Sc_2O_3 , обладает ионной проводимостью по кислороду при повышении температуры от (350-500) °С и является твердым электролитом. Однако, для получения изоляторов требуется химически чистый порошок с содержанием оксида гафния до 99,8%. Известно, что особо чистые порошки плохо спекаются, требуется высокая температура спекания свыше 2000 °С.

Целью исследования было изучение возможности получения плотного керамического материала на основе чистого оксида гафния без стабилизирующих добавок и изделий на его основе для высокотемпературного применения при температурах свыше 2200 °С для применения в качестве изолятора термодар.

В данной работе проведено исследование влияния размера частиц чистых порошков оксида гафния различных производителей и условий компактирования методом холодного изостатического прессования на получение керамического материала максимальной плотности (близкой к теоретической) при сохранении наноструктуры. В качестве исходных использовали порошки оксида гафния производства АО «Чепецкий механический завод» (АО «ЧМЗ») и ФГБУН «ИОНХ РАН», Россия.

Микроструктура и морфология частиц агломератов этих порошков представлены на рисунке 1. Кроме того, определены гранулометрический состав и удельная поверхность порошков оксида гафния. Порошки подвергали помолу в биссерной мельнице в течение 2 ч. По данным электронной микроскопии порошок производства ФГБУН «ИОНХ РАН» представляет собой агломераты 3-10 мкм (рис.1 а, б), а агломераты частиц порошка АО «ЧМЗ» образованы челнокообразными частицами длиной 1-6 мкм и шириной 0,5 - 0,8 мкм (рис.1 в), которые состоят из частиц сферической формы размером ~ 80-130 нм (рис.1 г).

В качестве метода формования изделий-трубок размерами 2,2×0,8×50 мм был выбран метод холодного изостатического прессования в специальной технологической оснастке при максимальном давлении $P_{max}=150-200$ МПа. Технологическая оснастка состоит из матрицы, изготовленной из эластичного материала на основе полиуретана, которая формирует при прессовании внешнюю поверхность с размерами, учитывающими усадку заготовок при спекании и прессовании, и из металлической внутренней иглы, которая задает форму и размеры внутреннего отверстия изделия также с учетом усадочных характеристик заготовок при спекании.

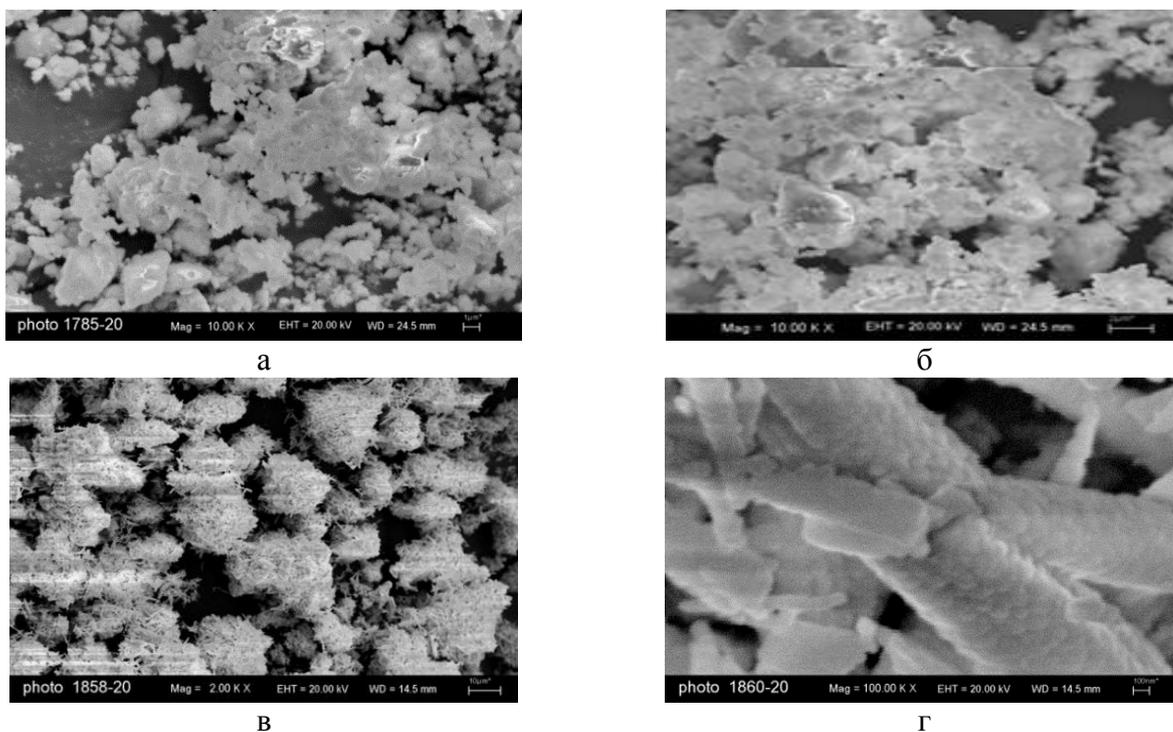


Рис. 1. Морфология и структура частиц агломератов порошков: а), б) производства ФГБУН «ИОНХ РАН»; в), г) производства АО «ЧМЗ»

Установлено, что керамика, полученная из нанокристаллического порошка производства АО «ЧМЗ», спекается до максимальной кажущейся плотности 9,89-9,9 г/см³, что соответствует 98-99% от теоретической плотности, в интервале температур 1700-2200 °С, а полученная из порошка производства ФГБУН «ИОНХ РАН» – спекается при той же температуре до кажущейся плотности 9,1-9,3 г/см³ и открытой пористости до 7-12%.

Структура спеченной керамики из порошка производства АО «ЧМЗ» мелкокристаллическая с размером агломератов частиц до 1-2 мкм, которые состоят из наноразмерных кристаллитов (рис. 2а, б). Ее структура во всех исследуемых зонах трубок достаточно равномерная и однородная по размерам и морфологии зерен. Изготовленные трубки-изоляторы для термопар были успешно испытаны в установке для калибровки датчиков измерения температуры в ООО «Обнинская термоэлектрическая компания» в диапазоне температур 1700-2200 °С со скоростью нагрева 40 °С/с.

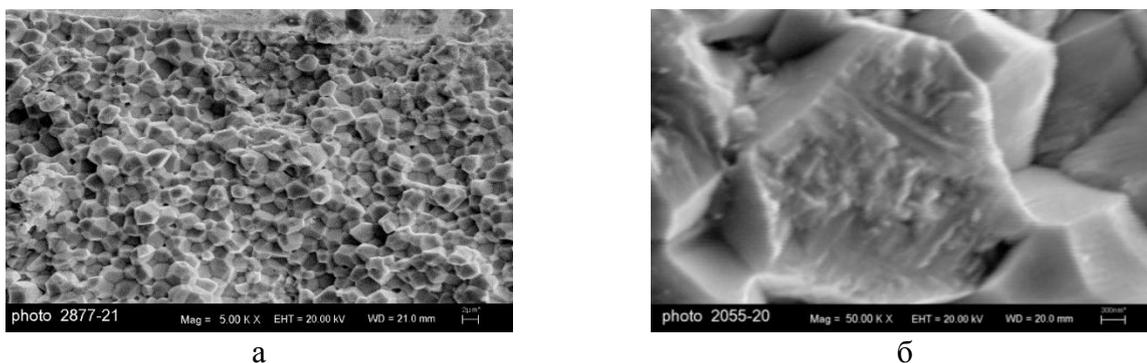


Рис. 2. Микроструктура спеченного материала из оксида гафния производства АО «ЧМЗ» с разным увеличением а) $\times 5000$; б) $\times 50000$

Испытания показали, что керамические изделия, изготовленные из чистого (99,8%) оксида гафния методом холодного изостатического прессования и последующего спекания, являются изоляторами и выдерживают нагревы с большой скоростью до температуры 2200 °С.

Керамоматричные композиты на основе карбида кремния и диборида циркония, армированные непрерывным волокном, полученные методом предкерамических препрегов

А.В. Уткин^{1,2}, Я.М. Шершов^{1,2}, Р.А. Орбант^{1,2}, М.А. Голосов¹, Д.А. Банных¹, Н.И. Бакланова¹

¹Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН), г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия

E-mail: Utkin@solid.nsc.ru

В последние годы растет интерес к разработке и применению армированных керамических композитов с матрицей на основе диборида циркония и карбида кремния, которые могут быть использованы для изготовления теплонагруженных деталей, режущего инструмента, электродуговых электродов и др. Одним из перспективных методов формирования таких композитов является метод керамических препрегов, который активно развивается в зарубежной промышленности, однако в России этот метод пока не получил широкого распространения.

Целью данной работы была разработка способа формирования керамоматричных композитов с матрицами на основе карбида кремния и диборида циркония, армированных углеродным или карбидокремниевым волокном через керамические ленты – препреги.

Задачи включали разработку способа получения суспензий из порошков карбида кремния и диборида циркония, оптимизацию их состава, формирование препрегов с помощью пропитки армирующих наполнителей суспензиями, отработку температурных режимов обработки препрегов, изготовление и исследование модельных образцов.

Для приготовления суспензий использовались порошки ZrB_2 и SiC различной зернистости, органические терморезактивные смолы и растворители. Предкерамические суспензии готовили механическим перемешиванием. Жгут волокна пропитывали предкерамической суспензией, формировали однонаправленные ленты и сушили при комнатной температуре (рис. 1). Препреги раскраивали, собирали в стопки, помещали в вакуумируемый пакет и автоклавируют при 250-300 °С. Далее образцы карбонизировали при 1000 °С и силицировали при 1500-1650 °С.

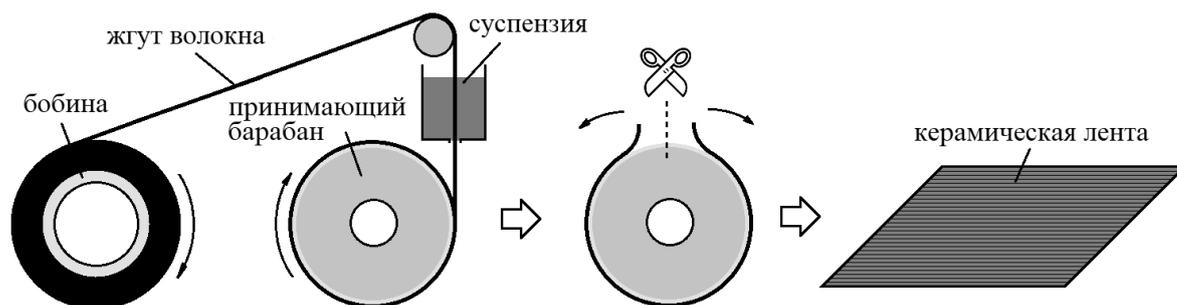


Рис. 1. Схема получения предкерамических препрегов

Результаты показали, что жидкофазное силицирование при более низких температурах позволяет снизить высокотемпературную деградацию армирующего волокна и сохранить высокие механические свойства композитов. Введение пластификаторов и модификация связующего позволяет значительно снизить пористость образцов (менее 3%). SiC/SiC -композиты проявляют хрупкий характер разрушения ввиду отсутствия интерфазы, C/ZrB_2 -композиты демонстрируют псевдопластичное разрушение. Механическая прочность на изгиб составляет 170-190 МПа для SiC/SiC -композитов и 30-70 МПа для C/ZrB_2 -композитов.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-19-00212).

Увеличение трещиностойкости керамик через организации синергетического действия диссипативных механизмов

С.П. Буякова, Ю.А. Мировой, А.Г. Бурлаченко, А.С. Буяков, В.В. Шмаков
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН),
г. Томск, Россия
E-mail: sbuyakova@ispms.ru

Поиск механизмов увеличения трещиностойкости керамических материалов – одна из основных задач современных исследований в области управления свойствами непластичных материалов. Низкая трещиностойкость керамических материалов, обусловленная типом химической связи, является главным препятствием к использованию керамических материалов и керамических композитов для расширения областей их применения в машиностроении, ракетостроении, медицине. Несмотря на достигнутые к настоящему времени успехи в организации диссипативных структур в керамических материалах, достигаемое при этом приращение трещиностойкости, зачастую недостаточно для использования их в изготовлении элементов конструкций машин и механизмов, в медицинских изделиях. Решением проблемы низкой трещиностойкости керамических материалов может стать структурно-фазовая организация, обеспечивающая совокупное действие разных механизмов подавления зарождения, торможения и остановки трещин.

Целью данной работы стало выявление возможности синергетического действия нескольких механизмов увеличения вязкости разрушения керамических композитов на основе оксида циркония ZrO_2 , стабилизированного 3 моль % оксидом иттрия Y_2O_3 в тетрагональной модификации (3YSZ). Для этого в керамическую матрицу 3YSZ с трансформационным превращением вводились многослойные углеродные нанотрубки MWCNTs и частицы гексагонального нитрида бора h -BN как по отдельности, так и совместно.

Средний размер зерна в керамике 3YSZ составил 0,68 мкм. В композитах увеличение содержания включений MWCNTs и h -BN сопровождалось уменьшением среднего размера зёрен керамической матрицы 3YSZ. Наименьший размер зёрен 3YSZ имели композиты с MWCNTs. При введении в циркониевую матрицу 0,25 мас. % MWCNTs средний размер зерна 3YSZ составил 0,71 мкм. В композите 3YSZ– h -BN при содержании нитрида бора 0,25 мас. % средний размер зерна циркониевой матрицы составил 0,678 мкм.

На рисунке 1 приведены результаты определения критического коэффициента интенсивности напряжений (K_{IC}) по суммарной длине трещин от отпечатка индентора Виккерса ($K_{IC(indent)}$) и методом трехточечного изгиба балки с V-образным надрезом (SEVNB, Single-Edge-V-Notched beam ($K_{IC(SEVNB)}$)) для керамики 3YSZ и композитов 3YSZ–MWCNTs / h -BN.

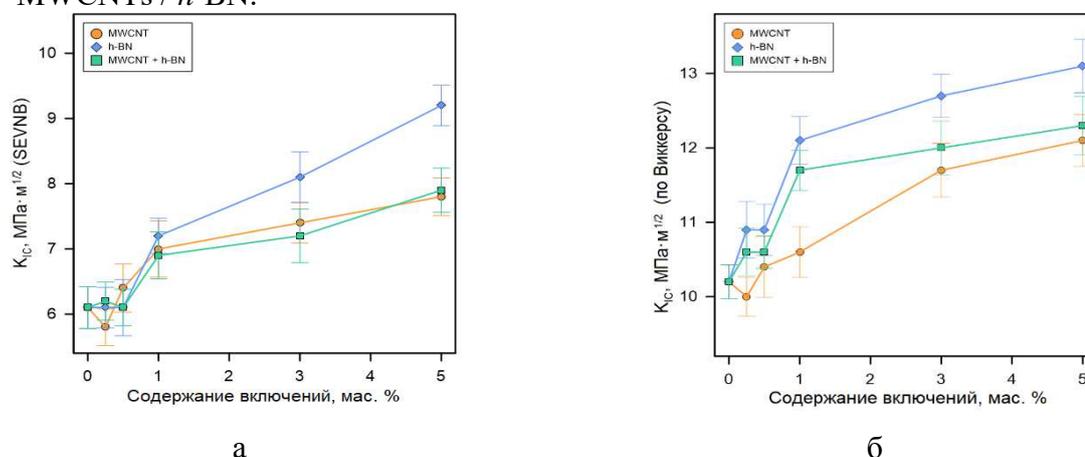


Рис. 1. K_{IC} керамических композитов 3YSZ–MWCNTs / h -BN, определенный методом SEVNB (а) и по суммарной длине трещин от отпечатка индентора Виккерса (б)

Для керамики 3YSZ $K_{IC(indent)}$, рассчитанный по суммарной длине трещин, составил $10,20 \pm 0,23$ МПа·м^{1/2}, а $K_{IC(SEVNB)}$, определенный методом V-образного надреза – $6,10 \pm 0,32$ МПа·м^{1/2}.

Присутствие в керамической матрице 3YSZ включений MWCNTs / *h*-BN оказало положительное влияние на трещиностойкость керамики. Величина K_{IC} для всех полученных в данной работе композитов возрастала при увеличении содержания включений. Наибольшую вязкость разрушения имели композиты с включениями гексагонального нитрида бора. При содержании *h*-BN в керамической матрице 5 мас. % величина $K_{IC(SEVNB)}$ составляла $9,20 \pm 0,31$ МПа·м^{1/2}.

Вязкость разрушения композитов 3YSZ–MWCNTs с содержанием углеродных нанотрубок 1 об. % и более, также была выше, чем полученной в данной работе циркониевой керамики. Для композита 3YSZ–MWCNTs с содержанием углеродных нанотрубок 5 об. %, величина $K_{IC(SEVNB)}$ составила $7,80 \pm 0,29$ МПа·м^{1/2}. Для композитов 3YSZ–MWCNTs–*h*-BN наибольшая величина $K_{IC(SEVNB)}$ составила $7,90 \pm 0,34$ МПа·м^{1/2} при суммарном содержании включений 5 об. %.

Из результатов исследований влияния включений MWCNTs / *h*-BN на трещиностойкость керамики 3YSZ можно сделать вывод, что наиболее эффективным решением увеличения работы распространения трещин из рассмотренных является введение в керамическую матрицу низкомолекулярных частиц гексагонального нитрида бора. Наличие относительно слабых межфазных границ в композитах 3YSZ–*h*-BN является причиной отклонения и бифуркации трещин и, как следствие, увеличения работы их распространения.

Для всех полученных в данной работе композитов увеличение содержания включений привело к увеличению трещиностойкости. В композитах с включениями углеродных нанотрубок распространение трещин сдерживало «мостикование». В композитах с включениями гексагонального нитрида бора увеличение ударной вязкости обусловлено полной остановкой и/или бифуркацией трещин на относительно слабых границах «матрица – включение». Однако ответ на вопрос о синергии механизмов увеличения ударной вязкости композитов 3YSZ–MWCNTs / *h*-BN может быть получен, в том числе из анализа приращения *m*-ZrO₂ в процессе разрушения.

Анализ фазового состава поверхности разрушения керамики 3YSZ и композитов 3YSZ–MWCNTs / *h*-BN показал, что доля моноклинной модификации ZrO₂ на поверхности разрушения для всех рассматриваемых материалов больше, чем зафиксировано на полированной поверхности. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что трансформационный переход из тетрагональной модификации *t*-ZrO₂ в моноклинную *m*-ZrO₂ в поле напряжений трещин реализуется для всех полученных композитов. Однако приращение *m*-ZrO₂ (ΔX_m) при разрушении весьма отличается для композитов с разным типом включений. Присутствие в матрице 3YSZ низкомолекулярных включений *h*-BN уменьшало модуль упругости керамических композитов в целом и, тем самым, уменьшалась энергия деформации перехода *t*-ZrO₂ → *m*-ZrO₂, что приводило к увеличению доли моноклинной модификации оксида циркония в композитах с включениями гексагонального нитрида бора.

Судя по полученным данным о количестве присутствующей на поверхностях разрушения композитов моноклинной фазы диоксида циркония, немаловажное значение для трансформационного перехода *t*-ZrO₂ в *m*-ZrO₂ имели остаточные термические напряжения в композитах. Расчет остаточных термических напряжений на границах раздела фаз в композитах показал, что в керамической матрице 3YSZ на границе с включениями MWCNTs при охлаждении от температуры спекания формируются растягивающие напряжения $\sigma_0 \approx 0,73$ ГПа. В керамической матрице 3YSZ на границе с включениями *h*-BN, напротив, формируются сжимающие напряжения $\sigma_0 \approx -1,29$ ГПа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0009.

Кинетика залечивания высокотемпературных композиционных материалов ZrB_2-SiC

А.Г. Бурлаченко, С.П. Буякова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН), г. Томск, Россия

E-mail: burlachenkoag8@gmail.com

В настоящее время в значительной мере возрос интерес к керамике на основе боридов и карбидов металлов в связи с развитием исследований в области высокотемпературных теплозащитных материалов. Использование высокотемпературной керамики в качестве материала тепловой защиты теплонагруженных конструктивных элементов способствует увеличению энергоэффективности элементов конструкции летательных аппаратов.

Наиболее перспективными при создании теплозащитных конструкций многоциклового использования в условиях эксплуатационных температур свыше 2000 °С являются керамические композиционные материалы на основе ZrB_2-SiC благодаря высокой термостойкости и малому удельному весу. Известно, что керамические композиционные материалы ZrB_2-SiC обладают способностью к самозалечиванию.

Получение данных о кинетике самозалечивания высокотемпературной керамики при циклическом высокотемпературном воздействии позволит увеличить их надёжность посредством создания условий для реализации процессов, обеспечивающих самозалечивание дефектов.

Для испытаний при циклическом высокотемпературном воздействии керамические образцы имели форму дисков $\varnothing \approx 15$ мм, $h \approx 4$ мм и были получены горячим прессованием при давлении 35 МПа с изотермической выдержкой в течение 15 мин при температуре 1800 °С.

Дефекты в виде пропила формировались на поверхности образцов с помощью алмазного инструмента. Глубина пропилов во всех исследуемых образцах составляла 100 ± 5 мкм, ширина раскрытия на поверхности 60 ± 5 мкм.

Кинетика самозалечивания сформированных дефектов изучалась после циклического нагрева образцов ZrB_2-SiC до температур 1200, 1400 и 1600 °С с изотермической выдержкой 0, 5 и 10 мин в воздушной среде. Скорость нагрева составляла 5 °С/мин, охлаждение производилось вместе с печью. Измерялась остаточная глубина дефектов и рассчитывался процент самозалечивания искусственно сформированных дефектов.

Известно, что самозалечивание в керамических композиционных материалах ZrB_2-SiC является результатом окислительных процессов. Процесс окисления происходит либо с увеличением массы, либо с её уменьшением за счет испарения легкоплавких соединений. Таким образом, в керамических композиционных материалах ZrB_2-SiC самозалечивание дефектов реализуется посредством двух механизмов: окисления диборида циркония и образования стеклофазы. В керамике ZrB_2 самозалечивание возможно только посредством окисления бориды циркония до оксида ZrO_2 .

В результате термической обработки самозалечивание дефектов в керамических композиционных материалах ZrB_2-SiC при температуре 1400 °С с постепенным увеличением продолжительности изотермической выдержки привело к снижению залечивающей способности и проявлению дефектов, что вызвано испарением легкоплавких стекол и увеличением интенсивности окисления поверхности. Испытания образцов ZrB_2 и ZrB_2-SiC при температуре 1400 °С обеспечили самозалечивание дефектов в среднем от 20 до 40%.

В керамических композиционных материалах ZrB_2-SiC для режимов термообработки без изотермической выдержки при температуре 1600 °С наибольшее значение процента залечивания наблюдались для составов с содержанием карбида кремния от 10 до 20 об. % и достигали 98%. Для образцов с содержанием 0; 5; 25 об. % SiC , заполнение дефектов не превышало 80%.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН (проект FWRW-2021-0009).

«Композит в композите» – подход к увеличению механических параметров через управление структурой на примере системы ZrB_2-TaB_2-SiC

А.С. Буяков, В.В. Шмаков, С.П. Буякова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН),

г. Томск, Россия

E-mail: alesbuyakov@ispms.ru

Несмотря на высокую твердость, прочность, стойкость к изнашиванию и низкий удельный вес тугоплавкие керамические материалы требуют особого отношения при проектировании изделий, эксплуатируемых в экстремальных условиях, по причине свойственной им хрупкости. Многие коллективы исследователей посвящают свою работу поиску подходов и механизмов увеличения трещиностойкости керамических матриц через введение армирующих компонентов. Однако часто такие решения являются компромиссными, и увеличение трещиностойкости способно негативно сказаться на иных структурно-зависимых характеристиках.

В настоящем исследовании был применен подход к увеличению трещиностойкости через структурную организацию материала по принципу «композит в композите», без введения новых фаз. Исследование осуществлено на примере системы ZrB_2, TaB_2 и SiC , где композиционная матрица ZrB_2-SiC была наполнена композиционными включениями TaB_2-SiC , содержание которых в матрице составляло от 10 до 50 об. %. Материалы были получены путем спекания порошковых смесей матрицы и предварительно сформированных гранул TaB_2-SiC под давлением в защитной атмосфере.

Обнаружено, что организация структуры «композит в композите» обеспечивает значительный, более чем в три раза, прирост трещиностойкости по сравнению с композитами, сформированными по принципу гомогенного распределения однофазных включений в однофазной матрице – от $3,22 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ до $11,2 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Исследование микроструктуры с помощью растровой электронной микроскопии и структурных параметров фаз методом рентгеноструктурного анализа позволяет заключить, что достигнутый эффект обусловлен формированием и характером распределения остаточных упругих сжимающих напряжений, оказывающих диссипативное действие на распространяющиеся трещины, а наличие этих напряжений обусловлено различиями в величинах коэффициентов теплового расширения компонентов.

Поскольку абразивное изнашивание керамических материалов происходит за счет образования поверхностных микротрещин и уноса отколотых частиц материала, следствием увеличенной трещиностойкости двойных композитов является повышенное сопротивление абразивному износу по сравнению с композитами, обладающими традиционной структурой. Кроме того, все исследуемые композиты демонстрируют устойчивую способность к самозалечиванию поверхностных дефектов в виде сколов, пор и трещин при отжиге в кислородсодержащей среде. Самозалечивание происходит за счет заполнения неровностей поверхности вновь формируемыми оксидными фазами, обладающими меньшей температурой плавления и большей текучестью по сравнению с исходным композитом, а структура и состав исследуемых материалов определяют температурный интервал (от 1000 до 1500 °С) и кинетику процесса залечивания.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0009.

Свойства керамических материалов SiC-NbC

Ш.Ш. Шабанов¹, Г.Д. Кардашова²

¹ДГУ, г. Махачкала, Россия; ²ДГТУ, г. Махачкала, Россия

E-mail: sh-shaban@yandex.ru

Добавление к карбиду кремния карбидов переходных металлов позволяет получить керамические материалы на основе карбида кремния с различной теплопроводностью и электропроводностью. Керамика SiC-NbC была получена спеканием при температуре 2373-2473 К в атмосфере Ar в течение 1 ч. Использовался порошок SiC (зеленый) политипа 6Н. Порошки SiC и NbC дисперсностью 5 мкм смешивали в шаровой мельнице. Количество порошка SiC и NbC при смешивании изменялось от 10 до 90 мас. %, с шагом 20%. Плотность и пористость полученных образцов керамики SiC-NbC определяли методом гидростатического взвешивания. Данные по плотности и пористости для керамики SiC-NbC представлены в таблице.

№ п/п	Температура получения, К	Количество NbC, %	Плотность кажущаяся, $\rho, \times 10^3, \text{ кг/м}^3$	Открытая пористость П, %
1	2373	10	1,68	53,7
2	2373	30	1,82	53,4
3	2373	50	2,29	52,4
4	2473	70	3,39	38,0
5	2373	90	5,23	17,0

Структуру полученных керамических материалов SiC-NbC изучали по интегральной интенсивности рентгеновского излучения на дифрактометре ДРОН-УМ-2 в $\text{CuK}\alpha$ излучении при ускоряющем напряжении 20 кВ и при синхронном вращении образца и детектора. Обзорные рентгенограммы были сняты в интервале брегговских углов $2\Theta = 15^\circ\text{-}40^\circ$, с вращением образца, при максимальных режимах работы рентгеновской трубки и в наиболее чувствительном диапазоне измерения интенсивности отражений. На рентгенограммах наблюдаются все линии, соответствующие рентгеновским спектрам как SiC, так и NbC. Других линий, свидетельствующих об образовании новой фазы, обнаружено не было. Кроме того, на рентгенограммах наблюдаются отдельные слабые рефлексы, не повторяющиеся для образцов различного состава. При анализе угловых положений этих линий их не удается идентифицировать как линии, принадлежащие какому-либо соединению типа NbC, SiC₄, Nb₃Si₄, NbSi₂, Si₃Nb₅. Для оценки межплоскостных расстояний d(3,00) и d(00,18) была проведена съемка в интервале углов $2\Theta = 59^\circ\text{-}60^\circ$ и $2\Theta = 66^\circ\text{-}68^\circ$. Межплоскостные расстояния рассчитаны по положениям линии для длин волн $\lambda_{\alpha 1}$ и $\lambda_{\alpha 2}$ отдельно. Погрешность в измерении d(3,00) и d(00,18) составляла $\pm 0,00004 \text{ \AA}$ и $\pm 0,00003 \text{ \AA}$, соответственно. Идентифицированные линии от образца к образцу не воспроизводятся. Поскольку никаких дополнительных линий, свидетельствующих об образовании новой фазы не обнаружено, то из анализа рентгенограмм керамики SiC-NbC различного состава можно заключить, что в процессе спекания при температуре 2373 К фазовые переходы не происходят и новые соединения не образуются. Полученные результаты показывают, что для керамики SiC-NbC, спеченной при 2373 К, параметры элементарной ячейки карбида кремния изменяются. Параметр “с” уменьшается с ростом содержания NbC, а значение параметра “а” остается приблизительно тем же. Изменение параметра “с” предполагает частичное замещение атомов кремния атомами Nb в тетраэдрах. Кроме смещения

дифракционных линий, связанных с изменением параметров элементарной ячейки, на серии рефлексов (00,18) от образцов, спеченных при 2273 К наблюдается anomальное распределение интенсивности, которое проявляется в соотношениях $J_{K\alpha_1}$ и $J_{K\alpha_2}$. Соотношение $J_{K\alpha_1} / J_{K\alpha_2}$ для образцов керамики с 10 мас. % NbC составляет 2:1. По мере замещения SiC на NbC интенсивность линии $J_{K\alpha_1}$ постепенно уменьшается, а $J_{K\alpha_2}$ - увеличивается. При спекании в этой системе происходит взаимная твёрдофазная диффузия между карбидом кремния и карбидом ниобия. Это было показано исследованиями твёрдофазной диффузии между монокристаллами SiC и NbC. Проведенный Оже-анализ приконтактной области (1 мкм от поверхности раздела) показал, что наряду с пиками кремния и углерода, в монокристалле SiC наблюдается пик Nb, что подтверждает наличие активной взаимной диффузии в системе SiC–NbC при твёрдофазном спекании. По концентрационным профилям Nb, в SiC и Si в NbC, видно, что они сходны и сосредоточены вблизи границы раздела, причем непрерывное возрастание парциальных атомных концентраций C_{Nb} , приводит к уменьшению C_{Si} и наоборот. Наблюдаемый характер изменения парциальных атомных концентраций C_{Nb} , в SiC и C_{Si} в NbC, свидетельствует об образовании непрерывного ряда твердых растворов в приконтактной области от SiC до NbC. Исследование микроструктуры в керамике SiC–NbC и спектров состава в различных точках проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа. Элементный анализ был проведен в трёх точках: зерно карбида кремния, зерно карбида ниобия и промежуточная фаза. В них были пики кремния, ниобия, соответственно, а в промежуточной фазе были обнаружены пики кремния и ниобия. С увеличением содержания NbC цепочки карбида кремния разрываются. Существенного роста зерна не наблюдается. Исследовалась также температурная зависимость электропроводности керамики состава SiC–NbC. Для этого применялись образцы керамики в виде пластин 2×5×12 мм. Измерения проводились в диапазоне температур 300–1800 К в среде аргона. Результаты измерений электропроводности керамики, описываются зависимостью $\ln \sigma = f[10^4 / T]$. Электропроводность керамики растёт с увеличением T и содержания NbC до 50 мас. %. При этом величина электропроводности с ростом процентного содержания NbC меняется незначительно, а энергия активации падает. При концентрации NbC более 50% температурная зависимость электропроводности приобретает вид, характерный для металлов. При увеличении содержания NbC в составе керамики, увеличивается доля металлической связи карбида ниобия, обуславливая тем самым металлический характер проводимости. При содержании в керамике NbC ≥ 10 мас. % электропроводность увеличивается на три порядка по сравнению с чистым SiC. Исследовалась температуропроводность, теплоемкость и теплопроводность керамики SiC–NbC. Температуропроводность керамики SiC–NbC состава 10 мас. % NbC изменялась от 30 мм²/с при 300 К до менее 10 мм²/с при 1000 К. С ростом температуры и содержания карбида ниобия температуропроводность падает. Для образцов керамики SiC–NbC с содержанием карбида ниобия более 30 мас. % при температурах более 750 К наблюдалось резкое уменьшение температуропроводности связанное очевидно процессами окисления. Теплоемкость керамики SiC–NbC измерялась в температурном интервале (300–750) К. Теплоемкость керамики SiC–NbC при 300 К для составов 10 мас. % и 90 мас. % составляло 700 Дж/кг·К, и 400 Дж/кг·К, соответственно. Значения теплоемкости остальных составов находились между этими значениями. Причем характер изменения значения теплоемкости от температуры для составов 30 и 50 мас. % NbC был идентичен. Максимальное значение теплоемкости составляло 1100 Дж/кг·К для состава 10 мас. % NbC при температуре 750 К. Теплопроводность керамики SiC–NbC была рассчитана по известным значениям плотности, температуропроводности и теплоемкости. С ростом температуры и содержания карбида ниобия теплопроводность керамики SiC–NbC падает, что связано с ростом рассеяния фононов и электронов, а также с тем, что карбид кремния является более теплопроводным материалом, чем карбид ниобия. Максимальное значение теплопроводности наблюдалось у состава 10 мас. % NbC и составляло 35 Вт/м·К, при комнатной температуре.

Методы измерения температуры выше 2000 °С в вакуумно-углеродной агрессивной среде и управления радиационным нагревом элементов конструкций ЛА

М.В. Репина, В.В. Суслин, Ю.Д. Ходжаев
ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский, Россия
E-mail: margarita.repina@tsagi.ru

Надежное измерение температуры при работе нагревательного оборудования, способного обеспечивать в вакуумных камерах нагревание изделий до температур свыше 2000 °С, и проведение теплопрочностных испытаний элементов конструкций перспективных высокоскоростных летательных аппаратов является важной задачей и требует исследований в области управления радиационным нагревом в данном диапазоне температур.

Разработанный в ЦАГИ высокотемпературный нагреватель, состоящий из углеродсодержащих композиционных материалов УКМ (излучатель, теплозащитный и теплоизолирующий экраны), способен обеспечивать программы нагревания таких конструкций, которые характеризуются темпами нагрева до 200 °С/с, значениями температуры выше 2000 °С и плотностями теплового потока 1500-2000 кВт/м².

Наиболее полно требованиям к точности температурных измерений данного нагревателя удовлетворяют термометрические цепи с термопарами ВР5/20 из вольфрам-рениевого сплава. Однако у этих цепей имеется недостаток, заключающийся в малом уровне термоЭДС. А в современных установках, с мощными электронагревательными устройствами, электрические помехи, возникающие в термометрической цепи, могут быть довольно существенными, наличие которых приводит к увеличению погрешности, а иногда и к потере работоспособности измерительной аппаратуры.

На данный момент работа нагревателя на базе вакуумной камеры может быть обеспечена только до 2000 °С из-за возникновения помех и выхода из строя управляющих термопар (рис. 1). Нагрев до более высоких температур ограничивается по ряду причин, наиболее значимыми из которых являются:

- активное взаимодействие при температурах 1200-1300 °С паров углерода и вольфрам-рениевых сплавов, приводящее к образованию карбидов W_2C и WC , охрупчиванию электродов и нестабильности работы термопар;
- электромагнитные наводки от питающих кабелей, возникающие в термометрических цепях; а также скачки напряжения от тиристорного регулятора, которые могут приводить к возникновению газового разряда и сбою измерения температуры.

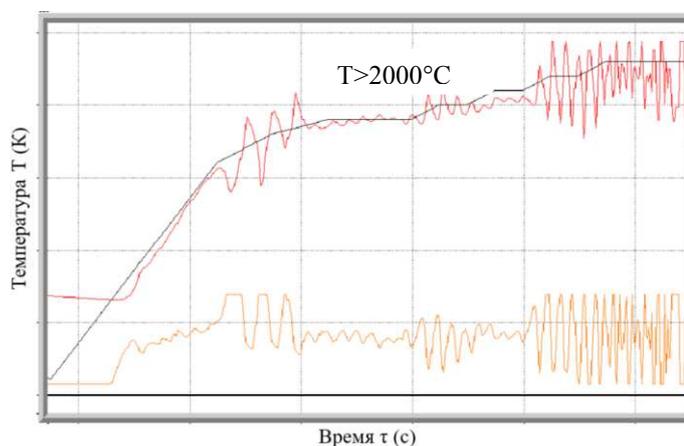


Рис. 1. Показания стандартных термопар ВР5/20 при нагреве до температуры выше 2000 °С в вакуумно-углеродной среде

В работе приведены результаты исследований по разработке технологии измерения температуры термопарами ВР5/20 в агрессивной вакуумно-углеродной среде, а также управления радиационным нагревом до температур свыше 2000 °С.

В целях снижения помех в термометрических цепях проведены исследовательские работы по модернизации системы энергоснабжения стенда вакуумной камеры с применением способов помехозащиты, включающие: экранирование силового кабеля и компенсационных проводов термопар, заземление, установку низкочастотного RC-фильтра.

Проведен расчет индукции и напряженности магнитного поля в силовом кабеле при работе стенда на переменном токе. Установлено, что ЭДС, наводимая в контуре термометрической цепи на частоте $f=50$ Гц, может составлять порядка 15 мВ, то есть более 50% отклонения термопары от ее номинально статической характеристики НСХ. Проведен расчет затухания электромагнитных волн в стенке экрана силового кабеля, согласно которому полное затухание волны происходит при 20 кГц на глубине порядка 1,2 мм, а при 50 Гц – на глубине 2,5 мм. Проведен расчет паразитной емкостной связи, возникающей в двух параллельно проложенных компенсационных проводах термопар ВР5/20, и расчет RC-фильтра. Установлено, что уровень напряжения помех, обусловленных емкостной связью на входе прибора, может достигать величин $U_{\text{пом}} \sim 7,2$ мВ, то есть более 20% от напряжения полезного сигнала. Установка RC-фильтра снижает уровень помех почти в два раза.

Для защиты электродов термопары от влияния углеродсодержащей среды и токов утечки применялись термопреобразователи ТП-А1(2×0,35)-2,5-1200 на основе термопар ВР5/20 с термостойким электроизоляционным покрытием на термоэлектродах и керамическими одноканальными трубками, разработанные в ООО «Термоэлектрическая компания» совместно с «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

В качестве перспективного материала для защиты термопреобразователей выбран оксид гафния HfO_2 .

Нагрев с термопреобразователями №№ 1, 2 (1 – с покрытием рабочего спая, 2 – без покрытия) выше 2000 °С со скоростью 40 °С/с и выдержкой при данной температуре до выхода их из строя (рис. 2) показал продолжительность выдержки термопреобразователей более 150 с. Колебания термопреобразователя № 2 составили порядка 5% отклонения от НСХ, № 1 – 9,8%.

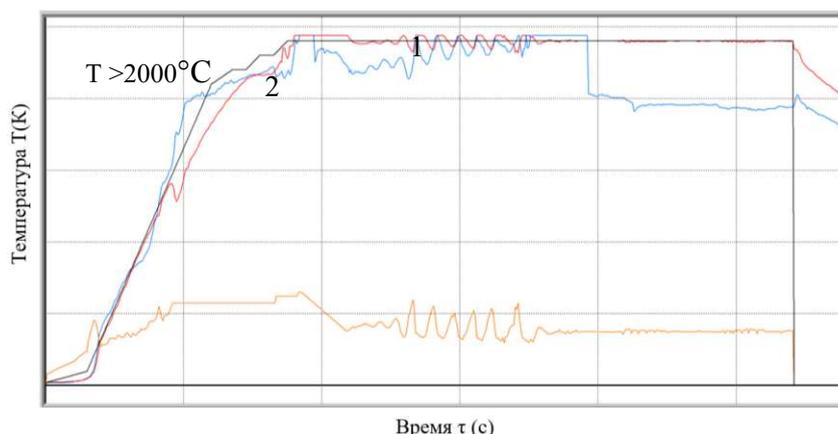


Рис. 2. Показания термопреобразователей ТП-А1 при нагреве до температуры выше 2000 °С в вакуумно-углеродной среде

Результаты проведенных испытаний с термопреобразователями ТП-А1 показали эффективность действия защиты изоляционных трубок от влияния вакуумно-углеродной среды и токов утечки. Но по защитному покрытию термоэлектродов требуется серьезная доработка, так как по одинаковому характеру нагрева обоих термопреобразователей видно, что покрытие обладает пропускательной способностью.

Влияние температуры обжига и количества кордиерит-сподуменового связующего на физико-механические свойства пористой керамики на основе карбида кремния

Б.Л. Красный¹, К.И. Иконников¹, М.А. Варганян², Д.Д. Бернт^{1,3}, **О.И. Родимов¹**,
А.Л. Галганова¹, А.С. Сизова¹, А.М. Поскотинова^{1,2}

¹ООО «НТЦ «Бакор», г. Щербинка, г. Москва, Россия; ²РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия; ³НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

E-mail: rodimov@ntcbakor.ru

Пористые керамические материалы хорошо себя зарекомендовали в качестве фильтрующих элементов для очистки горячих газов. Способ получения пористых керамических материалов состоит в обжиге монофракционных порошков с керамическим связующим. Использование монофракционных порошков дает возможность получить заданное распределение размера пор, а керамическое связующее обеспечивает сцепление частиц между собой в прочный каркас, т.е. придает механическую прочность и термическую стойкость пористым материалам.

Также для увеличения термической стойкости пористых материалов используют керамические связующие, обладающие низким значением термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР). На практике в качестве керамического связующего для пористых материалов на основе карбида кремния, обладающего низким значением ТКЛР, используют кордиерит. Существенным недостатком кордиеритового связующего является его узкий интервал спекшегося состояния. Также низким значением ТКЛР обладают материалы трехкомпонентной системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$. Таким образом, целью данной работы является получение пористой керамики на основе карбида кремния с кордиерит-сподуменовым связующим.

Пористую керамику на основе карбида кремния получали путем смешения порошка карбида кремния (фракции F60 и F100) и кордиерит-сподуменового связующего (от 2,5 до 15 мас. %) в лабораторном смесителе СЛ-5. Формование образцов в виде цилиндров диаметром 36 мм производили методом полусухого прессования на гидравлическом прессе П-10 при давлении прессования 40 МПа. В качестве временного технологического связующего использовали водный раствор поливинилового спирта. Обжиг образцов производили в печи с карбидокремниевыми нагревателями при температуре 1280, 1310 и 1340 °С.

В данной работе открытую пористость определяли согласно ГОСТ 473.4-81. Предел прочности при сжатии определяли согласно ГОСТ 4071.1 – 2021.

Результаты определения открытой пористости для карбидокремниевой керамики приведены на рисунке 1. Результаты определения предела прочности при сжатии приведены на рисунке 2.

Открытая пористость образцов, полученных из карбида кремния F60 при температурах 1280 и 1310 °С, с увеличением количества кордиерит-сподуменового связующего от 2,5 до 15 мас. % уменьшается с 40 до 30%. При температуре обжига 1340 °С с увеличением кордиерит-сподуменового связующего от 2,5 до 10 мас. % открытая пористость уменьшается с 39 до 32%. При дальнейшем увеличении связующего до 15 мас. % открытая пористость увеличивается с 32 до 34%, что вызвано пережогом керамического материала.

При использовании карбида кремния F100 открытая пористость уменьшается с 40 до 31 % с увеличением кордиерит-сподуменового связующего от 2,5 до 15 мас. % независимо от температуры обжига.

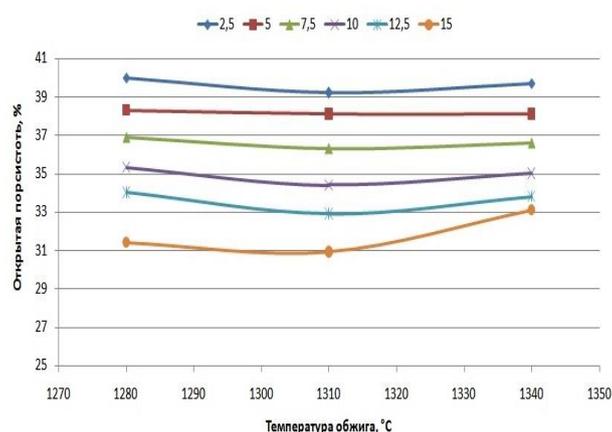
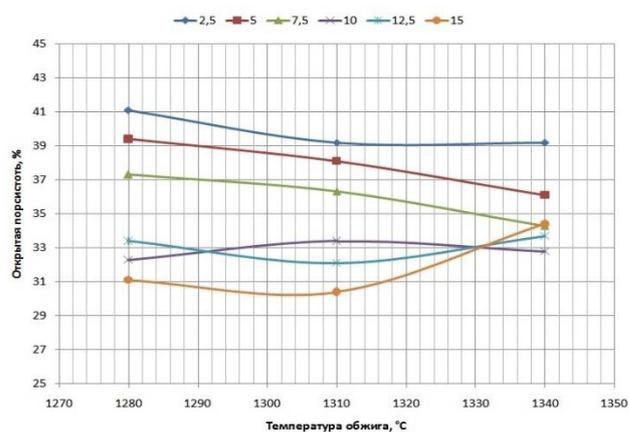


Рис. 1. Открытая пористость карбидокремниевой керамики, полученной при разных температурах обжига: а) SiC F60, б) SiC F100

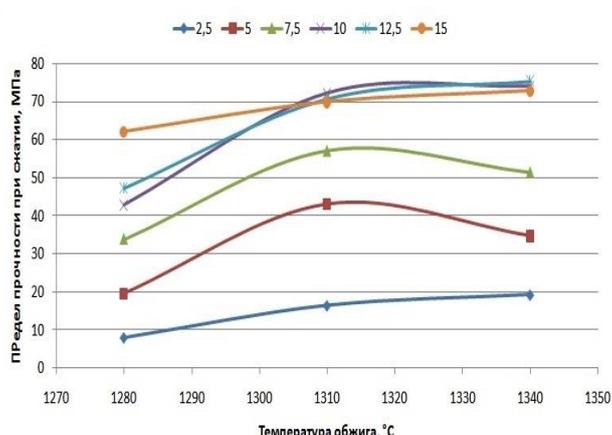
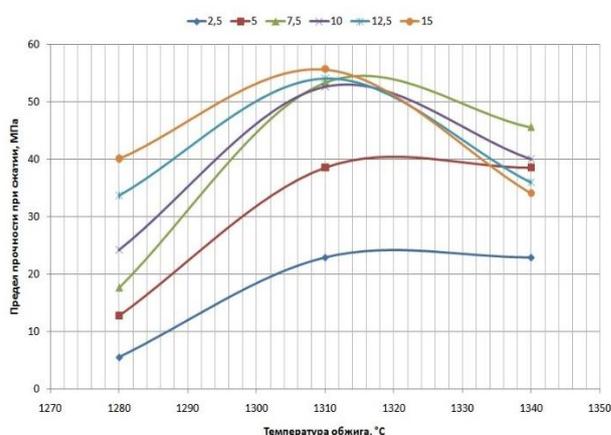


Рис. 2. Предел прочности при сжатии карбидокремниевой керамики, полученной при разных температурах обжига: а) SiC F60, б) SiC F100

Предел прочности при сжатии образцов, полученных из карбида кремния F60 при температуре 1280 и 1310 °C, с увеличением концентрации связующего от 2,5 до 15 мас. % увеличивается с 5,5 до 40,1 МПа и с 22,9 до 55,7 МПа, соответственно. При температуре обжига 1340 °C с увеличением кордиерит-сподуменового связующего от 2,5 до 7,5 мас. % предел прочности при сжатии увеличивается с 22,9 до 45,6 МПа. При дальнейшем увеличении связующего до 15 мас. % предел прочности при сжатии уменьшается до 34,1 МПа.

Предел прочности при сжатии пористых материалов на основе карбида кремния F100, полученных при температуре 1280 °C, увеличивается с 8,1 до 62,1 МПа во всем концентрационном интервале содержания связующего. При температуре 1310 °C предел прочности при сжатии увеличивается с 16,5 до 72,3 МПа с увеличением кордиерит-сподуменового связующего от 2,5 до 10 мас. %. Дальнейшее увеличение кордиерит-сподуменового связующего до 15 мас. % не приводит к повышению предела прочности при сжатии и остается на уровне 70-72 МПа. Предел прочности при сжатии пористых материалов, полученных при температуре обжига 1340 °C, увеличивается с 19,3 МПа до 74,1 МПа с увеличением кордиерит-сподуменового связующего от 2,5 до 10 мас. %. Дальнейшее увеличение кордиерит-сподуменового связующего до 15 мас. % не приводит к повышению предела прочности при сжатии и остается на уровне 72-74 МПа.

Технология режущего тугоплавкого композиционного материала на основе кубического нитрида бора со связкой из соединений титана

Л.П. Руденок, В.И. Румянцев, С.В. Агафонов, О.Н. Булатов
ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: info@virial.ru

Композиционные материалы на основе кубического нитрида бора (сBN) перспективны при создании термически стабильного высокотвердого режущего инструмента, устойчивого к ударным и коррозионным воздействиям. Создание равномерной микроструктуры за счет нанесения покрытия на порошки сверхтвердых материалов улучшает эксплуатационные характеристики инструмента. Одним из методов, успешно применяемых для нанесения равномерного покрытия на частицы порошка сBN, является метод химического осаждения из газовой фазы с использованием направленного транспорта металла в виде йодидов с образованием плотного слоя продуктов взаимодействия. Этот метод использован при получении режущих композиций на основе сBN с нитридно-боридной связкой TiN–TiB₂.

Обычно для обработки труднообрабатываемых материалов используют режущие пластины с содержанием сBN до 95 об. %. Для расширения области применения режущего инструмента из композиционных материалов на основе кубического нитрида бора следует стремиться к минимизации содержания дорогостоящего компонента без существенной потери режущих свойств. В настоящее время ООО «Вириал» серийно выпускает режущие пластины марки VB07 на основе кубического нитрида бора со связкой из нитридов и боридов алюминия и проводит работы по получению новых композиционных материалов на основе сBN.

Цель настоящей работы – получение режущего тугоплавкого композиционного материала на основе кубического нитрида бора со связкой из соединений титана с высокими эксплуатационными характеристиками, предназначенного для обработки инструментальной стали, серых и отбеленных чугунов, труднообрабатываемых материалов, а также для изготовления износостойких конструкционных деталей.

В качестве исходных компонентов для получения покрытых порошков использовали кубический нитрид бора марки Funik сBN-M990 фракций 5-10, 4-8 и 1-3 мкм, титан фракции < 10 мкм и йод кристаллический. Для получения сверхтвердого композиционного материала со связкой TiN–TiB₂ осуществляли приготовление шихты путем смешивания порошков сBN в количестве 60% от массы шихты, металлического титана и йода при массовом отношении титана к йоду 5:1, и дальнейшую термическую обработку порошка сBN методом йодного транспорта по режиму с конечной температурой процесса в диапазоне от 705 до 730 °С. В результате на поверхности зерен сBN образовывалось сплошное покрытие из соединений титана, толщина которого зависела от исходного размера зерен сBN. На поверхности зерен сBN фракции 5-10 мкм толщина покрытия составила 390-530 нм, фракции 4-8 мкм – 270-390 нм, фракции 1-3 мкм – 110-180 нм. Частицы порошков сBN с равномерным распределением соединений титана по поверхности образуют структуру типа «ядро – оболочка».

Формование и спекание образцов проводили методом НРПТ (High-Pressure High-Temperature) при давлении 3,8±0,2 ГПа и температуре 1450±50°С в течение 10 с. Результаты РФА спеченных материалов показали, что их фазовый состав не зависит от размера зерен покрытых порошков, при этом интенсивность пиков боридно-нитридной связи ниже у материала с исходной фракцией 1-3 мкм. При воздействии высоких давлений и температур происходит изменение фазового состава, оболочки зерен сверхтвердого материала образуют единую матрицу. В процессе спекания композита, покрытие из соединений титана реагирует с BN с образованием нитрида и диборида титана. Композиты сBN–TiN–TiB₂ имеют структуру, образованную связкой TiN–TiB₂, равномерно распределенной между зернами

cBN и прочно скрепляющей их друг с другом (рис. 1). Параметры синтеза материала предотвращают превращение кубической фазы BN в гексагональную. Физико-механические свойства композитов cBN–TiN–TiB₂ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства композитов cBN–TiN–TiB₂

Состав	Фракция исходного порошка cBN, мкм	Свойства образцов после спекания			
		ρ , г/см ³	HV, ГПа	K _{1C} , МПа·м ^{1/2}	E, ГПа
1	5-10	3,85	38,1±2,3	6,8±0,3	639
2	4-8	3,81	37,1±2,0	6,7±0,3	632
3	1-3	3,59	30,6±1,0	6,6±0,7	581

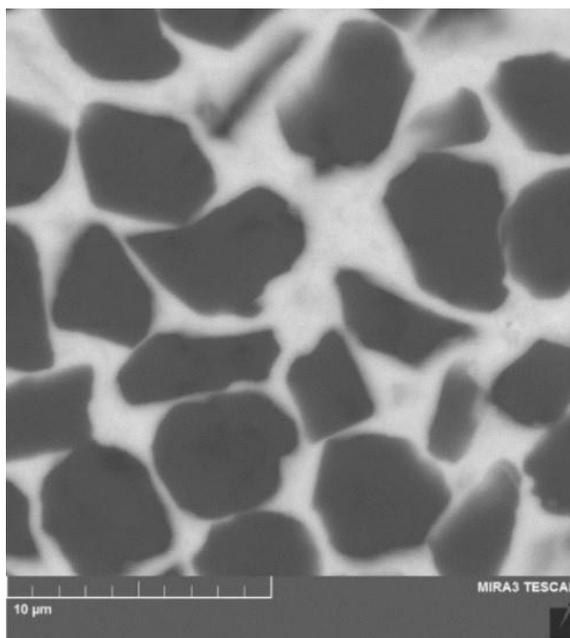


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок структуры материала (состав 2), где: темная фаза – зерна кубического нитрида бора, светлая фаза – связка TiN–TiB₂

Для исследования режущих свойств из полученных спеченных заготовок изготавливали пластины формы RNMN 050300 с острой режущей кромкой в соответствии с ISO 513. Режущие свойства пластин cBN–TiN–TiB₂ оценивали по результатам обработки инструментальной стали марки ХВГ твердостью по Роквеллу 59-60 HRC без использования смазочно-охлаждающей жидкости. 95%-й период стойкости разработанных материалов определяли по режиму: скорость 110 м/мин, подача 0,1 мм/об, глубина резания 0,5 мм, время течения 28 мин.

Критериями износа при испытаниях пластины на 95%-й период стойкости являются: износ по задней грани пластины, значение которого не должно превышать 400 мкм, а также отсутствие сколов на передних или задних поверхностях.

Износ инструмента по задней поверхности происходит по всей рабочей длине главной режущей кромки, полоска износа имеет равномерную ширину, сколы на передних и задних поверхностях пластины отсутствуют. Катастрофический износ при испытаниях на 95%-й период стойкости (28 мин) не наблюдается, износ материала cBN–TiN–TiB₂ составил для состава 1 – 160 мкм, для состава 2 – 220 мкм, для состава 3 – 260 мкм.

Показана принципиальная возможность получения режущего тугоплавкого композиционного материала на основе порошков cBN фракций 5-10, 4-8 и 1-3 мкм с покрытиями из соединений титана, нанесенными методом химического осаждения из газовой фазы. Эксплуатационные свойства полученных режущих пластин отвечают критерию стойкости в испытанном диапазоне размеров частиц исходного порошка cBN.

Получение керамических изделий сложной геометрии из реакционно-спеченного карбида кремния

Д.А. Дюскина

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: randkald@mail.ru

Важной задачей современного материаловедения является получение керамических изделий сложной геометрии. Это связано с тенденцией замены металлических деталей различных механизмов на керамические, поскольку керамика имеет ряд преимуществ перед металлами, таких как низкая плотность, высокая жаростойкость и коррозионная стойкость. Данные материалы способны работать при высоких температурах в агрессивных средах в условиях нагружения. Однако изготовление керамических изделий сложной геометрии является нетривиальной задачей, поскольку форма керамических изделий, получаемых стандартными методами синтеза, ограничена, а механическая обработка почти невозможна в силу высокой твердости керамики.

В данной работе описывается комбинированный метод получения изделий сложной формы на основе карбида кремния путем формования заготовки методом горячего шликерного литья с ее последующим реакционным спеканием.

Горячее шликерное литье под давлением позволяет изготавливать заготовки с тонкостенными элементами (толщиной порядка 1 мм), резьбовыми соединениями и другими элементами сложной формы (рис. 1). Для осуществления горячего шликерного литья заготовки заданной геометрии под спекание применяли обратные металлические формы, которые проектировались таким образом, чтобы обеспечить их оперативный съем после проведения отливки без внесения дефектов в заготовку.

Полученные заготовки обсыпались чистым кусковым кремнием в количестве 80% от массы образца, после чего спекались при температуре 1600 °С в течение 10-20 мин в вакууме. При достижении температуры 1400 °С кремний переходит в жидкую фазу и пропитывает пористые заготовки. В теле заготовки расплав кремния взаимодействует с углеродом с образованием вторичного карбида кремния в межзеренном пространстве частиц первичного карбида кремния связывая их, в результате чего формируется непрерывный поликристаллический каркас из SiC. Важной особенностью метода реакционного спекания карбида кремния является отсутствие усадки конечного спеченного изделия, за счет чего возможно получение изделия без нарушения исходной геометрии. После спекания изделие требует только финальной пескоструйной обработки для удаления излишков кремния.

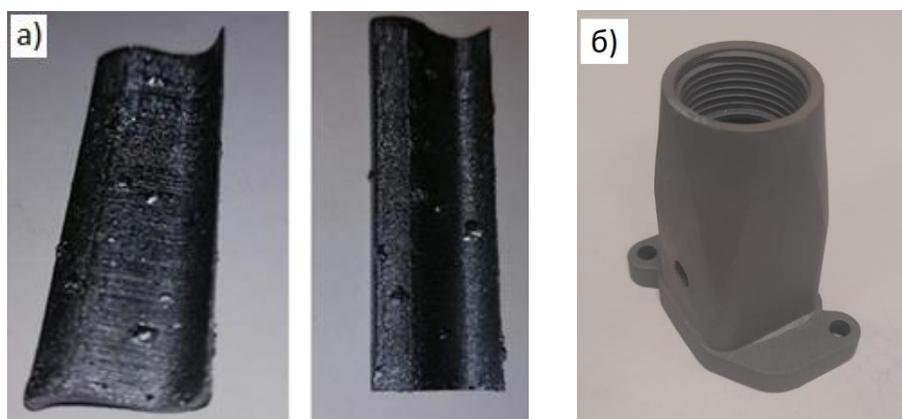


Рис. 1. Полученные изделия сложной геометрии: а) лопатка с толщиной стенки ~1 мм до пескоструйной обработки; б) кабельный ввод с резьбой.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-73-30019.

Исследования экспериментальных методов испытания и определения свойств керамических композиционных материалов

М.А. Мезенцев, Б. Мыктыбеков, Д.С. Пальчиков, А.А. Луппов, Д.В. Афанасьев, С.В. Воробьев

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ), г. Москва, Россия

E-mail: anamezentsev@ciam.ru

Для перспективных деталей и узлов горячего тракта газогенератора авиационного двигателя предъявляются высокие требования к конструкции и характеристикам материалов, которые должны обеспечивать следующие параметры: рабочая температура до 1500 °С, стойкость к высоким перепадам температур, возникающим при нагреве и охлаждении двигателя, статическая кратковременная прочность 250-300 МПа при температуре более 1000 °С, высокий коэффициент теплопроводности, высокие характеристики ударной вязкости и большое сопротивление развитию трещин. Конструкция должна компенсировать различные температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) в местах крепления узлов с ответными металлическими деталями.

Для определения некоторого перечня приведенных выше характеристик перспективных конструкционных материалов и конструкций авиационного двигателя требуется проведение большого объема экспериментальных исследований. При этом требуется постоянное развитие различных видов экспериментальных исследований, средств измерений, обеспечивающих и удовлетворяющих требования квалификационным испытаниям материалов и деталей.

Понимание механического поведения композиционных материалов (КМ) при нагружении, знание характеристик физических свойств конструкционных материалов, таких как модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона, является основой для применения их в качестве конструкционных материалов. Хотя композиционные материалы анизотропны по своей природе, во многих случаях их свойства предполагаются однородными с точки зрения макромеханики и в расчет принимаются усредненные механические свойства, что приводит к их неэффективному применению. В случае рассмотрения трансверсально-изотропной структуры КМ (направления в плоскости изотропии, и нормальное направление к плоскости изотропии или трансверсальное направление) описание линейной связи между напряжениями и деформациями трансверсально-изотропного композиционного материала при плоском напряженном состоянии необходимо иметь шесть упругих постоянных. Наиболее трудно реализуемым и практически невыполнимым, является определение упругих и прочностных свойств КМ в направлении толщины КМ (трансверсальное направление). Для определения упругих и прочностных характеристик в этом направлении невозможно изготовить длинные стандартные образцы, в связи с чем необходимо другое исполнение образцов.

Разработанный образец (патент РФ № 2798326) из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины представляет собой пластину (рис. 1), включающую захватные части и расположенную между ними рабочую часть 1. При этом захватные части выполнены в виде параллельно расположенных соответствующих балок 2 и 3, оси которых перпендикулярны оси рабочей части 1 образца. Один конец каждой из балок 2 и 3 жестко связан с соответствующим концом рабочей части 1 образца, а свободные концы предназначены для взаимодействия с нагружающим устройством (на чертеже не показана). Образец снабжен опорой 4, размещенной между балками 2 и 3 в средней их части и предназначенной для взаимодействия с последними. Опора 4 может быть выполнена шарнирной, в виде металлической, керамической пластины, или в виде слоя адгезионного материала, закладываемого между балками 2 и 3 в процессе изготовления образца. Кроме того, при определении упругих характеристик исследуемого слоистого

композиционного материала опора 4 может быть выполнена в виде перемычки из материала образца, жестко связанной с балками.

Разработан метод определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов, в котором нагрев образца до заданной температуры с определенной скоростью выполняется при помощи инфракрасных тороидальных ламп (патент РФ № 2794108).

Плоский образец 1 (рис. 2) из керамического или другого конструкционного материала с рабочей зоной 2, величина которой составляет 5-10 мм, закрепляют в захватах 3 нагружающего устройства и размещают нагреватели, выполненные в виде инфракрасных тороидальных ламп 5. В процессе нагрева фокусируют тепловые лучи 6 инфракрасных тороидальных ламп 5 под углом 15° - 75° на ограниченной рабочей зоне 2 плоского образца 1. Высокая скорость теплового излучения инфракрасных тороидальных ламп 5 позволяет расширить диапазон скоростей нагрева рабочей зоны 2 плоского образца 1 от $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $1500^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Измерение деформации плоского образца 1 выполняется в границах рабочей зоны 2 при помощи щупов 7 высокотемпературного контактного экстензометра 8, а измерение температуры рабочей зоны 2 плоского образца 1 осуществляется при помощи тепловизора 9.

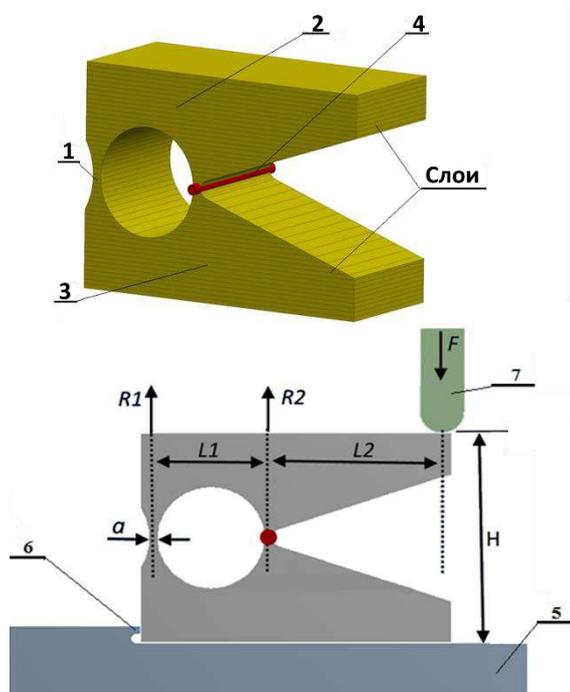


Рис. 1. Образец из слоистых КМ для испытаний на растяжение в направлении толщины

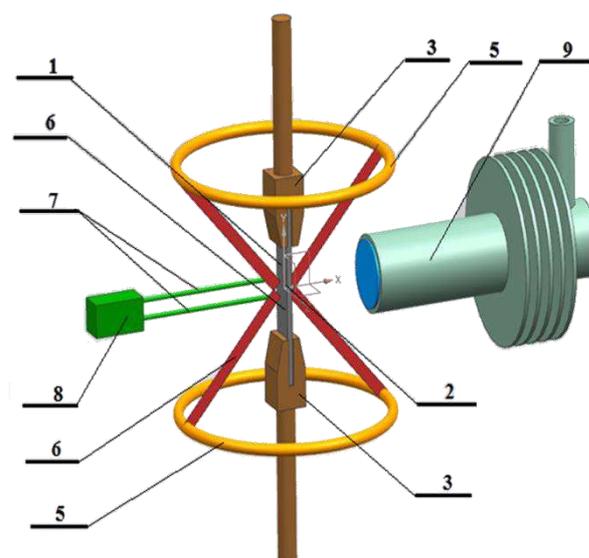


Рис. 2. Схема испытаний для определения предела прочности при растяжении КМ

В результате работы:

- разработан образец из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины и выпущен патент РФ № 2798326;
- разработан метод определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов и выпущен патент РФ № 2794108.

Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от «24» июня 2021 г. №075-15-2021-605).

Получение пористых биоморфных C/HfC/Hf₂SnC и C/HfC керамических материалов путем инфильтрации гафния через расплав олова

А.Е. Ершов, Т.С. Строганова, Д.В. Прохоров, И.М. Шмытько
Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН (ИФТТ РАН), г. Черноголовка,
Россия
E-mail: ershov@issp.ac.ru

Пористые керамические материалы активно используются в различных отраслях науки и техники. Наиболее широкое распространение они получили в качестве футеровочных материалов, фильтров и катализаторов. Пористые биоморфные керамические материалы получают на основе преобразования различных пород древесины. При этом исходная структура древесины хорошо сохраняется, в связи с чем данные материалы имеют ряд особенностей, таких как, возможность управления плотностью и пористостью получаемого материала путем выбора исходной породы, связанная микроканальная структура пор, преимущественно открытая пористость, анизотропия свойств и другие. В ряде случаев это полезно с точки зрения практического применения, например, микронный диаметр каналов (и как следствие, развитая внутренняя поверхность) и открытая пористость подходят для задач фильтрации и катализа. Исследуется возможность применения биоморфных материалов для изготовления костных имплантов, нагревательных элементов и других задач.

Очевидно, что для такого широкого круга применения рассматриваются различные типы биоморфной керамики, отличающиеся структурой и фазовым составом. Для их получения были разработаны различные методы, такие как LSI (liquid silicon infiltration), PVD (physical vapor deposition), CVD (chemical vapor deposition) и методы пропитки золями. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, что накладывает ограничения на структуру, размеры образцов и фазовый состав получаемой пористой керамики. В связи с этим разработка новых подходов к получению биоморфных карбидных керамических материалов представляется актуальной задачей.

В настоящее время в ИФТТ РАН активно ведутся работы по разработке нового метода получения пористой карбидной керамики, основанного на инфильтрации через инертный растворитель. В данном методе в качестве исходного материала используются биоморфные углеродные каркасы, полученные пиролизом древесины. Каркасы помещают в расплав нереагирующего с углеродом вещества, в котором растворен карбидообразующий элемент. Расплав постепенно проникает в микроканалы, и карбидообразующий элемент реагирует с углеродом, образуя связанный каркас, состоящий из карбидов соответствующих элементов и, для некоторых систем, МАХ-фаз. После удаления материала растворителя из каналов получается пористая микроканальная керамика.

В данной работе было исследовано взаимодействие биоморфных углеродных каркасов на основе древесины ольхи (*Alnus incana*) с расплавами Sn–Hf при температурах 950-1200 °С и времени выдержки до 14 дней. Показано, что при взаимодействии с расплавом происходит постепенная инфильтрация расплава в образец. При выдержке в течение 1 недели произошло заполнение расплавом образца длиной ~20 мм (в направлении оси роста дерева). При этом глубина инфильтрации от времени увеличивалась нелинейно в связи с диффузионным характером процесса.

Для удаления остаточного олова использовали два метода. Первый – это травление в соляной кислоте, которая позволяет селективно удалить олово из приповерхностных слоев образца и не разрушает зерна HfC и МАХ-фазы Hf₂SnC, что позволяет исследовать структуру материала. В то же время удаление олова из центральной части образца затруднено, т.к. образующийся в результате реакции газ, заполняя микроканалы, препятствует контакту олова и кислоты. Было показано, что при инфильтрации расплава на поверхности углерода стенок каналов в первую очередь образуется слой карбида гафния. При

дальнейшем развитии реакции на границе между карбидом гафния и расплавом нарастают зерна фазы Hf_2SnC пластинчатой формы (рис. 1). Кроме того, на спектрах рентгенограмм некоторых образцов были обнаружены следы металлического гафния.

Толщина образующихся слоев менялась в зависимости от расстояния до края образца, т.к. это влияет как на концентрацию гафния в расплаве, так и на длительность контакта расплава с углеродом стенки. При длительной высокотемпературной выдержке ($1200\text{ }^\circ\text{C}$, 168 ч) на границе образца с расплавом произошло практически полное зарастание микроканалов. Более равномерное распределение толщин слоев по глубине образца было получено при температурах $1000\text{-}1100\text{ }^\circ\text{C}$.

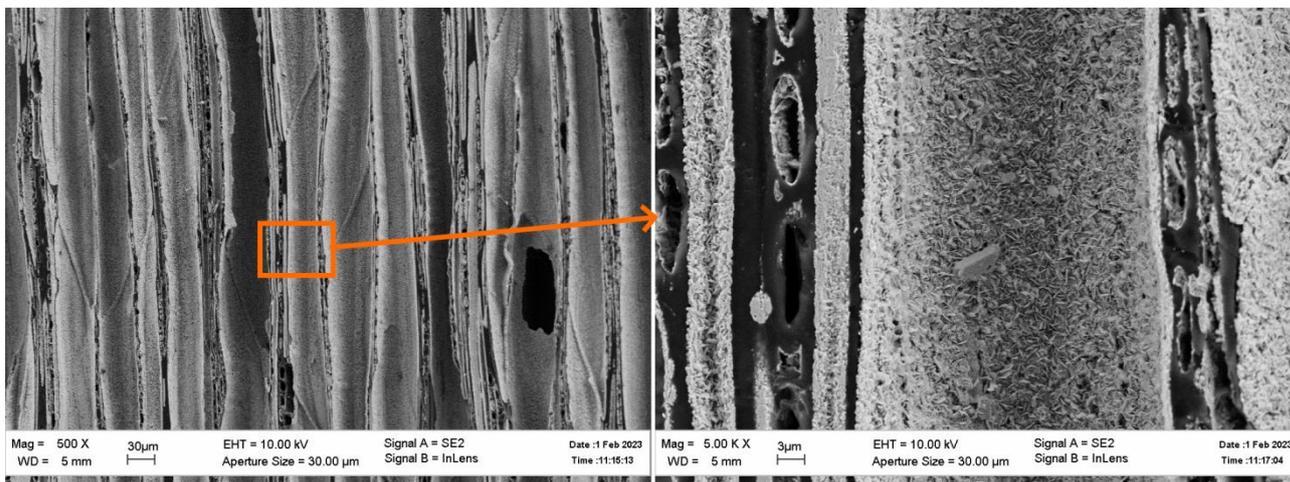


Рис.1. Микроструктура C/HfC/Hf₂SnC каркаса после травления

Второй метод – испарение олова в вакууме при температуре $\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$, позволяет удалить олово из всего объема образца. При этом МАХ-фаза разлагается с образованием карбида гафния, что позволяет получить пористый связный HfC-каркас. В зависимости от толщины слоя МАХ-фазы получали материал, состоящий как из округлых, так и из пластинчатых нанозерен HfC (рис. 2).

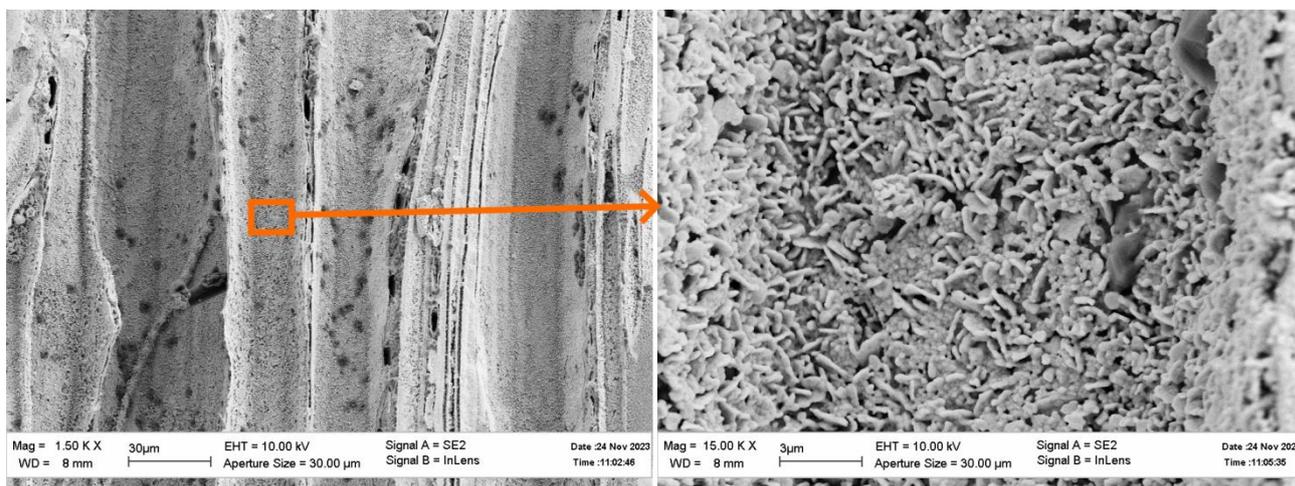


Рис. 2. Микроструктура C/HfC каркаса после высокотемпературного отжига

Полученные результаты показывают, что при помощи метода инфильтрации гафния через расплав олова можно получать пористые C/HfC/Hf₂SnC и C/HfC керамические материалы. В связи с наноскопическим размером зерен, из которых состоят микроканалы таких материалов, они обладают развитой внутренней поверхностью, что может быть полезно для задач фильтрации и катализа.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Разработка ламинированных металлокерамических композитов из прекерамических бумаг на основе МАХ-фазы $Ti_3Al(Si)C_2$ и тугоплавких металлических фольг

Е.Б. Кашкаров, А.В. Абдульменова, Д.Г. Кроткевич

НИ ТПУ, г. Томск, Россия

E-mail: egor_kashkarov@mail.ru

В настоящее время существует необходимость в создании новых высокопрочных и стойких к окислению материалов. Большое внимание ученых привлекают МАХ-фазы – класс нанослоистых соединений, представленных общей формулой $M_{n+1}AX_n$, где $n=1-3$, М – переходный металл, А – элементы групп IIIA и IVA таблицы Менделеева, Х – азот или углерод. Как металлы они электро- и теплопроводны, поддаются механической обработке, как керамика – устойчивы к коррозии, имеют высокие модули упругости, низкую плотность. Несмотря на достаточно высокие механические характеристики МАХ-фаз, при невысоких температурах наличие механических напряжений может привести к их хрупкому разрушению. Одними из перспективных материалов с повышенной вязкостью разрушения являются металлокерамические слоистые композиты. Так, использование нескольких подходов, включающих армирование частицами и образование вторичных фаз, добавление слоев пластичных металлов могут значительно повысить вязкость разрушения и прочность разрабатываемых материалов на основе МАХ-фаз. В данной работе методом искрового плазменного спекания были получены ламинированные металлокерамические композиты из прекерамических бумаг на основе МАХ-фазы $Ti_3Al(Si)C_2$ (ТАС) и фольги из тугоплавких металлов (Nb, Ta). Синтез проводился при температуре 1250 °С и давлении 50 МПа в течение 5 мин. Микроструктура и элементный состав полученных композитов были проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и рентгеновской дифракции. Получены плотные слоистые композиты Nb / ТАС–TiC (рис. 1а) и Ta / ТАС–TiC (рис. 1б), состоящие из слоев Nb (~82 мкм) и ТАС–TiC (~95 мкм), слоев Ta (~63 мкм) и ТАС–TiC (~103 мкм) соответственно. На границах раздела керамических и металлических слоев формируются реакционные слои (РС) толщиной ~17 мкм (Nb / ТАС–TiC) и ~13 мкм (Ta / ТАС–TiC), обогащенные Al, Si и Nb / Ta. Уменьшение толщины РС связано с меньшей реакционной способностью Ta. Композиты Nb / ТАС–TiC и Ta / ТАС–TiC демонстрируют вязкий механизм разрушения с пределом прочности на изгиб ~430 и 350 МПа соответственно. При дальнейшей деформации не наблюдается полного разупрочнения образцов, как в случае керамических композитов ТАС без металлических слоев. Последнее связано с увеличением сопротивления распространению трещин границами раздела «керамика – металл» путем разветвления, отклонения трещин и частичного расслоения композита, а также с пластической деформацией слоев металла.

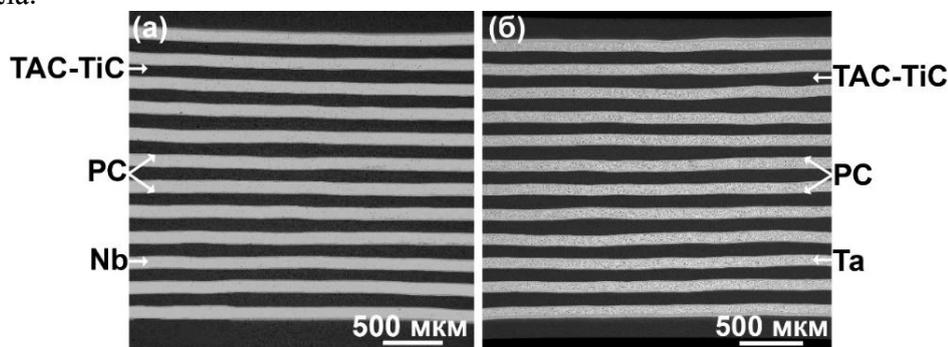


Рис. 1. СЭМ-изображения поперечного сечения ламинированных композитов: (а) Nb / ТАС–TiC; (б) Ta / ТАС–TiC (РС – реакционный слой)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00109).

Исследование взаимосвязи в ряду «состав и параметры SPS спекания – плотность и свойства керамики на основе SiC»

Г.Д. Кардашова¹, Г.К. Сафаралиев², С.М. Магомедов¹, А.Р. Абдуллаев¹

¹ДГТУ, г. Махачкала, Россия; ²АО «НИИ «Полнос» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, Россия

E-mail: gulya-kal1@yandex.ru

Керамический материал на основе карбида кремния обладает способностью противостоять, не расплавляясь, действию высоких температур и обладает высокой твердостью, благодаря чему его относят к классу высокоогнеупорных и ударопрочных материалов. Все больше интерес исследователей к карбидокремниевой керамике проявляется и в ее использовании в качестве конструкционного материала для изготовления износостойких уплотнений, сопел, клапанов, элементов горячей зоны двигателей и установок новых поколений для авиационной и ракетно-космической отрасли.

Свойства керамики определяются ее составом, структурой и пористостью, а плотность зависит от технологических параметров получения керамического материала. Поэтому задачей представленных исследований являлась оптимизация составов смесей исходных компонентов и режимов искрового плазменного спекания (SPS) для достижения комплекса наилучших физико-механических свойств (плотность, структура, микротвердость и др.).

Известно активирующее влияние оксида иттрия при спекании керамики на основе SiC–AlN. Этот прием мы использовали при SPS композиций системы SiC–AlN. Оксид иттрия вводили первоначально в порошок AlN (3 и 7 мас. % по отношению к AlN), а затем готовили смеси с SiC. Исходные компоненты смешивали в соотношениях, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Состав и дисперсность порошков

Состав	Соотношение компонентов, мас. %		
	SiC	AlN	Y ₂ O ₃
1	75	25	0
2	75	22	3
3	75	18	7
Дисперсность, мкм	14,22	5,69	7,72

Исследуемые образцы керамики SiC–AlN были получены при различных режимах спекания по методу SPS: температура спекания – 1400, 1500, 1600, 1700, 1800 °С; давление прессования – 50 МПа; длительность выдержки при температуре спекания – 3, 6, 9, 12, 15 мин.

В ходе эксперимента выявлено, что при спекании образцов с добавкой 7 мас. % оксида иттрия при 1800 °С наблюдается формирование жидкой фазы, которая заполняет пространство между частицами карбида кремния до образования плотного материала. Это подтверждается представленными на рисунке 1 фотографиями микроструктуры, полученными на автоэмиссионном растровом электронном микроскопе (РЭМ). Увеличение концентрации активирующей добавки Y₂O₃ приводит к росту испарения оксидов и возрастанию их взаимодействия с карбидом кремния, что уменьшает плотность SiC-материала. Таким образом, оптимальной является добавка Y₂O₃ в количестве 7 мас. %.

Изучена температуропроводность образцов керамики различного состава, полученных при температуре спекания 1800 °С и времени выдержки 6 мин (рис. 2). Установлено, что добавление оксида иттрия увеличивает температуропроводность керамики на основе SiC–AlN.

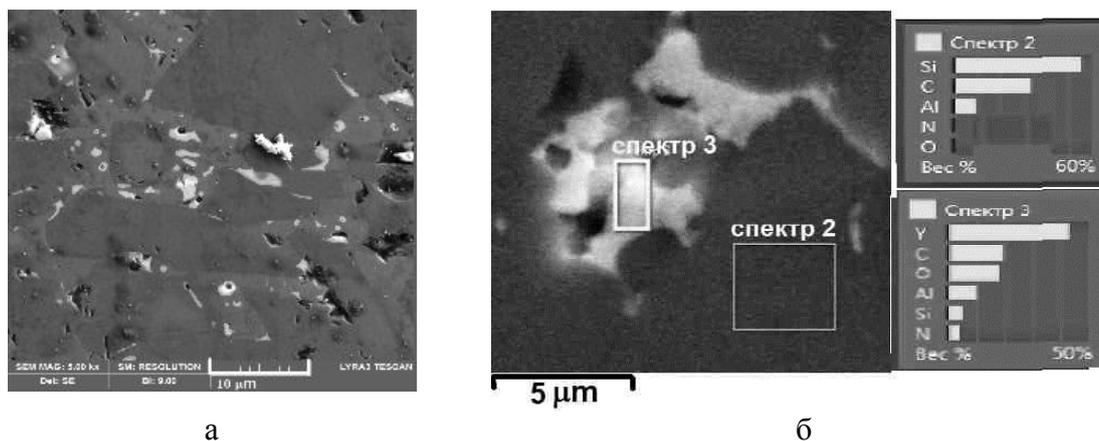


Рис. 1. РЭМ-изображение структуры (а) и элементный анализ (б) керамики SiC(75%)–AlN(18%)–Y₂O₃(7%), полученной методом SPS

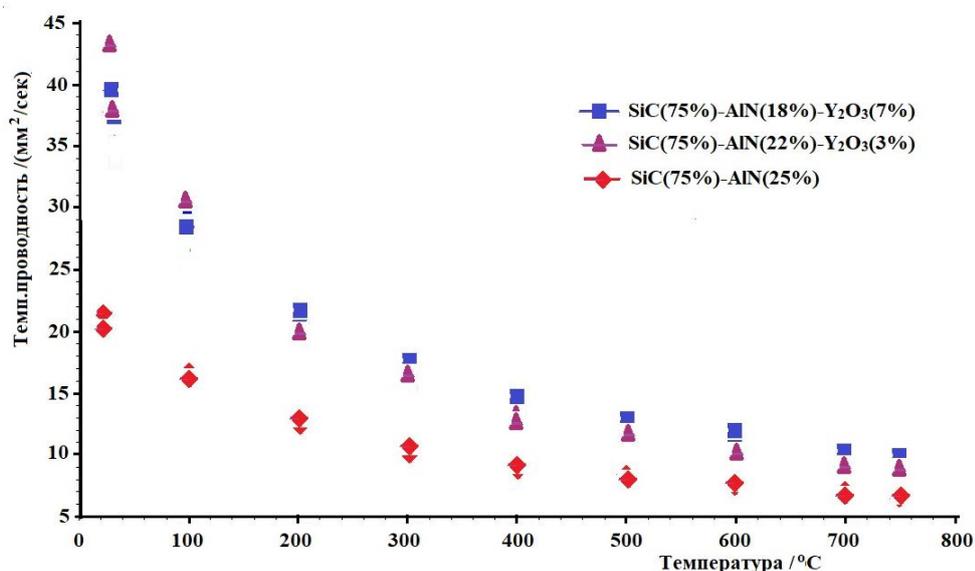


Рис. 2. Зависимость температуропроводности керамики SiC–AlN–Y₂O₃ от температуры, полученной методом SPS

Установленные оптимальные параметры режима SPS для получения многокомпонентной керамики состава SiC(75%)–AlN(22%)–Y₂O₃(3%) (1800 °C / 50 МПа / 15 мин) обеспечивают формирование 100% плотного композита, значение микротвердости которого составляет 26,7 ГПа, что позволяет рекомендовать эти параметры для изготовления легкого и высокоплотного керамического материала заданного состава с прогнозируемыми свойствами.

Из полученных образцов был отобран образец с высокой плотностью для изучения упругих свойств при комнатной температуре методом резонансной ультразвуковой спектроскопии (RUS). Так как для исследуемой керамики характерен ковалентный тип межатомных взаимодействий, то она будет иметь максимальную прочность и минимальную сжимаемость. Для образца с наибольшей плотностью получено значение модуля Юнга – 298,04 ГПа, коэффициента Пуассона – 0,2367 и объемного модуля упругости – 188,6 ГПа.

Представленные результаты показывают, что методом искрового плазменного спекания из порошка микронной фракции могут быть получены высокоплотные образцы керамики на основе карбида кремния с высокой (до 100%) плотностью, что открывает перспективы широкого применения метода SPS для экономичного производства высококачественных керамических изделий из карбида кремния заданного состава с прогнозируемыми свойствами.

Получение специальных композиционных керамических материалов в волне горения

Ю.М. Михайлов, В.В. Алешин, **А. В. Бакешко**, В.С. Смирнов
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (ФИЦ ПХФ и МХ РАН), г. Черноголовка, Россия
E-mail: bav@icp.ac.ru

Показано, что в результате высокотемпературного горения образцов из спрессованной термитной смеси оксида меди с алюминием и титаном происходит образование пористого материала с интерметаллидной матрицей состава Al_5CuTi_2 , содержащей включения титаната алюминия (Al_2TiO_5), при этом полученные образцы сохраняют форму и размеры исходной образцов.

Из литературы известно, что, как правило, при горении смесей оксида меди с алюминием и титаном происходит образование смесей интерметаллидов Al–Cu–Ti различного состава с оксидами этих элементов. Целью настоящей работы была проверка возможности применения процесса горения для одностадийного получения материала, состоящего из интерметаллидной матрицы однородного состава с интеркалированными частицами титаната алюминия, и изготовления образцов заданной формы.

Для изготовления образцов использовались следующие исходные материалы:

- порошок алюминия марки АСД-4. Средний размер частиц металла 6 мкм, удельная поверхность – 0,34-0,38 м²/г;
- порошок титана марки ПТОМ-1. Средний размер частиц металла 20 мкм, удельная поверхность – 0,12-0,14 м²/г;
- оксид меди (II) марки «ч. д. а.». Состоит из агломератов со средним размером 40 мкм из частиц оксида размером около 1 мкм. Удельная поверхность – 0,53 м²/г.

Исходные компоненты в заданных соотношениях перемешивали в пластмассовой емкости механического смесителя в течение 30 мин. Из полученной смеси методом глухого прессования под давлением 500 МПа формовали цилиндрические образцы диаметром 15 мм и высотой около 10-20 мм. Исходные образцы в виде параллелепипедов 75×15×6 мм формовали в пресс-форме бокового прессования под давлением 300 МПа. Плотность образцов составляла 3,0-3,5 г/см³.

Для осуществления процесса горения цилиндрических образцов их помещали в специальный реактор объемом 310 мл, продуваемый аргоном под атмосферным давлением, и инициировали горение верхнего торца образца нихромовой электрической спиралью, имеющей температуру около 900 °С. Далее волна горения распространялась по образцу за счет тепла, выделяющегося при взаимодействии компонентов исходной смеси. Максимальная расчетная температура горения составляла 2850 °С. Образцы в виде параллелепипедов поджигали на воздухе. После завершения процесса образующийся пористый образец-слиток охлаждали в токе аргона, измеряли его размеры и определяли фазовый состав методами РФА и металлографии.

Для того, чтобы образующиеся образцы-литки получаемого материала имели однородный состав и сохраняли форму и размеры исходного образца, была проведена оптимизация соотношения исходных компонентов как для изготовления цилиндрических образцов, так и для образцов в виде параллелепипеда.

В результате было экспериментально показано, что при соотношении исходных компонентов 15% Al, 70% Ti и 15% CuO, образующиеся материалы состоят только из интерметаллидной матрицы Al_5CuTi_2 с интеркалированными частицами Al_2TiO_5 , цилиндрические образцы-литки сохраняют форму и размеры исходного образца. Получаемый композиционный материал обладает довольно высокой пористостью – около 28% (рис.1).

В результате оптимизации соотношения исходных компонентов для изготовления слитка в виде параллелепипеда было установлено, что образец-слиток сохраняющий форму и размеры исходного образца, образуется при горении исходного образца, изготовленного из смеси 20% Al, 60% Ti и 20% CuO, при этом его материал состоит из тех же продуктов, что и в предыдущем случае (рис.2).

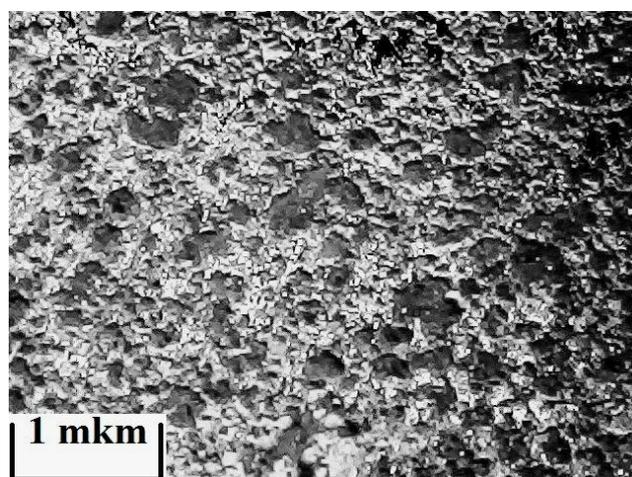


Рис.1. Изображение внутренней структуры материала цилиндрического образца-слитка, полученного в результате горения смеси 15% Al, 70%Ti и 15%CuO

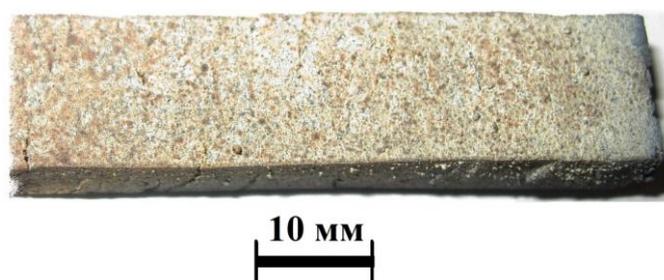


Рис.2. Внешний вид образца-слитка материала в виде параллелепипеда, полученного в результате горения смеси 20% Al, 60%Ti и 20%CuO

Полученный образец имеет светло-желтый цвет из-за частичного поверхностного окисления металлов. Он несколько искривлен и обладает шероховатой поверхностью. Электронно-микроскопические исследования показали, что кроме пор в изготовленном образце имеется сеть мелких трещин, которых нет в продуктах горения образца цилиндрической формы. Вероятно, появление трещин обусловлено малой толщиной образца (6 мм), поскольку его прочности недостаточно для компенсации механических напряжений, возникающих при быстром и неравномерном горении и остывании на воздухе.

Таким образом, установлено, что при горении смесей, составленных из исходных компонентов, взятых в оптимальных соотношениях, в системе Al–Ti–CuO могут быть получены пористые композиционные материалы, содержащие частицы Al_2TiO_5 в интерметаллидной матрице Al_5CuTi_2 , при этом полученные образцы-слитки сохраняют форму и размеры исходных образцов.

Работа выполнена по теме Государственного задания, номер государственной регистрации № 124020100045-5.

Исследования возможностей инновационной технологии получения субмикронных порошков карбида кремния в вакууме

В.В. Котунов, А.Е. Ливанов, Ю.В. Усачев, И.Ю. Усачев
ООО «ВЭЛМА» (НПО «ЭРГА»), г. Калуга, Россия
E-mail: livanov@erga.ru

ООО «ВЭЛМА» (НПО «ЭРГА») специализируется на разработке и изготовлении высокоскоростных электрических машин широкого спектра применения с различными типами опор – шариковыми, гидро-/газодинамическими, магнитными.

Разрабатываемая технология измельчения карбида кремния основана на инерционном размоле с применением высокоскоростных электрических приводов, разреженной газовой среды (вакуума) для достижения высоких скоростей движения частиц измельчаемого материала с последующим переводом накопленной кинетической энергии в энергию разрушения. Все процессы – измельчение, активация, твердофазный синтез (если в процессе участвует более двух компонентов, например, спекающие добавки), происходят в вакуумной камере за один цикл измельчения с минимальным нагревом материала.

Пример пробного помола за один цикл измельчения с производительностью несколько килограммов в минуту приведен на рисунках 1, 2. Помол порошка карбида кремния F400 (производства ОАО «Волжский абразивный завод») с $d_{50}=18$ мкм и отсутствием субмикронной фракции (рис. 1) дал конечный продукт с $d_{50}=1,74$ мкм и содержанием субмикронной фракции около 20% (рис. 2).

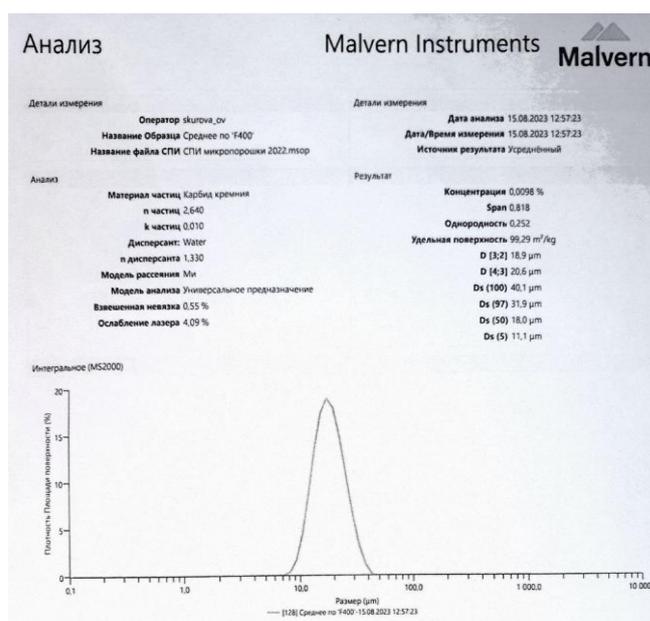


Рис. 1. Исходный порошок (F400)

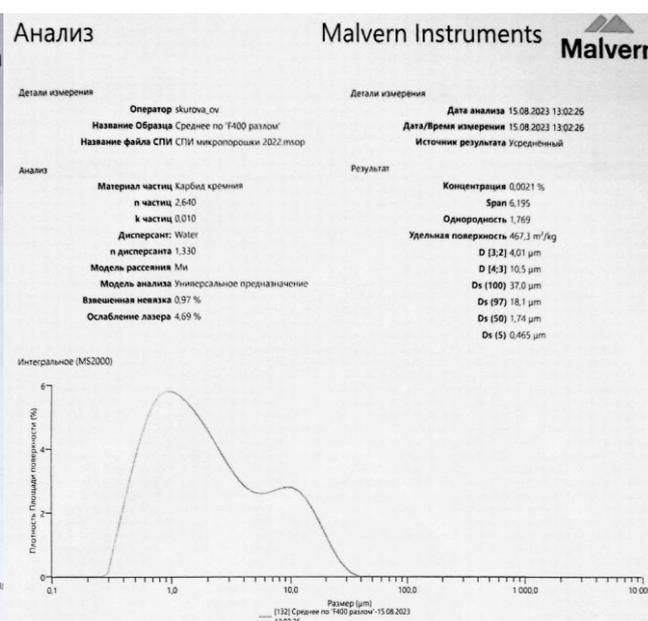


Рис. 2. После одного цикла измельчения

По итогам серии экспериментальных помолов сделаны выводы о перспективности представляемой технологии и необходимости улучшения результатов в части увеличения доли частиц размером менее 1 мкм, а также удаления крупных включений.

Проведен анализ возможностей разрабатываемой технологии, предложены пути повышения эффективности процесса измельчения и выделения субмикронной фракции порошков карбида кремния.

Кнудсеновская эффузионная масс-спектрометрия для исследования термодинамики парообразования керамических систем

Н.А. Грибченкова, А.С. Смирнов, А.С. Алиханян

Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (ИОНХ РАН), г. Москва, Россия

E-mail: gribchenkova@igic.ras.ru

Как правило, получение керамических материалов, а иногда также их эксплуатация связаны с высокими температурами, при которых становятся выраженными испарение материала или отдельных его компонентов и/или взаимодействия материала с окружением. В связи с этим, изучение термодинамики парообразования керамических систем, а также систем «металл – оксид» имеет большую ценность для прогнозирования высокотемпературного поведения материалов. Наиболее подходящим методом для исследования физико-химических характеристик процессов парообразования, в том числе гетерогенных равновесий в конденсированной фазе является метод Кнудсеновской эффузионной (или высокотемпературной) масс-спектрометрии (КЭМС). КЭМС представляет собой комбинацию двух методов: классического эффузионного метода Кнудсена и масс-спектрального анализа газовой фазы, эффундирующей из камеры Кнудсена. Такое сочетание делает возможным определять химический состав насыщенного пара исследуемого вещества или системы, а также получать количественную информацию в виде величин парциальных давлений компонентов пара в зависимости от температуры. Идентификация газовых компонентов позволяет описывать реализующиеся в эффузионной камере равновесия уравнениями химических реакций, константы равновесия которых могут быть рассчитаны на основании полученных значений парциальных давлений. Дальнейшие термодинамические расчеты дают в результате энергетические характеристики реакций – стандартные энергии Гиббса и стандартные энтальпии, на основании которых рассчитываются стандартные энтальпии образования соединений. Кроме того, величины парциальных давлений компонентов пара используют для вычисления термодинамических активностей компонентов керамических систем, которые, как оказалось, очень «чувствительны» к изменению фазового состава образца. Поскольку КЭМС является динамическим методом определения давления, и в течение эксперимента происходит убыль вещества через эффузионный канал, состав системы меняется, что позволяет при необходимости в рамках одного эксперимента наблюдать за переходом фигуративной точки (ф. т.) системы из одного поля фазового пространства в другое. Данный переход, т.е. пересечение ф. т. фазовой границы, сопровождается резким изменением активностей компонентов системы, благодаря чему по данным КЭМС можно установить координаты моноварианты в фазовом пространстве: давление, температуру и состав. Таким образом, эти данные могут быть использованы для построения сечений p – T – x -фазовых диаграмм систем, чрезвычайно удобных для представления фазовых взаимосвязей в системах в зависимости от физико-химических параметров. Например, построение в T – x координатах дает в результате диаграмму плавкости системы, что с учетом широкого температурного интервала, в котором возможны измерения КЭМС (до 3000 К), дает уникальные возможности для определения солидуса и ликвидуса тугоплавких систем. Пример такого приложения метода был продемонстрирован в нашем исследовании системы WO_3 – ZnO . Там же было установлено вероятное существование азеотропа в области расплава, на основании постоянства и равенства составов конденсированной и газовой фаз при парообразовании системы. Следует отметить, что практика применения системного подхода при исследовании индивидуальных соединений, позволяет специальным планированием эксперимента получить данные, которые невозможно получить при рассмотрении соединения изолированно, так, например, нами было доказано присутствие атомарного In в насыщенном паре In_2O_3 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания ИОНХ РАН.

Перспективная технология получения функциональной керамики на основе МАВ-фазы Fe_2AlB_2 , обладающей магнитокалорическим эффектом вблизи комнатной температуры

Е.А. Башкиров, А.Ю. Потанин, Ю.С. Погожев, С.И. Рупасов, Е.А. Левашов
НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия
E-mail: bashkirov.ea@misis.ru

В последние десятилетия наблюдается значительное увеличение исследовательского интереса к технологиям твердотельного охлаждения, так как они обладают высокими показателями энергоэффективности и безопасны для окружающей среды. Отдельное внимание уделяется материалам, обладающим вблизи комнатной температуры магнитокалорическим эффектом (МКЭ), который обусловлен изменением температуры и энтропии при наложении или снятии внешнего магнитного поля. Одним из таких материалов является Fe_2AlB_2 , относящийся к семейству атомно-слоистых материалов под названием МАВ-фазы (где М – переходный металл, А – алюминий и В – бор). Кроме того, данный материал характеризуется хорошей трещиностойкостью, твердостью, электро- и теплопроводностью, что делает его перспективным кандидатом для потенциального применения в установках твердотельного охлаждения. Известные методы получения материалов на основе данной МАВ-фазы: дуговая плавка, реакционное спекание и горячее прессование (ГП), характеризуются высокими экономическими затратами вследствие неоднократного переплава, длительной высокотемпературной выдержки или использования более чем 3-х кратного избытка алюминия для получения Fe_2AlB_2 . С другой стороны, метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), основанный на поддержании реакции за счет энергии химического взаимодействия, зарекомендовал себя как эффективный и экономичный способ получения керамических материалов на основе МАВ- и МАХ-фаз высокой степени чистоты.

Целью данной работы было получение компактной керамики на основе Fe_2AlB_2 , изготовленной по комплексной технологии элементного СВС и горячего прессования, и исследование ее механических, теплофизических и магнитокалорических свойств, а также окислительной стойкости при температуре 1000 °С.

Для получения СВС-порошка элементные порошки железа марки ВК-3, алюминия марки ПА-4 и бора марки Б-99А смешивали из расчета получения соединения Fe_2AlB_2 в планетарной мельнице при скорости вращения барабанов 700 об/мин и после формовали в пористые брикеты, которые помещали в реактор, где в среде Ar происходило локальное инициирование процесса СВС с помощью резистивного нагрева вольфрамовой проволоки. Полученные спеки измельчали в шаровой вращающейся мельнице до получения порошка, который в дальнейшем консолидировали методом ГП.

По результатам дифференциальной сканирующей калориметрии было установлено, что при 1284 °С происходит разложение МАВ-фазы, поэтому исследование влияния температуры горячего прессования СВС-порошка на свойства компактной керамики проводилось в интервале 0,8-0,9 от $T_{\text{разлож}}$. Оптимальная температура консолидации составила 1100 °С, при которой керамика состояла из пластинчатых зерен Fe_2AlB_2 толщиной от 170 до 200 нм и длиной 2-5 мкм (рис. 1а) и имела остаточную пористость 2,3%.

Полученная однофазная ГП-керамика имела твердость 12,8 ГПа, трещиностойкость 5,2 МПа·м^{1/2}, прочность на изгиб 429 МПа и теплопроводность 7,47 Вт/(м·К). Наибольший измеренный прямым методом МКЭ наблюдался при температуре 293 К и составил $\Delta T_{ad} = 0,92$ К (рис. 1б).

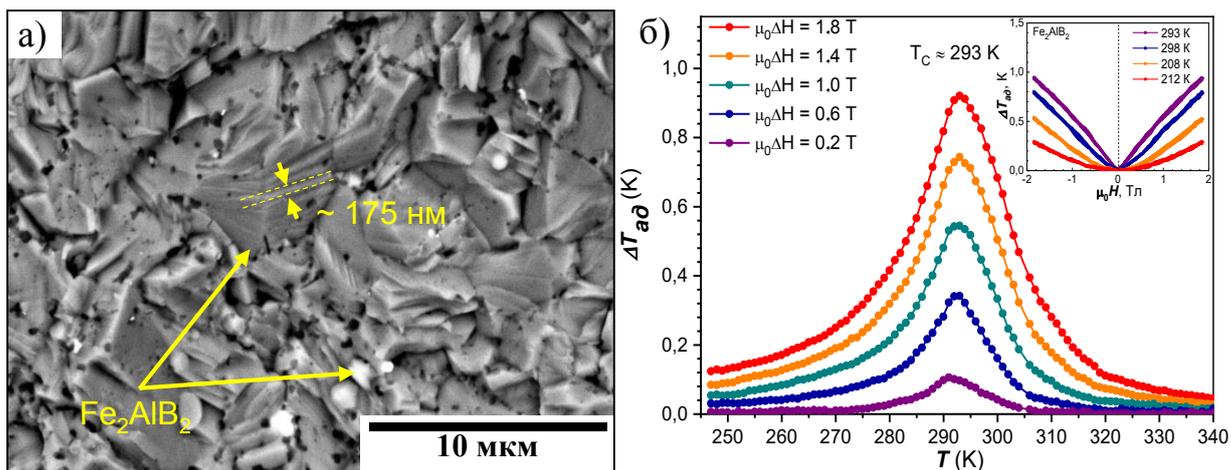


Рис. 1. Микроструктура излома (а) и измеренный прямым методом МКЭ (б) керамики на основе МАВ-фазы Fe_2AlB_2

При исследовании жаростойкости керамики на основе Fe_2AlB_2 при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ на воздухе было установлено (рис. 2), что кинетика окисления описывается линейным законом, при этом на поверхности образца образуется гетерогенная оксидная пленка с многослойной структурой с верхним слоем гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и внутренним слоем, состоящим из борсодержащих оксидов в виде железного варвикита Fe_2BO_4 и пористого слоя бората алюминия $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$, формирующегося в виде нитевидных кристаллов. На границе с подложкой установлено образование подслоя на основе FeB . Расчетное значение скорости окисления после 30 ч испытаний составило $0,03\text{ мг}/(\text{см}^2\cdot\text{мин})$.

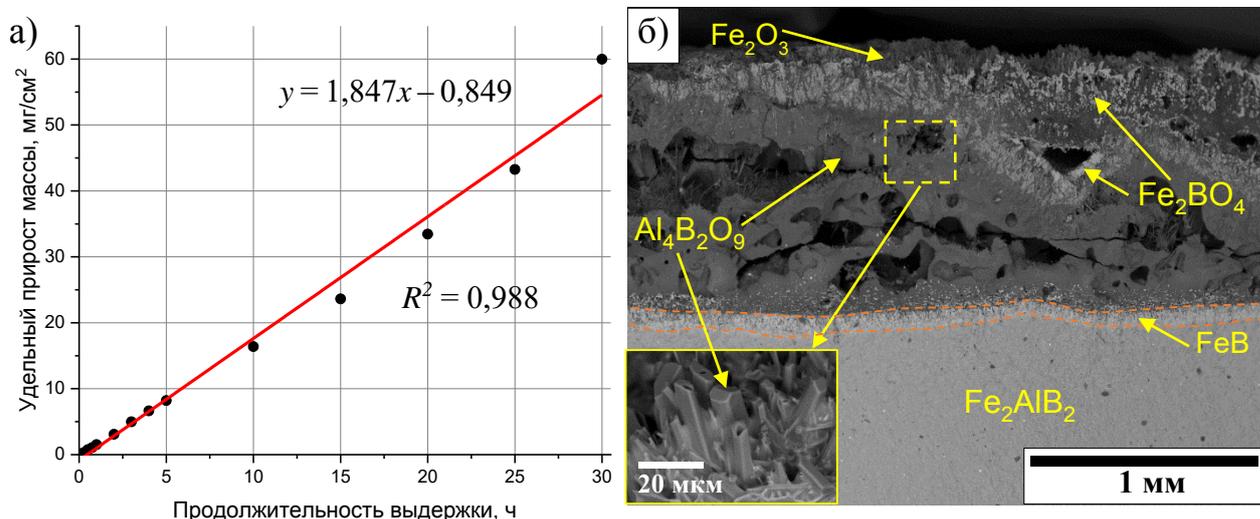


Рис. 2. Кинетика окисления (а) и микроструктура окисленного слоя после 30 ч изотермической выдержки при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ керамики на основе МАВ-фазы Fe_2AlB_2 (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-79-10103.

Влияние ZrO_2 на состав оксидных фаз при СВС композиций $Si_3N_4-Yb_2O_3$, $Si_3N_4-Y_2O_3$

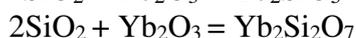
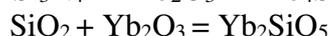
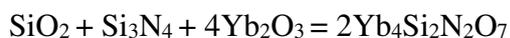
В.В. Закоржевский, И.В. Шibaков, В.Э. Лорян

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН (ИСМАН), г. Черноголовка, Россия

E-mail: zakvl@ism.ac.ru

Создание новой техники требует разработки новых керамических материалов с высокой температурой эксплуатации, в частности, керамики на основе нитрида кремния.

Причиной снижения высокотемпературной прочности нитридкремниевой керамики является наличие в ее межзеренном пространстве аморфной стеклофазы в виде силикатов, при этом данная стеклофаза размягчается при более низких температурах, чем температура плавления силикатов. Таким образом, повышение высокотемпературных свойств нитридкремниевой керамики сводится к созданию условий формирования межзеренной связи в кристаллическом состоянии с высокой температурой плавления и высокой прочностью. В настоящее время перспективным направлением повышения высокотемпературных свойств нитридкремниевой керамики считается использование в качестве спекающих добавок оксидов редкоземельных металлов, которые могут образовывать в системе Si-N-O-Me высокотемпературные кристаллические фазы. Из ряда редкоземельных элементов такими свойствами обладают иттрий, иттербий и лютеций, которые образуют такие соединения, как $Y_4Si_2O_7N_2$, $Yb_4Si_2O_7N_2$, $Lu_4Si_2O_7N_2$. Температура плавления $Yb_4Si_2O_7N_2$ составляет $1870^\circ C$, а $Y_4Si_2O_7N_2$ – $1850^\circ C$, поэтому четвертичные оксинитриды наиболее предпочтительны в качестве межзеренной фазы. Однако при оптимальном содержании в композиции или смеси Yb_2O_3 (16 мас. %) в оксинитрид связывается 0,62% SiO_2 или 0,33% O_2 , остальной SiO_2 образует силикаты, преимущественно в аморфном виде:



Для сохранения высокотемпературной прочности материала данные силикаты надо перевести в кристаллическое состояние. Для этого существует два способа: 1 – длительная выдержка при температуре, близкой к температуре плавления, 2 – использование катализаторов кристаллизации силикатов. Известно, что такие оксиды, как Cr_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 ускоряют процесс кристаллизации силикатов. В наших экспериментах мы использовали оксид циркония.

Для определения роли ZrO_2 как катализатора кристаллизации провели модельные эксперименты в режиме горения, в которых в качестве разбавителя использовали композиции $Si_3N_4-Y_2O_3$, $Si_3N_4-Yb_2O_3$, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), и нанопорошок оксида циркония. Температуры горения составляли $1950-2000^\circ C$. При использовании композиции $Si_3N_4-Y_2O_3$ фазовый состав продукта синтеза был представлен только бета-фазой нитрида кремния. При горении такого же состава шихты, но с 2 мас. % ZrO_2 , оксидная фаза состояла из дисиликата иттрия. Результаты данного эксперимента подтвердили роль ZrO_2 как катализатора кристаллизации силикатов. Аналогичный результат был получен в экспериментах с оксидом иттербия. При введении ZrO_2 в продукте синтеза, наряду с четвертичным оксинитридом иттербия, кремния образовалась фаза дисиликата иттербия. Для подтверждения полученных результатов было проведено спекание композиций и смесевых составов в волне горения с ZrO_2 и без него. Рентгенофазовый анализ спеченных образцов подтвердил ранее полученные результаты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00085, <https://rscf.ru/project/24-23-00085/>.

Механические свойства спеченного нитрида кремния с добавкой Yb_2O_3

Н.К. Георгиу, Е.С. Жукова, А.И. Жмурин, А.И. Ганичев, М.Г. Лисаченко, М.Ю. Русин
АО «ОИПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Керамические материалы на основе нитрида кремния имеют высокую прочность, химическую стойкость, стойки к термоудару и способны длительно выдерживать температуру $1400\text{ }^\circ\text{C}$, что обуславливает применение Si_3N_4 в качестве компонентов горячих секций усовершенствованных газовых турбин, с температурой газа в турбине $1500\text{ }^\circ\text{C}$ и выше. В то же время при температуре выше $1400\text{ }^\circ\text{C}$ происходит падение прочности нитрида кремния из-за размягчения межзёрненной фазы, что может осложнить применение изделий на его основе в составе газотурбинного двигателя.

Повышения высокотемпературной прочности Si_3N_4 керамики можно достичь применением в качестве спекающей добавки тугоплавких оксидов редкоземельных металлов. В настоящей работе проведена оценка влияния спекающей добавки Yb_2O_3 в количестве 7,5-20 мас. % на прочность Si_3N_4 керамики. Получены экспериментальные данные о фазовом составе и прочности на изгиб данной керамики при комнатной температуре и при $1600\text{ }^\circ\text{C}$.

Порошки Si_3N_4 (ИСМАН, г. Черноголовка) с добавкой 7,5, 10, 12,5, 15 и 20 мас. % Yb_2O_3 (далее К1, К2, К3, К4 и К5, соответственно) измельчали в планетарной мельнице Pulverisette-5 в среде этанола в течение 24 ч с частотой вращения 300 об/мин, после чего их смешивали с водным раствором поливинилпирролидона в количестве 3 мас. % для получения пресс-порошка. Прессование сырцов выполняли на одноосном прессе при давлении 200 МПа. Спекание образцов проводили при температуре $1900\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 часов под давлением 2 МПа в атмосфере N_2 .

Кажущуюся плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания. Фазовый состав керамики определяли с помощью рентгеновского дифрактометра Empyrean. Измерения предела прочности при трехточечном изгибе при комнатной температуре проводили с использованием установки LFM-50. Испытания на изгиб при $1600\text{ }^\circ\text{C}$ на воздухе проводили на установке LFM-100: образец помещали в нагретую печь, оставляли его на 10 мин для выравнивания температуры, а затем нагружали до разрушения.

В процессе спекания для всех составов были достигнуты значения плотности, равные 98,5-99,5% от теоретической. По данным РФА (рис. 1) основной фазой образцов К1, К3, К5 является высокотемпературная фаза $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, что свидетельствует о полноте перехода $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ в $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ в процессе спекания.

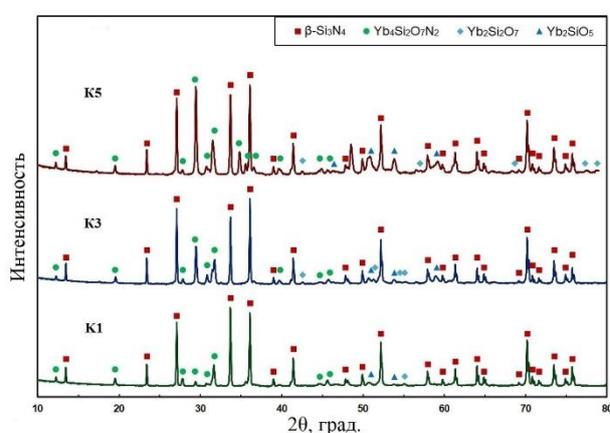
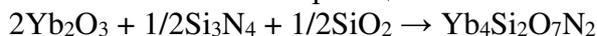


Рис. 1. Рентгенограммы образцов спеченного Si_3N_4 с добавками 7,5-20 мас. % Yb_2O_3

Межзёренная фаза главным образом состоит из кристаллического иттербий-кремниевого оксинитрида, интенсивность пиков которого на рентгенограммах растёт с увеличением содержания Yb_2O_3 в исходных порошках. Образование данного соединения можно представить, как взаимодействие компонентов по реакции:



Также обнаруживались и силикаты иттербия, при этом интенсивность соответствующих пиков растёт с увеличением содержания спекающей добавки.

На рисунке 2 представлены зависимости прочности на изгиб от содержания Yb_2O_3 при комнатной температуре и при 1600 °С. В обоих случаях с ростом концентрации спекающей добавки наблюдается снижение прочности керамики. Подобная тенденция характерна для спеченных Si_3N_4 -материалов из-за размягчения межзёренной фазы.

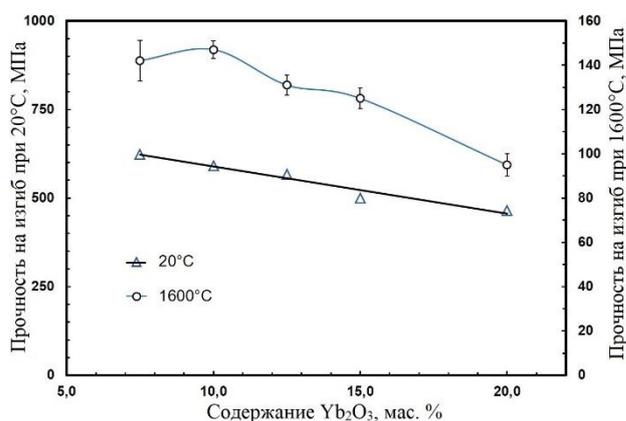


Рис. 2. Зависимость прочности на изгиб образцов спеченного Si_3N_4 с добавками 7,5-20 мас. % Yb_2O_3 при комнатной температуре и при 1600 °С

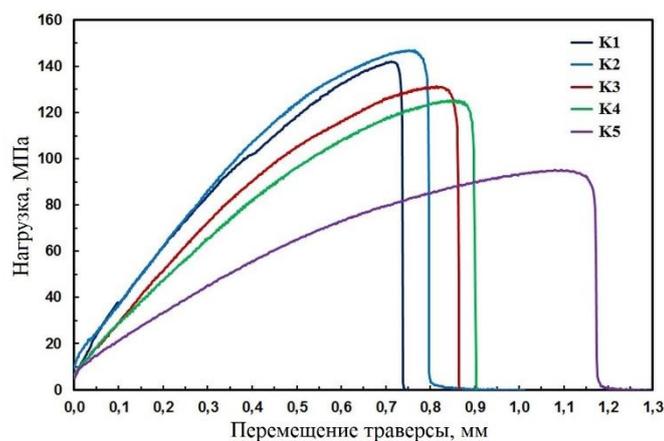


Рис. 3. Диаграмма нагрузки-перемещения траверсы при испытании прочности на изгиб образцов спеченного Si_3N_4 при 1600 °С

На рисунке 3 представлены кривые перемещения-нагрузки при 1600 °С для спеченного Si_3N_4 с добавками 7,5-20 мас. % Yb_2O_3 . Ход данных кривых указывает на пластический характер деформации и текучесть материала, которая растет с увеличением количества Yb_2O_3 . Полученная закономерность объясняется наличием силикатов иттербия, которые размягчаются при температурах выше 1400 °С. Кроме того, вязко-пластичный характер разрушения образцов K1-K5 указывает на неполную кристаллизацию межзёренной фазы и наличие аморфной фазы по границе зерна, снижающей высокотемпературную прочность материала.

Исследовано влияние добавки Yb_2O_3 на фазовый состав и механические свойства спеченного Si_3N_4 . Для всех исследуемых составов межзёренная фаза главным образом образована высокотемпературным соединением $\text{Yb}_4\text{Si}_2\text{O}_7\text{N}_2$, но отличается наличием сопутствующей фазы $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, количество которой растет с увеличением содержания Yb_2O_3 . Максимальную прочность на изгиб 623 ± 33 МПа как при комнатной температуре, так и при 1600 °С, демонстрируют образцы с наименьшим содержанием Yb_2O_3 . С увеличением содержания Yb_2O_3 прочность плавно снижается, зависимость носит линейный характер. Вязко-пластичный характер деформации и текучесть материала при 1600 °С, растущая с увеличением количества добавки Yb_2O_3 , указывает на высокую концентрацию аморфной составляющей межзёренной фазы, существенно снижающей высокотемпературную прочность материала. Снижению прочности Si_3N_4 при 1600 °С также способствуют силикаты иттербия, размягчающиеся при температурах выше 1400 °С.

Композитные материалы с магнитным наполнителем

А.Л. Ткачя, А.Б. Дубовский

«ЦНИИХМ им. Д.И. Менделеева», г. Москва, Россия

E-mail: artur.tka.01@gmail.com

В настоящее время магнитные композиционные материалы (КМ) на основе ферритов со структурой шпинели занимают важное место в радиоэлектронных устройствах высокочастотного (ВЧ) диапазона, таких как дроссели или материалы для обеспечения электромагнитной совместимости. Наибольший интерес представляют исследования зависимости комплексной магнитной проницаемости от концентрации ферритмагнитной фазы и повышение её значений на высоких частотах. Увеличение резонансной частоты возможно путем использования плоских частиц или тонкопленочных слоев взамен вытянутых эллипсоидальных частиц, что в ряде случаев представляет определенные технологические трудности. После синтеза частиц необходимой формы или роста пленки нужной толщины, магнитная фаза вводится в диэлектрическую матрицу, образуя полимерную матричную композицию или многослойную структуру, разделенную диэлектрическими прослойками.

В работе предложен метод изготовления альтернативного керамического композитного материала, позволяющий получать после отжига феррита общедоступной марки готовый материал, обладающий более высокими ВЧ магнитными характеристиками, чем образцы, изготовленные по стандартной полимерной композиционной технологии. Для получения керамических КМ шихта смешивалась с алюмохромфосфатным связующим и высушивалась в сушильном шкафу. После сушки и формовки заготовки помещались в высокотемпературную печь для проведения твердофазного синтеза. Для сравнения ВЧ магнитных свойств образцов, полученных двумя способами, были также изготовлены полимерные КМ путем смешивания ферритового порошка той же марки и эпоксидной смолы с последующим отверждением при комнатной температуре.

Для изучения фазового состава и микроструктуры керамических композитов образцы после твердофазного синтеза были исследованы методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии. Химический состав композита был определен при помощи энергодисперсионного анализа. Магнитные характеристики изучались с помощью вибрационной магнитометрии. Комплексная магнитная проницаемость исследовалась в коаксиальной ячейке на векторном анализаторе цепей в диапазоне 1 МГц-1 ГГц.

Для проведения моделирования путем разложения спектров мнимой части магнитной проницаемости на составляющие, соответствующие пикам резонанса доменных границ и ферромагнитного резонанса, порошки феррита были исследованы методом лазерной дифракции, позволяющей оценить исходный средний размер зерен.

Было обнаружено, что на спектрах мнимой части магнитной проницаемости положение и высота высокочастотных пиков зависят от температуры сушки керамических КМ, что может быть связано с изменением размера пор в объеме материала. Благодаря удобству регулирования размера пор от температуры сушки, результаты исследований разработанных керамических композитов дают возможность выявить закономерности влияния размера пор на положение и форму пиков мнимой части магнитной проницаемости и провести моделирование их микроволнового поведения. Использование предложенного метода изготовления керамических КМ позволило увеличить ВЧ магнитную проницаемость образцов более чем в три раза по сравнению с полимерными КМ при сохранении близкого значения плотности, что может найти применение в материалах, используемых для обеспечения электромагнитной совместимости.

Синтез станната кальция как компонента конденсаторной керамики

А.А. Холодкова^{1,2}, Ю.Д. Ивакин¹, В.Е. Базарова², И.Д. Акиншин², Л.А. Арбанас²,
А.Н. Хрусталева², М.В. Корнюшин², А.В. Смирнов²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ²РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия

E-mail: anastasia.kholodkova@gmail.com

Керамические конденсаторы пользуются высоким спросом при создании электронных устройств различного назначения. Важное место среди материалов для многослойных микроконденсаторов с высокой емкостью и малыми диэлектрическими потерями занимает керамика на основе титаната бария BaTiO_3 . В чистом виде керамика состава BaTiO_3 проявляет сегнетоэлектрические свойства при температурах ниже точки Кюри (120-130 °С). При плотности материала, близкой к теоретической (6,01 г/см³), и размере зерна около 1 мкм диэлектрическая проницаемость достигает 8000-10000, тангенс угла диэлектрических потерь порядка 10^{-2} в области низких и средних частот в точке Кюри. Повышение требований к размерам и функциональным характеристикам микроконденсаторов показало необходимость модифицирования состава керамики на основе BaTiO_3 . В результате были созданы различные многокомпонентные системы с улучшенными температурными характеристиками и повышенной диэлектрической проницаемостью. В 2003 г в литературе обсуждался синтез порошка станната кальция CaSnO_3 как перспективного компонента конденсаторной керамики. В 2021 г для системы $\text{BaTiO}_3\text{-CaSnO}_3$ было показано смещение точки Кюри к комнатной температуре, что позволило изготовить керамику с диэлектрической проницаемостью более 10000 и тангенсом угла диэлектрических потерь менее 0,04 на частоте 100 кГц. Керамика состава $\text{BaTiO}_3\text{-CaSnO}_3$ представляет особый интерес для дальнейшего исследования и практического использования благодаря сочетанию комплекса диэлектрических свойств, сравнительной простоты состава и доступности сырья. Наиболее легко масштабируемыми и экономичными способами синтеза порошка CaSnO_3 являются твердофазный, а также гидротермальный с последующим прокаливанием осажденного прекурсора $\text{CaSn}(\text{OH})_6$. Тем не менее, необходимость высокотемпературной обработки реагентов или прекурсора приводит к повышенным энергозатратам и получению продукта с неоднородной морфологией.

В настоящей работе CaSnO_3 был напрямую синтезирован из смеси $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и SnO_2 в среде сверхкритического водного флюида (400 °С, 26 МПа) в реакторе периодического действия. Обнаружено, что необходимым условием образования продукта является присутствие в реакционной среде ионов натрия, которые были внесены в виде NaOH . Для равномерного распределения Na^+ по объему смеси реагентов проводилась предварительная пропитка SnO_2 раствором NaOH с последующим высушиванием при температуре около 70 °С. Размер кристаллов в полученном порошке CaSnO_3 составил менее 20 мкм. На основе коммерческого BaTiO_3 с добавлением синтезированного CaSnO_3 по традиционной технологии путем прессования и обжига при 1380 °С была изготовлена керамика, обладающая диэлектрической проницаемостью более 13500 и тангенсом угла диэлектрических потерь менее 0,015 при комнатной температуре на частоте приложенного поля 100 кГц. Полученный результат превосходит ранее известные из литературы для керамики близкого состава и указывает на высокое качество синтезированного порошка CaSnO_3 .

Работа выполнена в рамках учета индикаторов по проектам, финансируемым из государственного бюджета или других внешних источников: Национальный проект «Наука и университеты» для достижения результата «Создание новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей (нарастающий итог)». FSFZ-2022-0003.

Биорезорбируемые материалы на основе фосфатов магния, полученных с помощью метода пиролиза аэрозоля

Ю.Р. Рассолова, А.М. Мурашко, Я.Ю. Филиппов, Е.С. Климашина
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
E-mail: rassolovayr@my.msu.ru

Перспективным материалом с точки зрения создания биорезорбируемых имплантатов является керамика на основе фосфатов магния благодаря стимулирующему действию ионов магния на рост и пролиферацию клеток, а также более высокой растворимости по сравнению с фосфатами кальция. Метод пиролиза аэрозоля позволяет получать мелкодисперсные высокоактивные порошковые прекурсоры, которые могут быть использованы для создания мелкозернистой керамики с высокой прочностью. В связи с чем целью данной работы стало получение составов в системе $Mg_3(PO_4)_2$ – $Mg_2P_2O_7$ с помощью метода пиролиза аэрозоля.

Для получения порошковых прекурсоров методом пиролиза (рис. 1) в емкость ингалятора заливали 0,1 М растворы, содержащие $Mg(NO_3)_2$ и $(NH_4)_2HPO_4$ в различных соотношениях в расчете на конечные продукты реакции: $Mg_3(PO_4)_2$, $Mg_2P_2O_7$ и $3Mg_3(PO_4)_2/2Mg_2P_2O_7$ (эвтектический состав). С током воздуха капли аэрозоля диаметром до 3 мкм попадали в нагретую до 600 °С область кварцевого реактора, где происходило разложение нитратов и образование рентгеноаморфного порошка с частицами сферической морфологии.

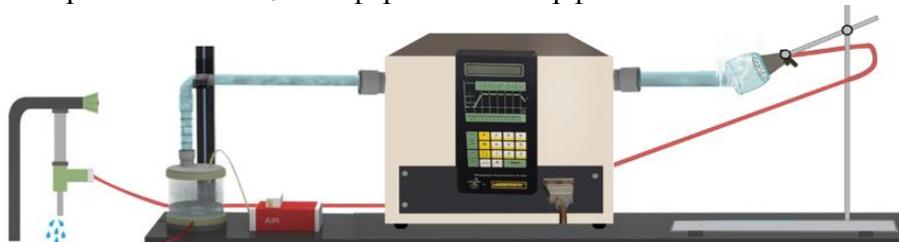


Рис. 1. Схематическое изображение установки для пиролиза

Для получения порошковых прекурсоров также может быть использован метод твердофазного синтеза из $MgO(Mg_2(OH)_2CO_3)$ и $(NH_4)_2HPO_4$, который отличается более высоким выходом, однако для частиц характерны более крупные размеры. На основе данных дилатометрического анализа было установлено, что обжиг составов после пиролиза приводит к растрескиванию материалов на основе пирофосфата и эвтектического состава, поэтому было предложено использовать предварительный обжиг при 700 °С в течение 30 мин для удаления непрореагировавших нитратов и влаги. Согласно данным РЭМ, после термообработки размер частиц преимущественно сохраняется. Было установлено, что среди выбранных составов ортофосфат магния начинает спекаться при наиболее низких температурах (930 °С), однако для получения плотной керамики необходим длительный обжиг (до 5 дней). Эвтектический состав наиболее эффективно спекается при температуре 1100 °С и позволяет достигнуть наибольшего значения относительной плотности – до 93%. Предварительное прокаливание составов, полученных методом пиролиза аэрозоля при температуре 700 °С, позволяет получить наиболее плотную керамику. Для образцов, полученных методом твердофазного синтеза, не удастся осуществить эффективное спекание при температурах 1100 °С и ниже, что подтверждают низкие значения плотности. С применением МТТ-теста было проведено исследование вытяжек материалов, которое показало отсутствие цитотоксичности керамических материалов, полученных с использованием метода пиролиза аэрозоля, о чем говорит высокая выживаемость клеток относительно контрольных проб. Наименьшую выживаемость клеток демонстрируют вытяжки из эвтектического состава, полученного методом твердофазного синтеза.

Разработка технологии изготовления высокотемпературной керамики на основе диборида циркония методом свободного спекания

Н.С. Лазарев, Е.И. Соломатина, Н.А. Голубева, А.О. Забежайлов, М.Г. Лисаченко,
Л.А. Плясункова

АО «ОНИИ «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Развитие гиперзвуковых летательных аппаратов ставит новые цели по созданию материалов и технологий изготовления изделий на их основе, способных длительно выдерживать воздействие экстремальных температур в окислительной среде.

Наиболее нагруженными деталями являются носовые части и острые кромки крыльев гиперзвуковых летательных аппаратов, имеющих сложную конфигурацию.

Разработчиков привлекают явные преимущества высокотемпературной керамики на основе ZrB_2 . Кроме тугоплавкости ($T_{пл} > 3000$ °С) диборид циркония обладает и другими уникальными свойствами: высокой химической стойкостью в различных агрессивных средах и жаропрочностью.

Однако получение монолитной керамики из чистых порошков диборида циркония затруднено в связи с высокими температурами спекания, поэтому в качестве добавки, понижающей температуру спекания, используют SiC в количестве 20-30 об. %. Карбид кремния выполняет несколько важных функций: является ингибитором роста зерна основной фазы, увеличивает стойкость к окислению, повышает прочность и теплопроводность керамики.

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрана керамика состава ZrB_2 –30 об. % SiC, отработана технология получения сложнопрофильных изделий методом шликерного литья и последующего свободного спекания, получены экспериментальные данные об основных физико-механических свойствах разрабатываемых материалов в широком диапазоне температур.

В качестве исходных материалов использовали следующие компоненты: порошок ZrB_2 ТУ 20.13.64-035-49534204-2017 АО «УНИХИМ с ОЗ», порошок SiC М5 марки 64С ГОСТ 26327-87 ОАО «Волжский абразивный завод».

Исходные порошки подвергали совместному измельчению в планетарной мельнице в изопропиловом спирте с последующей сушкой суспензии. Для деагломерации порошки протирали через сито с ячейкой 100 мкм. Средний размер частиц полученной смеси составил 1-3 мкм.

Для приготовления термопластичного шликера использовали связующее на основе парафина. Количество связующего для получения шликера с приемлемыми литейными характеристиками составило 11 мас. %. Из полученного шликера были отформованы экспериментальные образцы размером 60×10×10 мм для определения физико-механических свойств, а также конструктивно-подобные образцы типа «Носок» (рис. 1). Температура формования образцов составила 85 °С, а давление – 6 атм. Удаление временного связующего проводили при температуре 210 °С до остаточного контролируемого количества 1-3 мас. %.

Спекание образцов проводили в среде аргона, в поддерживающей засыпке, в высокотемпературной вакуумной печи при температуре 2000-2100 °С с различным временем выдержки ($t_{спек}$) при конечной температуре: 0, 0,6, 1, 2 и 3 ч.

Величину линейной усадки и потерю массы образцов при спекании определяли расчетным путем, исходя из значений исходных и конечных размеров и массы образцов.

Для определения физико-механических характеристик полученные образцы обрабатывали до размера 3×4×50 мм. Физико-механические свойства образцов керамики приведены в таблице 1. Плотность образцов составила от 91% до 95% от теоретической в

зависимости от времени конечной выдержки. Линейная усадка образцов составила от 11 до 15,5%, потеря массы после спекания 5-15%.



Рис. 1. Внешний вид конструктивно-подобного образца «Носок»

Микроструктура полученных образцов однородная, фаза SiC равномерно распределена между зернами ZrB₂ (рис. 2). Оптимальными физико-механическими свойствами обладает керамика, полученная с временем выдержки $t_{\text{спек}} = 1$ ч. С ростом времени выдержки $t_{\text{спек}}$ до 3 ч наблюдается существенный рост зерна основной фазы с 10-15 мкм до 25-50 мкм, сопровождающийся снижением прочности при комнатной температуре с 330 МПа до 269 МПа, высокотемпературной прочности при 1500 °С с 220 МПа до 184 МПа. Микротвердость (HV) и коэффициент трещиностойкости (K1c) остаются примерно на одном уровне 11-12 ГПа и ~ 4 МПа \times м^{1/2}, соответственно.

Таблица 1. Физико-механические свойства керамики ZrB₂-30 об. % SiC

$t_{\text{спек}}$, ч	Линейная усадка, %	Потеря массы, %	Плотность кажущаяся, г/см ³	Открытая пористость, %	Предел прочности при статическом изгибе при 20°С, МПа	Предел прочности при статическом изгибе при 1500°С, МПа	Микротвердость, ГПа	Трещиностойкость, МПа \times м ^{1/2}
0	11,0 \pm 0,6	5,5 \pm 0,5	4,78 \pm 0,10	4,2 \pm 0,3	308 \pm 25	129 \pm 11	11,8 \pm 1,2	4,0 \pm 0,1
0,6	14,5 \pm 0,5	6,0 \pm 0,5	4,89 \pm 0,10	0,5 \pm 0,1	328 \pm 25	160 \pm 15	12,0 \pm 1,3	3,6 \pm 0,1
1	15,0 \pm 0,5	15,0 \pm 0,7	4,91 \pm 0,05	0,5 \pm 0,1	330 \pm 27	220 \pm 10	12,0 \pm 1,0	3,9 \pm 0,1
2	15,5 \pm 0,5	15,0 \pm 0,3	4,95 \pm 0,05	0,4 \pm 0,1	267 \pm 24	202 \pm 9	11,1 \pm 0,9	4,1 \pm 0,1
3	15,5 \pm 0,7	15,0 \pm 0,3	4,95 \pm 0,05	0,3 \pm 0,1	269 \pm 27	184 \pm 9	12,4 \pm 1,1	4,2 \pm 0,1

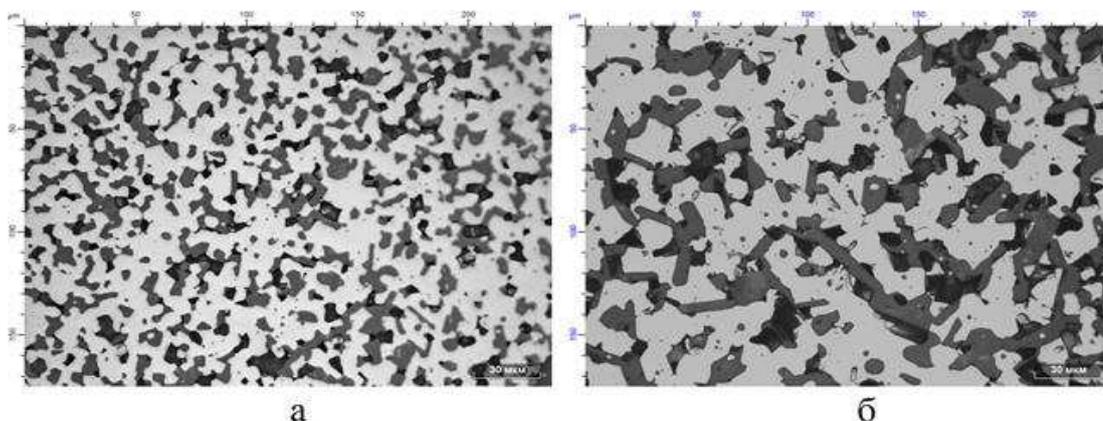


Рис. 2. Микроструктура образцов ZrB₂-30 об. % SiC после спекания: а – время выдержки при $t_{\text{спек}} = 1$ ч; б – время выдержки при $t_{\text{спек}} = 3$ ч

Получение керамики на основе диборида циркония аддитивным способом

И.Г. Михайлов, В.С. Зайцев, А.П. Возняк, Е.И. Соломатина, А.О. Забежайлов, М.Г. Лисаченко

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: lisachenkomg@technologiya.ru

Благодаря высокой температуре плавления и способности выдерживать критически высокие термические нагрузки сверхвысокотемпературные керамические материалы на основе диборида циркония могут найти применение в экстремальных условиях гиперзвуковых полётов в качестве различных деталей и узлов возвращаемых космических аппаратов и ракетных двигателей. Этими деталями могут быть крылья летательных аппаратов с острыми кромки и внутренними каналами охлаждения или распылители топлива форсунок с тонкими в сечении каналами, которые невозможно изготовить с применением методов традиционных керамических технологий, таких как инжекционное формование или прессование.

Современный аддитивный метод экструзии материала позволяет в кратчайшие сроки без изготовления оснастки проводить формование сложнопрофильных изделий из шликеров, используемых в традиционном керамическом производстве. Такой подход позволяет получать сложнопрофильные изделия из твёрдых высокотемпературных керамических материалов. При этом, дальнейшие технологические операции, такие как удаление связующего и термообработка, аналогичны уже существующим. В результате свойства материала изделий, получаемых аддитивным методом экструзии материала близки к свойствам изделий, получаемым по технологии инжекционного формования. К настоящему времени существует ограниченное количество исследований по получению керамики на основе диборида циркония аддитивным способом. В этих способах используется водная суспензия диборида циркония, что не исключает того, что в процессе формования из-за усадки может привести к короблению изделий по мере увеличения их размеров. В настоящей работе исследуется получение и свойства композиционного материала на основе диборида циркония, получаемого аддитивным методом экструзии материала. Отличительной особенностью работы является использование термопластичного шликера на основе смеси порошков диборида циркония, карбида кремния и карбида вольфрама, что позволяет формовать сложнопрофильные изделия, в том числе с острыми кромками и внутренними каналами охлаждения (рис. 1).



Рис. 1. Элемент кромки крыла с внутренними каналами охлаждения, полученный аддитивным методом экструзии материала

С целью получения керамики на основе диборида циркония аддитивным методом экструзии материала использовался термопластичный шликер из смеси порошков диборида циркония ZrB_2 разработки и производства АО «УНИХИМ с ОЗ» г. Екатеринбург (ТУ 20.13.64-035-49534204-2017), марка А (боротермия), абразивного порошка карбида

кремния SiC марки 64С ГОСТ 26327-84 производства АО «Волжский абразивный завод», карбида вольфрама WC ТУ 48-19-540-92 и связующего на основе парафина. Массовая доля связующего составляла 10-11%. При формовании образцов пластин с размерами 70×70×8,7 мм, необходимых для изучения основных свойств материала, использовались следующие технологические параметры процесса аддитивной экструзии материала (табл. 1).

Таблица 1. Параметры аддитивной экструзии материала для получения образцов

Параметр аддитивной экструзии материала	Значение
Диаметр сопла	0,8 мм
Толщина слоя	0,3 мм
Скорость перемещения	18 мм/с
Температура экструзии	68 °С
Температура подложки	48 °С

После формования заготовки пластины проводилось частичное удаление связующего в атмосфере воздуха при температуре 200 °С, остаток составлял не более 1-2 мас. %, и далее проводилось спекание в вакууме при максимальной температуре 2100 °С. Изображение заготовки пластины до и после спекания представлено на рисунке 2.

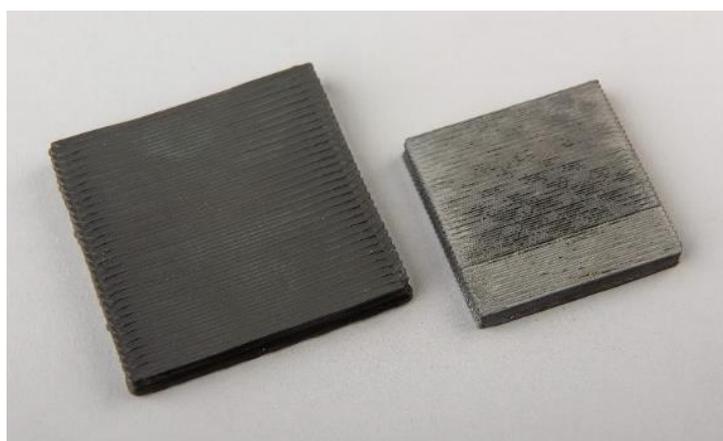


Рис. 2. Изображение заготовки пластины из ZrB₂-SiC-WC до (слева) и после спекания (справа)

Из полученных пластин изготовлены образцы размерами 3×4×50 мм для определения кажущейся плотности, предела прочности при трёхточечном изгибе, микротвёрдости и трещиностойкости. Данные по основным свойствам керамики на основе диборида циркония, получаемой аддитивным методом экструзии материала представлены в таблице 2.

Таблица 2. Свойства керамики на основе ZrB₂, полученной аддитивным методом экструзии материала

Свойство	Значение
Кажущаяся плотность	6,59±0,05 г/см ³
Открытая пористость	0,04-0,05%
Предел прочности при изгибе, 20 °С	391±21 МПа
Предел прочности при изгибе, 1500 °С	416±27 МПа
Микротвёрдость	16260 МПа
Трещиностойкость, K1c	5,5 МПа×м ^{0,5}

Разработка компьютерной модели процессов получения кварцевой керамики на основе экспериментальных данных

К.В. Печенкин, И.А. Антошина, М.О. Забежайлов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Разработка новых керамических материалов требует изготовления большого количества опытных образцов и исследования их физических характеристик. Это не всегда оправдано с точки зрения экономии времени и ресурсов. Построение компьютерной модели, предсказывающей отклик керамического материала или изделия на различные внешние воздействия, которая учитывает технологию получения материала, могло бы решить данную проблему. В данной работе представлено несколько этапов разработки такой компьютерной модели на примере кварцевой керамики.

На первом этапе была воспроизведена структура сырца кварцевой керамики. Для этого методом лазерной дифракции был определен гранулометрический состав исходного порошка кварцевого стекла. В модели сначала в некоторую емкость случайным образом были введены сферические частицы, имитирующие частицы порошка аморфного SiO_2 , распределение которых по размеру соответствовало экспериментальным данным. В модели также было учтено упругое взаимодействие между частицами, сила трения и гравитационная сила. Под действием указанных сил частицы ссыпались в емкость. После релаксации частиц порошок был уплотнен до пористости, равной пористости реального образца сырца кварцевой керамики. Полученная структура соответствует СЭМ-изображению микроструктуры реального сырца кварцевой керамики.

Константы упругости для модели сырца кварцевой керамики были получены методом молекулярной динамики. В данном методе материал представляет собой совокупность атомов, взаимодействующих друг с другом посредством межатомного потенциала. Для определения констант упругости была рассчитана структура аморфного SiO_2 . Для фазы α -кварца при комнатной температуре, был смоделирован медленный нагрев до температуры, превышающей температуру плавления. Далее структуру выдерживали при заданной температуре до состояния расплава и затем резко охлаждали до комнатной температуры. Исходная структура α -кварца и полученная из неё структура аморфного SiO_2 показаны на рисунке 1.

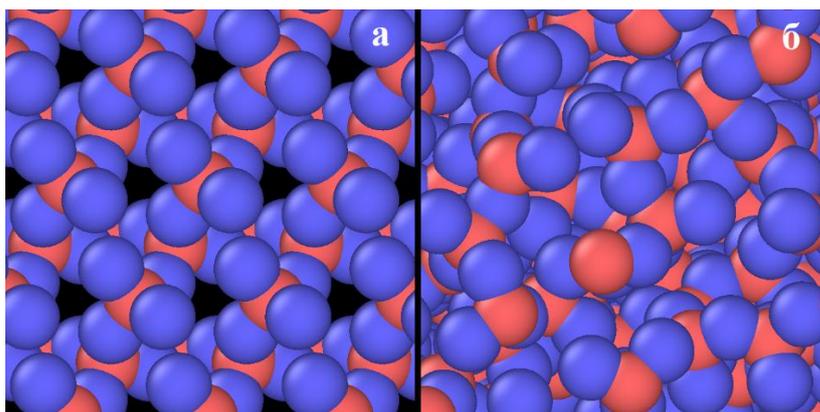


Рис. 1. Структура α -кварца (а) и аморфного SiO_2 (б)

Для получения упругих констант E , G , ν к модели аморфного SiO_2 были применены различного рода внешние воздействия и рассчитаны возникающие при этом напряжения. Полученные результаты соответствуют литературным данным.

Модель сырца также была использована для начального этапа построения модели спекания кварцевой керамики. Модель спекания основана на механизме вязкого течения, согласно которому частицы порошка аморфного SiO_2 , составляющего сырец, притягиваются

под действием сил поверхностного натяжения и отталкиваются за счет вязкости. При этом они соединяются друг с другом, с образованием перешейка между ними. В описанном методе требуется уточнение динамических параметров модели спекания по экспериментальным данным. Данные параметры определялись таким образом, чтобы усадка модели, подвергнутой термообработке, совпала с экспериментально определенной усадкой. Для этого были проведены эксперименты по определению усадки сырцов кварцевой керамики при различных скоростях нагрева в дилатометре. Полученные температурные зависимости приведены на рисунке 2.

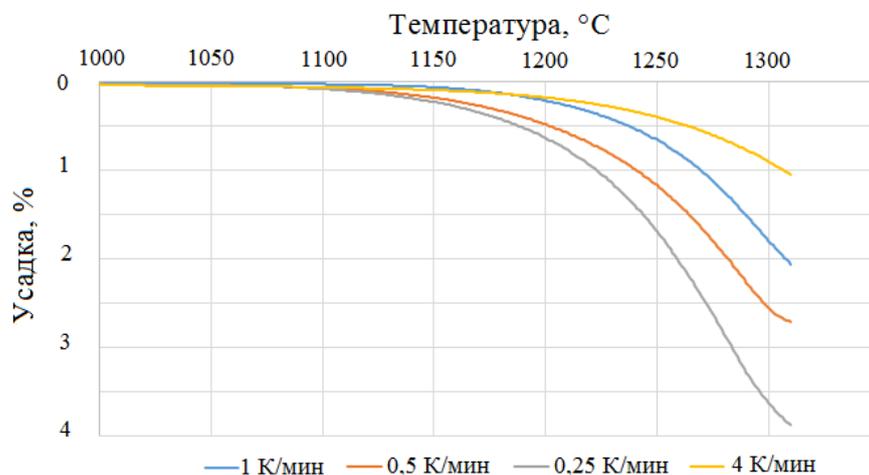


Рис. 2. Зависимость усадки образцов сырца кварцевой керамики от температуры при различных скоростях нагрева

После этого была проведена верификация модели спекания. С помощью уточненной модели были вычислены значения усадки для других режимов термообработки. Визуализация модели до (сырец) и после обжига (спеченная керамика) представлена на рисунке 3.

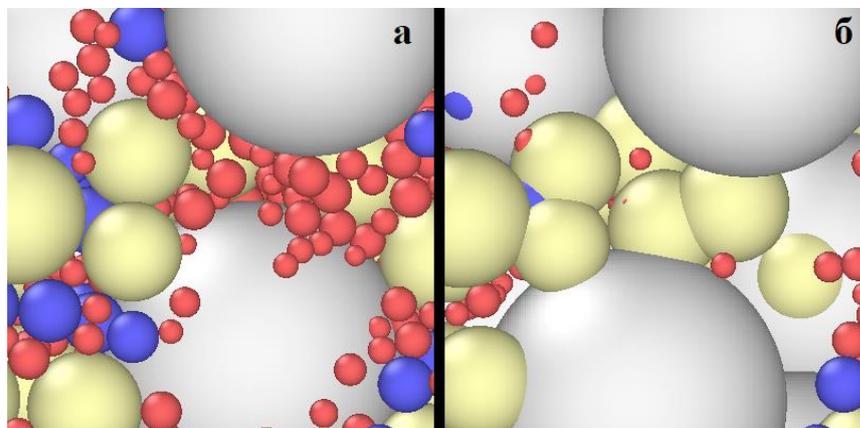


Рис. 3. Модель сырца (а) и спеченной керамики (б)

Таким образом, нами была построена модель сырца кварцевой керамики, позволяющая воспроизвести реальную структуру сырца на основе данных о гранулометрическом составе реального шликера. Для разработки и верификации модели были проведены эксперименты по определению гранулометрического состава шликера, пористости и микроструктуры сырца, а также усадки образцов кварцевой керамики. Полученные результаты будут использованы для построения модели, которая будет воспроизводить структуру кварцевой керамики в зависимости от гранулометрического состава и режима обжига сырца, а также будет отображать отклик керамического образца на различные тепловые и механические воздействия.

Исследования по созданию «умных» нагревательных панелей для наземных испытаний керамических обтекателей

В.С. Райлян, А.В. Терехин

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г.Обнинск, Россия

E-mail: terekhinav@technologiya.ru

Система уравнений, описывающая процесс теплообмена в системе: «отражательный экран – инфракрасный излучатель (ИКИ) – керамическое изделие» имеет вид:

$$q_0 = A_1 \cdot \left(\frac{q}{2} + q_2 + q_6 \right) - q_1 - q_5 \quad (1)$$

$$q_1 = C \cdot \varepsilon_1 \cdot \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \quad (2)$$

$$q_2 = C \cdot \varepsilon_2 \cdot \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \quad (3)$$

$$q_5 = (1 - \varepsilon_1) \cdot \left(\frac{q}{2} + q_2 + q_6 \right) \quad (4)$$

$$q_6 = (1 - \varepsilon_2) \cdot \left(\frac{q}{2} + q_1 + q_5 \right) \quad (5)$$

$$q_3 = A_2 \cdot \left(\frac{q}{2} + q_1 + q_5 \right) - q_2 - q_6 \quad (6)$$

$$q_4 = \frac{q}{2} + q_1 + q_5 \quad (7)$$

$$q = K_1 \cdot P \quad (8),$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности; P – электрическая мощность, рассеиваемая ИКИ; q_0 – плотность теплового потока поглощаемого керамическим изделием; q_1 – плотность теплового потока излучаемого наружной поверхностью изделия; q_2 – плотность теплового потока излучаемого отражательным экраном; q_3 – плотность теплового потока поглощаемого отражательным экраном; q_4 – плотность теплового потока, проходящего через прозрачное окно; q_5 – плотность теплового потока, отражаемого от наружной поверхностью изделия; q_6 – плотность теплового потока, отражаемого от наружной поверхностью экрана; T_1 – температура наружной поверхности керамического изделия; T_2 – температура внутренней поверхности отражательного экрана; A_1 – коэффициент поглощения наружной поверхности керамического изделия; A_2 – коэффициент поглощения внутренней поверхности отражательного экрана; ε_1 – степень черноты наружной поверхности керамического изделия; ε_2 – степень черноты внутренней поверхности отражательного экрана; q – полный тепловой поток от инфракрасных излучателей.

Для того, чтобы применить термин «умная нагревательная панель» необходимо придать ей способность контролировать свое температурное состояние или оценить уровень теплового воздействия, направленного на нее. Уровень современной техники позволяет реализовать такую способность.

В данной работе исследована возможность создания «умных» нагревательных панелей установок радиационного нагрева, обладающих способностью оценки уровня теплового воздействия на них в процессе тепловых испытаний керамических изделий и «обучения».

Если представить систему: «отражательный экран – ИКИ – керамическое изделие» как единое целое, то любая составляющая теплового потока и температуры (см. систему уравнений (1) – (8) может быть использована для оценки теплообмена в целом в процессе тепловых испытаний. Это можно осуществить только с составляющими, которые можно регистрировать в процессе нагрева.

Анализ возможности регистрации составляющих теплового потока $q_0 - q_6$ показывает, что, на практике можно регистрировать только составляющую теплового потока q_4 . Измерить составляющую q_4 можно с охлаждаемыми датчиками теплового потока (ОДТП) по схеме Гордона. Кроме того, схема регистрации составляющей теплового потока q_4 предполагает установку ОДТП в отражательных экранах нагревательных панелей.

В процессе исследования выяснилось, что в России не организовано массовое производство ОДТП, измеряющих плотность в диапазоне 0-2,5 мВт/м². Такой датчик разработан и зарегистрирован в реестре средств измерения России, но производство не организовано. Это охлаждаемый датчик теплового потока ДРТП-15. Датчик применяется в основном для проведения экспериментальных исследований. Импортные датчики теплового потока для таких диапазонов дороги (150000-500000 руб.), но из-за санкций их невозможно приобрести.

В данной работе приведены результаты исследований технологии создания ОДТП ТЕХ-1 с ограниченным применением сварки и пайки. ОДТП ТЕХ-1 разработан для монтажа в нагревательных панелях, действующих установок радиационного нагрева.

После монтажа ОДТП ТЕХ-1 в нагревательных панелях проводится «обучение умных панелей». При обучении необходимо выполнить действия в следующей последовательности:

- подготовить теплофизический макет конкретного керамического изделия;
- подготовить режим нагрева по температуре на теплофизическом макете;
- повторить режимы нагрева N-ое количество раз с синхронной регистрацией составляющей теплового потока q_4 ;
- вычислить среднее значение составляющей теплового потока q_4 по N включениям;
- подготовить режим нагрева по среднему значению составляющей теплового потока q_4 ;
- повторить режим по составляющей q_4 N-ое количество раз с синхронной регистрацией температуры теплофизического макета;
- вычислить погрешность задания температуры на теплофизическом макете при задании режима нагрева по плотности теплового потока;
- сравнить погрешность задания температуры на теплофизическом макете с действующей методикой тепловых испытаний данного типа керамического изделия, если погрешность меньше заданной в методике, то «обучение» закончить;
- если погрешность больше заданной в методике, то устранить причину и повторить «обучение».

Предложенный алгоритм экспериментально отработан на керамических образцах. Погрешность задания температуры при задании режима нагрева по плотности теплового потока не превысила 7%.

Разработка методики и лабораторного комплекса для определения коэффициента газопроницаемости керамических материалов

А.В. Терехин, Д.В. Алексеев, С.В. Маслов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Развитие новых областей техники требует создания материалов с высокими эксплуатационными параметрами, способных работать в условиях атмосферной влаги, морской воды, тумана, аэродромной пыли, дождя, а также воздействия экстремальных тепловых нагрузок. Для перспективных управляемых летательных аппаратов (ЛА) классов поверхность-воздух, воздух-воздух, воздух-поверхность, выполненных из конструкционной керамики, крайне важно поддерживать необходимое давление во внутреннем объеме отсека, что может быть достижимо только герметичностью конструкции на протяжении всего времени эксплуатации. Для определения и прогнозирования требуемого уровня изменения давления необходимо точно представлять способность материалов пропускать (фильтровать) газ. Для анализа течения газа через пористые материалы в настоящее время широкое распространение получил масс-спектрометрический метод, а для определения коэффициента газопроницаемости применяется метод стационарной фильтрации. Отсутствие возможности прогнозировать герметичность конструкции радиопрозрачного обтекателя (РПО) на этапе проектирования приводит к возникновению риска потери работоспособности ЛА в процессе эксплуатации.

Прогнозирование таких свойств пористых сред, как абсолютная газопроницаемость, является непростой задачей, имеющей фундаментальное и практическое значение, следовательно, необходима разработка индивидуальных способов оценки абсолютной газопроницаемости через пористые материалы.

На рисунке 1 приведена структурная схема методики определения коэффициента газопроницаемости k_f и коэффициента абсолютной газопроницаемости $k_{абс}$.

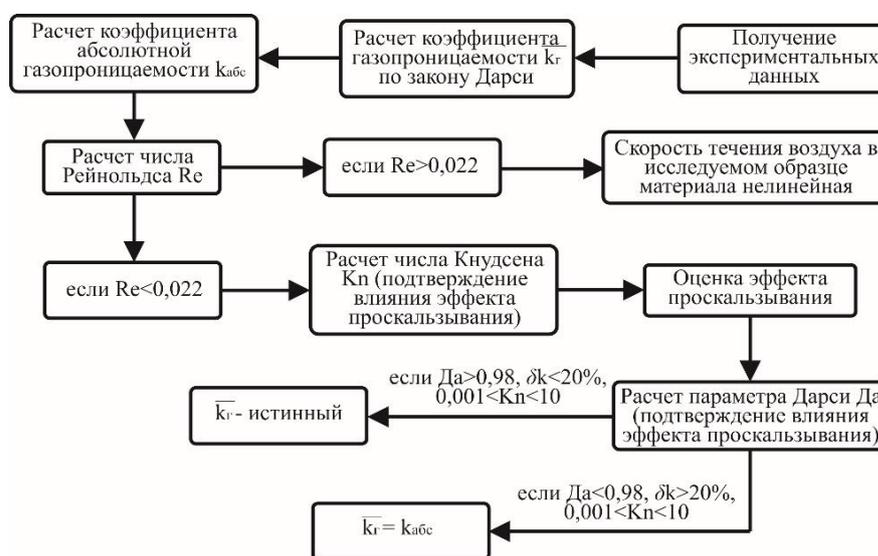


Рис. 1. Структурная схема методики

Разработанная методика позволяет определять коэффициент газопроницаемости k_f и коэффициент абсолютной газопроницаемости $k_{абс}$ в диапазоне от $1,0 \times 10^{-20} \text{ м}^2$ до $1,0 \times 10^{-8} \text{ м}^2$ при линейном законе фильтрации воздуха. Методы определения газопроницаемости через пористые материалы очень разнообразны, поскольку они чаще всего являются результатом методов измерения, адаптированных к конкретным условиям процесса. Одним из основных

является экспериментальное соотношение, называемое линейным законом Дарси:

$$k_r = \frac{Q\mu h}{\Delta p S}, \quad (1)$$

где Q – расход воздуха, проходящего через образец исследуемого материала, м³/с;
 μ – динамическая вязкость воздуха при комнатной температуре, Па×с;
 h – толщина образца, м;
 Δp – градиент давлений по стенке образца исследуемого материала, Па;
 S – площадь поперечного сечения поверхности образца, м².

Абсолютная и рассчитанная по закону Дарси газопроницаемости связаны между собой в соответствии с формулой (2), учитывающей эффект проскальзывания газа (эффект Клинкенберга):

$$k_{абс} = k_r \cdot \left(1 + \frac{b}{\bar{p}}\right), \quad (2)$$

где b – коэффициент Клинкенберга, Па;
 \bar{p} – среднепоровое давление равно $(\Delta p)/2$, Па.

Абсолютная газопроницаемость $k_{абс}$ изменяется в широком диапазоне от 10^{-12} до менее 10^{-23} м² для различных типов пористых материалов. Газопроницаемость k_r , рассчитанная по закону Дарси, может быть больше в 2-10 раз, чем $k_{абс}$, и данную разницу необходимо учитывать при прогнозировании герметичности РПО.

Для реализации разработанной методики разработан лабораторный масс-спектрометрический комплекс, в состав которого входят расходомеры типа АТОВАС серии АРС500 с минимальным порогом измерения расхода газа 0,1 см³/мин, что позволяет, используя формулу (1) рассчитывать коэффициент газопроницаемости k_r различных керамических материалов в диапазоне чувствительности от $1,0 \times 10^{-20}$ м² до $1,0 \times 10^{-8}$ м².

По результатам апробации разработанной методики определены коэффициенты газопроницаемости k_r и коэффициенты абсолютной газопроницаемости $k_{абс}$ образцов, выполненных из кварцевой керамики НИАСИТ (без пропитки), кварцевой керамики НИАСИТ (с объемной пропиткой МФСС) и стеклокерамики ОТМ-357-О. Результаты показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты определения параметров, характеризующих течение воздуха через образцы материала

Материал	Открытая пористость, %	Давление воздуха, Δp , кПа	Расход воздуха, Q , см ³ /мин	Коэффициент газопроницаемости, k_r , м ²	Коэффициент абсолютной газопроницаемости, $k_{абс}$, м ²
ОТМ-357-О	0,07	600	<0,10	$<1,77 \times 10^{-19}$	$<1,66 \times 10^{-19}$
НИАСИТ с пропиткой МФСС	0,03	100	0,35	$2,97 \times 10^{-18}$	$2,16 \times 10^{-18}$
НИАСИТ без пропитки	10,2	100	12	$2,04 \times 10^{-16}$	$1,79 \times 10^{-16}$

Разработанная методика позволяет определять коэффициент газопроницаемости k_r и коэффициент абсолютной газопроницаемости $k_{абс}$ керамических материалов с учетом влияния эффекта проскальзывания, а также определить параметры, характеризующие течение воздуха через керамические материалы.

Исследование источников излучения для создания установки радиационного нагрева на основе инфракрасных направленных излучателей

В.С. Райлян, В.И. Фокин, А.В. Терехин, Д.А. Тетеревенков

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Анализ тенденций изменения тактико-технических характеристик современных образцов высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) показывает непрерывный рост скорости и дальности их полета, что неизбежно приводит к повышению тепловых нагрузок на элементы конструкции ЛА из конструкционной керамики до 1800 °С и более. Долгое время использовавшиеся способы испытаний в настоящее время не обеспечивают необходимый уровень тепловых нагрузок. Особенно это касается возможности проведения тепловых испытаний в воздушной среде.

Одним из вариантов увеличения температурного диапазона нагрева является применение установок на основе направленных источников излучения, удаленных от объекта испытания. В этом случае появляется возможность для дистанционного измерения температуры объекта средствами пирометрии, наблюдения за испытуемым объектом и контроля радиотехнических характеристик.

Предварительные исследования показывают, что для создания установки, обеспечивающей нагрев образцов изделий до температур 2000 °С необходимо от 150 до 200 источников излучения, каждый из которых должен обеспечивать плотность теплового потока около 10 кВт/м². При этом источники излучения должны располагаться на расстоянии до образца не менее 2,5 м.

Целью исследований является создание направленного источника излучения, обеспечивающего необходимую плотность теплового потока на расстоянии не менее 2,5 м. Для достижения поставленной цели необходимо исследовать различные конструкции источников с применением различных видов ламп и типов рефлекторов.

Один из вариантов схемы источника направленного излучения приведен на рисунке 1.

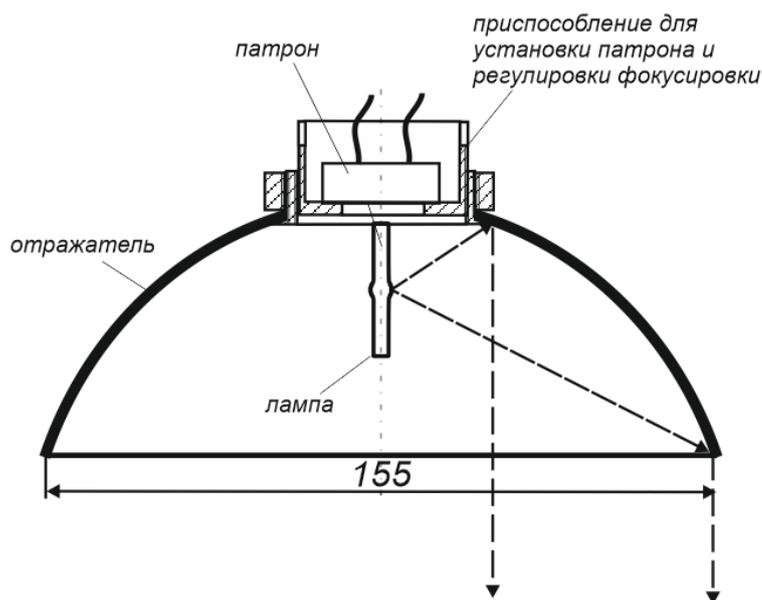


Рис. 1. Схема источника излучения

Для проведения экспериментов по определению плотности падающего теплового потока на различных расстояниях от источника была создана установка (рис.2). Установка обеспечивает контроль плотности падающего от источника теплового потока, а также позволяет изменять расстояние от источника до приемника излучения.

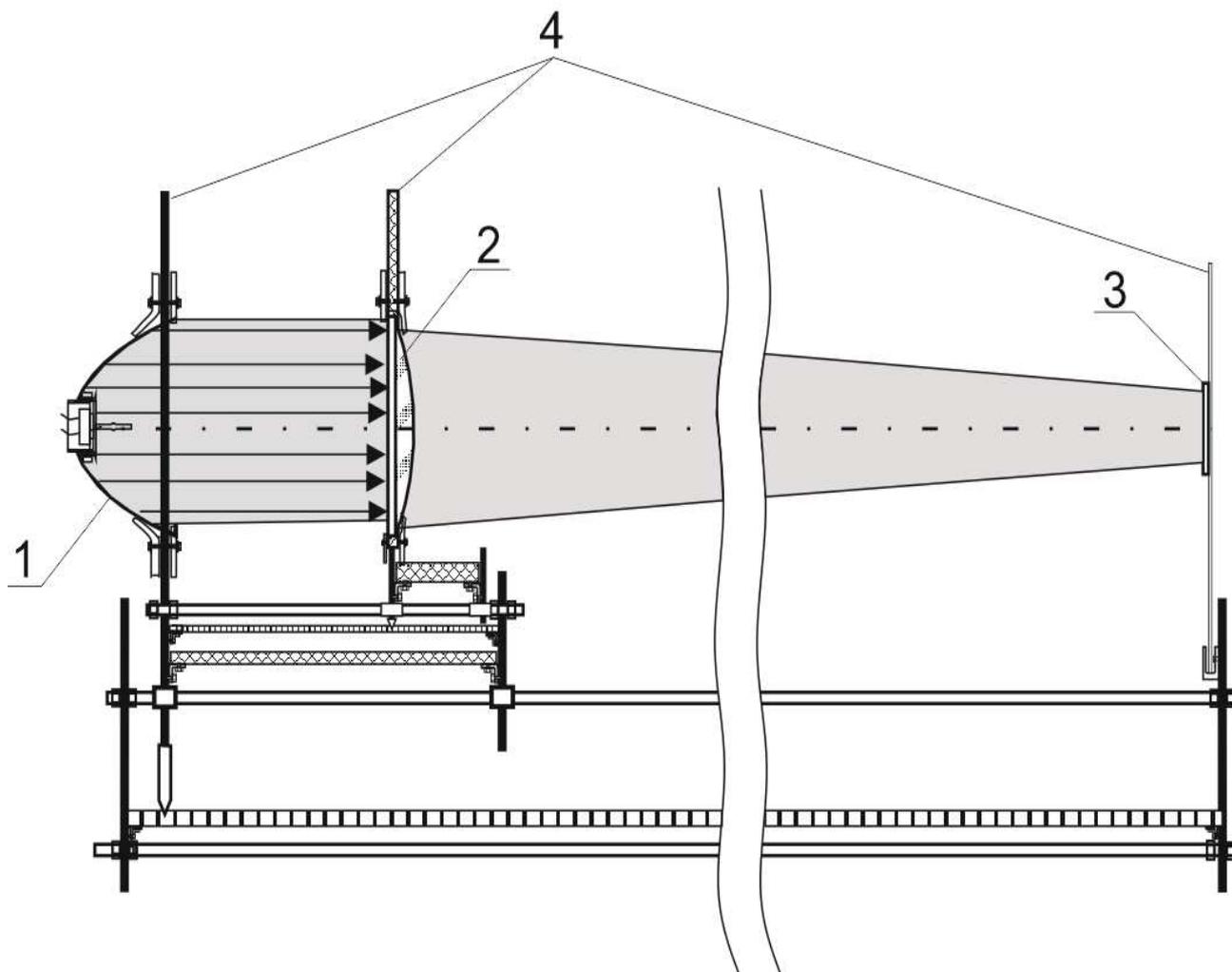


Рис.2. Установка для определения плотности падающего теплового потока от направленных источников излучения: 1 – направленный источник излучения, 2 – фокусирующая линза, 3 – калориметрический датчик теплового потока, 4 – крепежные стенки установки

Для оценки фактических параметров падающего теплового излучения был использован калориметрический датчик теплового потока (медный образец толщиной 2 мм, диаметром 150 мм с зачеканенными на тыльной поверхности термопарами). Образец с наружной стороны покрывался черной высокотемпературной краской.

Были проведены экспериментальные исследования параметров источников излучения с различными комбинациями ламп (галогенными и газоразрядными) и рефлекторов (параболическими и эллиптическими), проведен анализ результатов полученных плотностей потока (от 0,5 до 18,0 кВт/м²) от источников излучения на расстояниях от 1 до 3 м.

По результатам экспериментов выбрана оптимальная конструкция направленного источника излучения, которая может быть использована в дальнейшем для тепловых испытаний керамических материалов при температурах выше 2000 °С в воздушной среде.

Измерение теплопроводности теплоизоляционных материалов методом квазистационарного теплового режима с учетом температурной усадки

Р.А. Миронов¹, М.О. Забежайлов¹, С.В. Резник^{1,2}, П.В. Просунцов^{1,2}

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия;

E-mail: info@technologiya.ru

Способы определения теплопроводности теплоизоляционных материалов (ТМ), такие как метод горячей плиты, квазистационарного теплового режима (КТ), горячей проволоки основаны на измерении перепада температур между двумя (или более) точками в объеме образца заданной геометрии при его нагреве в условиях близких к стационарным. Геометрические параметры образца в процессе измерения при этом считаются неизменными. Так, например, метод КТ полагает неизменной толщину образца. Однако, при определении теплопроводности при температуре, близкой к предельной для данного материала, в нем может происходить изменение его геометрии под действием собственного веса за счет частичного спекания или фазовых превращений. Изменение геометрии образца является признаком непригодности материала для длительной эксплуатации, поэтому производители теплоизоляционных материалов, как правило, ограничивают предельную температуру их использования началом этих изменений. Однако, так как процесс спекания материала вследствие размягчения каких-либо его компонентов является по своей природе кинетическим, температурные границы кратковременной эксплуатации могут быть несколько шире. Поэтому актуальной задачей представляется разработка методик, которые позволяют исследовать теплопроводность теплоизоляционных материалов при температурах, превышающих точку начала необратимого изменения их геометрических характеристик. В настоящей работе предлагается усовершенствованная конструкция установки для определения теплопроводности методом КТ, позволяющая контролировать толщину образца в процессе измерения теплопроводности. Принципиальная схема установки показана на рисунке 1.

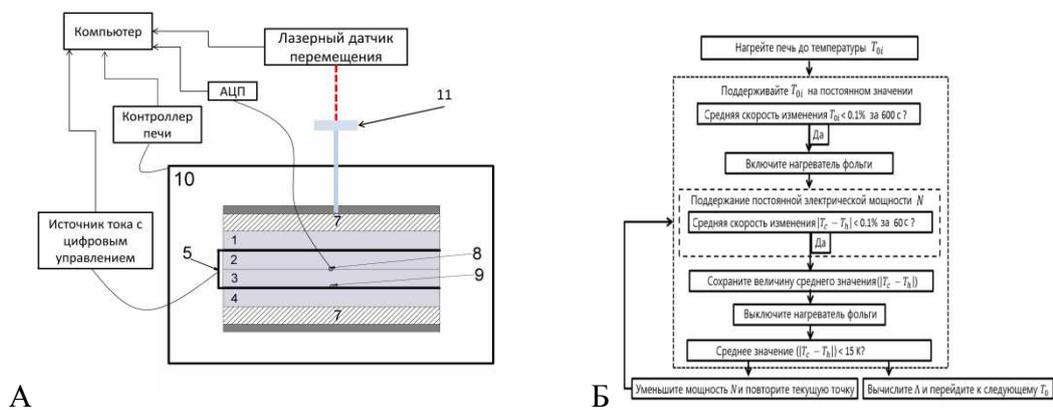


Рис. 1. А – Принципиальная схема установки определения теплопроводности методом квазистационарного теплового режима с контролем толщины образца: (1,2,3,4) – четыре пластины ТМ размером $70 \times 70 \times 10$ мм каждая, (5) – нагреватель из фольги, (7) – пластины теплоизоляции, (8,9) – термоэлектрические преобразователи, (10) – печь, (11) – керамический стержень

Б – алгоритм работы программы управления установкой

Метод КТ основан на измерении перепада температур в центре сборки (8 на рис.1) и около нагревателя (9 на рис.1) при нагреве образца источником с постоянной мощностью тепловыделения. После предварительного нагрева образца до стационарной температуры, на нагревательный элемент из фольги (5 на рис.1) подается постоянное напряжение,

потребляемая мощность нагревателя замеряется; по достижении постоянного перепада температур по толщине образца, теплопроводность материала может быть рассчитана как:

$$\lambda = \frac{hq}{2(T_h - T_c)},$$

где, h – толщина одной пластины ТМ, T_h и T_c температуры на нагревателе и в центре сборки, соответственно, q – подводимый тепловой поток, который рассчитывается из потребляемой нагревателем мощности (N) и поперечного сечения образца (A_{QS}) $q = N/4A_{QS}$. Ключевой особенностью данной работы является добавление в схему лазерного датчика перемещения, который измеряет расстояние до площадки, закрепленной на керамическом стержне, упирающемся в поверхность образца.

Для апробации было проведено измерение образца теплоизоляционного материала DRT06-Z производства ООО «ТИМ» – волокнистого материала на основе диоксида кремния с добавлением нанопористого диоксида кремния. Полученные результаты приведены на рисунке 2.

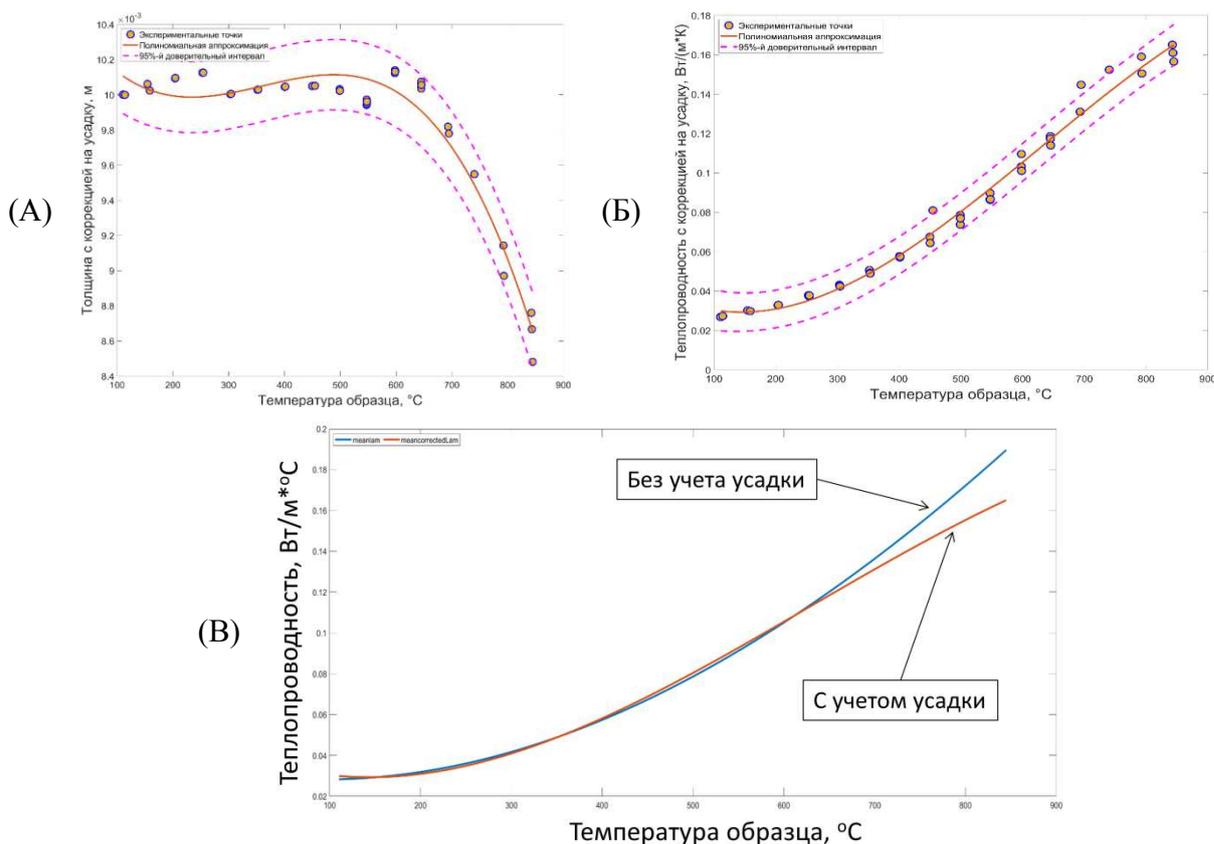


Рис. 2. Толщина образца (А) и теплопроводность с учетом усадки (Б), (В) – сравнение теплопроводности, рассчитанной по измеренным данным без учета и с учетом усадки

Материал DRT06-Z демонстрирует существенную усадку при температуре выше 650-700 °C, что согласуется с указанным производителем температурным диапазоном работы данного материала (до 650 °C). Рис.2В демонстрирует важность учета усадки образца при определении теплопроводности. Так, при температуре 800 °C, разница между значениями теплопроводности без учета усадки и с учетом достигает практически 0,02 Вт/м·°C, что составляет около 10% от значения теплопроводности при этой температуре. Приведенные результаты иллюстрируют актуальность контроля толщины образца непосредственно в процессе измерения теплопроводности.

Теплоизоляционный материал для элементов теплоизоляции тепловых источников тока

О.В. Томчани¹, И.М. Зайцев¹, Е.М. Кашкарова¹, С.В. Ворвуль¹, О.Ш. Джумбекова²

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия, ²НИИХИТ (АО), г. Саратов, Россия

E-mail: lab.em@technologiya.ru

Среди химических источников тока резервного типа тепловые источники тока (ТИТ) считаются одними из наиболее приемлемых для использования в случаях, требующих от источника тока высоких мощностных характеристик в широком диапазоне температур. Продолжительность работы ТИТ напрямую связана с обеспечением необходимого температурного диапазона электрохимического элемента, которое в большой степени определяется эффективностью применяемых в конструкции теплоизоляционных материалов (ТИМ).

Среди известных ТИМ наиболее низкой теплопроводностью в условиях окружающей среды обладают микропористые теплоизоляционные материалы на основе пирогенного диоксида кремния (менее 0,030 Вт/(м·К)). Однако, несмотря на более высокие прочностные показатели при сжатии по сравнению с волокнистыми ТИМ, изготовление тонкостенных (5-10 мм) деталей из них, которые заложены в конструкцию ТИТ, осложняется их природой, структурой, анизотропией свойств.

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» ранее были созданы микропористые ТИМ двух марок ТИМ-МП-НК ТУ 1-596-513-2013 и ТИМ-МП-К ТУ 1-596-517-2014 с теплопроводностью (0,025±0,03) Вт/(м·К), но попытки изготовления из них тонкостенных цилиндрических деталей не привели к положительному результату. Поэтому была поставлена задача создания нового материала с сохранением при этом сверхнизкой теплопроводности, которая была решена путем введения дополнительно в состав материала фенолоформальдегидной смолы и внесения изменений в технологию подготовки формовочной смеси к прессованию. Выбор плотности материала определялся балансом между прочностными и теплоизоляционными свойствами, последние с увеличением плотности ухудшаются. Средняя прочность при сжатии при 10%-й деформации разработанного материала ТИМ-МП-К6 ТУ 1-596-573-2021 составляет 1,7 МПа при плотности 350-375 кг/м³. Температурная зависимость теплопроводности представлена на рисунке 1 в сравнении с теплопроводностью волокнистых теплоизоляционных материалов ТЗМК-10М и ТЗМ-23М.

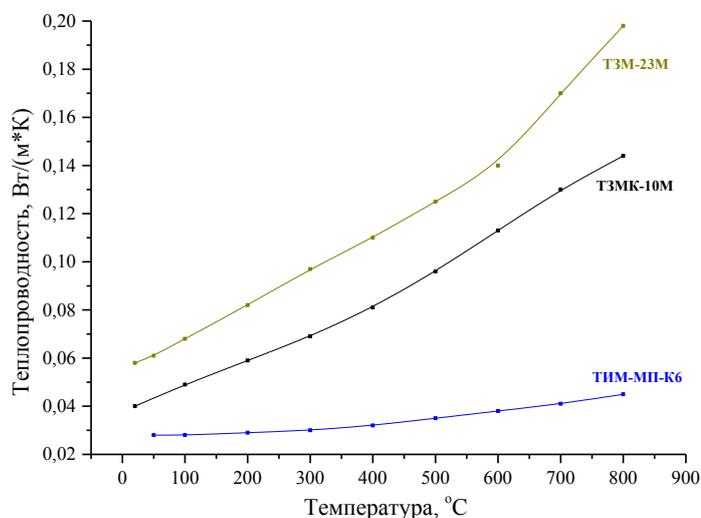


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности теплоизоляционного материала ТИМ-МП-К6

Из разработанного материала были изготовлены элементы теплоизоляции (рис. 2а), макетные образцы ТИТ (рис. 2б) и проведены испытания, которые подтвердили преимущество микропористого теплоизоляционного материала перед волокнистым ТЗМ-23М, используемым в настоящее время в аналогичной конструкции. Время разряда до конечного напряжения после воздействия пониженной температуры среды (минус 50 °С) увеличилось на 14,6%, температура на поверхности корпуса ТИТ после воздействия повышенной температуры среды (плюс 60 °С) снизилась на 27% (рис. 3). Таким образом, испытания макетных образцов тепловых источников тока показали эффективность и целесообразность применения теплоизоляционного микропористого материала ТИМ-МП-К6 в качестве изоляции в тепловых источниках тока.



Рис. 2. Элементы теплоизоляции и макет теплового источника тока

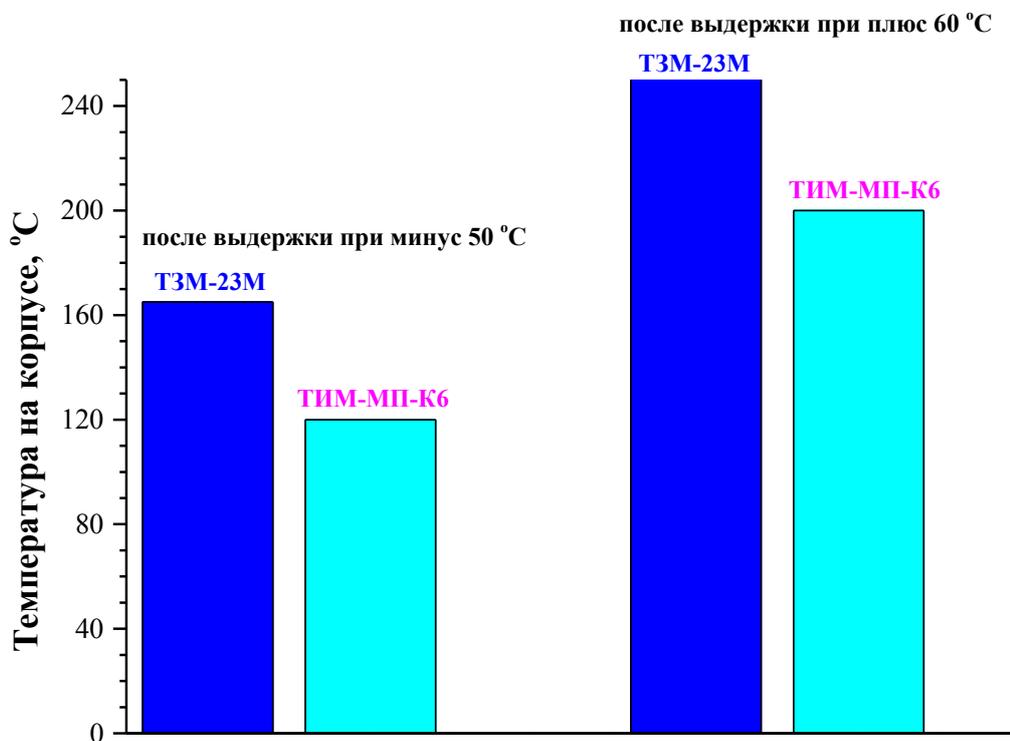


Рис. 3. Максимальная температура на корпусе ТИТ после выдержки в течение 1,5 ч после его разряда

Изготовление высокотемпературных фильтрующих элементов на основе алюмосиликатных волокон с применением разных методов сушки

Б.Л. Красный¹, К.И. Иконников¹, А.С. Сизова¹, А.Л. Галганова¹, О.И. Родимов¹,
Д.Д. Бернт^{1,2}, А.М. Поскотинова^{1,3}

¹ООО «НТЦ «Бакор», г. Щербинка, г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия;

³РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

E-mail: sizova@ntcbakor.ru

Температуры газов, отходящих от промышленных тепловых агрегатов, могут достигать 1000 °С. Для снижения энергозатрат при очистке горячих газов используют фильтрационные установки, содержащие в качестве фильтрующих элементов (ФЭ) керамические фильтры на основе алюмосиликатных волокон. Для обеспечения возможности фильтрации высокотемпературного газа элемент должен характеризоваться одновременно высокими показателями термостойкости, проницаемости и механической прочности. Метод сушки, используемый при изготовлении такого фильтра, существенно влияет на его свойства.

В работе изучено влияние методов сушки на распределение связующего, как правило, кремнезоля, по толщине стенки фильтрующего элемента. Для этого подготовлена серия образцов с применением различных методов сушки: конвективной, микроволновой и метода, включающего заморозку заготовок, пропитанных кремнезолью, с последующей конвективной сушкой. Исследованы особенности микроструктуры образцов пористой керамики, полученной разными методами сушки. Визуально определено наличие непроницаемой корки кремнезема на внешней поверхности образцов при проявлении миграции связующего. Также проведены работы по определению наличия или отсутствия связующего во внутренних слоях образцов. Проведена оценка предела прочности при разрыве галтелей, вырезанных из стенок исследуемой керамики, а также аэродинамического сопротивления как характеристики проницаемости образцов.

Заготовки волокнистых фильтрующих элементов изготавливали методом вакуумного формования из суспензии, содержащей смесь волокон и катионного крахмала. Сформованные и высушенные заготовки механически обрабатывали для придания изделию требуемых геометрических характеристик. Обточенный полуфабрикат пропитывали кремнезолью и высушивали с применением одного из исследуемых методов. Для определения проявления миграции связующего на внешнюю поверхность перешейка наносили насечку с целью разрушения образовавшейся корки кремнезема. Свойства образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства ФЭ, полученных с применением разных методов сушки

Способ сушки ФЭ	Предел прочности на разрыв без нарушения внешнего слоя стенки, МПа	Предел прочности на разрыв с нарушением внешнего слоя стенки, МПа	Аэродинамическое сопротивление ФЭ, Па
Конвективная сушка	0,35±0,03	0,10±0,03	770±50
Микроволновая сушка	0,46±0,10	0,44±0,10	410±60
Заморозка с последующей конвективной сушкой	0,57±0,10	0,53±0,10	490±60

При конвективной сушке мицеллы кремнезоля вместе с водой диффундируют к нагреваемой поверхности образцов, таким образом, формируется структура материала, в которой внешний слой представлен кремнезолью, армированной волокнами, в то время как волокна внутреннего слоя не скреплены связующим (рис. 1). Этим объясняются низкие значения прочности при разрыве и высокое аэродинамическое сопротивление (т.е. низкая проницаемость).

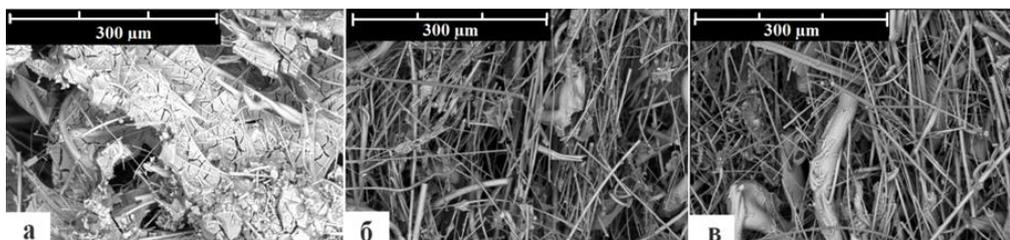


Рис. 1. Микроструктура слоев образца ФЭ, изготовленного с применением конвективной сушки при 110 °С: а – внешнего слоя; б – среднего слоя; в – внутреннего слоя

В процессе микроволновой сушки нагревание происходит по всему объему изделия. Влага резко вскипает и испаряется, при этом скорость диффузии частиц кремнезема не достаточна, чтобы связующее переместилось к внешней поверхности образцов вместе с влагой. Процесс происходит быстро и частицы кремнезема не флокулируют с образованием крупных агрегатов. Во внешнем слое образцов не наблюдается непроницаемой корки связующего, а микроструктура схожа с микроструктурой среднего и внутреннего слоев (рис. 2). Агрегированные частицы кремнезема располагаются на поверхности волокон и в местах их переплетения. Образцы характеризуются прочностью при разрыве $0,46 \pm 0,10$ МПа, и аэродинамическим сопротивлением 410 ± 60 Па. При нанесении насечки на внешнюю поверхность фильтрующего элемента прочность при разрыве образцов снижается на 8,4–10,4%, что свидетельствует о том, что миграция не устраняется полностью.

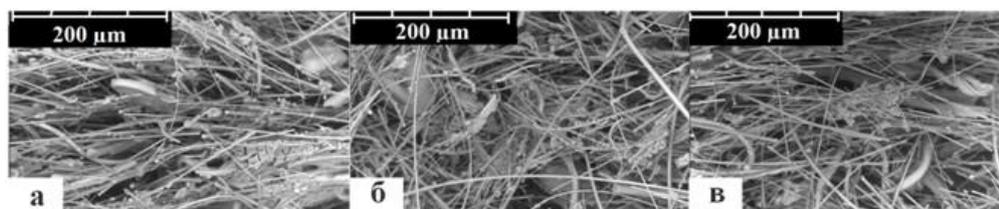


Рис. 2. Микроструктура слоев образцов ФЭ, изготовленных с применением микроволновой сушки: а – внешнего слоя; б – среднего слоя; в – внутреннего слоя

Применение заморозки образцов обусловлено способностью кремнезольей необратимо коагулировать при воздействии отрицательных температур. Во время заморозки кристаллы воды отталкивают частицы золя от фронта замерзания в незамерзшую область (в сторону волокна), где увеличивается концентрация золя и электролита. Это приводит к сжатию двойного электрического слоя и понижению энергетического барьера, что способствует началу коагуляции, сопровождающейся образованием прочных силоксановых связей. В процессе сушки вода, образовавшаяся в процессе таяния льда, перемещается к нагреваемой поверхности ФЭ, захватывая с собой свободно диффундированные частицы кремнезема, не сдвинутые к волокну фронтом замерзания. Агрегированные на волокне частицы кремнезема достаточно крупные и не перемещаются к внешней поверхности образцов с удаляемой влагой. В результате формируется структура, в которой кремнезем распределен по толщине стенки ФЭ (рис. 3).

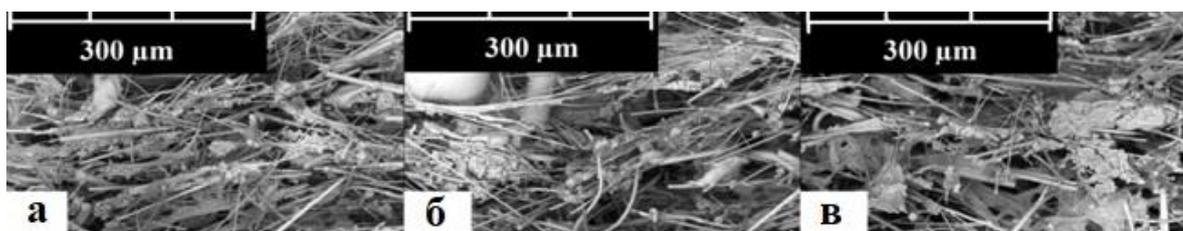


Рис. 3. Микроструктура слоев образцов ФЭ, изготовленных с применением заморозки при -40 °С с последующей конвективной сушкой: а – внешнего слоя; б – среднего слоя; в – внутреннего слоя

Ферриты для СВЧ с высокой диэлектрической проницаемостью

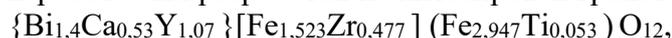
А.Г. Налогин, А.А. Алексеев, П.Г. Петров, А.В. Цыберт, Е.С. Ермакова, В.Р. Чернышев
АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Россия
E-mail: agnalogin@istokmw.ru

В последнее время возрос интерес к новым ферритовым материалам в связи разработкой и производством СВЧ-модулей активных фазированных антенных решеток радиолокационных станций (АФАР РЛС) в сантиметровом диапазоне частот, где в выходных каскадах нашли применение микрополосковые ферритовые развязывающие приборы (ФРП) дорезонансного типа (вентили и циркуляторы). Формирование фазированной решетки из массива модулей вводит ограничения на геометрию ферритовых приборов.

В настоящей работе приводятся результаты исследований свойств поликристаллических ферритов (различных систем) со структурой граната, предназначенных для работы в СВЧ ферритовых развязывающих приборах. Анализ существующих марок ферритовых материалов показал необходимость разработки материалов, обладающих более высокой диэлектрической постоянной $\epsilon > 15$ и малыми диэлектрическими потерями. Ионы кислорода в структуре граната находятся в позициях, которые допускают смещение (x, y, z) без искажения общей структуры кристалла, что способствует получению материалов с различной диэлектрической проницаемостью. Однако, что касается катионов, входящих в кристаллическую решетку граната, данная структура обладает большой избирательностью, и то, может ли данный ион входить в структуру граната, зависит от свойств и размеров остальных ионов.

Изменение свойств было осуществлено замещением ионов Y^{+3} в додекаэдрической подрешетке ионами Bi^{+3} , обладающих высокой поляризуемостью, таким образом, чтобы полученный материал увеличивал желаемые диэлектрические свойства для применения в СВЧ-устройствах, а именно: обладал большими значениями диэлектрической постоянной и малыми потерями на СВЧ. Висмутсодержащие диэлектрики используются в СВЧ-технике как материалы, обладающие диэлектрической постоянной 100 или более. Bi образует много соединений преимущественно со степенью окисления +3. Эффект приписан одиночной паре электронов в трехвалентном ионе Bi^{+3} , которые дают иону значительно большую поляризацию (молекулярный дипольный момент) в оксидных соединениях (электронная формула $6s^2 6p^3$). Внешняя электронная оболочка иона Bi^{+3} представляет собой $6s^2$ конфигурацию, изолированная «одиночная» электронная пара способствует к поляризации в оксидной паре ионов $Bi^{+3}-O^{2-}$ и, следовательно, к изменению показателя преломления, т.е. изменению диэлектрической постоянной в этих соединениях. Катионное распределение ферритов-гранатов в большой степени зависит от размеров катионов. Самые «крупные» катионы склонны занимать додекаэдрические, «средние» – октаэдрические, а «малые» – тетраэдрические пустоты. Ионы Bi^{3+} (0,117 нм) или Ca^{2+} (0,099 нм) обладают большим предпочтением к додекаэдрическим позициям.

В работе был разработан и синтезирован гранат состава:



где в фигурные скобки заключены ионы, занимающие *c*-положения; в квадратные – занимающие *a*-положения; в круглые – занимающие *d*-положения. Материал изготовлен по стандартной керамической технологии, включающей смешивание исходных компонентов, изготовление шихты, прессование заготовок и спекание в силитовых печах на воздухе при температуре $T_{сп}=1000$ °С. Из спеченных заготовок изготавливались пластины.

Намагниченность насыщения, измеренная на кольцах Гельмольца микровеберметром Ф199 на пластинах $48 \times 30 \times 0,7$ мм составила 142,5 кА/м в соответствии с рекомендациями стандарта ИЕС 60404-14.

Измерение эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_3 и тангенса суммарных потерь производилось при частоте 100 ГГц на стенде «Стенд для измерения эффективной относительной диэлектрической проницаемости и тангенса суммарных потерь плоскопараллельных заготовок магнитодиэлектриков в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц» по разработанной нами методике (Свидетельство об аттестации методики измерений №585-RA/RU/311243-2018). Значения параметров равны: $\epsilon_3=26,3$, $\Sigma(\text{tg}\delta+\text{tg}\mu)=0,0025$.

На основе измеренных электромагнитных параметров феррогранатов были проведены расчеты микрополоскового Y-циркулятора X-диапазона. Согласно расчетам, увеличение диэлектрической постоянной в 1,8 раз приведет к уменьшению габаритов прибора на 25%. Были изготовлены макеты Y-циркуляторов на подложках из материалов ФГ-140 ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) и ФГЕ-140 ($\text{Bi}_{1,4}\text{Ca}_{0,53}\text{Y}_{1,07}\text{Fe}_{4,45}\text{Zr}_{0,477}\text{Ti}_{0,053}\text{O}_{11,97}$). Конструкция макетов представляет собой ферритовую плату толщиной 0,7 мм с наклеенной на нее магнитной системой, состоящей из 2 магнитов диаметром 5 мм для макета ФГ-140 и диаметром 3,9 мм для макета из материала ФГЕ-140 (рис. 1). S-параметры макета Y-циркулятора на ферритовой плате из материала ФГЕ-140 приведены на рисунке 1.

Как видно из полученных S-параметров макетов циркуляторов электрические параметры (табл. 1) макетов из ФГЕ-140 аналогичны электрическим параметрам макета на ФГ-140, а габаритные размеры снижены на 25%.

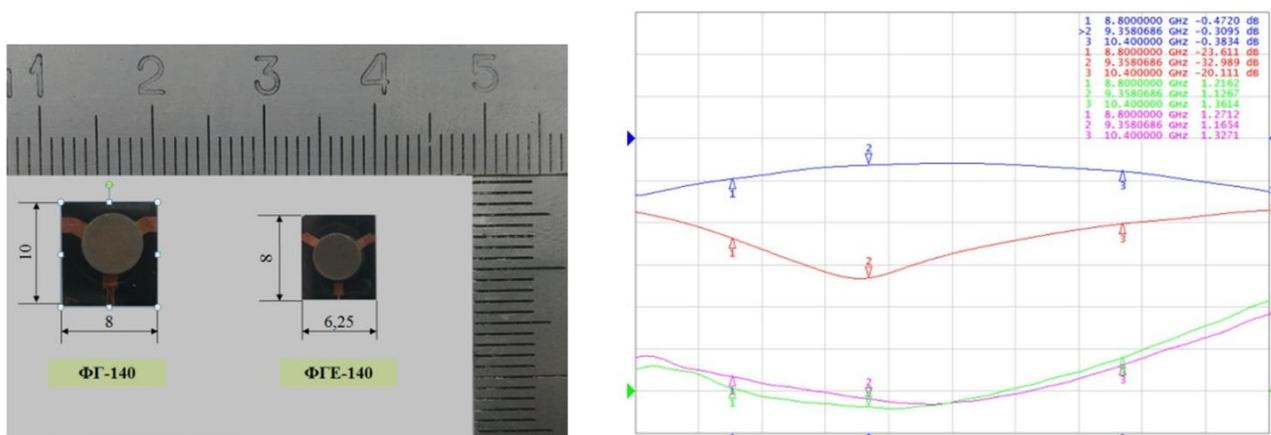


Рис. 1. Внешний вид макетов Y-циркуляторов и S-параметры макета Y-циркулятора на ферритовой плате материала ФГЕ-140

Таблица 1. Сравнительная характеристика макетов Y-циркуляторов X-диапазона

Марка феррита	Вид прибора	Рабочий диапазон частот, Δf , ГГц	Прямые потери $\alpha_{пр}$, дБ	Обратные потери $\alpha_{обр}$, дБ	Габаритные размеры, мм
ФГ-140	Y-циркулятор	8,5÷10,2	не более 0,5	не менее 20	8×10×5
ФГЕ-140		8,8÷10,4	не более 0,5	не менее 20	6,25×8×5,8

Феррогранаты, имеющие высокие значения диэлектрической проницаемости и намагниченности насыщения, особенно полезны для миниатюризации ферритовых микрополосковых приборов (вентилей и циркуляторов), функционирующих в частотном диапазоне (1-18 ГГц).

Оценка трещиностойкости и износостойкости композитов ZrC–C / h-BN

Ю.А. Мировой¹, Н.Д. Кулагин², С.П. Буякова¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН), г. Томск, Россия; ²НИ ТПУ, г. Томск, Россия

E-mail: y.a.mirovoy@ispms.ru

Сверхвысокотемпературные материалы на основе карбидов, нитридов, боридов металлов IV-V групп периодической системы благодаря сочетанию высокой температуры плавления, высокого модуля упругости, твердости и абляционной устойчивости нашли широкое применение в различных отраслях промышленности: космической, энергетической, обрабатывающей и др. Карбид циркония ZrC обладает температурой плавления около 3400 °С, модулем упругости 412 ГПа и твердостью 24 ГПа. Основными методами консолидации керамики на основе ZrC являются горячее прессование и искровое плазменное спекание. Основным недостатком ZrC, как и других керамических материалов, является повышенная хрупкость. Присутствие дефектов, таких как трещины и микросколы, приводят к катастрофической потере прочностных характеристик, что не позволяет вести дальнейшую эксплуатацию изделий. Решением данной проблемы может стать создание гетеромодульных композитов на основе керамической матрицы и низко модульных включений. В работах А.Ю. Попова и И.Л. Шебалина подробно изложены механизмы, препятствующие распространению трещин в керамике на примере карбида титана. Углеродные включения обеспечивают увеличение трещиностойкости путем блокировки трещин на границе раздела «углерод – карбидная матрица».

Установлено, что с увеличением объемной доли включений углерода от 0 до 3 об. % в составе композита относительная плотность материалов на основе ZrC–C увеличивается с 0,88 до 0,95. Дальнейшее увеличение содержания углерода до 15 об. % приводит к снижению относительной плотности до 0,82. Данное явление связано с заполнением порового пространства при малых концентрациях включений углерода и последующей агломерации с увеличением его содержания в составе композита. Для композитов ZrC–h-BN, большую относительную плотность $0,98 \pm 0,02$ имели образцы композита с содержанием нитрида бора 5 об. %. С увеличением объемного содержания включений частиц h-BN относительная плотность уменьшалась, что является следствием ограничения диффузии в ZrC с присутствием в керамической матрице нитрида бора. Относительная плотность образцов композиционных материалов с содержанием h-BN 10 об. % и 15 об. % составила $0,93 \pm 0,03$ и $0,94 \pm 0,03$ соответственно.

Увеличение доли включений углерода в составе композиционного материала ZrC–C до 3 об. % позволяет достичь величины трещиностойкости K_{IC} , равной $7,01 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (рис. 1), в то время как для высокоплотной керамики ZrC, полученной методом искрового плазменного спекания, коэффициент интенсивности напряжений составляет всего $3,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Значительное увеличение коэффициента интенсивности критических напряжений связано с механизмами, препятствующими распространению трещин в объеме материала, а именно диссипацией энергии упругих деформаций распространяющихся трещин на границах раздела ZrC–C и поровым пространством композитного материала. Измерения коэффициента интенсивности критических напряжений композитов ZrC–h-BN методом трехточечного изгиба балки с V-образным надрезом (SEVNB) демонстрируют повышение K_{IC} с 3,39 до $4,22 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ в диапазоне от 0 до 3 об. %. С последующим увеличением содержания гексагонального нитрида бора в композите K_{IC} снижается до $3,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ при объемной доле h-BN 15 %.

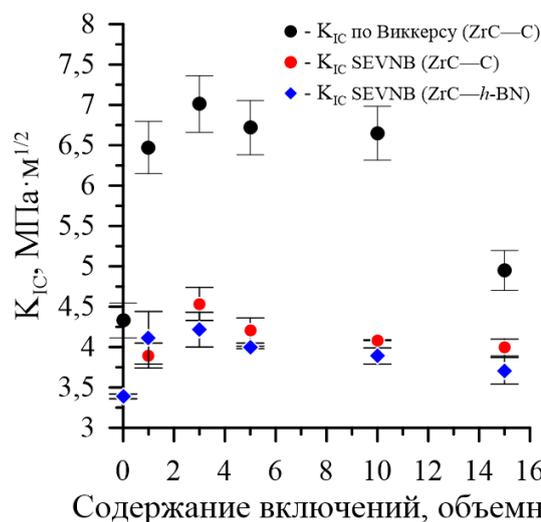


Рис. 1. Зависимость коэффициента трещиностойкости композитов от содержания включений углерода и гексагонального нитрида бора

Трибологические испытания образцов керамики ZrC и гетеромодульных керамических композитов ZrC—C и ZrC—h-BN показали, что введение в керамику ZrC включений углерода и гексагонального нитрида бора до 3 об. % существенно увеличивает износостойкость композитов (рис. 2). Коэффициент трения керамики ZrC при скоростях скольжения 0,5, 1 и 2 м/с составил $0,500 \pm 0,025$, $0,420 \pm 0,021$ и $0,400 \pm 0,020$ соответственно. Добавление включений углерода и гексагонального нитрида бора в количестве 3 об. % привело к снижению коэффициента трения для всего диапазона скоростей скольжения гетеромодульных композитов ZrC—C 3 об. % и ZrC—h-BN 3 об. %.

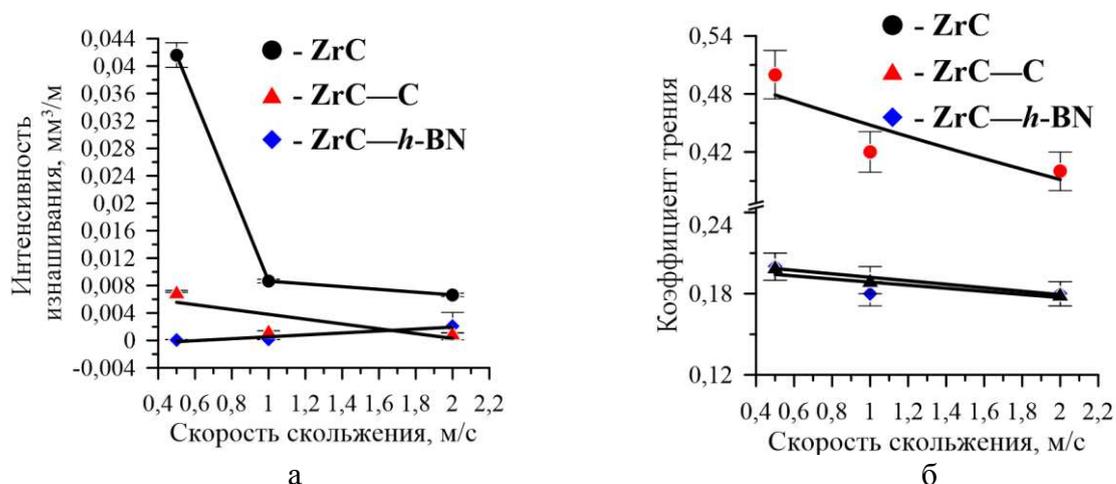


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания (а) и коэффициента трения (б) от скорости скольжения образцов керамики ZrC и гетеромодульных керамических композитов

В работе показано, что включения углерода и гексагонального нитрида бора, выполняющие роль смазки, привели к эффекту «безызносности» для гетеромодульных материалов ZrC—C 3 об. %, ZrC—h-BN 3 об. % в диапазоне скоростей скольжения 0,5-2,0 м/с.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0009.

Карбид бора как сырье для изготовления керамических материалов для баллистической защиты

Ю.Я. Ласыченков, А.С. Нечепуренко, О.Ф. Гарипов, М.В. Ротермель
АО «УНИХИМ с ОЗ», г. Екатеринбург, Россия
E-mail: Rotermel@unichim.ru

Главной задачей современных разработок в области средств индивидуальной бронезащиты (бронезилетов, противопульных щитов, защитных костюмов, экзоскелетов и т.д.) является создание материалов и конструкторско-технологических решений, позволяющих снизить вес брони при обеспечении высоких баллистических характеристик. Основными керамическими материалами, используемыми для создания броневых изделий, являются оксид алюминия, карбид кремния и карбид бора. Как материал брони керамика из Al_2O_3 обладает стойкостью к окислению, химической инертностью, низкой стоимостью и проста в получении. Однако низкие показатели прочности на изгиб и трещиностойкости, а также высокая плотность Al_2O_3 не могут соответствовать тенденции создания легкой и прочной брони. Ударопрочная керамика из карбида кремния, обладая высокой твердостью (уступает только алмазу, кубическому нитриду бора и карбиду бора) низкой плотностью и низкой ударной вязкостью, ограниченно подходит для отдельных приложений. Карбид бора

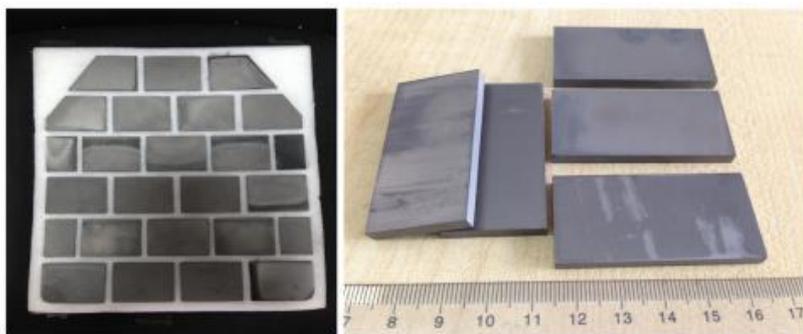


Рис. 1. Пластины из карбида бора

(рис. 1) как баллистический материал представляет собой превосходное сочетание высокой твердости, низкого веса и механических свойств. Плотность B_4C самая низкая среди обычно используемых бронекерамических материалов, а высокий модуль упругости делает его идеальным выбором для создания легкой и прочной брони.

Бронекерамику на основе карбида бора в настоящее время получают методом горячего прессования. Лидерами в её производстве являются зарубежные компании. Российская Федерация в данном направлении отстаёт от мирового уровня. Промышленное производство высококачественной горячепрессованной бронекерамики на основе B_4C в РФ отсутствует. В частности, это связано с отсутствием производства отечественного, доступного по цене сырья – порошка B_4C . За 2023 год 98% ввезённого в Россию карбида бора было произведено в КНР. Собственное производство имеет Украина (Запорожский абразивный комбинат), где в советское время было организовано производство мощностью десятки тысяч тонн в год. Ориентировочная потребность российской промышленности в карбиде бора различного гранулометрического состава и химической чистоты составляет 100-200 т/год. Ввиду незначительного объёма потребления, организация производства B_4C по классической углетермической технологии, реализованной на Украине и в КНР, невозможна по экономическим соображениям. Помимо этого, в результате углетермического процесса получается продукт, не соответствующий требованиям по чистоте, предъявляемым к материалам для изготовления бронекерамики. Углетермический B_4C содержит большое количество свободного углерода и железа. Вследствие указанных причин в АО «УНИХИМ с ОЗ» была поставлена задача разработать технологию производства высокочистого мелкодисперсного порошка B_4C со стабильными физико-химическими характеристиками производительностью до 200 т/год с целью обеспечения отечественным сырьём производства бронематериалов.

АО «Уральский научно-исследовательский химический институт с опытным заводом», г. Екатеринбург, является единственным в Российской Федерации разработчиком технологий производства и производителем бескислородных соединений бора, в частности карбида бора различных спецификаций. В АО «УНИХИМ с ОЗ» реализован углетермический способ получения карбида бора, в основе которого лежит взаимодействие (1):



Однако данный способ синтеза не позволит покрыть потребности в сырье для бронекерамических материалов при организации их производства, т.к. получаемый продукт имеет высокую стоимость, а оборудование обладает низкой производительностью. В настоящее время в АО «УНИХИМ с ОЗ» создан научно-технический задел по разработке технологии изготовления порошков B_4C марки «КБС» гранулометрического состава 5-20 мкм и менее 5 мкм, потенциально пригодных для изготовления бронекерамики, с применением самораспространяющегося высокотемпературного синтеза по реакции (2):



В результате получен ультрадисперсный материал, удовлетворяющий требованиям мировых стандартов по чистоте, из российского сырья. Так, производителем борной кислоты является Дальнегорский ГОК, магнезия – Соликамский магниевый завод, углерода технического – ОАО Туймазыхуглерод, Башкортостан. По предварительной оценке, магниитермическая технология позволит производить до 200 т B_4C в год. В октябре 2020 г были проведены успешные баллистические испытания по классу защиты Бр5 экспериментальных панелей, собранных из образцов, изготовленных из порошка B_4C высокой чистоты марки «КБС» производства АО «УНИХИМ с ОЗ» (рис. 2). Работы по



Рис. 2. Образцы бронепанелей из карбида бора после огнестрельных испытаний.

а) фронтальная сторона бронепанели, б) тыльная сторона бронепанели
керамический экран, в) бронепанель тыльная сторона

опробованию экспериментальной партии показали положительные результаты с точки зрения возможности изготовления ударопрочной керамики, обеспечивающей снижение веса на 15-20% по сравнению с существующими серийно выпускаемыми в РФ материалами. Использование карбида бора производства АО «УНИХИМ с ОЗ» в качестве сырья позволяет обеспечить выполнение современных требований к бронепластинам: плотность не более $2,7 \text{ г/см}^3$; среднее значение твердости по Виккерсу не менее 28 ГПа; модуль упругости не менее 380 ГПа; коэффициент трещиностойкости не менее $4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Разработка АО «УНИХИМ с ОЗ» технологии магниитермического получения высокочистого карбида бора варьированного гранулометрического состава и организация его производства позволит полностью удовлетворить потребности в продукте в среднесрочной перспективе, а также решить проблему импортозамещения и повысит обороноспособность Российской Федерации.

Многослойная оболочка ТВЭЛ на основе волокнисто-армированных керамоматричных композиционных материалов SiC/SiC

В.И. Румянцев¹, С.В. Агафонов¹, О.Н. Булатов¹, **М.В. Горбачева¹**, М.А. Юрков¹,
А.В. Глебов², Ф.В. Макаров²

¹ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия;

²АО «ВНИИНМ», г. Москва, Россия,

E-mail: info@virial.ru

В настоящее время специалисты России и зарубежных стран в области атомной энергетики ведут разработки различных новых многослойных оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), как на основе металлических, так и на основе неметаллических материалов с целью повышения безопасности реакторов с водой под давлением, как при нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях, при этом они считают, что одной из перспективных конструкций оболочки ТВЭЛ, является конструкция оболочки ТВЭЛ, в которой используется многослойные структуры, состоящие из монолитного карбидокремниевого слоя, каркасов в виде нитевидных кристаллов (НК) карбида кремния и непрерывного карбидокремниевого волокна ($\text{SiC}_{\text{вол}}$), и матрицы SiC ($\text{SiC}_{\text{м}}$). Монолитный слой SiC обеспечивает газонепроницаемость оболочки для газов деления и коррозионную стойкость. Непрерывное волокно SiC обеспечивает прочностные характеристики композиционных материалов SiC/SiC. НК SiC повышают прочностные характеристики и теплопроводность композиционных материалов SiC/SiC за счет заполнения порового пространства пористого каркаса из непрерывного SiC волокна.

Специалистами ООО «Вириал» и ООО «ВНИИНМ» предложена схема изготовления четырехслойной оболочки ТВЭЛ. Для изготовления такой оболочки необходимо провести ряд стадий: синтез НК SiC, осаждение пироуглеродного покрытия на НК SiC и непрерывное $\text{SiC}_{\text{вол}}$, формирование каркаса из $\text{SiC}_{\text{вол}}$ и НК SiC, химическая газофазная инфильтрация карбида кремния каркаса из $\text{SiC}_{\text{вол}}$ и НК SiC, химическое газофазное осаждение монолитного слоя карбида кремния.

В ООО «Вириал» разработана технология синтеза НК SiC по механизму «газ-жидкость-твердое тело» в температурном интервале от 1350 °C до 1550 °C в среде водорода. В качестве исходных реагентов диоксида кремния и углерода используем ковелос и технический углерод, а также катализатор – железо. За счет изменения состава смеси и режимов синтеза возможно контролировать диаметр и длину кристаллов SiC. В результате проведенных опытов были получены НК SiC с предпочтительными геометрическими параметрами для применения их при изготовлении оболочки ТВЭЛ. Для предотвращения хрупкого разрушения композита $\text{SiC}_{\text{вол}}/\text{НК SiC}/\text{SiC}_{\text{м}}$ на поверхность НК SiC и непрерывных волокон SiC проводили осаждение пироуглеродного покрытия в интервале температур от 1000 °C до 1300 °C с использованием метана.

Химическую газофазную инфильтрацию карбидом кремния пористого каркаса из непрерывного волокна и нитевидных кристаллов SiC проводили при температуре 1000 °C. В качестве источника Si и C использовали метилтрихлорсилан (МТХС), обеспечивающий получение стехиометрического карбида кремния кристаллической структуры (β - SiC).

Эксперименты по осаждению монолитного SiC (рис. 1) на поверхности графитового стержня проводили в температурном интервале от 1000 °C до 1300 °C при варьировании соотношения водорода к метилтрихлорсилану от 5 до 30 (рис. 1). Наиболее эффективное осаждение карбида кремния β -модификации происходит при $T=1300$ °C и соотношении водорода к МТХС = 5, скорость роста монолитного SiC составляет ~ 100 мкм/ч.

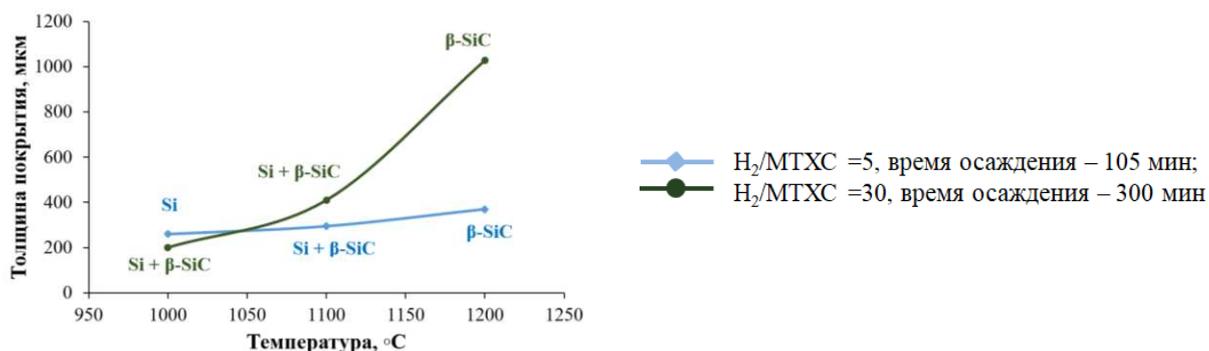


Рис. 1. Зависимость толщины и фазового состава монокристаллического покрытия SiC от температуры, времени осаждения, соотношения газовых реагентов водорода от МТХС

Исследование микроструктуры методом растровой электронной микроскопии образцов четырехслойной оболочки ТВЭЛа (рис. 2) показало, что крупные макропоры от 10 до 50 мкм содержатся в основном в слоях из композиционных материалов SiC_{волн}/SiC и НК SiC/SiC.

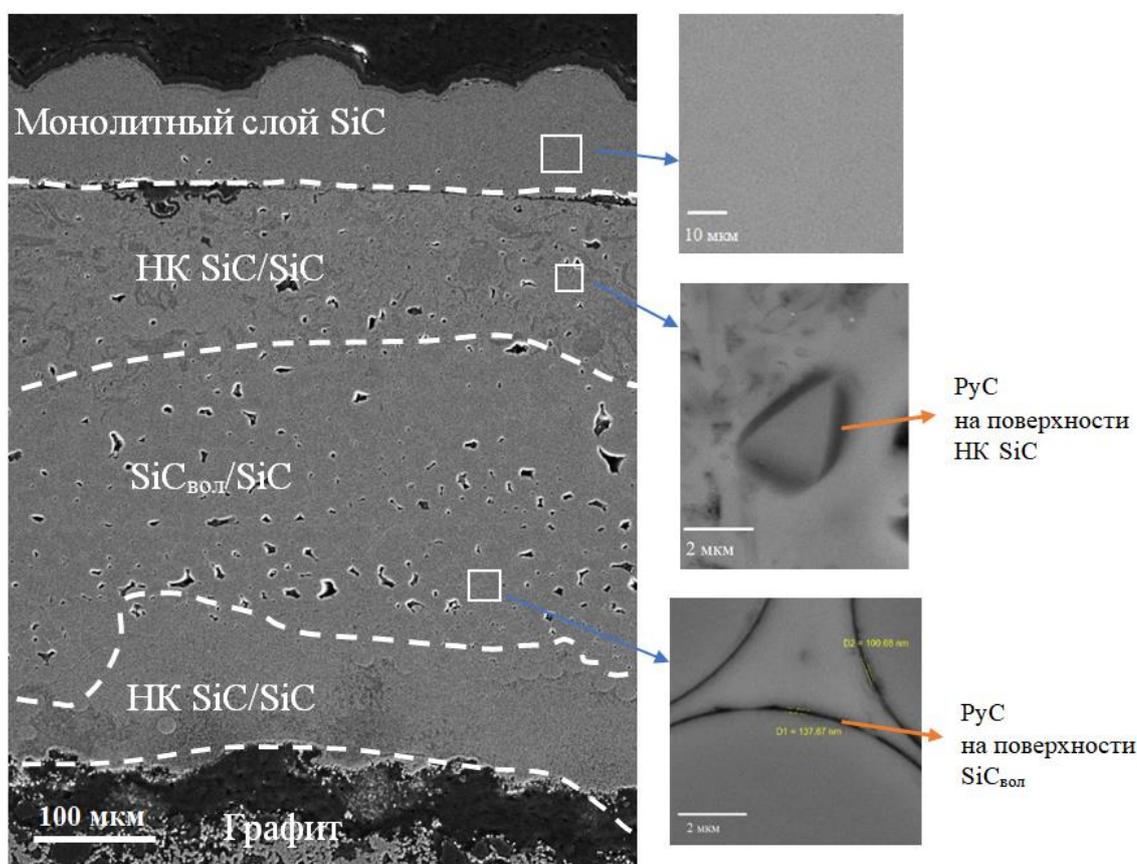


Рис. 2. Фотография поперечного среза фрагмента четырехслойной оболочки ТВЭЛ, полученная с помощью просвечивающего электронного микроскопа марки Zeiss Libra 200FE

Пористость монокристаллического покрытия SiC оценивали путем определения объемного содержания пор в монокристаллическом покрытии SiC с использованием программного обеспечения ВидеоТест-Структура-морфология 5.2. Пористость монокристаллического покрытия SiC составляет 0,5%.

Установлено, что закрытые продолговатые и извилистые макропоры присутствуют в основном в двух внутренних слоях из композиционных материалов SiC_{волн}/SiC и НК SiC/SiC. При этом плотность образцов четырехслойных оболочек ТВЭЛа находится в интервале от 2,61 до 2,67 г/см³.

Методика и стенд для контроля качества пьезокерамических элементов методом исследования их амплитудно-частотных характеристик

Н.Р. Запотьлыко, И.А. Кабаев

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, Россия

E-mail: tizar@mail.ru

При эксплуатации одночастотных лазеров в широком температурном диапазоне актуальной является стабилизация их частоты. Стабилизация частоты резонатора лазера осуществляется с помощью специальных устройств – пьезокорректоров, изменяющих длину периметра резонатора. В основе таких устройств лежит блок пьезоэлектрический (БП), связанный тем или иным способом с зеркалом резонатора.

В состав типичного БП входят ситалловый диск, соединенный методом пайки с двумя пьезокерамическими элементами (ПКЭ). В БП пьезоэлементы электрически соединены таким образом, что при приложении электрического напряжения (от 0 до 200 В) к его контактам один пьезоэлемент радиально расширяется, в то время как другой радиально сужается. Возникающие моменты изгибают мембрану, вызывая наибольшее осевое перемещение центральной части мембраны относительно закрепленного корпуса. Усилие, создаваемое изгибом мембраны привода, передается через центральный стержень мембране зеркала, тем самым меняя положение отражающей поверхности.

Важнейшими параметрами качества ПКЭ являются однородность материала, отсутствие посторонних включений, трещин, внутренних полостей и т.д., которые могут привести к пробою. Нами был разработан оригинальный метод выявления внутренних дефектов в пьезокерамическом материале. Суть метода заключается в следующем: электрический сигнал от генератора качающейся частоты поступает на одну из обкладок пьезоэлемента, с другой обкладки снимается сигнал прохождения акустических колебаний через пьезоэлемент и регистрируется на приборе для исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

На рисунке 1 представлена структурная схема стенда для контроля АЧХ ПКЭ.

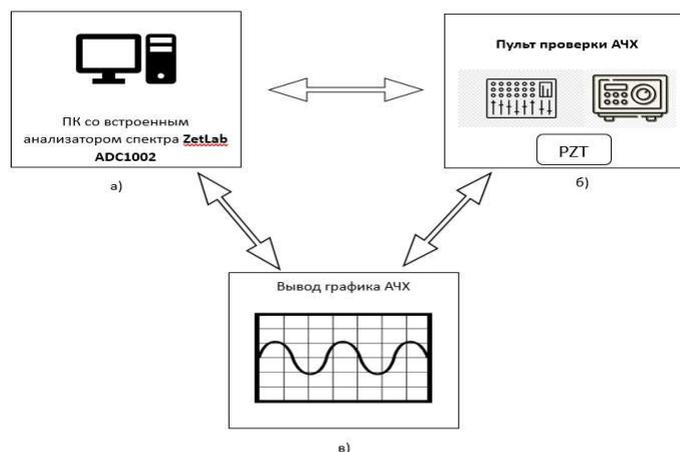


Рис. 1. Структурная схема стенда для контроля АЧХ:

- а) программно-вычислительный комплекс с анализатором спектра и ПО от ZetLab;
- б) пульт проверки АЧХ с источником питания;
- в) вывод графика на экран

Для измерения АЧХ был применен анализатор спектра ADC1002 производства компании ZetLab (г. Зеленоград), а также использовано программное обеспечение, поставляемое производителем устройства. Для стенда был разработан и изготовлен пульт

проверки, позволяющий снимать АЧХ как без подачи на ПКЭ электрического напряжения, так и с подачей напряжения с целью раскрытия дефекта при контроле.

Методика предусматривает рассмотрение нескольких первых резонансов, т.к. амплитуда колебаний пьезоэлемента многократно увеличивается при резонансе (первые резонансы имеют бóльшую амплитуду колебаний относительно последующих), поэтому влияние дефектов структуры сказывается сильнее. Изменение условий прохождения акустических колебаний (наличие трещин, больших пор, посторонних включений) в пьезоэлементе вызовет изменение вида амплитудно-частотной характеристики, так как появляются дополнительные резонансы.

На рисунке 2 представлен вид амплитудно-частотной характеристики годного пьезоэлемента. На рисунке видно, что амплитудно-частотная характеристика имеет ярко выраженный резонанс и антирезонанс, дополнительные резонансы отсутствуют. Это говорит о том, что в структуре пьезоэлемента нет больших пор и посторонних включений.



Рис. 2. Вид амплитудно-частотной характеристики годного пьезоэлемента

На рисунке 3 представлен вид АЧХ бракованного элемента.



Рис. 3. Вид амплитудно-частотной характеристики бракованного пьезоэлемента

Разработка методики по выявлению скрытых дефектов в пьезокерамике позволила существенно повысить надежность и долговечность работы БП. Отказы по пробую ПКЭ при работе БП отсутствуют. Процент отбраковки ПКЭ этим методом обычно составляет 5-10% от числа контролируемых в зависимости от производителя.

Керамические конструкционные, теплозащитные и теплоизоляционные материалы для высокотехнологичных отраслей промышленности

О.Ю. Сорокин, А.С. Чайникова, М.Л. Ваганова, Ю.Е. Лебедева, Н.Е. Щеголева,
В.Г. Бабашов, А.В. Истомин, А.А. Луговой
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва, Россия
E-mail: os1981@list.ru

Актуальность применения керамических конструкционных, теплозащитных и теплоизоляционных материалов для высокотехнологичных отраслей промышленности, например, энергетики, металлургии, авиационной промышленности и др., продиктована необходимостью работы деталей и сборочных единиц в жестких условиях – при высоких температурах, резких теплосменах, воздействии окислительной среды / продуктов сгорания топлива в газотурбинных двигателях и др.

Наилучший уровень свойств материалов возможно получить при использовании комбинированных методов, например, методом гибридного спекания (FAST / SPS). Показано, что высокие скорости нагрева и охлаждения обеспечивают сокращение технологического цикла спекания тугоплавких электропроводящих соединений и предотвращают рост зерна исходных порошков. Изготовленные данным методом конструктивно-подобные образцы облицовки жаровой трубы, сектора соплового аппарата подтвердили свою работоспособность при температурах до 1500 °С в условиях, близких к эксплуатационным.

Метод реакционного спекания, применяемый для получения карбидокремниевых материалов, позволяет получать крупногабаритные и сложнопрофильные изделия, в частности, триботехнического назначения. Установлено, что добавка искусственного графита в состав прессуемой шихты и тонкая регулировка плотности прессуемых заготовок позволяет снизить содержание свободного кремния до уровня 4 мас. % в материале из реакционно-спеченного карбида кремния, содержащего графит. Заметно повысить значение трещиностойкости возможно за счет придания материалу гетеромодульной микроструктуры.

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводит разработки в области получения керамических изделий с применением аддитивных технологий:

- разработаны фотоотверждаемые полимерные связующие и высоконаполненные керамические пасты для изготовления керамических изделий методом стереолитографии (SLA) и фотополимеризации в ванне (DLP), проведено импортозамещение керамических паст на основе Al_2O_3 , ведется разработка паст на основе ZrO_2 ;

- проводятся экспериментальные исследования по разработке филаментов с содержанием керамического наполнителя не менее 50 мас. % для изготовления керамических изделий методом наплавления (FDM).

С применением метода горячего прессования разработана технология получения термохимически стойкого материала на основе BN, предназначенного для изготовления сопел, необходимых для распыления жаропрочных авиационных сплавов на Ni / Co основе, различных марок сталей и последующего получения порошков для аддитивных технологий. Разработана технология изготовления керамических эмиттеров для электронно-лучевой сварки изделий из жаропрочных, высокопрочных, коррозионностойких сталей, титановых и других сплавов.

Проводятся исследования по получению волокон тугоплавких оксидов и изготовлению на их основе теплоизоляционных и теплозащитных материалов, отличающихся низкой плотностью и низкой теплопроводностью. Ведется разработка теплозвукоизоляционных материалов на основе стеклянных и кварцевых волокон. В частности, идут работы над совершенствованием теплозвукоизоляционных материалов типа АТМ, предназначенных для изоляции салонов самолетов, кабины пилота, трубопроводов и других систем. Создан научно-технический задел по получению высокотемпературных пенокерамических фильтрационных материалов для литья сталей, жаропрочных и реакционно-активных сплавов взамен импортных аналогов.

Модифицированный золь-гель метод получения порошков иттрий-алюминиевого граната с добавкой оксида скандия

А.С. Протасов, М.О. Сенина, Д.О. Лемешев
РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия
E-mail: th-232@yandex.ru

Керамика из иттрий-алюминиевого граната (ИАГ), обладая высокими физико-механическими показателями в сочетании с оптической прозрачностью, в настоящее время является востребованным материалом во многих областях науки и техники. Технология получения высокоплотной керамики имеет определенные особенности и чрезвычайно требовательна к выбору как исходных веществ, так и методов, реализуемых на каждом технологическом этапе. В частности, при выборе метода синтеза прекурсоров преследуются цели получения порошков с заданным составом, структурой, морфологией и активностью при спекании. Ключевыми условиями при получении прозрачной керамики являются отсутствие пористости, монофазность, определенный размер кристаллов. Соответственно, при выборе метода синтеза прекурсоров керамики необходимо соблюдать требования в части контроля стехиометрии, чистоты компонентов, а также максимально равномерного распределения последних, включая спекающие добавки. Применение алкоксидных золь-гель методов во многих вариантах исполнения позволяет выполнить эти условия. Стадия метода, приводящая к получению золь гидроксидов – гидролиз алкоксидов металлов – протекает через спонтанную оксо-алкоксидную стадию. Высокая реакционная способность алкоксосоединений, высокая чувствительность к параметрам проведения синтеза делает метод плохо контролируемым и зачастую обладающим плохой воспроизводимостью.

Осуществить контролируемый гидролиз можно частично инактивируя алкоксогруппы путем введения индифферентных заместителей. В нашей работе применялись частично алкоксилированные β -дикетонаты металлов, позволяющие получить полиметаллические хелатные комплексы, из которых в процессе гидролиза можно добиться получения гелей со структурой, близкой к структуре конечного материала. В литературе имеются примеры работ, связанных с неполной термической деструкцией ацетилацетонатов металлов в среде алкоксиллирующих агентов – спиртов – с получением частично замещенных алкоксипроизводных, степень и скорость гидролиза которых легко контролируется внешними условиями и временем проведения процесса.

В настоящей работе использовали другой подход к получению частично замещенных реагентов. В качестве носителя алкоксогрупп использовали изопропилат алюминия. В качестве носителя β -дикетонатной группировки – ацетилацетонаты иттрия и скандия. При этом ацетилацетонаты металлов и алкоксиды металлов способны образовывать полиядерные комплексы.

Вода, необходимая для гидролиза, частично находилась в исходных компонентах в виде гидратной воды ацетилацетонатов иттрия и скандия, и дополнительно вводилась в виде водно-ацетонового раствора. Гидролиз проводили в течение 8 ч при температуре 80 °С при постоянном перемешивании. Полученный гель сушили при температуре 70 °С в сушильном шкафу и затем подвергали помолу. Таким методом получали прекурсор иттрий-алюминиевого граната без добавок и с добавками оксида скандия в количестве от 5 до 30 моль %.

Полученный ксерогель представляет собой рентгеноаморфный порошок рыхлых агрегатов, состоящих из наноразмерных частиц. Результаты исследования микроструктуры порошка до синтеза представлены на рисунке 1А. Температура кристаллизации гранатовой фазы определена на основании дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Для ИАГ без добавки (рис. 2) она составила 927 °С, в системе $Y_3Al_5O_{12}-Sc_2O_3$ для состава с 5 моль % Sc_2O_3 – 912 °С, и для составов с 10, 20 и 30 моль % добавки – 910 °С. Синтез осуществлялся при температуре 1000 °С в течение 2 ч. Во всех случаях получен монофазный

иттрий-алюминиевый гранат (рис. 3), при этом параметр решетки увеличивался от 12,0066 Å для чистого граната (рис. 2) до 12,0257 Å для граната с 30 моль % добавки. Размер кристаллитов, рассчитанных по формуле Шеррера на основании дифрактограмм, составляет 35-40 нм. СЭМ-изображение порошка ИАГ после синтеза приведено на рисунке 1Б.

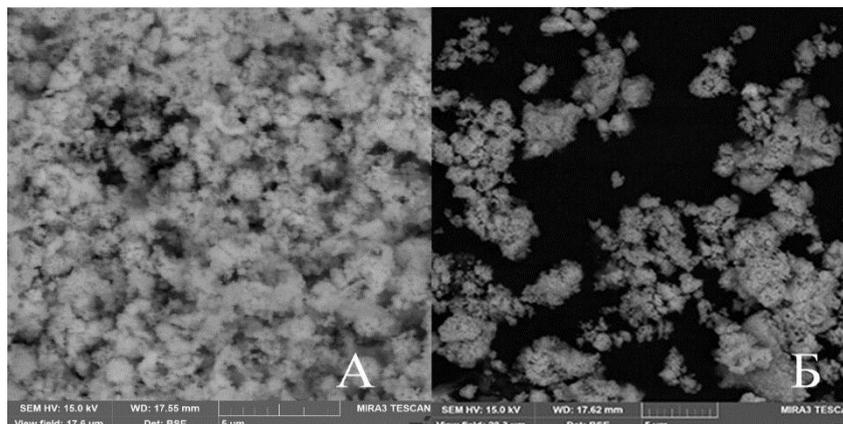


Рис. 1. СЭМ-изображение порошка ИАГ без добавки до синтеза (А) и после синтеза (Б)

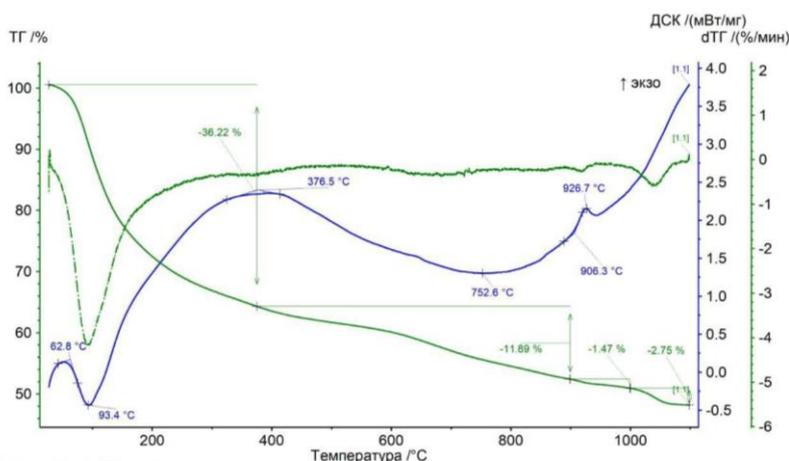


Рис. 2. ДСК порошка ИАГ без добавки

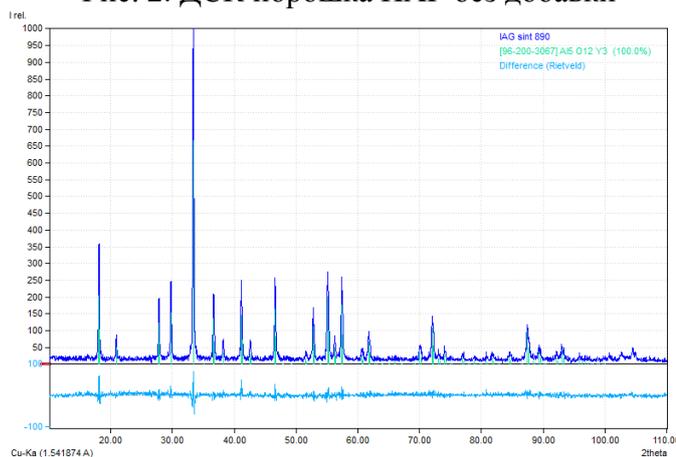


Рис. 3. Дифрактограмма порошка ИАГ без добавки

В работе изучена возможность синтеза иттрий-алюминиевого граната без добавок и с добавками оксида скандия с использованием модифицированного алкоксидного золь-гель метода. Полученные порошки представляют собой слабо агломерированные наноразмерные частицы монофазного иттрий-алюминиевого граната.

Метрологическое обеспечение производства ферритовых и керамических материалов

В.С. Кузьмин¹, А.В. Мясников¹, А.Г. Налогин¹, И.А. Налогин¹, А.А. Алексеев¹,
Г.Г. Щучкин², М.П. Пархоменко³, Д.С. Каленов³, В.В. Паршин⁴

¹АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», г. Фрязино, Россия; ²РТУ МИРЭА (филиал), г. Фрязино, Россия; ³ФирЭ им. В.А. Котельникова, г. Фрязино, Россия; ⁴Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, Россия

В процессе производства ферритовых развязывающих, коммутирующих и управляющих приборов, работающих в диапазоне частот 1-118,1 ГГц, в НПК-9 АО «НПП «Исток» им. Шокина» в рамках технологического процесса изготовления керамических и ферритовых поликристаллических материалов в виде заготовок и пластин (подложек), изготавливаемых из них, проводится неразрушающий контроль их электромагнитных параметров. Контроль электромагнитных параметров заготовок и пластин (подложек) заложен в производственный цикл и проходит в 2 этапа.

1 Квазиоптический метод измерения в диапазоне частот (78,3÷118,1) ГГц.

Объектами измерения в квазиоптическом методе и созданной на его основе методики являются заготовки поликристаллических керамических материалов и ферритов в форме плоскопараллельных прямоугольных пластин с поперечными размерами не менее 20×20 мм и диски диаметром не менее 25 мм. Размеры контролируемых заготовок после спекания в процессе серийного производства в виде прямоугольных пластин: 54×33×(5÷10) мм, 63×53×(5÷15) мм, чистота обработки лицевых поверхностей – не менее 7 кл., неплоскостность лицевых поверхностей – не более 0,01 мм, непараллельность лицевых поверхностей – не более 0,02 мм. Контролируемые параметры: эффективная относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_3 и тангенс угла суммарных потерь $\text{tg}\delta_\Sigma$ (магнитных и электрических).

Измерения проводятся методами, основанными на частотной зависимости модуля коэффициента отражения плоской электромагнитной волны (ТЕМ-волны) от плоскопараллельного слоя керамики или размагниченного феррита при нормальном падении. При измерении используются два варианта схемы измерения (рис. 1): отражение ТЕМ-волны от плоскопараллельного слоя, расположенного на металлическом зеркале (определение $\text{tg}\delta_\Sigma$), и отражение ТЕМ-волны от плоскопараллельного слоя без металлического зеркала (определение ϵ_3). Диапазоны значений измеряемых параметров представлены в таблице 1.

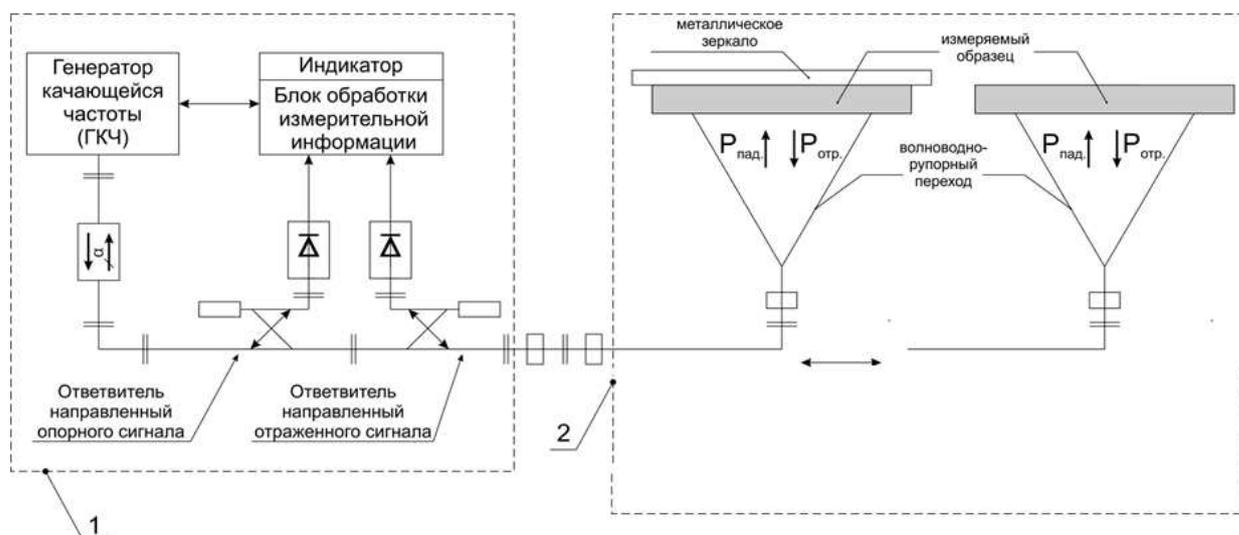


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки:

1 – панорамный измеритель коэффициента стоячей волны по напряжению и ослабления, векторный анализатор цепей; 2 – измерительный модуль (апертура волноводно-рупорного перехода 14×14 мм)

Таблица 1. Диапазоны значений измеряемых параметров по методу 1

Эффективная относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_3)	от 10 до 30
Тангенс угла суммарных потерь ($\text{tg}\delta_\Sigma$)	от $5 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$
Погрешность измерения ϵ_3 при доверительной вероятности 0,95, %	± 2
Погрешность измерения $\text{tg}\delta_\Sigma$ при доверительной вероятности 0,95	$\pm \left(\frac{60}{d} \cdot 10^{-4}\right)$, d – толщина, мм

Представленная методика включена в Госреестр, аттестат аккредитации 585-RA.RU.311243-2018.

2 Неразрушающий резонаторный метод измерения электромагнитных параметров пластин (подложек) из поликристаллических керамических материалов и ферритов с малыми потерями в диапазоне частот 9,8 ÷ 10,1 ГГц.

Рассматриваемый резонаторный метод и методика, созданная на его основе, предназначены для измерения действительной части относительной диэлектрической проницаемости ϵ' , тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_\epsilon$, действительной части относительной магнитной проницаемости μ' и тангенса угла магнитных потерь $\text{tg}\delta_\mu$ пластин (подложек) из поликристаллических керамических материалов и СВЧ-ферритов в диапазоне частот от 9,8 до 10,1 ГГц. Электромагнитные параметры определяются посредством сравнения параметров резонаторов (резонансная частота, добротность) с измеряемым образцом с параметрами резонаторов с контрольным образцом или контрольным виртуальным образцом, созданным на основе математического моделирования (данная часть методики внесена в Госреестр, аттестат аккредитации 585-RA.RU.311243-2018). Диапазоны значений измеряемых параметров по данному методу представлены в таблице 2.

Таблица 2. Диапазоны значений измеряемых параметров по методу 2

Действительная часть относительной диэлектрической проницаемости ϵ'	от 14,5 до 15,5
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_\epsilon$	от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$
Действительная часть относительной магнитной проницаемости μ'	от 0,85 до 0,90
Тангенс угла магнитных потерь $\text{tg}\delta_\mu$	от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$
Абсолютная погрешность измерения ϵ' при доверительной вероятности 0,95	$\pm 0,1$
Абсолютная погрешности измерений $\text{tg}\delta_\epsilon$ при доверительной вероятности 0,95	$\pm 2,5 \cdot 10^{-5}$
Абсолютная погрешность измерения μ' при доверительной вероятности 0,95	$\pm 0,007$
Абсолютная погрешность измерения $\text{tg}\delta_\mu$ при доверительной вероятности 0,95	$\pm 6 \cdot 10^{-5}$

Требования к пластинам (подложкам): прямоугольная пластина с размерами сторон $48_{-0,1} \times 60_{-0,12}$ мм и толщиной $1,00 \pm 0,02$ мм (допускается проводить измерения сразу на 2-х прямоугольных пластинах с размерами сторон $48_{-0,1} \times 30_{-0,1}$ мм и толщиной $1,00 \pm 0,02$ мм из одной партии), намагниченность насыщения образцов ферритов от 16 до 160 кА/м (измеряемые образцы ферритов должны быть полностью размагничены), шероховатость лицевых поверхностей Ra не более 0,02 мкм, неплоскостность лицевых поверхностей не более 0,01 мм, непараллельность лицевых поверхностей не более 0,02 мм.

Практика применения отечественной системы керамики-пасты для изготовления изделий по технологии LTCC

Д.Н. Полозов, Ю.И. Тодосечук, Д. А. Бурлакова, В.М. Коломин., В.С. Горяйнов,
А.Л. Курапова
АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Россия
E-mail: dnpolozov@istokmw.ru

С развитием компьютерной техники и СВЧ-аппаратуры беспроводной связи для повышения быстродействия электронных схем проводники из тугоплавких металлов необходимо было заменить на металлы с минимальным удельным электрическим сопротивлением ($\leq 0,005$ Ом/кв.см), например, такие как медь, серебро, золото и их сплавы с палладием и платиной. Температуры спекания порошков этих металлов лежат в пределах 750-900 °С. Но несогласованность температур обжига корундовой керамики и спекания проводников из порошков драгметаллов в процессе «co-fire» привела к необходимости разработки специальных составов стеклокерамических материалов с низкой температурой обжига 850-900 °С и низкими диэлектрическими потерями на СВЧ. Аббревиатура новой технологии – LTCC (Low Temperature Co-fire Ceramic) – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика.

На стадии зарождения LTCC-технологии предполагалось, что она получит широкое развитие благодаря ряду особенностей, включая то, что становится возможным создание 3D-структур со встроенными пассивными компонентами и низкоомными проводниками, обладающими высокой механической прочностью и герметичностью. Всё это позволяет рассматривать данную технологию как базовую при изготовлении сложных электронных систем, где требуется высокая надежность.

Зарубежный опыт становления и совершенствования технологии LTCC подтвердил её основные достоинства. Однако главным преимуществом технологии LTCC является возможность её широкого применения при создании компактной электронной аппаратуры СВЧ-диапазона длин волн вплоть до 100 ГГц.

Сегодня микросхемы в корпусах на основе низкотемпературной керамики успешно применяются в автомобильной, потребительской электронике, телекоммуникациях, спутниковых системах и военных изделиях в области высоких и сверхвысоких частот.

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» разработан отечественный стеклокерамический материал (СКМ) и пленка на его основе. Реализован замкнутый цикл производства изделий по технологии LTCC, начиная от получения исходных компонентов до изготовления сложных многослойных керамических плат.

Освоено серийное производство многослойных керамических плат с высокоинтегрированной объемной компоновкой цепей питания, управления и СВЧ-трактов в объеме платы. Разработанная технология изготовления изделий LTCC позволяет проектировать широкую номенклатуру для устройств СВЧ с рабочей частотой до 40 ГГц, предназначенных для работы в составе приемопередающих трактов аппаратуры связи, бортовых и наземных радиолокационных и радионавигационных систем гражданского и специального назначения.

Благодаря широкому потреблению изделий, изготовленных из отечественной системы «керамика-металлизационные пасты» по технологии LTCC, нарабатан опыт по проектированию, разработке и изготовлению многослойных керамических изделий различной сложности. В связи с развитием СВЧ-электроники и повышением требований к изделиям LTCC в АО «НПП «Исток» им. Шокина» совместно с соисполнителями проводятся работы по разработке терморезистивных паст, а также их интеграции в конечные изделия. Кроме того, ведутся работы по созданию технологии формования ферритов методом литья тонкой пленки и последующим её внедрением в систему LTCC.

3D-печать керамических материалов из фосфатов магния, синтезированных современными методами, со специальными биомедицинскими свойствами

Е.С. Климашина¹, А.К. Пупанова¹, Ю.Р. Рассолова¹, А.С. Бирюков¹, И.И. Преображенский¹, А.М. Мурашко¹, Я.Ю. Филиппов^{1,2}, В.И. Путляев¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ²НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

E-mail: Klimashinaes@my.msu.ru, klimashina@inorg.chem.msu.ru

3D-печать керамических материалов со специальными биомедицинскими свойствами является важной задачей материаловедения. Главная цель работы – разработка керамических материалов на основе фосфатов с контролируемыми свойствами, которые могут замещать ткани человеческого тела, включая костную.

В связи с обширным набором требований, предъявляемых к таким материалам, технологии их производства все еще не достигли совершенства и постоянно развиваются. Современные научные исследования в сфере биоматериалов для костной регенерации нацелены на получение керамических высокопористых структур, которые выступают в начальный момент времени в роли поддерживающего каркаса при замене костной ткани и могут использоваться как носители разных видов клеток и биологически активных веществ, высвобождаемых в окружающую среду с регулируемой скоростью. В то же время, такие материалы должны быть совместимы с тканями организма, подвергаться биорезорбции, стимулировать остеогенез и обладать необходимой прочностью на протяжении всего периода эксплуатации.

Для восстановления костной ткани в настоящее время наиболее часто применяют керамику на основе фосфатов кальция, а именно гидроксиапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (ГА) и трикальциевого фосфата $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (ТКФ). Тем не менее, невзирая на их высокую биосовместимость, такая керамика обладает недостаточной резорбируемостью, что не соответствует современным требованиям регенеративной медицины. Из-за недостаточно высокой растворимости упомянутых фосфатов кальция новая костная ткань формируется на поверхности имплантата, «запирая» его, что препятствует нормальному росту кровеносных сосудов новой кости и повышает риск повреждения тканей на границе имплантат – кость. В связи с этим необходимо обратить внимание на более резорбируемые по сравнению с ГА и ТКФ материалы.

Использование магниевых фосфатов для создания биорезорбируемых материалов предполагает их более высокую растворимость по сравнению с гидроксиапатитом и трикальциевым фосфатом. Несмотря на меньший радиус иона Mg^{2+} по сравнению с Ca^{2+} (ионный радиус Mg^{2+} равен 0,86 Å, а Ca^{2+} – 1,14 Å), высокая энтальпия гидратации магниевого катиона компенсирует его влияние на увеличение энергии кристаллической решетки, что в свою очередь увеличивает растворимость фосфатной фазы. Более того, за счет подавления пролиферации остеокластов и стимулирования пролиферации и адгезии остеобластов, магний способен ускорить процесс остеосинтеза. Разработка подобного материала требует исследования фазовых равновесий и физико-химических свойств керамики, основанной на магниевых фосфатах. Несмотря на то, что введение магния в состав фосфатов кальция, ГА и ТКФ, является распространенным методом модификации биокерамики, фундаментальных исследований в области создания керамики, как классическими методами спекания, так и с помощью 3D-печати только из фосфатов магния мало.

В результате разработанного многостадийного воспроизводимого синтеза были получены однофазные порошки ортофосфата магния, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, и пирофосфата магния, $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$, пригодные для дальнейшей 3D-печати керамических высокопористых образцов. Одним из вариантов синтеза был криохимический метод с сублимационной сушкой и последующим

отжигом, предложенный ввиду высокой степени однородности химического, гранулометрического, фазового составов получаемых продуктов и возможности получить чистый безводный образец с заданной стехиометрией. Метод пиролиза аэрозоля может также быть использован для получения мелкодисперсных высокоактивных порошковых прекурсоров заданного состава, которые могут использоваться как для компоненты суспензии для стереолитографической печати, а также для спекания мелкокристаллической керамики с высокими прочностными характеристиками.

Для получения пористой керамики методом 3D-печати был взят ортофосфат магния со средним размером агломератов $28,3 \pm 1,4$ мкм. Предварительно были подобраны параметры печати с заданной толщиной слоя печати 100 мкм и состав суспензии. В результате был напечатан образец (рис. 1) со структурой Кельвина и заданной пористостью 70%. В ряде случаев наблюдалось небольшое растрескивание внутри слоя печати, что может быть обусловлено частичной потерей кристаллизационной воды или необходимостью более точного подбора параметров печати. В результате высокотемпературного обжига при получении керамического материала, образуется мезопористая мелкокристаллическая керамика, с размерами кристаллитов до 1-2 мкм, и происходит частичное залечивание мелких трещин.



Рис. 1. Образец материала из фосфата магния со структурой Кельвина, полученный 3D-печатью

Таким образом, были определены условия получения гидратированных фосфатов магния из растворов. Продукты реакции зависят от поддерживаемого pH (был выбран pH=9 для ортофосфата магния в области существования pH=7,5-9) и ионного состава (Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+) при фиксированных концентрациях, времени проведения и температуре синтеза. Гарантированно получить однофазный ортофосфат магния возможно в результате твердофазного синтеза или растворного синтеза из фосфорной кислоты и оксида магния. Проведено физико-химическое сравнение $Mg_3(PO_4)_2$, полученного в результате осаждения из растворов и твердофазного синтеза. Полученные фосфаты магния пригодны для создания высокопористых керамических структур для костных имплантатов методом стереолитографической 3D-печати. Определены температура и время изготовления (900 °C, 12 ч) и проведена печать однофазной магнийфосфатной пористой керамики со структурой Кельвина.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00396, <https://rscf.ru/project/24-29-00396/>.

Керамика с антибактериальными свойствами из трикальцийфосфата, допированная катионами стронция, гадолиния и меди

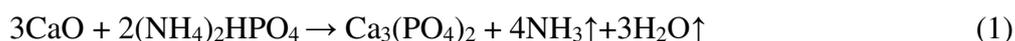
Е.А. Федорова¹, И.В. Фадеева², Г.А. Давыдова³, И.И. Селезнева³, А.В. Кнотько¹, Д.В. Рау⁴
¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, ²Институт металлургии и материаловедения РАН им. А.А. Байкова (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия, ³Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН (ИТЭБ РАН), г. Москва, Россия, ⁴Istituto di Struttura della Materia, Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISM-CNR), г. Рим, Италия
E-mail: fedorova_katycha@mail.ru

Одними из перспективных керамических материалов для лечения поврежденных костных тканей являются кальций-фосфатные соединения, среди которых широко используется трикальцийфосфат (ТКФ), который характеризуется хорошей биосовместимостью и способен частично резорбироваться в жидкостях организма.

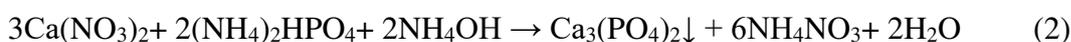
Внедрение ионов с антибактериальными свойствами (Cu^{2+} , Gd^{3+} , Sr^{2+}) в структуру ТКФ может придать керамике из них антибактериальную активность и дополнительно увеличить ее резорбируемость в условиях организма.

Целью данной работы являлись синтез и характеристика катионзамещенных фосфатов кальция для изготовления керамики с антибактериальными свойствами.

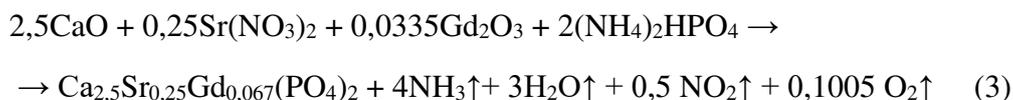
Незамещенный ТКФ синтезировали двумя методами: твердофазным методом при 1200 °С, реагенты для шихты брали в соответствии с реакцией (1):



и осаждением из водного раствора с последующей термообработкой согласно следующей реакции (2):



Двойные гадолиний- и стронций-замещенные трикальцийфосфаты синтезировали твердофазным методом, количества реагентов для шихты рассчитывали в соответствии с реакцией (3):



Керамические диски получали двухсторонним одноосным прессованием в стальных цилиндрических формах диаметром 20 мм при давлении прессования 1000 кгс. Образцы спекали в камерной печи с силитовыми нагревателями при температуре 1200 °С в течение 2 ч. Линейная усадка после спекания для большинства образцов составила около 5%. Фазовый состав спеченной керамики представлен единственной фазой – витлокитом.

Для улучшения остеоинтеграции имплантата с окружающей костной тканью имплантат должен обладать системой взаимосвязанных пор определенного размера. Оценку эффективности процесса спекания при выбранной температуре и размера образовавшихся пор проводили по результатам СЭМ. По результатам СЭМ и EDX установлено, что допанты распределяются в керамике равномерно, микроструктура керамики равномерная (рис. 1, 2).

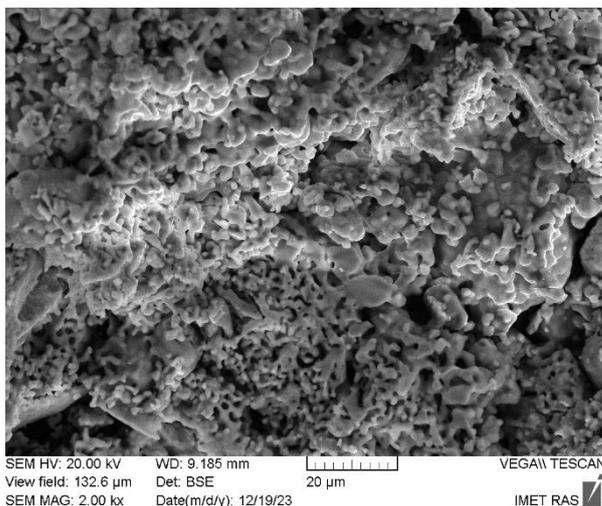


Рис. 1. Микроструктура спеченной при 1200 °С керамики (Cu, Sr)-ТКФ

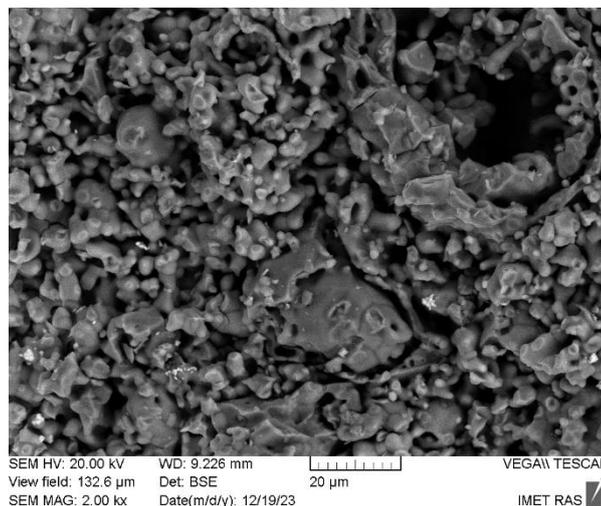


Рис. 2. Микроструктура спеченной при 1200 °С керамики (Sr, Gd)-ТКФ

Для определения растворимости керамики в условиях, приближенных к среде организма (температура 37 °С, pH = 7,4) был проведен эксперимент в модельной жидкости, в качестве которой использовали физиологический раствор с ТРИС-буфером. О растворимости керамики судили по изменению концентрации кальция в модельной жидкости. Установлено, что динамическое равновесие между ионами кальция, перешедшими в раствор и ионами кальция, образующими на поверхности образца слой биологического апатита, устанавливается после 30 сут выдерживания образца в модельной жидкости.

Биологические исследования *in vitro* показали, что керамика из двойных замещенных ТКФ, допированная ионами гадолиния и стронция, а также меди и стронция, является биосовместимой: при исследовании биосовместимости дисков на клетках NCTC clone L929 показано, что они не оказывали угнетающего действия на клетки (рис. 3).

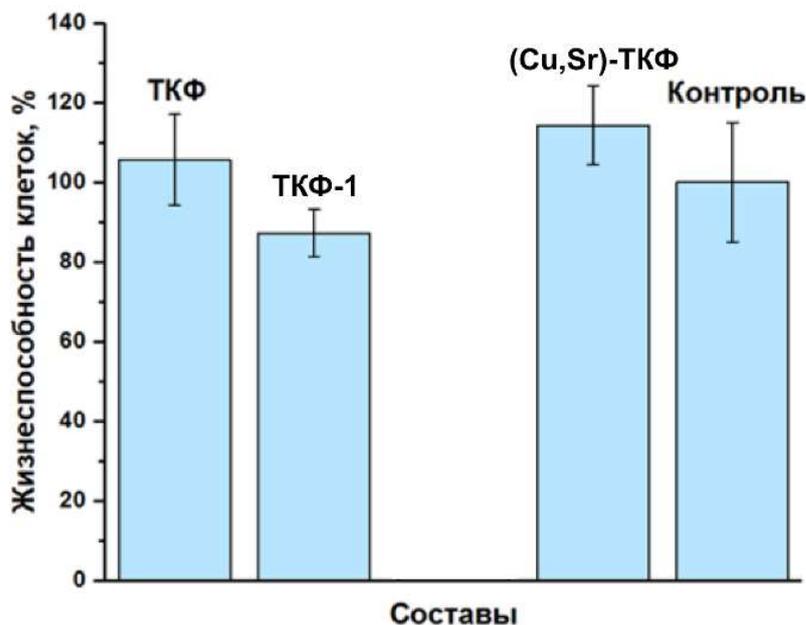


Рис. 3. Результаты биологических испытаний

Синтез ТКФ и физико-химическое исследование полученных образцов выполнены в рамках Госзадания № 075-00320-24-00. Биологические исследования проведены по Госзаданию № 075-00224-24-01.

Исследование зависимости насыпной плотности многофракционных смесей SiC порошков от их дисперсного состава

А.Ю. Колмогоров, О.Ю. Сорокин, М.Л. Ваганова, А.С. Чайникова
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва, Россия
E-mail: kolmogorov.andrey99@yandex.ru

Изделия на основе карбида кремния, широко применяемые в различных отраслях промышленности (машиностроении, энергетике, авиации и др.), наиболее часто получают методами порошковой металлургии. Актуальной задачей в области материаловедения является получение изделий из композиционных материалов (КМ) на основе SiC с повышенным сопротивлением к истиранию и деформации. Для достижения высокого уровня физико-механических свойств карбидокремниевых материалов, как правило, требуется приложение высоких давлений и/или температур, что ограничивает возможность получения крупногабаритных сложнопрофильных изделий. Решением данной проблемы является введение в их состав вторичной более легкоплавкой фазы, однако одновременно с этим происходит ухудшение комплекса свойств SiC материалов. В связи с этим, актуальным является уменьшение содержания легкоплавкой фазы в SiC материале за счет тонкого регулирования дисперсного состава многофракционных смесей SiC порошков для получения их более плотной упаковки.

В данной работе оценку плотности упаковки проводили по измеренным значениям насыпной плотности (ρ). Также определена морфология и примесный состав исследуемых SiC порошков.

Измерение насыпной плотности многофракционных смесей SiC порошков со средним размером частиц $D[4;3]$ не более 100 мкм проводили в соответствии с ГОСТ 28924-91 на анализаторе текучести порошков с использованием воронки Холла и анализаторе насыпной плотности (волюметр Скотта). Были установлены оптимальные значения отношений объемных долей фракций $[\varphi_{\text{круп}} \cdot \varphi_{\text{мелк}}]$, а также значения отношений средних размеров частиц $(D[4;3]_{\text{круп}} / D[4;3]_{\text{мелк}})$, при которых достигаются максимальные значения насыпной плотности многофракционных SiC порошков.

Показано, что для смесей, содержащих мелкодисперсные SiC порошки со средним размером частиц $D[4;3] < 5$ мкм, не рекомендуется использование волюметра Скотта вследствие низкой сыпучести порошка и, как следствие, получения недостоверных результатов измерений.

Установлено, что максимальные значения насыпной плотности двухфракционных смесей получены при значениях $D[4;3]_{\text{круп}} / D[4;3]_{\text{мелк}}$, находящихся в диапазоне от 14 до 22. Показано, что с уменьшением среднего размера частиц крупной фракции в двухфракционной смеси (F220→F240→F320) максимум значения насыпной плотности смещается от соотношения $[\varphi_{\text{круп}} \cdot \varphi_{\text{мелк}}] = [73:27]$ в сторону увеличения объемной доли крупной фракции $\varphi_{\text{круп}}$. Стоит заметить, что с уменьшением среднего размера частиц $\varphi_{\text{мелк}}$ (F1200→F1500) содержание более мелких частиц в смеси возрастает, что наряду с процессами диспергирования приводит к интенсификации агрегирования и ухудшению сыпучести порошка.

Установлено, что при добавлении в двухфракционные смеси промежуточной фракции SiC порошка удается дополнительно повысить насыпную плотность до значений $\rho > 1,32$ г/см³. Определены оптимальные показатели объемной доли и дисперсного состава промежуточной фракции SiC порошка.

Таким образом, были установлены значения насыпной плотности и выбраны оптимальные дисперсные составы многофракционных смесей SiC порошков, что в дальнейшем позволит получить практически беспористые изделия на основе карбида кремния с минимальным содержанием легкоплавкой фазы и высоким уровнем физико-механических свойств.

Специальный комплекс для исследования радиотехнических характеристик материалов и конструкций в диапазоне 4-40 ГГц

Р.А. Чирков, А.Е. Жителев, В.П. Крылов, Р.А. Миронов, М.О. Забейайлов, Н.А. Горшков, В.С. Петухов, О.В. Неповинных, А.П. Шадрин
АО «ОНИИ «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: zabeyaylovmo@technologiya.ru

Среди новых возможностей, которые открываются при измерениях методами свободного пространства, выделяются: широкополосность, позволяющая определять характеристики материалов и конструкций в широкой полосе частот, бесконтактность, возможность измерения угловых зависимостей материалов и конструкций, проявляющих анизотропию свойств. Различные методы обработки используют характеристики отраженных, прошедших волн и их комбинации. В основе методов лежит определение матрицы рассеяния образца, которая состоит из S-параметров. Элементы матрицы рассеяния представляют собой нормированные комплексные напряжения, мощности или токи, полученные после взаимодействия с элементами СВЧ-цепи. Конструкция разработанного авторами комплекса объединяет в себе возможности известных установок и позволяет исследовать рассеяние электромагнитных волн объектами в полосе частот от 4 до 40 ГГц в широком диапазоне углов с высокой точностью позиционирования: для угловых перемещений до 7 угловых секунд, для линейных перемещений до 0,01 мм. Исследование характеристик рассеяния позволяет расширить уже существующий и активно использующийся в настоящее время в мировой практике арсенал методов измерения радиотехнических характеристик и контроля материалов, конструкций и изделий. Внешний вид и 3D-модель конструкции комплекса изображены на рисунке 1.

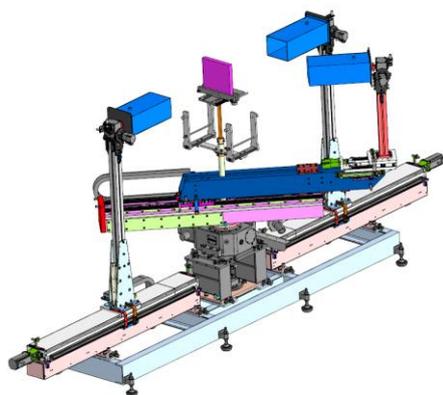


Рис. 1. Специальный комплекс для измерения радиотехнических характеристик конструкций в диапазоне 4-40 ГГц

Для определения материальных характеристик образцов в программный комплекс моделирования и обработки результатов встроено решение задачи нелинейной оптимизации для подбора параметров образца по измеренным данным. Программный блок позволяет определять комплексные значения диэлектрической (ϵ' , ϵ'') и магнитной (μ' , μ'') проницаемостей, а также имеет возможность подбора частотной дисперсии этих параметров. На рисунке 2 (а, б) представлены измеренные частотные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь некоторых материалов, используемых для создания радиопрозрачных конструкций. Для образцов из реакционно-связанного нитрида кремния (РСНК), изготовленных методом 3D-печати, со степенью заполнения материалом 59% обнаружена явно выраженная частотная зависимость диэлектрической проницаемости. Это означает, что при использовании технологии 3D-печати для создания многослойных широкополосных конструкций со слоями с различной степенью заполнения необходимо учитывать дисперсию свойств диэлектрической проницаемости

материала. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь обнаружена для всех образцов. Наиболее заметно тангенс угла диэлектрических потерь с ростом частоты изменяется у стеклокерамики ОТМ-357. Значения тангенса угла диэлектрических потерь кварцевой керамики НИАСИТ и кварцевого стекла совпадают во всём диапазоне частот. На рисунке 2 (в, г) представлены теоретические и экспериментальные угловые зависимости коэффициента передачи (КП) многослойной пластины из нитрида кремния, изготовленной методом 3D-печати, оптимизированной для максимальной радиопрозрачности в полосе частот от 9 до 21 ГГц. Видно хорошее соответствие теоретических и экспериментальных угловых зависимостей широкополосной структуры. Полученные данные могут быть использованы при разработке перспективных изделий радиотехнического назначения работоспособных в широком диапазоне частот и углов падения/отражения/рассеяния СВЧ-сигнала.

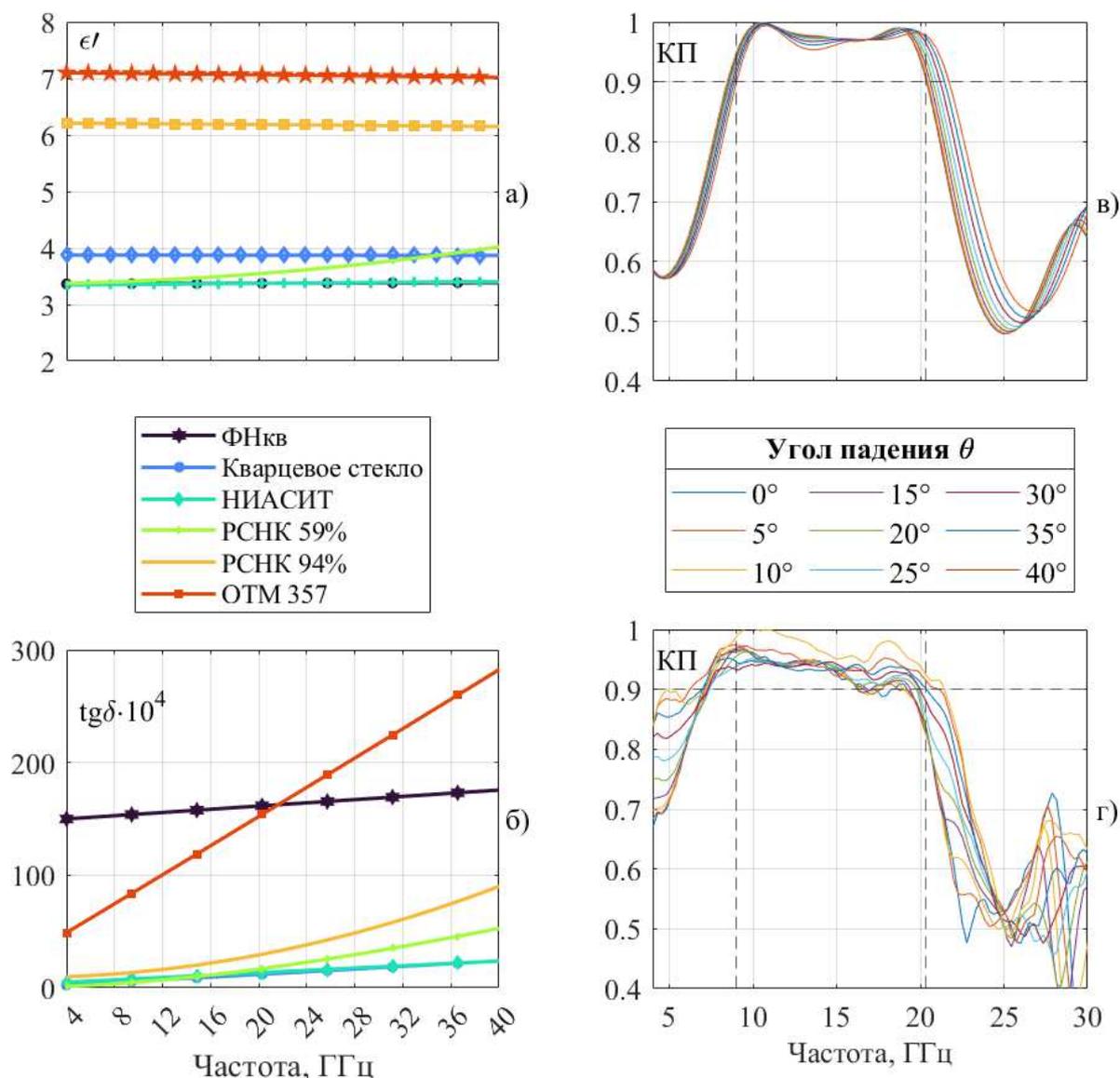


Рис. 2. Экспериментальные зависимости: а) диэлектрической проницаемости и б) тангенса угла диэлектрических потерь от частоты различных материалов; в) теоретические и г) экспериментальные угловые зависимости КП оптимизированной многослойной структуры из нитрида кремния, полученной методом 3D-печати

Применение моделей эффективной среды при решении задач широкополосной радиопрозрачности многослойных сложнопрофильных стенок

А.Е. Жителев, Р.А. Чирков, Р.А. Миронов, М.О. Забейайлов, И.Г. Михайлов, В.С. Зайцев, А.О. Забейайлов, М.Г. Лисаченко

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Email: zabzhaylovmo@technologiya.ru

Современные возможности 3D-печати позволяют создавать материалы с внутренней структурой (пористостью), обладающие, в отличие от сплошных материалов, уникальными характеристиками. В частности, использование 3D-печати для создания радиопрозрачных оболочек/укрытий антенн позволяют решить, в том числе, задачи расширения рабочей полосы частот и увеличение коэффициента прохождения СВЧ излучения. Настоящая работа посвящена проектированию и созданию такого рода конструкций, характеристики слоёв которых подбираются с целью решения указанных выше радиотехнических задач. Контролируемое послойное формирование материала оболочки позволяет управлять эффективными электрическими параметрами каждого слоя в отдельности и изделия в целом. Примерами структур, способных лечь в основу таких изделий, могут служить многослойные структуры с изменяющейся степенью заполнения слоев (рис.1).

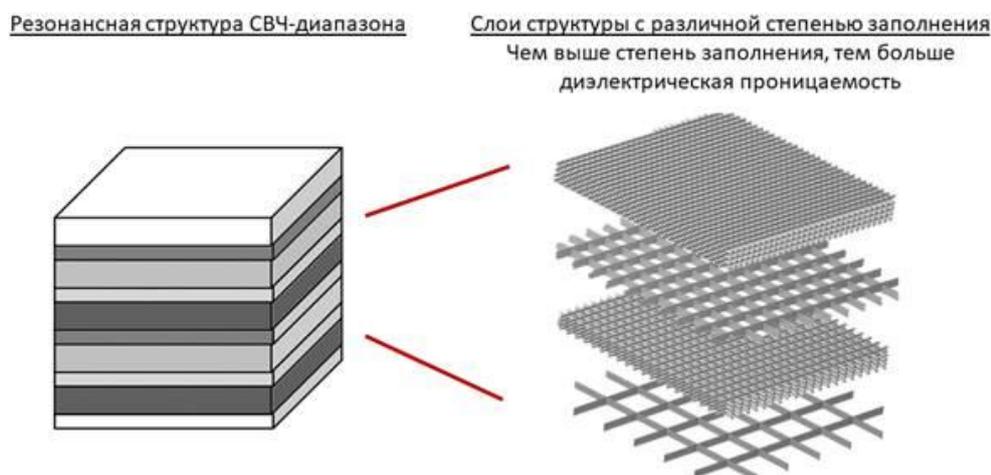


Рис. 1. Многослойная структура СВЧ-диапазона, состоящая из слоев с различной степенью заполнения

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» разработана экспериментальная установка 3D-печати, в основе которой лежит технология послойной экструзии термопластичного шликера, позволяющая в результате процесса 3D-печати получать заготовку («сырец») керамической детали, которая затем проходит стадии удаления связующего и спекания для получения конечного керамического изделия сложной конфигурации. Наиболее перспективным высокотемпературным материалом для формирования многослойных, радиопрозрачных, широкополосных структур является реакционносвязанный нитрид кремния (РСНК), обладающий высокой механической прочностью и стабильностью диэлектрических характеристик, сохраняющихся в широком диапазоне температур. Технологически этот материал отличает отсутствие усадки при обжиге. Именно с помощью РСНК, формованного с применением метода послойной экструзии, получены сложнопрофильные структуры, исследуемые в данной работе.

В рамках работы определялась применимость модели эффективной среды для прогнозирования диэлектрической проницаемости материалов, получаемых методом 3D-печати. Экспериментальные результаты определения эффективной диэлектрической проницаемости (ЭДП) были получены в объёмном цилиндрическом резонаторе (образцы-диски), и методами свободного пространства (образцы-панели) (рис.2). Также на рисунке 2 представлены результаты расчётов ЭДП в зависимости от коэффициента заполнения по моделям эффективной среды: линейной, Максвелла-Гарнетта и модели «с параметром». Показано, что экспериментальные данные согласуются между собой, а модель ЭДП «с параметром» хорошо описывает зависимость ЭДП от относительной плотности материала.

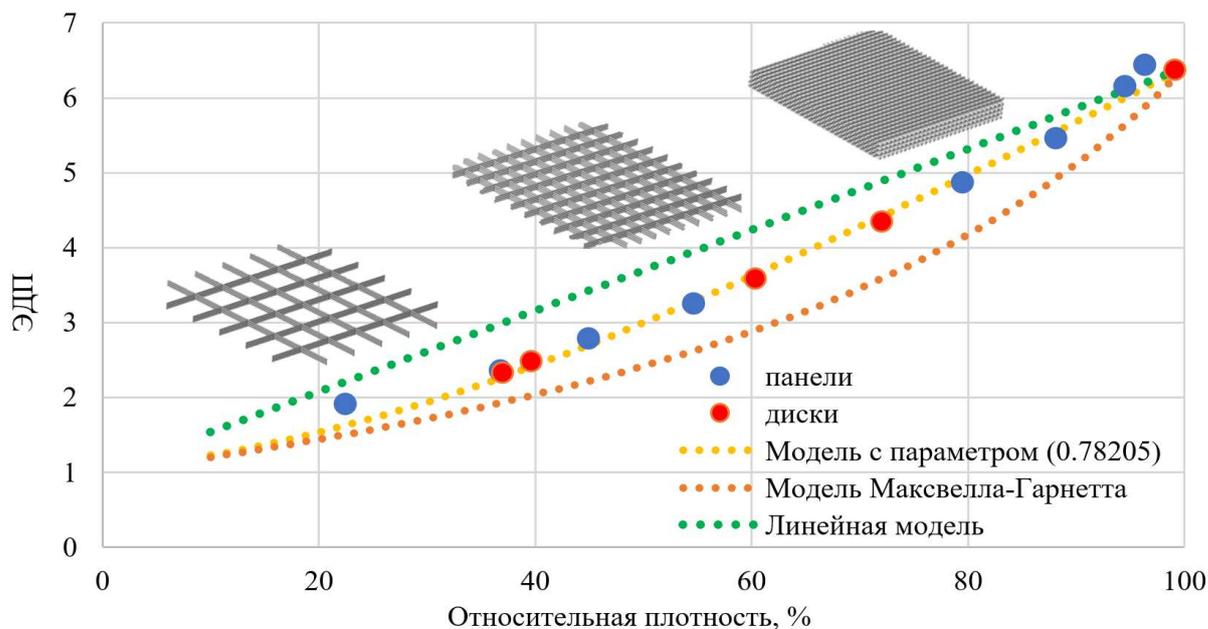


Рис. 2. Зависимость ЭДП образцов от относительной плотности (%)

На основе полученных данных, с применением модели эффективной среды, была синтезирована 14-слойная просветляющая структура для частотного диапазона 10-18 ГГц. На рисунке 3 представлен коэффициент прохождения (КП) такой структуры. Наблюдается совпадение теоретической и экспериментальной зависимости КП в рабочем диапазоне частот.

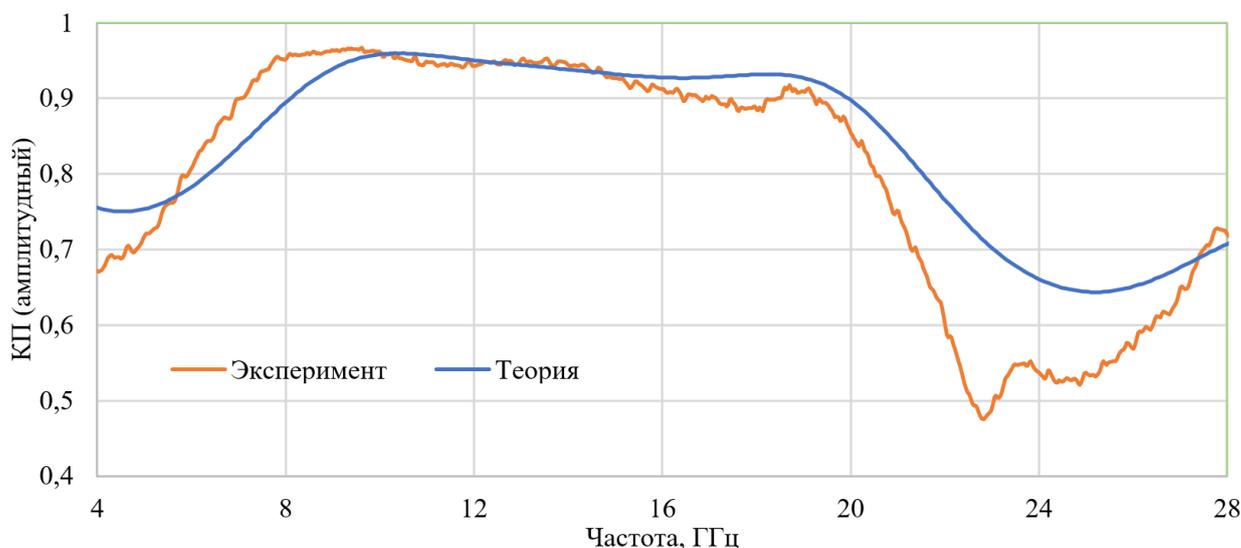


Рис. 3. КП 14-слойного образца

Разведывательный приемник диапазона 1-18 ГГц

Н.Н. Исакович, Д.Г. Булавко, И.Н. Вошко, А.А. Дыдо, Д.А. Кондрашов, И.С. Сурвило
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dmitrybylavko@gmail.com

В докладе рассмотрен способ и схемотехнический вариант построения сверхширокополосного радиоприемника измерительной системы, представлены результаты математического моделирования основных параметров приемного тракта.

Показаны структурная схема и общие характеристики приемника, в том числе динамический диапазон принимаемых сигналов, составляющий 111 дБ, рабочий диапазон частот от 1 до 18 ГГц.

Рассмотрены составные блоки приемника, такие как блок автоматического регулирования мощности с динамическим диапазоном 50 дБ и шагом перестройки 1 дБ, преселектор с шестью полосами пропускания 1-2,5; 2,5-4; 4-6; 6-11; 11-15; 15-18 ГГц и блок преобразования частот с тремя ступенями преобразования. Обоснована структура и приведены параметры каждого из блоков.

Подробно рассмотрена схема преобразования частот с конечной промежуточной частотой 0,75 ГГц и полосой пропускания 500 МГц. Представлены результаты моделирования коэффициента шума, распределения уровня сигнала по тракту приемника в зависимости от уровня входного сигнала и выходного сигнала ПЧ.

Приемник построен по супергетеродинной схеме приема с тремя преобразованиями частоты. В качестве гетеродинов используются синтезаторы частоты, входящие в состав приемника. Рабочий диапазон частот принимаемых сигналов составляет от 1 до 18 ГГц и разбит на поддиапазоны. Динамический диапазон принимаемых сигналов ИС составляет 111 дБ (от -74 до 37 дБм). Для обеспечения такого большого динамического диапазона и защиты последующих каскадов приемника от перегрузок и выхода из строя, на входе приемника используется блок автоматической регулировки усиления (АРУ). Верхняя граница мощности рассчитана на 5 Вт, для защиты приемника используются ограничительные диоды. Входной сигнал проходит ограничительный диод и поступает на ответвитель по мощности, с которого часть мощности измеряется на логарифмическом детекторе и решающее устройство переключает СВЧ ключи между малошумящим усилителем и управляемым аттенуатором. В схеме используется широкополосный МШУ с коэффициентом усиления 17,5 дБ во всем принимаемом диапазоне, коэффициент шума составляет 3 дБ в худших частотных точках диапазона. Полный частотный диапазон приемника разбит на два поддиапазона: от 1 до 6 ГГц и от 6 до 18 ГГц. В свою очередь каждый поддиапазон состоит из трех каналов, содержащих фильтры с полосами пропускания: 1-2,5; 2,5-4; 4-6; 6-11; 11-15; 15-18 ГГц. Основное назначение фильтров – подавление сигналов зеркальных каналов этих частотных участков. Ослабление помех от зеркальных каналов составляет не менее 50 дБ, а ослабление полезных сигналов, вносимое фильтрами, – 2,5 дБ. В каждом из каналов преселектора используются МШУ, с помощью которых повышаются энергетические уровни принимаемых сигналов. Выбор одного из шести каналов преселектора осуществляется с помощью ключей СВЧ по сигналам блока управления ИС для выбранной частоты.

С целью определения необходимых параметров приемника разработана математическая модель приемника. Исходя из выбранных комплектующих элементов, узлов и блоков приемника, определены их параметры. Эти параметры и графическая модель использовались в качестве исходных данных для моделирования.

В докладе представлены результаты моделирования коэффициента шума, распределения уровня сигнала по тракту приемника в зависимости от уровня входного сигнала и сигнала ПЧ на его выходе.

Способы построения устройств ближней радиолокации на основе сигналов с частотной модуляцией

А.В. Ворошень, **А.И. Волковец**, Д.А. Кондрашов, Я.В. Рошупкин, А.В. Турло
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: volkovets@bsuir.by

Наряду с непрерывным увеличением дальности действия радиолокационных устройств определилась тенденция внедрения радиолокационных принципов в область, требующую решение задач при малых расстояниях. Специфические требования, особенно к техническим решениям в этой области, привели к формированию научного и технического направления систем ближней радиолокации. Характерная особенность систем ближней радиолокации – соизмеримость дальности действия с геометрическими размерами взаимодействующих объектов и с ошибками выдачи результатов измерений.

Измерение дальности и высоты полета объектов является неотъемлемой частью информационной составляющей систем обслуживания летательных аппаратов и авиационных устройств. Наиболее часто используемым является радиолокационный метод на основе применения радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Типовая структурная схема радиовысотомера с ЛЧМ показана на рисунке 1. Отличительной особенностью этой структуры является совмещение функций генератора передатчика и гетеродина приемника, в результате чего система становится когерентной. При преобразовании напряжений излучаемого передающей антенной сигнала и принятого приемной антенной отраженного сигнала в смесителе приемника после обработки фильтром выделяется напряжение разностной частоты $F_{\text{раз}} = f_{\text{изл}} - f_{\text{отр}}$.

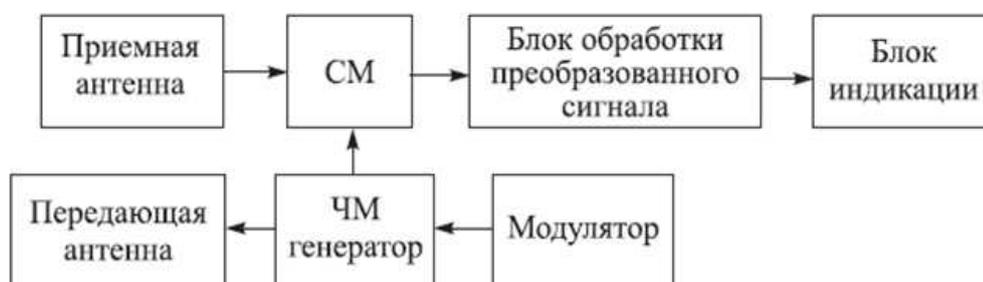


Рис. 1. Типовая структурная схема радиовысотомера с ЛЧМ

Во всех рассматриваемых структурах радиовысотомеров их высокочастотная часть, включающая приемную и передающую антенны, ЧМ генератор и смеситель, является неизменной. Поэтому методы построения радиовысотомеров основываются на методах построения модуляторов, блоков обработки разностного сигнала и индикации. Перечислим эти методы: частотный (спектральный), временной, корреляционный, метод счета переходов через ноль. Частотный метод построения является классическим и основан на фильтровом способе выделения из спектра разностного сигнала заданной его гармоники. Временной метод построения радиовысотомеров основан на измерении временного интервала задержки отраженного сигнала относительно излучаемого. Метод счета переходов через ноль использует связь переходов через нулевое значение амплитуды разностного сигнала с величиной измеряемой высоты.

В докладе рассматриваются структуры устройств, построенных по перечисленным методам, их достоинства и недостатки.

Способ взаимной привязки передающих и приемной позиций малобазовой многопозиционной РЛС по времени, частоте и начальной фазе, устранение слепых скоростей в системах СДЦ

П.И. Оргиш, С.А. Горшков, В.Н. Завиженец, А.И. Волковец
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: sedbox@mail.ru

Одно из перспективных направлений радиолокации – переход к многопозиционным радиолокационным системам (МП РЛС), состоящим из разнесенных в пространстве передающих, приемных и (или) приемо-передающих позиций РЛС (антенн, модулей), которые совместно ведут радиолокационное наблюдение целей. Следует отметить, что все преимущества МП РЛС в полной мере могут быть реализованы только при когерентной совместной обработке сигналов от разных позиций. Однако совместная обработка сигналов на радиочастоте возможна только в пространственно-когерентных МП РЛС, в которых необходима взаимная привязка разнесенных позиций по времени, частоте (опорным частотам передатчиков и гетеродинов приемников) и высокочастотной фазе. Необходимость такой привязки требует существенного усложнения аппаратуры передающих позиций и повышения общей стоимости системы. Однако данных усложнений можно избежать, если для привязки по времени, частоте и начальной фазе использовать прямые сигналы передающих позиций. Очевидно, что сигналы, излученные передающими позициями и распространяющиеся по кратчайшему пути к приемной позиции, будут содержать информацию о расстояниях между передатчиками и приемником, о частоте несущих сигналов и о начальных фазах. Данную информацию можно использовать для расчета поправочных весовых коэффициентов при совместной обработке отраженных от цели сигналов. В этом случае основное требование к генераторам несущих колебаний передающих позиций заключается в обеспечении требуемой относительной нестабильности частоты минимум в течении одного периода повторения излучения зондирующего сигнала. Данный способ применим только для малобазовых МП РЛС с одной приемной и несколькими передающими позициями. У большебазовых систем проблематично обеспечить прямую видимость между передающими и приемной позициями, а также минимальную требуемую дальность цели. Кроме того, при наличии нескольких разнесенных приемников их гетеродины нельзя синхронизировать при помощи прямых сигналов передающих позиций.

Рассмотрены импульсно-доплеровские РЛС обзора с низкой частотой повторения импульсов, реализующие попачечную смену периодов повторения и несущих частот для формирования квазиравномерной амплитудно-скоростной характеристики (АСХ) СДЦ. Когерентную последовательность зондирующих импульсов с фиксированными значениями периода повторения и частоты несущего колебания в дальнейшем будем называть подпачкой. Несколько подпачек, с различными частотно-временными параметрами и одинаковым числом импульсов в каждой, составляют пачку принимаемых импульсов в течение времени наблюдения. Такой ЗС, решает задачу устранения слепых скоростей в системах СДЦ. Задача решается в несколько этапов. На первом этапе выбирается опорная частота из диапазона перестройки несущих частот, задается средний уровень АСХ, определяется минимальный (из максимальной дальности действия) период повторения импульсов, а также предварительные значения заданного числа N остальных периодов. Затем определяются безразмерные частотно-временные коэффициенты (ЧВК), равные произведению опорного значения несущей частоты и i -го периода повторения ($i=1 \dots N$). На следующем этапе вычисляются координаты, ограничивающие область на плоскости несущая частота – период повторения. Эта область определена верхней и нижней несущими частотами, а также минимальным заданным периодом повторения. Заключительный этап предусматривает расчет частотно-временных параметров для группировки однотипных РЛС, обеспечивающих, наряду с максимизацией среднего уровня провалов в АСХ, близкое к максимальному числу импульсов в подпачках, электромагнитную совместимость радаров.

Алгоритмы распознавания и идентификационная матрица сигнальных портретов радиолокаторов

Д.В. Архипенков, **И.И. Забеньков**

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: zabenkov@bsuir.by

Основными видами внутриимпульсной модуляции, применяемой в радиолокационных станциях (РЛС), являются частотная модуляция (ЧМ), частотная и фазовая манипуляция и их комбинации. Наиболее распространенной является ЧМ с линейно изменяющейся частотой (ЛЧМ). Для кодирования фазы зондирующего сигнала широко используются коды Баркера, многофазные коды Франка, P1, P2, P3 и P4, а также многопозиционные коды T1, T2, T3 и T4.

Интенсивное использование ведущими зарубежными странами современных РЛС приводит к необходимости совершенствования известных и разработки новых методов обработки их сигналов с целью последующего распознавания типа источника излучения. В настоящее время в средствах радиотехнического контроля для решения этой задачи используется процедура частотно-временного анализа, в основе которого лежит реализация динамического (оконного) преобразования Фурье (ДПФ). Оно является предпочтительным при анализе как широкополосных, так и узкополосных излучений. Но из-за невозможности получения одновременно высокого разрешения по времени и частоте применение только данного преобразования не позволяет получить набор признаков, обеспечивающих достоверное распознавание типа РЛС.

Одним из самых информативных параметров сигнала радиолокационных станций является его несущая частота. Измерение и запоминание несущей частоты разведываемого радиоэлектронного устройства является одной из наиболее важных функций станций радиоразведки и радиомониторинга.

Используя понятие аналитического сигнала, периодический сигнал можно представить через огибающую и фазу, либо квадратурные компоненты, что дает возможность расчета мгновенной частоты. Разработанный алгоритм позволяет измерить такие параметры сигнала с ЛЧМ, как крутизна, длительность импульса, период повторения, центральная частота, ширина спектра.

В докладе показана возможность реализации алгоритма измерения мгновенной частоты дополненным двойным дифференцированием. Первое дифференцирование позволяет измерить крутизну сигнала как выборочное среднее, второе дифференцирование – временные точки (длительность импульса, период повторения).

Представлены признаки сигнальных портретов для симметричного и несимметричного сигнала с ЛЧМ, а также при отсутствии внутриимпульсной модуляции. Результаты моделирования показали, что при соотношении частоты дискретизации к полосе сигнала, равной 2,3 раза, ошибка измерения крутизны сигнала составляет 25%, а при 11-8,8%; результаты моделирования проводились при соотношении сигнал/шум, равном 10 дБ.

В докладе представлен обзор методов идентификации основных сигналов, используемых РЛС; представлены алгоритм и результаты моделирования алгоритма для идентификации ЧМ сигналов при разных значениях отношения сигнал/шум, алгоритм и результаты моделирования алгоритма для идентификации сигналов с кодофазовой манипуляцией и импульсной модуляцией при различных значениях отношения сигнал/шум. На основе полученных результатов разработана матрица идентификации сигнальных портретов различных классов радиолокаторов.

Измерительный гармонический смеситель в миллиметровом диапазоне длин волн

В.П. Бондаренко, **И.А. Захаров**, М.А. Боровская, А.А. Попов, С.В. Редько
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com

Миллиметровый диапазон длин волн является одним из наиболее перспективных для развития различных технологий, включая телекоммуникации, медицину, радиолокацию и навигацию, и многие другие, для эффективного использования этого диапазона необходимо иметь соответствующие измерительные устройства. Одним из важнейших узлов таких устройств является измерительный гармонический смеситель, с помощью которого производится перенос сигнала из высокочастотной области в низкочастотную, пригодную для последующей обработки.

В данном докладе рассматривается измерительный гармонический смеситель, функциональная схема которого представлена на рисунке 1.

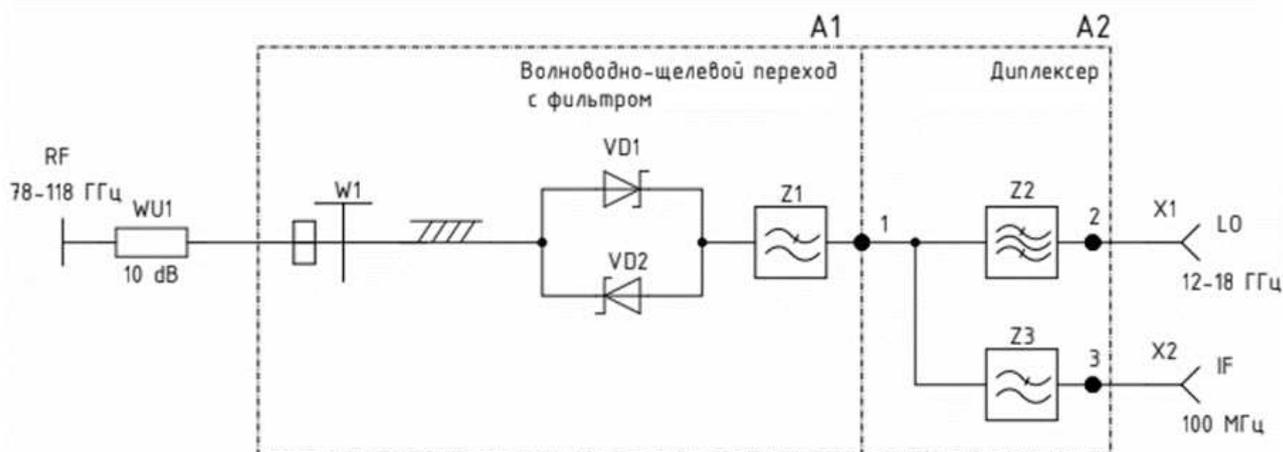


Рис. 1. Функциональная схема гармонического смесителя

Схему смесителя можно условно разделить на 3 части: согласующая часть, волноводно-щелевой переход, диплексер. Согласующая часть представляет собой волноводный аттенюатор WU1 номиналом 10 дБ с поглощающим клином из слюды с резистивным слоем. Главная задача данного аттенюатора – обеспечение согласования минимального уровня коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) на RF входе. Волноводно-щелевой переход W1 обеспечивает переход с волноводной линии передачи на щелевую линию, в которой расположена диодная секция VD1-VD2 на основе диодов Шоттки и фильтр нижних частот Z1 для дополнительного подавления входного СВЧ сигнала. Диплексер необходим для частотного разделения каналов LO и IF при помощи полосового фильтра Z2, соответствующего полосе рабочих частот гетеродина и низкочастотного фильтра Z3 служащего для уменьшения просачивания сигнала из канала гетеродина.

Определение параметров измерительного гармонического смесителя проводилось с помощью измерительного стенда, структурная схема которого представлена на рисунке 2.

В качестве источника RF-сигнала был использован источник сигнала в диапазоне частот 78,33-118,1 ГГц, в качестве источника LO-сигнала был использован Г4-МВМ-20, в качестве приемника сигнала IF – анализатор спектра Anritsu MS2830A.

Полученные измеренные технические характеристики разрабатываемого смесителя со встроенным диплексером приведены в таблице 1.

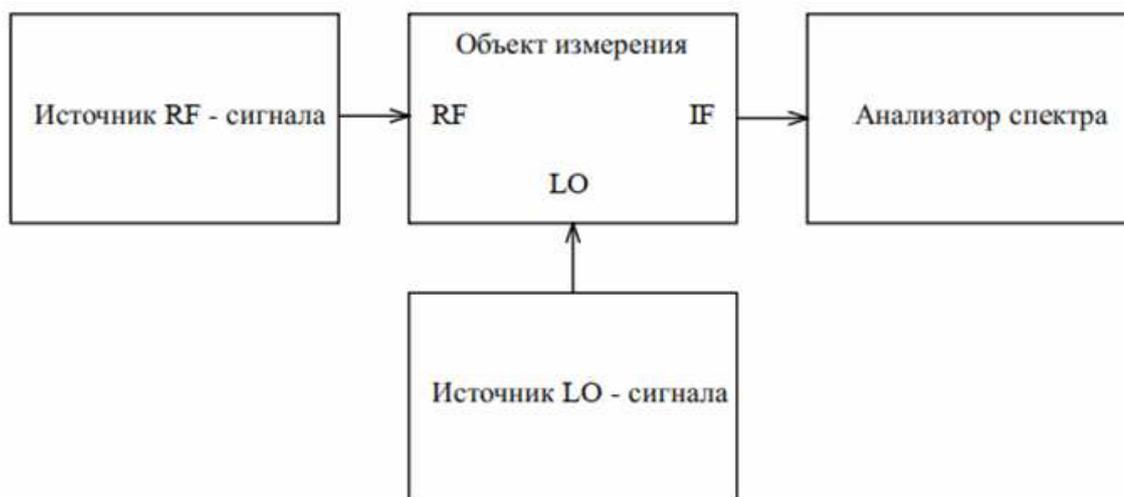


Рис. 2. Структурная схема измерительного стенда

Таблица 1. Технические характеристики разрабатываемого смесителя

Наименование параметра	Техническая характеристика
Диапазон рабочих частот канала RF, ГГц	от 78,33 до 118,1
Сечение волновода, мм	2,4×1,2
Диапазон рабочих частот канала LO, ГГц	от 11,19 до 16,87
Номер гармоники	7
Уровень мощности канала LO, дБм	от +10 до +13
Диапазон рабочих частот канала IF, ГГц	0,1-1,0
Порт RF	Прямоугольный фланец по ГОСТ 13317–89
Порт LO и IF	Коаксиальный, SMA
Потери преобразования, дБ	от 18 до 30
Допустимая входная мощность, мВт	не более 1,0

Внешний вид смесителя показан на рисунке 3.



Рис. 3. Внешний вид разработанного смесителя

Формирование результирующей оценки по совокупности неоднозначных в условиях априорной неопределённости и радиоэлектронное подавление радиоэлектронных средств

И.В. Чегирь, П.В. Иванишин, С.А. Горшков, С.Ю. Седышев, В.Н. Завиженец
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: sedbox@mail.ru

Рассмотрены импульсно-доплеровские РЛС обзора пространства, предназначенные для обнаружения, определения сферических координат (дальность, азимут и угол места) и радиальной скорости целей. Вместе с тем существует проблема, обусловленная необходимостью обеспечения однозначной требуемой дальности РЛС одновременно с однозначностью измерения радиальной скорости, предъявляющая противоречивые требования к периоду повторения импульсов. Кроме того, дополнительные сложности возникают вследствие ограниченного времени наблюдения и функционирования в многоцелевой воздушно-помеховой обстановке. В работе предложено использовать попарную вобуляцию периода повторения импульсов при минимальном его значении, обеспечивающем однозначное измерение на максимальной требуемой дальности. В результате обработки формируются неоднозначные оценки частоты Доплера целей. Причем для каждой когерентной подпачки характерно своё значение ошибки оценивания, определяемой рядом факторов. В каждом элементе разрешения по дальности вначале формируются возможные значения из области допустимых значений частоты Доплера. Затем полученные квадраты модулей функций правдоподобия размножаются во всем требуемом диапазоне радиальных скоростей. Результирующая (итоговая) функция правдоподобия формируется как взаимное произведение всех размноженных частных функций правдоподобия. С целью уменьшения вычислительной нагрузки предложен подход, реализующий поиск участков компактно сгруппированных частных функций правдоподобия. Только на этих участках осуществляется взаимное перемножение гауссовых функций правдоподобия. Результирующая оценка формируется как аргумент глобального максимума итоговой функции правдоподобия. Изложенный подход является модификацией широко известного нониусного метода устранения неоднозначности, известного только для пар полученных неоднозначных оценок.

Радиоэлектронное подавление (РЭП) радиоэлектронных средств (РЭС), является одной из важнейших составляющих радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Наибольшее развитие средства РЭП получили в боевой авиации. Оснащение всех средств нападения индивидуальными средствами защиты – приоритетная тенденция развития. Маскирующие помехи для подавления импульсно-доплеровских радиолокационных станций (ИД РЛС) сопровождения целей – это активные шумовые помехи (прицельные, заградительные), доплеровские шумы, а также ограниченные по дальности коррелированные ответные шумовые помехи (ОШП), полученные методом ретрансляции сигнала РЛС в станции помех с его растяжением по длительности и модуляцией по частоте или фазе. Такая помеха формируется в два этапа – вначале генерируется непрерывный узкополосный (коррелированный) шум в заданной полосе $\Delta f_{\text{ОШП}}$. Полоса частот задается цифровым фильтром нижних частот (ЦФНЧ) на основе информации из устройства измерения параметров и управления. Затем полученные из принятой последовательности радиоимпульсы на рабочей частоте РЛС с учетом частоты Доплера цели $F_{\text{Дс}}$ растягиваются по длительности в цифровом устройстве размножения по дальности на величину, не превышающую период повторения подавляемой РЛС. Использование цифрового устройства размножения позволяет получить импульс практически любой длительности. Полученные таким образом импульсы модулируются по амплитуде и фазе в соответствующем устройстве узкополосным (коррелированным) шумом. Ограничение ширины спектра АШП позволяет использовать передающее устройство САП ограниченной мощности (до десятков ватт) практически во всем диапазоне дальностей.

Проектирования волноводного делителя мощности

А.А. Копшай

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: kopshai@tut.by

Современный уровень развития механической обработки материалов, а также достижения в области СВЧ электроники позволяют создавать компактные многоканальные устройства СВЧ, объединяющие несколько функциональных узлов в едином, миниатюризованном корпусе. В процессе проектирования таких устройств важное место занимают процессы оптимизации элементов линии передачи сигналов, а также вопросы, связанные с производственными допусками на изготовление механических деталей, применяемых в таких устройствах.

В диапазоне частот 78-118 ГГц наиболее распространённой линией передачи является прямоугольный волновод. Поскольку длина волны сигнала приближается к единицам миллиметров, при конструировании устройств данного диапазона следует учитывать особенности металлообработки: размеры инструмента, характер шероховатости получаемой поверхности, допуски изготовления. Так, существенный вклад в распространение радиоволны в волноводе начинают вносить радиусные скругления в углах волноводной структуры, обеспечиваемые фрезерным инструментом. С другой стороны, применение таких устройств, как волноводные диафрагмы требует дополнительных расчётов, поскольку толщина материала, технологически приемлемого для создания диафрагм, также становится сравнимой с длиной волны.

Наиболее проблемным элементом многоканальных волноводных устройств является делитель мощности. Делитель должен обеспечивать равномерное разделение входной мощности между потребителями, минимальный коэффициент потерь, максимальную развязку между потребителями. Как правило, делители мощности выполняются в виде последовательно включённых секций деления мощности, обычно пополам. Такие схемы построения делителя мощности приводят к тому, что электрическая длина линии связи между ступенями деления является переменной величиной, что, в свою очередь, усложняет согласование текущей ступени делителя с предыдущей.

Целью работы является описание процесса проектирования волноводного делителя мощности в конструкции многоканального смесителя на частоте 94 ГГц; определение оптимальных геометрических размеров элементов делителя, обеспечивающих минимальные значения потерь на рассогласование, максимальную развязку между выходами; определение оптимальных значений допусков на толщину и плоскостность механических деталей, обеспечивающих расчётные параметры. Также решается вопрос согласования входов смесителя с антенной системой и делителем посредством диэлектрических вставок в волноводном канале.

Оптимизация конструкции делителя основывается на решении уравнений Максвелла методом конечных элементов в пакете Ansys HFSS для параметрической модели геометрии элементов Т-образного делителя мощности 1 к 2, с последующим объединением полученной оптимальной геометрии в многополюсник с 2^n количеством выходов. В работе описаны конкретные особенности построения трёхмерной модели волновода в пакете, влияющие на устойчивость решения. Для определения допусков изготовления применяется метод Монте-Карло вкпе с аналитическими формулами, определяющими потери, вызванные рассовмещением волноводных каналов.

Практическим результатом работы является применение полученной конструкции в опытном образце 64-канального смесителя, выполненном Центром 1.9 НИЧ БГУИР.

Способы построения устройств ближней радиолокации на основе сигналов с частотной модуляцией

А.В. Гусинский, С.А. Лукашевич, С.С. Солонович

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: lukashevichs@bsuir.by

В современных условиях обеспечения национальной безопасности и повышения эффективности вооружения одним из ключевых направлений является разработка систем наведения, обладающих высокой точностью и надежностью. Пассивные системы наведения, использующие амплитудно-фазовый метод пеленгации, представляют собой перспективное направление в развитии оборонных технологий. В докладе рассматриваются основные преимущества таких систем.

1. Сканирование радиочастотного спектра: мониторинг спектра (система осуществляет сканирование радиочастотного спектра полосами по 500 МГц для поиска потенциальных сигналов); анализ характеристик (детектированные сигналы анализируются на предмет совпадения по периоду, длительности, поляризации, мощности и типу модуляции с параметрами целеуказания).

2. Описание амплитудно-фазового метода пеленгации: принцип действия (использование различий в амплитуде и фазе радиосигналов от активной цели для определения её точного местоположения); преимущества метода (высокая точность и устойчивость к помехам, а также возможность использования в сложных условиях радиопомех).

3. Техническая реализация: оборудование (обзор ключевых компонентов системы, таких как аналого-цифровые преобразователи (АЦП), программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), микроконтроллеры и усилители); интеграция с существующими системами (возможности применения в современных комплексах вооружения); реализованный прототип (разработан и протестирован прототип системы, демонстрирующий практическую реализацию и эффективность метода в полевых условиях).

4. Функциональные возможности: диапазон частот (система эффективно работает в диапазоне от 1 до 18 ГГц, что обеспечивает универсальность и гибкость применения; определение и классификация сигналов: система способна обнаруживать наличие сигналов и классифицировать их по различным параметрам, включая ширину спектра, тип модуляции, периоды и длительность импульса, что позволяет более точно идентифицировать и оценивать потенциальные угрозы; использование приёмных антенн с неравномерными диаграммами направленности: позволяет адаптировать систему к специфическим условиям эксплуатации и расширяет её функциональные возможности.

5. Повышение точности наведения: примеры успешных тестов и опытного применения, демонстрирующие рост точности при использовании амплитудно-фазового метода пеленгации.; сравнительный анализ с традиционными методами наведения, выявление преимуществ в условиях высокой загруженности радиочастотного спектра.

6. Потенциальные применения: военные технологии (применение в системах ПВО и ракетных комплексах); гражданские сферы (перспективы использования в навигации и радиолокации для спасательных операций).

Пассивные системы наведения, основанные на амплитудно-фазовом методе пеленгации, демонстрируют значительный потенциал в повышении точности и надежности современных вооружений. Возможность определения и классификации сигналов по различным параметрам, а также использование приёмных антенн с неравномерными диаграммами направленности, наряду с наличием реализованного прототипа, значительно расширяют функциональность и подтверждают жизнеспособность концепции в реальных условиях. Дальнейшие исследования и разработки в этом направлении позволят углубить понимание и расширить функциональность данных систем.

Совершенствование термоэлектрического преобразователя мощности

М.С. Орабей, А.Н. Луферов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: aliaksei.luferau@gmail.com

В докладе представлены следующие усовершенствования термоэлектрического преобразователя мощности.

1. Нижняя полость в подложке. Для сведения к минимуму тепловых и электромагнитных потерь производится частичное удаление подложки в месте расположения поглощающих резисторов и термоэлектрической структуры (Back Cavity), с помощью микрообработки или травления.

2. Дополнительный тепловой перенос. Применение дополнительного пути распространения теплового потока в виде плавающей тепловой вставки (Floating Thermal Slug).

3. Термостабилизация холодных концов термопар. Рассмотреть возможность термостабилизировать холодные концы термопар при помощи дополнительного слоя.

4. Оптимизация батареи термопар. Убедиться, что термопары расположены на оптимальном расстоянии от поглощающих резисторов и имеют оптимальную длину (расстояние между горячими и холодными спаями термопар). Рассмотреть вариант двухуровневого расположения поглощающих резисторов и термопар. Расчёт, проектирование и симуляция различных конфигураций резисторы-батарея термопар.

5. Согласование импеданса. Характеристический импеданс копланарной линии (Coplanar waveguide CPW) должен совпадать с волновым импедансом волновода. Это требует тщательного проектирования и оптимизации размеров CPW (ширина зазора, ширина полосы и свойства подложки). Определить характеристический импеданс режима волновода (обычно TE₁₀ для прямоугольных волноводов). Используя аналитические формулы или инструменты моделирования для проектирования CPW с таким же импедансом, как у волновода. Убедиться, что материал и толщина подложки CPW совместимы с рабочей частотой и уровнями мощности.

6. Проектирование перехода. Проектирование и симуляция плавного переход от волновода к CPW. Цель состоит в том, чтобы минимизировать отражения и обеспечить эффективную передачу СВЧ энергии. Спроектировать сужение или ступенчатый переход от волновода к CPW. Смоделировать переходную структуру для минимизации отражения и оптимизации передачи СВЧ мощности.

7. Волноводные согласующие элементы. Если переход волновод-CPW не идеален, требуется разработка и симуляция согласующих элементов между волноводом и CPW.

8. Расположение волноводной вставки. Убедиться, что продольная волноводная вставка расположена оптимально внутри волновода. Ее размещение влияет на распределение электромагнитного поля и, следовательно, на эффективность передачи СВЧ мощности в нагрузку. Проверить диэлектрические свойства подложки с целью минимизации отражений. Разместить диэлектрическую пластину для максимизации эффективности передачи СВЧ мощности. Смоделировать волновод с диэлектрической пластиной для обеспечения минимального отражения.

9. Поглощающие резисторы. Убедиться, что поглощающие резисторы правильно размещены и согласованы с CPW для эффективного рассеивания мощности. Резисторы должны иметь сопротивление, равное характеристическому импедансу CPW, чтобы предотвратить отражения на конечном участке.

Адаптивный обнаружитель сигнала, оптимальный по весовому критерию

С.А. Габец, С.Ю. Седышев, С.В. Козлов, П.В. Иванишин
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: sedbox@mail.ru

При решении задачи обнаружения сигнала на фоне помех адаптивный обнаружитель должен выработать решение о его наличии или отсутствии в произвольном элементе разрешения РЛС. Решение принимается по результатам сравнения отношения правдоподобия с порогом обнаружения. Уровень порога обнаружения устанавливается согласно выбранному критерию оптимальности с заданными показателями качества. Качество принятия решения характеризуется риском принятия решения (1):

$$R = r_{00}P(A_0) + r_{01}P(A_0) + (r_{10} - r_{00})P(A_0)F - (r_{01} - r_{11})P(A_1)D, \quad (1)$$

где r_{ij} – стоимость решения i при условии j , $i = 1$ – решение цель есть, $i = 0$ – решение цели нет, $j = 1$ – условие цель есть, $j = 0$ – условие цели нет;

$P(A_0)$ – априорная вероятность отсутствия цели в элементе разрешения;

$P(A_1)$ – априорная вероятность наличия цели в элементе разрешения;

D – условная вероятность правильного обнаружения сигнала;

F – условная вероятность ложной тревоги в элементе разрешения.

Если выражение (1) привести к виду:

$$R = r_{00}P(A_0) + r_{01}P(A_0) + l_0F - D, \quad l_0 = \frac{(r_{10} - r_{00})P(A_0)}{(r_{01} - r_{11})P(A_1)}, \quad (2)$$

то получим весовой критерий оптимальности обнаружителя:

$$l_0F - D = \min, \quad \text{или} \quad D - l_0F = \max. \quad (3)$$

Из выражений (3) видно, что использование условных вероятностей F и D позволяет вести необходимые расчеты при использовании данных не об априорных вероятностях $P(A_0)$ и $P(A_1)$, а об их отношении. Таким образом, весовой критерий (3) является другой формой записи критерия минимума среднего риска (1) и является обобщенным критерием.

В радиолокационных задачах обнаружения наиболее распространенным является критерий Неймана-Пирсона (КНП). При его использовании минимизируется не средний риск, а максимизируется условная вероятность правильного обнаружения сигнала при фиксации вероятности ложной тревоги за счет выбора соответствующего порога обнаружения. Таким образом, порог обнаружения, который рассчитывается исходя из КНП, не может быть оптимальным.

Так как вероятность ложной тревоги и правильного обнаружения зависят от уровня порога обнаружения, весовой критерий (3) обретает вид:

$$R(\lambda_*) = l_0F(\lambda_*) - D(\lambda_*) \rightarrow \min. \quad (4)$$

где

$$F = F(\lambda_*) = \int_{\lambda_*}^{+\infty} p_0(f)df, \quad D = D(\lambda_*) = \int_{\lambda_*}^{+\infty} p_1(f)df, \quad (5)$$

Порог обнаружения λ_* , который минимизирует (4), будет оптимальным по весовому критерию (3). Для нахождения оптимального порога обнаружения необходимо продифференцировать уравнение (5) по λ_* и решить уравнение

$$dR(\lambda_*) / d\lambda_* = 0. \quad (6)$$

Алгоритм формирования оптимального порога (6) является универсальным, поскольку позволяет учесть любые особенности реализации этапов обработки сигнала в обнаружителе РЛС. Сравнение результатов работы обнаружителя с оптимальным порогом и обнаружителя с порогом по КНП показало, что обнаружитель с оптимальным порогом позволяет улучшить обнаружение целей с малым ОСП, обеспечить беспровальное сопровождение их траекторий на фоне остатков компенсации мешающих отражений.

Синтезатор радиолокационных сигналов в диапазоне частот 1-18 (18-37) ГГц

И.И. Забеньков, С.С. Солонович

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: solonovichse@gmail.com

При построении структур синтезаторов СВЧ сигналов наиболее часто встречается структура синтезатора частоты, использующего кольцо подсистемы фазовой автоподстройки частоты, позволяющая реализовать управление генератором, управляемым напряжением (ГУН), до частот в десятки ГГц. Структурная схема такого синтезатора содержит опорный генератор, блок подсистемы фазовой автоподстройки частоты, генератор, управляемый напряжением, I-Q модулятор (квадратурный преобразователь), управление уровнем с автоматической регулировкой усиления и ступенчатый аттенюатор.

При этом частота сравнения опорного генератора и генератора, управляемого напряжением в частотно-фазовом детекторе достигает сотен мегагерц. Но даже при таких параметрах кольца подсистемы фазовой автоподстройки частоты, время установления (переключения) частоты всего генератора сигналов по сравнению со временем установления частоты опорным генератором резко возрастает из-за ограничений по устойчивости на полосу пропускания фильтра нижней частоты подсистемы фазовой автоподстройки частоты, что является недостатком такого способа.

Актуальной задачей является повышение чистоты спектра выходного сигнала генератора квадратурных сигналов и снижение времени включения/выключения сигнала при необходимости оперативного изменения его частоты.

Целью настоящей разработки является создание синтезатора радиолокационных сигналов в диапазоне частот 1-18 (18-37) ГГц с улучшенной чистотой спектра выходного сигнала и снижением времени включения/выключения сигнала при необходимости оперативного изменения его частоты. Принципом построения синтезатора является классическая структура генерации сверхвысокочастотных сигналов аналоговым методом синтеза на основе подсистемы фазовой автоподстройки частоты.

Для получения синтезированных сигналов применяются операции генерации опорным генератором и ГУН сигналов, их сравнение после деления на N частоты сигнала ГУН и на M в частотно-фазовом детекторе, который вырабатывает после фильтрации управляющее напряжение, подаваемое на управляющий вход ГУН. На его выходе получается высокочастотный сигнал, уровень которого регулируется, усиливается по мощности, подается на детектор автоматической регулировки уровня и через ступенчатый аттенюатор поступает на выход векторного генератора.

Частота сравнения опорного генератора и генератора, управляемого напряжением в частотно-фазовом детекторе, достигает сотен мегагерц. При таких параметрах кольца подсистемы фазовой автоподстройки частоты время установления (переключения) частоты всего генератора сигналов по сравнению со временем установления частоты опорным генератором резко возрастает из-за ограничений по устойчивости на полосу пропускания фильтра нижней частоты подсистемы фазовой автоподстройки частоты.

В патенте РБ (авторы Гусинский А.В., Забеньков И.И., Ворошень А.В., Свирид М.С. Генератор квадратурных сигналов. Пол. Реш. от 25.05.2024 г.) предложено решение указанной задачи. Известно, что деление частоты генераторов на N -раз приводит к улучшению чистоты спектра на $20 \lg N$ дБ. Увеличение частоты ГУН и введение в структуру делителей частоты, коэффициент деления которых определяет нужный диапазон частоты генерации и совместно с ФНЧ позволяет производить оперативное включение/переключение не выключением ГУН, а отключением последующих делителей частоты. Это значительно снижает время установления выходного уровня векторного генератора.

Выбор метода интерполяции для повышения пространственного разрешения радиолокационных изображений

А.П. Белошицкий, В.Ю. Цветков, В.Т. Ревин

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: vtsvet@bsuir.by

Радиолокационные изображения (РЛИ) находят широкое применение в различных областях, в том числе при анализе структуры и характеристик материалов. Из-за особенностей конструкции радиоприемных матриц одной из проблем является формирование РЛИ высокого пространственного разрешения в СВЧ-диапазоне.

Для повышения пространственного разрешения РЛИ с СВЧ диапазоне может использоваться совмещение информации от множества РЛИ низкого разрешения, смещенных друг относительно друга на определенную долю пикселя, зависящую от коэффициента масштабирования. Общий алгоритм сверхразрешения является итерационным и позволяет повысить разрешение по вертикали и горизонтали на каждой итерации в два раза, используя пару смещенных на полпикселя друг относительно друга РЛИ низкого разрешения, операции интерполяции и совмещения. Интерполяция необходима для вычисления значений неопределенных пикселей при масштабировании РЛИ низкого разрешения. Для совмещения могут использоваться усреднение, перемножение значений соответствующих интерполированных пикселей и другие операции, обеспечивающие лучший контраст результирующего РЛИ высокого разрешения.

Наиболее распространенными методами интерполяции являются: по значению ближайшего соседа, билинейная, бикубическая. Последние два метода показывают значительно лучшие результаты на изображениях оптического диапазона. Однако РЛИ отличаются наличием большого количества высокочастотных компонент, которые соответствуют «блестящим» точкам объектов. В этой связи актуальной является задача выбора метода интерполяции, позволяющего получать более качественные изображения высокого разрешения.

Для решения данной задачи проведены исследования, основанные на сравнении эталонного РЛИ высокого разрешения размером 32×32 пикселя (рис. 1 а) и РЛИ высокого разрешения размером 32×32 пикселя, восстановленных за одну итерацию по двум РЛИ низкого разрешения размером 16×16 пикселей, смещенных друг относительно друга на полпикселя по вертикали и горизонтали (рис. 1 б).

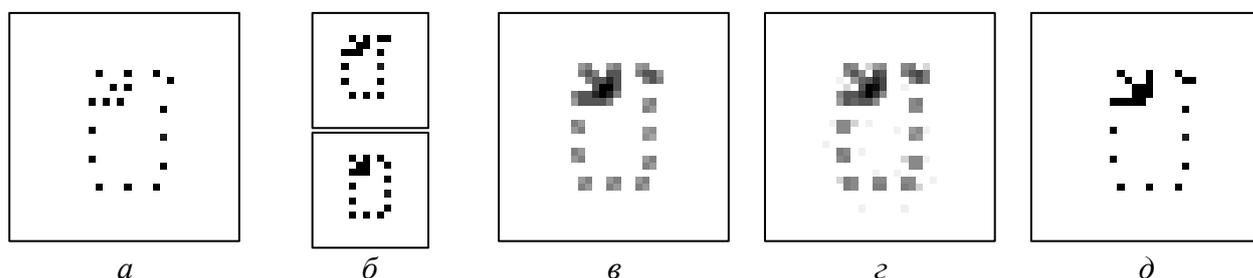


Рис. 1. Повышение разрешения РЛИ в 2 раза:

а – эталонное РЛИ высокого разрешения 32×32 пикселя; *б* – два исходных РЛИ низкого разрешения 16×16 пикселей, смещенные на полпикселя по вертикали и горизонтали (нижнее изображение смещено относительно верхнего на полпикселя вниз и вправо); *в* – РЛИ высокого разрешения 32×32 пикселя, восстановленное с помощью билинейной интерполяции; *г* – РЛИ высокого разрешения 32×32 пикселя, восстановленное с помощью бикубической интерполяции; *д* – РЛИ высокого разрешения 32×32 пикселя, восстановленное с помощью интерполяции по значению ближайшего соседа

Исходные РЛИ низкого разрешения получены в результате децимации и усреднения значений смежных пикселей эталонного изображения высокого разрешения, приведенного на рисунке 1 а. Восстановление РЛИ высокого разрешения осуществлялось с помощью билинейной интерполяции (рис. 1 в), бикубической интерполяции (рис. 1 г) и интерполяции по значению ближайшего соседа (рис. 1 д).

Из рисунка 1 следует, что методы билинейной и бикубической интерполяции дают схожие результаты, для которых характерно размытие элементов РЛИ. Бикубическая интерполяция дает также более заметные ореолы вокруг значимых элементов РЛИ. Интерполяция по значению ближайшего соседа лучше сохраняет детали, обеспечивая также значительно меньшую вычислительную сложность. Все рассмотренные методы имеют меньшие потери деталей вдоль диагонали от левого верхнего до правого нижнего угла изображения, что связано с направлением смещения исходных РЛИ низкого разрешения.

Качество восстановленных РЛИ зависит от числа итераций повышения разрешения, т.к. с каждой итерацией накапливается ошибка интерполяции. На рисунке 2 а показаны четыре исходных РЛИ низкого разрешения 8×8 пикселей, смещенные на четверть пикселя по вертикали и горизонтали друг относительно друга, которые получены из тестового эталонного изображения, приведенного на рисунке 1 а, с помощью децимации и усреднения значений смежных пикселей. На первой итерации на основе интерполяции и последующего комбинирования первого с третьим и второго с четвертым РЛИ низкого разрешения 8×8 пикселей формируются два изображения с высоким разрешением 16×16 пикселей. На второй итерации эта пара изображений используется для формирования РЛИ высокого разрешения 32×32 пикселя. РЛИ, получаемые в процессе повышения разрешения с помощью интерполяции по значению ближайшего соседа и бикубической интерполяции показаны на рисунках 2 б и 2 в, соответственно.

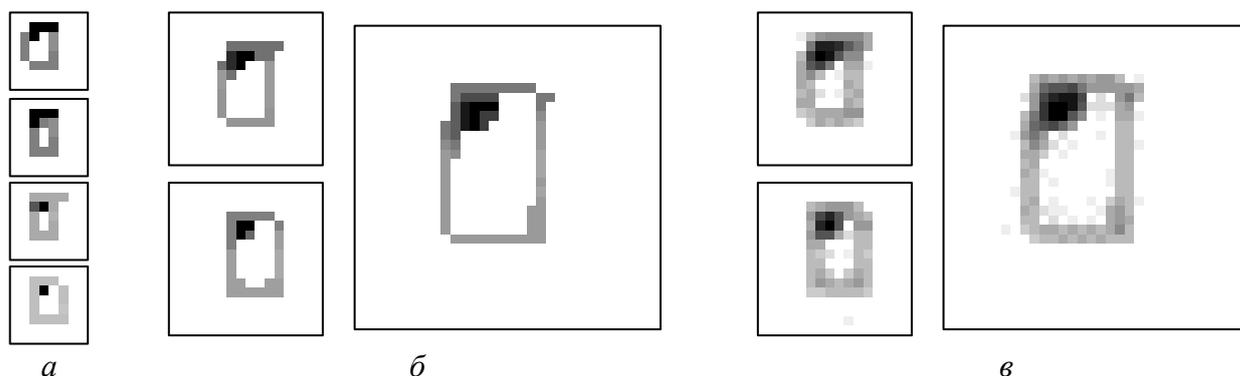


Рис. 2. Повышение разрешения РЛИ в 4 раза:

а – четыре исходных РЛИ низкого разрешения 8×8 пикселей, смещенные на четверть пикселя по вертикали и горизонтали (нижнее изображение смещено относительно верхнего на четверть пикселя вниз и вправо); *б* – два РЛИ 16×16 пикселей и одно РЛИ 32×32 пикселя, восстановленные с помощью интерполяции по значению ближайшего соседа; *в* – два РЛИ 16×16 пикселей и одно РЛИ 32×32 пикселя, восстановленные с помощью бикубической интерполяции

Из рис. 2 следует, что итеративное повышение разрешения РЛИ приводит к накоплению ошибок из-за интерполяции. Сопоставление РЛИ высокого разрешения 32×32 пикселя, приведенного на рисунке 1 а, с РЛИ высокого разрешения 32×32 пикселя, приведенными на рисунках 2 б и 2 в, показывает, что бикубическая интерполяция приводит к накоплению бóльшей ошибки, что связано с использованием большого количества соседних пикселей для формирования значений интерполируемых пикселей. Использование интерполяции по значению ближайшего соседнего пикселя позволяет повысить точность передачи элементов РЛИ и значительно снизить вычислительную сложность повышения разрешения.

Материалы и изделия на основе $ZrO_2-Y_2O_3$ для высокотемпературного применения

А.Б. Лисафин, Р.Ю. Куфтырев

ООО «Технокерамика», Верховье, Калужская обл., Россия

E-mail: a.lisafin@technokeramika.ru

Диоксид циркония, стабилизированный 6-8 мас. % оксида иттрия (6-8% YSZ), находит очень широкое применение в различных отраслях промышленности в первую очередь авиационной и энергетической.

Теплозащитные покрытия (ТЗП) – это высокотемпературные оксидные керамические покрытия, которые широко используются для защиты и повышения долговечности деталей в горячей зоне авиационных двигателей, в промышленных газовых турбинах. 6-8% YSZ обладает низким коэффициентом теплопроводности, относительно высоким коэффициентом теплового расширения, хорошей стойкостью к эрозии, высокой прочностью и высокой температурой плавления, что делает его подходящим керамическим материалом для ТЗП. ТЗП на основе 6-8% YSZ чрезвычайно надежны, поскольку могут увеличить срок службы лопаток горячей зоны двигателя за счет снижения их рабочей температуры, либо повысить эффективность и эксплуатационные характеристики двигателей за счет повышения рабочей температуры двигателя. Керамика на основе 6-8% YSZ также позволяют получать износостойкие при высоких температурах покрытия для регулирования зазоров в турбинной части авиационных и промышленных газотурбинных двигателей. Прирабатываемые покрытия с регулировкой зазора используются в тех случаях, когда вращающиеся компоненты могут соприкоснуться с покрытием в результате конструктивных особенностей или скачков при эксплуатации. Такие покрытия необходимы, чтобы свести к минимуму износ вращающихся компонентов и максимально повысить эффективность газового тракта за счет контроля зазоров в местах уплотнения.

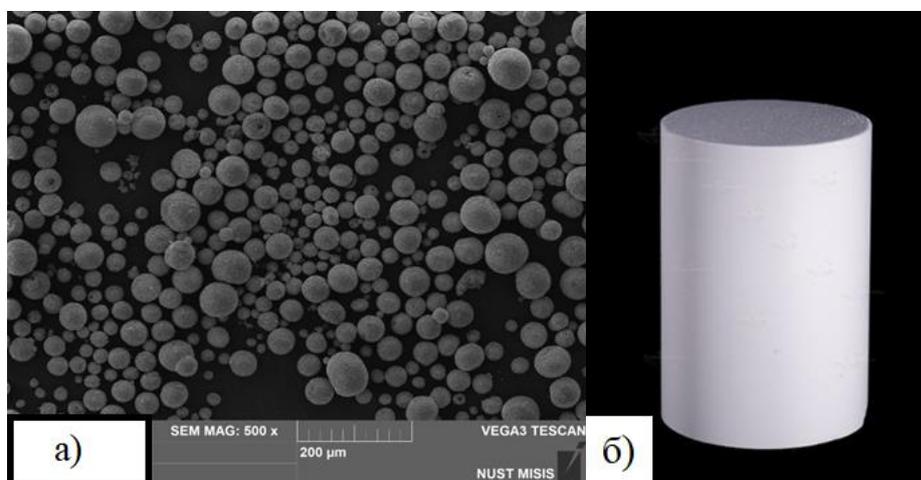


Рис. 1. Порошок 6-8% YSZ агломерированный (а) и спеченный керамический штабик на основе 6-8% YSZ (б)

В докладе представлены последние достижения коллектива ООО «Технокерамика» в области разработки, исследования и производства порошковых материалов на основе 6-8% YSZ для теплозащитных покрытий, а именно сферический 6-8% YSZ после плазменной высокочастотной индукционной сфероидизации, порошок 6-8% YSZ агломерированный и спеченный (рис.1а), порошок для прирабатываемых покрытий на основе 6-8% YSZ с порообразователем на основе полиэстера, керамические штабики на основе 6-8% YSZ (рис.1б) и цирконата гадолиния для электронно-лучевого нанесения конденсационных ТЗП.

Разработка узкополосных датчиков кислорода и технологии изготовления элементов их конструкции для автомобильных двигателей

Е.И. Чернов, Д.С. Конкин, С.В. Паршин, М.Ю. Рассадин, Л.О. Епремян
АО «ЭКОН», г. Обнинск, Россия
E-mail: econ@econobninsk.ru

Состав топлива воздушной смеси (коэффициент избытка воздуха λ) определяется как соотношение между количеством поступившего в двигатель воздуха и теоретическим количеством воздуха, необходимого для полного сгорания поступающего топлива,

В случае $\lambda=1$ такое соотношение называется стехиометрическим. Наибольшая степень конверсии токсичных компонентов достигается при поддержании на всех, по возможности, режимах работы ДВС стехиометрического состава топливной смеси. Такую возможность совместно с электронной системой управления двигателем (ЭСУД), представляет датчик кислорода (ДК) с сенсором из стабилизированного диоксида циркония, имеющему «релейную» характеристику в области стехиометрического состава смеси. На границе перехода, в области стехиометрии, напряжение датчика скачкообразно меняется от 800 до 100 mV.

В настоящее время, в России, нет полного цикла серийного производства таких ДК, поэтому создание конструкций таких приборов и серийной технологии их изготовления с характеристиками, соответствующими мировым стандартам для нашего автопрома, являются актуальными задачами.

Для экспериментов по разработке и модификации конструкций, отладки, проверки работоспособности ДК был создан метрологический стенд на базе предприятия. Он позволяет имитировать нагрев датчика в выпускном коллекторе двигателя, а также имеет возможность подачи смеси поверочных газов непосредственно в среду ДК. Кроме того, были проведены повторные тесты ДК на моторном стенде, с положительными результатами. По итогам таких экспериментов мы смогли корректировать параметры чувствительного элемента (ЧЭ), что позволило нам добиться стабильных показателей на протяжении всех экспериментов, а также решить следующие задачи:

- адаптировать конструкции ДК к технологии серийного производства;
- подобрать оптимальные параметры нагревателя ДК, снизить себестоимость;
- оптимизировать конструкции токовых выводов для теста на растяжение, вибрационную стойкость;
- разработать конструкцию и технологию изготовления электрохимического сенсора для контроля выбросов автомобилей по содержанию O_2 и CO .



Рис. 1. Узкополосный λ -зонд АО «ЭКОН»

В докладе представлены проводимые в АО «ЭКОН» работы в этом направлении и поставленные задачи, которые удалось решить, а также, вектор задач для дальнейшего развития направления.

Разработка широкополосного датчика кислорода и технологии изготовления элементов его конструкции для автомобильных двигателей

Д.С. Конкин, М.Ю. Рассадин, Е.И. Чернов

АО «ЭКОН», г. Обнинск, Россия

e-mail: econ@econobninsk.ru

Представлены результаты разработки АО «ЭКОН» датчиков кислорода (ДК) для измерения состава топливовоздушной смеси автомобильных двигателей. Работа является частью разработок на предприятии широкополосного ДК, измеряющего коэффициент избытка воздуха во всём диапазоне составов смеси, используемых в различных типах двигателей внутреннего сгорания. Коэффициент избытка воздуха λ отображает отношение количества воздуха, поступившего в двигатель к количеству воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания поданного в двигатель топлива. Широкополосный ДК позволяет осуществлять регулирование топливоподачи не только в стехиометрической точке при $\lambda = 1$, но и в диапазоне бедной ($\lambda > 1$) и богатой ($\lambda < 1$) смеси. Такие ДК могут использоваться не только в системах управления двигателя с искровым зажиганием со стехиометрическим регулированием (поддержание λ около 1), но и в процессах регулирования на бедных и богатых смесях, т.е. для дизелей и газовых двигателей.

В докладе представлены и исследованы несколько конструкций таких датчиков. Разработано несколько конструкций планарных твёрдоэлектролитных сенсоров (рис. 1), работающих в амперметрическом режиме. Предложены обоснования выбранных конструкций и параметров нагревателей в условиях работы двигателя автомобиля. Приводятся результаты испытания датчиков, в том числе и на моторном стенде, анализ которых позволяет выбрать конструкции сенсоров для дальнейших исследований, а именно:

- адаптация конструкции ДК к технологии серийного производства, снижение себестоимости;
- оптимизация конструкции токовых выводов;
- вибрационная стойкость в соответствии с техническими требованиями;
- технология планарных сенсоров для одновременного контроля состава отработавших газов двигателей внутреннего сгорания на содержание O_2 и CO .

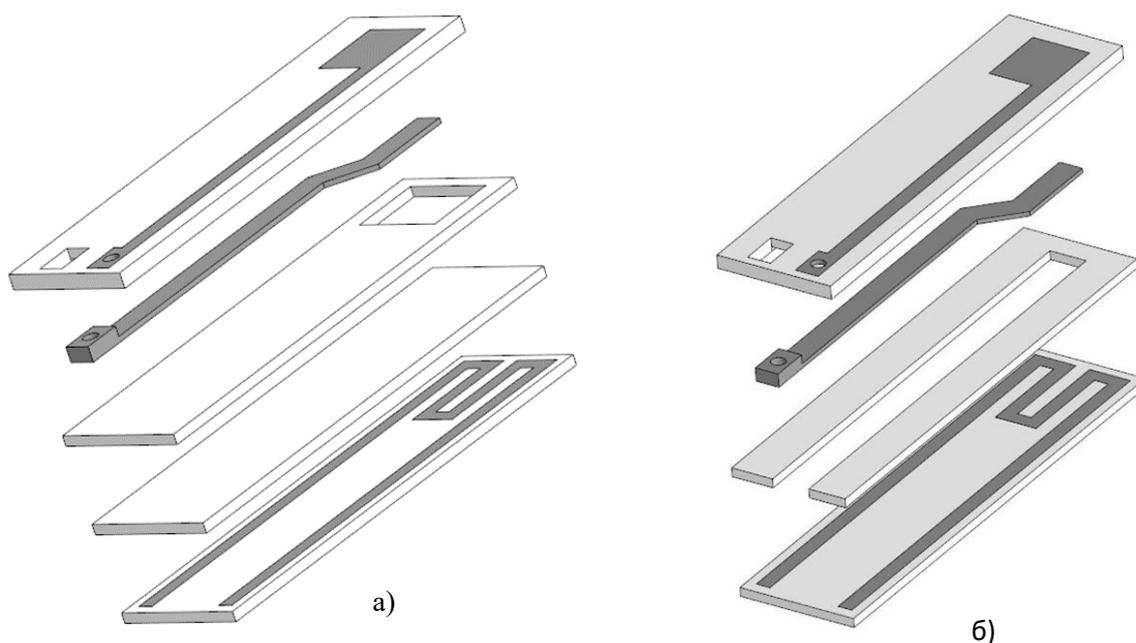


Рис. 1. Конструкция планарного твёрдоэлектролитного сенсора:

- а) конструкция электрохимической ячейки (ЭХЯ) с атмосферной камерой эталонного газа;
- б) конструкция ЭХЯ с накачкой кислорода из отработавших газов в камеру эталонного газа

Термодинамика и процесс синтеза оксидных систем

О.В. Лаврова, М.Е. Чернов
АО «ЭКОН», г. Обнинск, Россия
e-mail: econ@econobninsk.ru

На нашем предприятии проводятся исследования взаимодействия свинца (теплоноситель) с кислородом с помощью электрохимических датчиков кислорода в области жидкого свинца, содержащего кислород в растворённом виде. Этот процесс в настоящее время достаточно хорошо изучен. Кроме того, проведены расчётные исследования состава газовой фазы над жидким свинцом, содержащим кислород.

Термодинамические расчёты парциального давления кислорода $p(\text{O}_2)$ над различными металлооксидными системами, а также расчёты электродвижущей силы (ЭДС) при найденных значениях $p(\text{O}_2)$ по уравнению Нернста, позволяют построить диаграммы состояния различных систем в координатах «температура – ЭДС». В качестве примера на рисунке 1 представлена низкотемпературная часть диаграммы состояния «свинец-кислород».

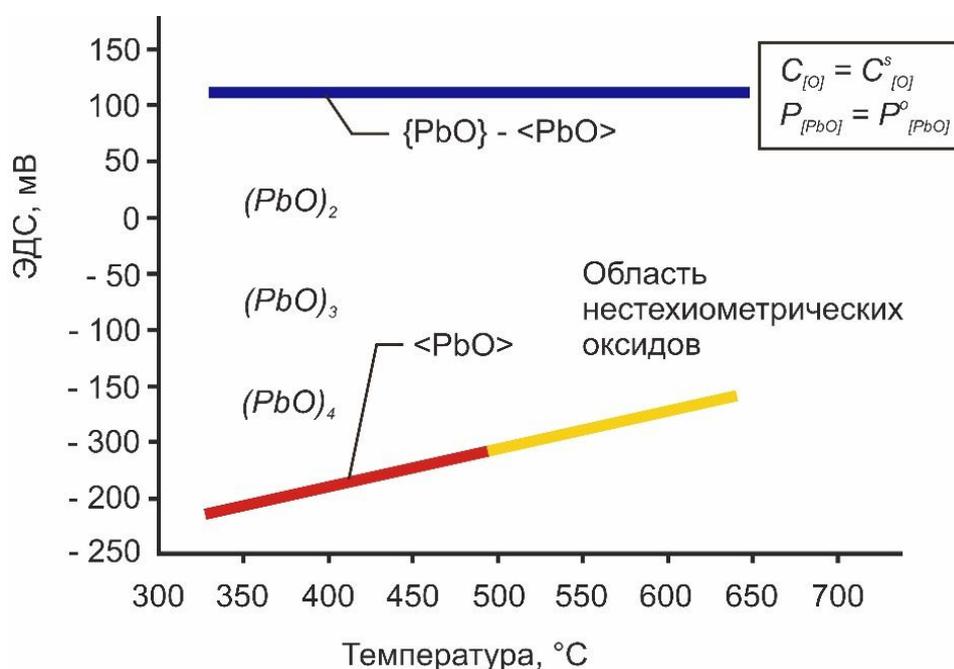


Рис. 1. Низкотемпературная часть диаграммы состояния «свинец – кислород» в координатах «температура – ЭДС»

Показано, что равновесное парциальное давление кислорода над системой «жидкий свинец – твёрдый оксид» $\{\text{Pb}\} - \langle \text{PbO} \rangle$ не совпадает с равновесным парциальным давлением кислорода над монооксидом свинца $\langle \text{PbO} \rangle$, что обуславливает разность в электрохимических потенциалах этих систем.

Аналогичные расчёты проведены в исследовании для других систем «железо – кислород», «цирконий – кислород», «иттрий – кислород» и других. Также были проведены расчёты и получены значения электрохимического потенциала насыщенного водяного пара в диапазоне температур 25-100 °С относительно воздушного электрода сравнения.

Предложенный подход позволяет рассматривать процессы синтеза оксидных материалов, а также процессы массопереноса, в частности, коррозии, основываясь на электрохимической модели.

Механические свойства кристаллов ZrO_2 , частично стабилизированных Y_2O_3 , Gd_2O_3 или Sm_2O_3

А.В. Кулебякин, Е.Е. Ломонова, Н.Ю. Табачкова, А.С. Числов
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия
E-mail: chislov.artem@bk.ru

Твердые растворы на основе диоксида циркония обладают уникальным сочетанием химических, оптических, механических, теплофизических и электрических свойств, что обуславливает их широкое применение в качестве биомедицинских, конструкционных, теплоизолирующих, оптических и триботехнических материалов. В зависимости от структуры эти материалы можно условно разделить на два основных типа, а именно, полностью и частично стабилизированный диоксид циркония. Наибольший интерес среди материалов частично стабилизированного диоксида циркония представляют поли- и монокристаллические структуры, состоящие из тетрагональной фазы ZrO_2 .

Эти тетрагональные твердые растворы характеризуются сочетанием высоких механических, трибологических характеристик с химической и биологической инертностью, низкой теплопроводностью, высоким коэффициентом теплового расширения и в связи с этим являются предметом многочисленных исследований.

Отличительной особенностью тетрагональных твердых растворов является высокая величина вязкости разрушения в сочетании с высокой механической прочностью. Причиной высокой величины вязкости разрушения этих материалов является так называемое трансформационное упрочнение. Для эффективного трансформационного упрочнения требуется сохранение максимального количества тетрагональной фазы ZrO_2 с оптимальной трансформационной способностью при определенной температуре. Под трансформационной способностью обычно понимают способность тетрагональной фазы ZrO_2 к фазовому превращению в моноклинную фазу ZrO_2 под воздействием поля механических напряжений около вершины трещины.

Степень метастабильности тетрагональной фазы, в значительной мере определяющая ее способность к трансформации, определяется как концентрацией, так и видом стабилизирующего оксида. В качестве стабилизирующих оксидов могут использоваться оксиды иттрия, щелочноземельных и редкоземельных элементов. Наиболее широкое применение в настоящее время находят хорошо изученные материалы на основе диоксида циркония частично стабилизированные оксидом иттрия. Представляет интерес проведение сравнительного анализа структурных особенностей и механических свойств твердых растворов на основе ZrO_2 , частично стабилизированных Y_2O_3 и другими оксидами редкоземельных элементов, полученных одним методом синтеза, при одинаковых температурно-временных условиях. Это позволит установить влияние размера ионного радиуса трехвалентного катиона на свойства и особенности формирования структуры тетрагональных твердых растворов на основе ZrO_2 .

В данной работе проведено сравнительное исследование фазового состава и механических свойств кристаллов твердых растворов ZrO_2 , полученных методом направленной кристаллизации, частично стабилизированных оксидами иттрия, гадолиния или самария, ионные радиусы которых изменяются в ряду $R_{Y^{3+}} = 1,019 \text{ \AA} < R_{Gd^{3+}} = 1,053 \text{ \AA} < R_{Sm^{3+}} = 1,074 \text{ \AA}$.

Исследования проведены на кристаллах $(ZrO_2)_{1-x}(R_2O_3)_x$ (где $R = Y, Sm, Gd$) при $x = 0,02; 0,028; 0,032; 0,037$ и $0,04$, полученных методом направленной кристаллизации расплава при одинаковых температурно-временных условиях синтеза, что дает возможность проведения сравнительного анализа характеристик кристаллов сопоставимых концентраций стабилизирующих оксидов. Исследование фазового состава проводили методами

рентгеновской дифрактометрии и рамановской спектроскопии. Микротвердость и вязкость разрушения кристаллов измеряли методом индентирования.

Показано, что плотность тетрагональных кристаллов $(\text{ZrO}_2)_{1-x}(\text{R}_2\text{O}_3)_x$ (где $\text{R} = \text{Y}, \text{Sm}, \text{Gd}$) при $x \geq 0,037$ увеличивается в ряду $\text{Y} \rightarrow \text{Sm} \rightarrow \text{Gd}$, что коррелирует с атомными весами соответствующих элементов. Появление излома на концентрационной зависимости плотности может служить диагностическим признаком изменения фазового состава кристаллов и использоваться для определения нижней границы стабилизации тетрагональной структуры кристаллов.

При минимальной концентрации стабилизирующего оксида равной 2,0 моль % все кристаллы содержали моноклинную фазу, которая исчезала при увеличении концентрации стабилизирующего оксида. Граничные концентрации, при которых моноклинная фаза не наблюдалась, составляли 2,8; 2,8 и 3,7 моль % в случае стабилизации Y_2O_3 , Gd_2O_3 и Sm_2O_3 , соответственно. Увеличение концентрации стабилизирующего оксида приводит к уменьшению количества трансформируемой (t) фазы и увеличению количества нетрансформируемой (t') фазы, причем степень тетрагональности ($c/\sqrt{2a}$) этих фаз при увеличении концентрации стабилизирующего оксида уменьшается. При сопоставимых концентрациях стабилизирующего оксида количество и степень тетрагональности трансформируемой (t) фазы увеличивается в ряду $\text{Y}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Gd}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Sm}_2\text{O}_3$. Данная закономерность коррелирует с изменением ионного радиуса катиона стабилизирующего оксида.

Максимальные значения вязкости разрушения составляли 11,0; 13,0 и 14,3 МПа·м^{1/2} для кристаллов $(\text{ZrO}_2)_{0,972}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,028}$, $(\text{ZrO}_2)_{0,972}(\text{Gd}_2\text{O}_3)_{0,028}$ и $(\text{ZrO}_2)_{0,963}(\text{Sm}_2\text{O}_3)_{0,037}$, соответственно. Все кристаллы, имеющие высокие значения K_{IC} содержали две, отличающиеся по химическому составу, тетрагональные фазы. Вязкость разрушения кристаллов, имеющих тетрагональную структуру, увеличивается с увеличением ионного радиуса трехвалентного катиона, что связано с повышением трансформационной способности метастабильной t фазы. Кристаллы, вязкость разрушения которых превышает значение $\sim 10,0$ МПа·м^{1/2}, обладали явно выраженной анизотропией. Значения K_{IC} в кристаллографическом направлении $\langle 100 \rangle$ на $\sim 20\%$ превышают аналогичную величину в направлении $\langle 110 \rangle$.

Показано, что ионный радиус катиона стабилизирующего оксида оказывает влияние на механические характеристики кристаллов опосредованным образом, а именно, через особенности фазообразования и изменения фазовых соотношений в исследуемых твердых растворах. Полученные данные свидетельствуют о том, что твердые растворы, стабилизированные трехвалентным катионом, имеющим больший радиус, подвержены более глубокому фазовому распаду. Другими словами, чем больше радиус трехвалентного катиона, тем ближе значения степени тетрагональности (t) и (t') фаз к параметрам равновесных тетрагональной и кубической фаз. Близость метастабильной (t) фазы к межфазной (t)/(c+t) границе облегчает индуцированный механическими напряжениями $t \rightarrow m$ фазовый переход и, следовательно, повышает трансформационную способность материала.

Многокомпонентные оксиды со структурой граната (Gd,Y,Ce,Tb)₃Ga₃Al₂O₁₂: получение прозрачной керамики стереолитографической 3D печатью

Л.В. Ермакова, В.Г. Смыслова, П.В. Карпюк, О.Ю. Коваль, И.Ю. Комендо, П.С. Соколов
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
E-mail: sokolov_ps@nrcki.ru

Сложные оксиды с кристаллической структурой граната изучаются с целью их использования в различных областях науки и техники в течение уже более 50 лет. Эти материалы отличаются тугоплавкостью, низкой ползучестью при высоких температурах, высокой твердостью и прочностью, выдающимися диэлектрическими свойствами, исключительной термостойкостью и химической инертностью. Кроме того, монокристаллы и функциональная керамика на основе сложных гранатов являются подходящей матрицей для различных редкоземельных ионов, что делает их интересными для оптических применений. Многокомпонентный гадолиний-иттрий-алюминий-галлиевый гранат, активированный церием или церием и тербием (Gd,Y,Tb,Ce)₃Ga₃Al₂O₁₂, является перспективным сцинтилляционным и детекторным материалом с высокой плотностью, высокой радиационной стойкостью, высоким световыходом, быстрой кинетикой высвечивания и хорошим временным разрешением, позволяющим использовать его в современной медицинской визуализации, в национальной безопасности и в физике высоких энергий. Особенное внимание инженеров и учёных привлекает прозрачная керамика на основе гранатов, а также новые бюджетные способы её получения.

В настоящей работе высокочистый исходный гидрокарбонатный осадок был синтезирован методом совместного осаждения водного раствора нитратов соответствующих металлов бикарбонатом аммония с последующей промывкой и сушкой. Для формирования фазы граната осадок прокаливали при температуре 1250 °С. Затем производили помол оксидного порошка в шаровой планетарной мельнице до размера частиц с $d_{50} \sim 2,5$ мкм. Таким образом был получен порошок с хорошей спекаемостью, но при этом обладающий умеренной удельной поверхностью (4-6 м²/г), что позволит получать высоконаполненные суспензии. УФ-фотоотверждаемые составы с наполнением до 41 об. % (до 80 мас. %) были получены из смеси коммерчески доступных акрилатных мономеров, фотоинициатора и диспергирующей добавки. На настольном DLP 3D-принтере открытой архитектуры Ember (Autodesk, США) успешно проведена печать модельных миниатюрных объектов (тонкостенных сеток) слоями 25 мкм. Путем выжигания органического связующего и высокотемпературного спекания при $T \geq 1650$ °С в атмосфере кислорода была получена прозрачная керамика (рис. 1). Дефекты или трещины отсутствовали как на поверхности, так и в объеме образцов.

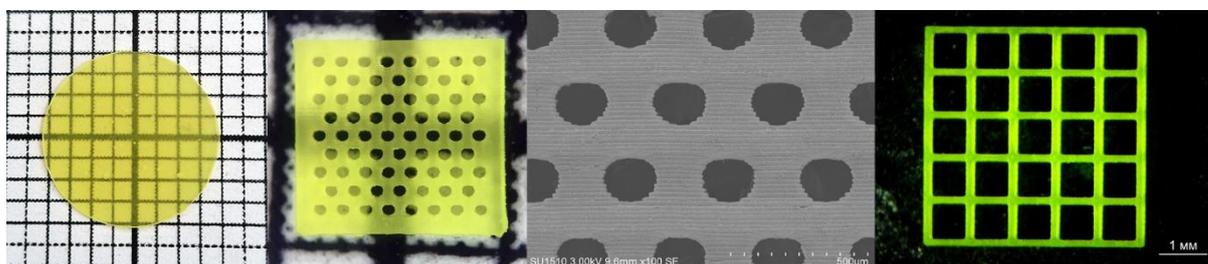


Рис. 1. Образцы керамики состава (Gd,Y)₃Ga₃Al₂O₁₂:Ce изготовленные с помощью 3D-печати

Аналитические исследования проведены с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ Курчатовский институт». Синтез и обработка порошков, а также изготовление керамики выполнено при поддержке РФФ (проект № 22-13-00172), <https://rscf.ru/project/21-73-10251/> в НИЦ «Курчатовский институт». Измерения сцинтилляционных свойств полученных керамических материалов производили в Институте ядерных проблем Белорусского государственного университета.

Технология изготовления подложек для ЭКБ СВЧ-электроники

А.А. Алексеев¹, А.Г. Налогин¹, Г.Е. Лепилов¹, М.О. Малышев¹, П.М. Ветошко²,
А.Н. Кузьмичев², С.А. Евстигнеева²

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Россия; ²ООО «МЦКТ», г. Москва, Россия
E-mail: aaalekseev@istokmw.ru

Тенденция к миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры, снижению массы и уменьшению габаритных размеров ее блоков при сохранении основных функциональных характеристик пассивной электронной компонентной базы (ЭКБ), в частности микрополосковых ферритовых развязывающих СВЧ-приборов, диктует путь усовершенствования технологии изготовления полированных подложек из ферритов и керамики. Уменьшение массогабаритных характеристик микрополосковых ферритовых СВЧ-приборов и, соответственно, размеров её элементов повышает технические требования не только к функциональным свойствам ферритовых и керамических материалов, но и к качеству изготовления ферритовых и керамических полированных подложек. Поверхность подложек должна обладать минимальными дефектами структуры (поры, раковины), механической обработки (царапины, сколы) и высоким классом чистоты поверхности.

В настоящей работе рассматривается технология изготовления поликристаллических ферритовых и керамических подложек для микрополосковых развязывающих СВЧ-приборов и монокристаллических подложек иттрий-скандий-галлиевых гранатов (YSGG). Высококачественные подложки YSGG необходимы для эпитаксиального роста пленок иттрий-железистых гранатов (ЖИГ). На пленках ЖИГ могут быть разработаны и испытаны новые сверхчувствительные магнитомодуляционные и магнитооптические сенсоры магнитного поля, превосходящие лучшие мировые аналоги по чувствительности в 10-100 раз, для применения в современных медицинских приборах нового поколения. Для эпитаксиального роста пленок ЖИГ необходимы монокристаллические подложки, обладающие таким же типом кристаллической решетки, близкими параметрами решетки и не имеющие в своем составе магнитных ионов. Монокристаллические подложки для эпитаксиального роста пленок должны иметь полированную поверхность (14 класс чистоты) и обладать минимальными механическими напряжениями. Таким образом, исследование и разработка технологии изготовления поликристаллических и монокристаллических подложек с требуемым качеством поверхности является актуальным и представляет интерес как для разработчиков приборов, так и для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Разработанная технология изготовления полированных подложек ($60 \times 48 \times (0,5 \div 2)$, $48 \times 30 \times (0,25 \div 2)$, $30 \times 24 \times (0,2 \div 2)$ мм) из поликристаллических ферритовых, керамических материалов и монокристаллических подложек включает следующие технологические операции: резка заготовок (булей) на пластины с припуском на последующую механообработку, резка пластин под необходимые габаритные размеры, шлифование, полирование и очистка подложек.

Резка заготовок материалов, обладающих высокой твердостью и хрупкостью, выполняется на станках резки со стальными кругами с алмазной внутренней режущей кромкой (АВРК) на металлической связке. Размеры круга АВРК, тип, размеры и концентрация алмазных частиц выбираются в зависимости от размеров и механических свойств материала заготовок. Установлено, что для резки ферритов и некоторых видов керамики оптимальными являются типы алмазов АС20, АСН, АСМ с размерами частиц 50/40 или 60/40 мкм, для керамики повышенной твердости (Al_2O_3 , АЛТК и др.), кварца – АС20 с размерами частиц 125/100 мкм. Применение кругов с размером зерен более 125/100 мкм не оправдано из-за увеличения глубины нарушенного слоя на пластинах и

ширины реза при резке, что приводит к увеличению потерь материала при механической обработке, необходимостью увеличения припуска на последующие обработки.

Шлифование пластин ферритов и керамики выполняется на установках одностороннего (с наклейкой на головки) и двустороннего (без наклейки) шлифования на свободном и связанном абразивах. В качестве абразивного материала применяются алмазный порошок, карбид кремния, электрокорунд белый и другие. Шлифование пластин в зависимости от их свойств может производиться в несколько этапов абразивными частицами с размерами от 60/40 до 5/3 мкм. Однако такой способ шлифования трудоемкий, материало- и энергозатратный. В данной работе предлагается одностороннее шлифование пластин алмазными шлифовальными кругами на органической связке с зерном АС4 125/100 или АС6 50/40 мкм в зависимости от твердости материала. Усредненные параметры шероховатости Ra поверхности пластин после шлифования: на 125/100 мкм – 0,55 мкм (8 класс чистоты), на 50/40 мкм – 0,09 мкм (10 класс чистоты).

Полирование пластин состоит из 2-х этапов: алмазно-механической полировки на оловянном притире и химико-механической полировки на притире, натянутом полиэфирной тканью. Были исследованы и разработаны составы полировальных суспензий на основе алмазного порошка с размером частиц 0,5/0 мкм (1-й этап), оксида церия ($<<0,4$ мкм) и оксида кремния (0,05 мкм) (2-й этап) для полирования монокристаллических и поликристаллических подложек.

В рамках проведенной научно-исследовательской работы, выполненной по заказу Международного центра квантовой оптики и квантовых технологий, проведены исследования и разработана технология механической обработки монокристаллических подложек иттрий-скандий-галлиевых гранатов (YSGG) с параметром шероховатости $Ra < 0,5$ нм для эпитаксиального роста пленок ЖИГ (рис. 1, табл. 1). Технология изготовления поликристаллических ферритовых и керамических подложек для микрополосковых развязывающих СВЧ-приборов обеспечивает следующие параметры шероховатости подложек: $Ra=0,006$ мкм, $Rz=0,015$ мкм, $Rmax=0,022$ мкм.

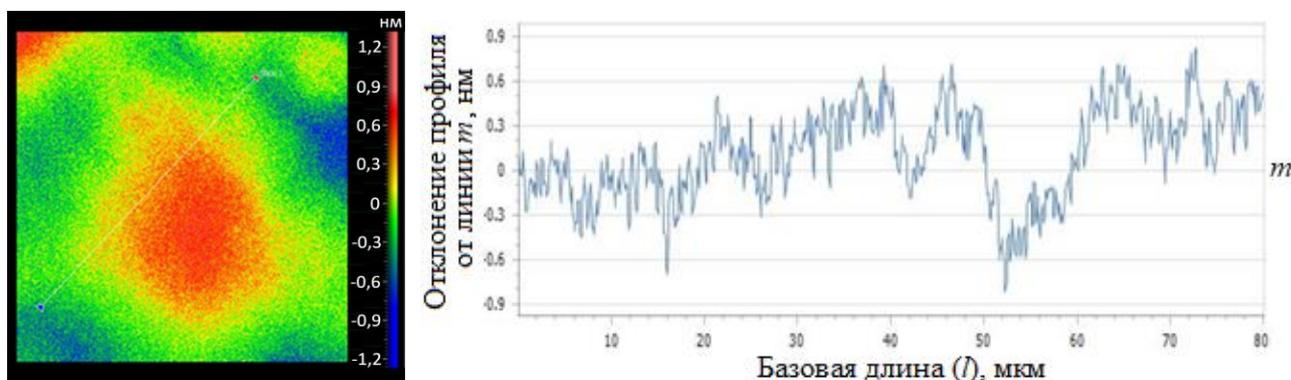


Рис. 1. Профиль шероховатости поверхности подложки YSGG с $Ra=0,267$ нм

Таблица 1. Параметры шероховатости подложек YSGG, полированных разными суспензиями на этапе химико-механической полировки

Суспензия полировальная	Профилометр Zygo NewView 8300		
	Ra , нм	Rz , нм	$Rmax$, нм
Суспензия на основе оксида кремния (0,05 мкм)	0,457	1,886	2,450
Суспензия на основе оксида церия (0,4 мкм)	0,439	1,156	1,402
Суспензия на основе оксида церия ($<<0,4$ мкм)	0,267	1,019	1,510

Способ оптимизации высоковакуумной системы обезгаживания электроракуумных приборов для контроля элементов конструкций летательных аппаратов

Д.В. Алексеев, А.В. Терехин, В.Д. Малыгин, С.В. Маслов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: terekhinav@technologiya.ru

В процессе опытного и серийного производства авиационной и ракетно-космической техники широко используются различные электроракуумные приборы (ЭВП), в том числе для обеспечения неразрушающего контроля высокоответственных элементов конструкций ЛА радиационными методами и методами компьютерной томографии.

Одними из наиболее трудоемких, технически сложных и ответственных технологических процессов изготовления ЭВП, во многом формирующих эксплуатационные характеристики ЭВП, являются этапы вакуумирования и термического обезгаживания внутреннего объема ЭВП. Как правило, эта технологическая операция является достаточно длительной и может продолжаться несколько недель, что накладывает высокую нагрузку на высоковакуумную откачную систему технологического оборудования. Наиболее распространенным в настоящее время в промышленности является применение высоковакуумных систем на основе турбомолекулярного насоса, что позволяет исключить наличие тяжелых углеводородов в спектре остаточных газов, а также достигать высокого вакуума и улучшить технические характеристики ЭВП. В состав вакуумной системы данного типа входят последовательно соединенные вакуумная камера с нагревателями (ВК), снабженная вакуумметрами, турбомолекулярный насос (ТМН), вентиль (В), форвакуумный спиральный или иной механический безмасляный насос (ФВН). Схема высоковакуумной системы представлена на рисунке 1.

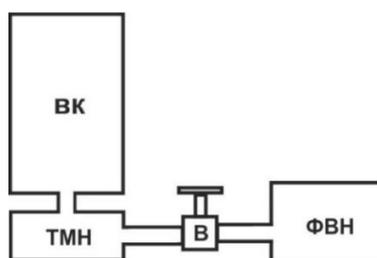


Рис. 1. Схема высоковакуумной откачной системы на базе турбомолекулярного насоса

Недостатком такой системы, особенно при длительных технологических процессах является непрерывная работа ФВН, приводящая к их интенсивному износу и нередкому выходу из строя, что, в свою очередь, приводит к нарушению технологического процесса и выходу в брак дорогостоящего ЭВП. При мелкосерийном производстве ЭВП фактический процент их выхода в брак из-за выхода из строя ФВН достигал 20%. Иногда для повышения надежности в откачной системе применяют несколько дублирующих друг друга ФВН, что повышает материальные издержки. Кроме того, долгая работа ФВН влечет за собой высокий расход электроэнергии.

Цель работы – минимизация процента неустранимого брака при изготовлении отечественных ЭВП, улучшение качества вакуумирования внутреннего объема ЭВП, экономия ресурса ФВН, снижение себестоимости изготовления ЭВП. Для достижения поставленной цели необходимо было решить задачу уменьшения продолжительности работы сухого спирального механического форвакуумного насоса в технологическом цикле вакуумирования и термическом обезгаживании внутреннего объема ЭВП, а также исключить потерю вакуума во внутреннем объеме ЭВП в процессе обезгаживания при аварийной остановке ФВН.

Одним из способов уменьшения длительности работы ФВН является установка между ФВН и ТМН дополнительной герметичной емкости, объемом, многократно превышающим рабочий объем вакуумной камеры (ВК). Для анализа эффективности работы дополнительной герметичной емкости (далее – аккумулятора вакуума (АВ)) в составе высоковакуумной откачной системы, предложена расчетная схема (рис. 2), состоящая из рабочего объема вакуумной камеры (ВК), аккумулятора вакуума (АВ), турбомолекулярного насоса (ТМН), форвакуумного насоса (ФВН), вентилях (В1 и В2), электромагнитного клапана (ЭК).

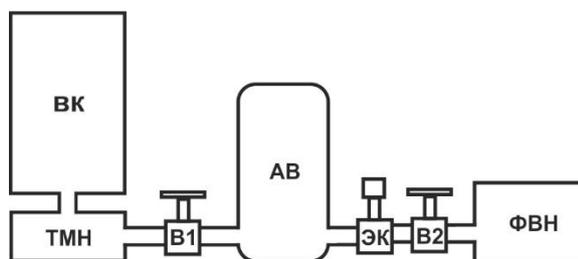


Рис. 2. Схема доработанной высоковакуумной откачной системы

После установки изделия в ВК производилась её герметизация, затем включался ФВН и, далее, открывались вентили В1, В2 и электромагнитный клапан ЭК. Производилась откачка ВК и АВ форвакуумным насосом до значений абсолютного давления около 10 Па. Электромагнитный клапан использовался в качестве предохранительного (отсечного), который, в случае аварийной остановки ФВН автоматически перекрывает откачную магистраль. По достижении абсолютного давления около 10 Па в ВК и АВ включался ТМН и давление в ВК снижалось до 10^{-4} Па, после чего включался нагрев ВК, рабочую температуру в ВК поднимали до 400 °С и снижали абсолютное давление в ВК до 10^{-5} Па. При достижении необходимого абсолютного давления в ВК, электромагнитный клапан и вентиль В2 перекрывали, после чего выключали ФВН. С этого момента АВ обеспечивал работу ТМН в качестве ФВН до окончания технологического процесса. На рисунке 3 показан график повышения абсолютного давления в АВ.

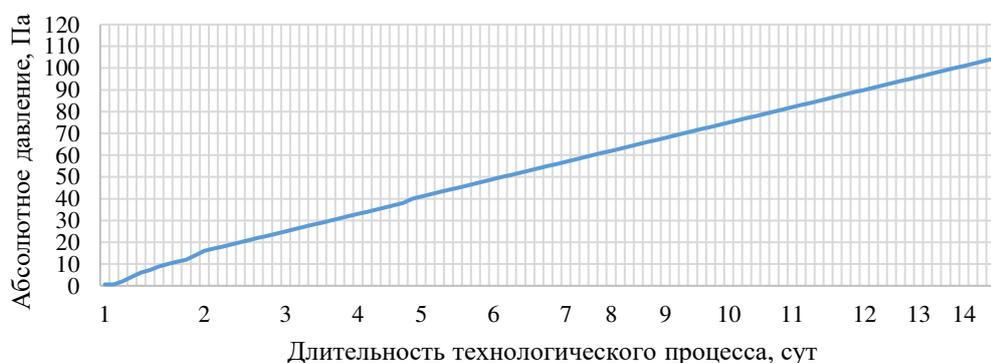


Рис. 3. График повышения абсолютного давления в аккумуляторе вакуума

Анализируя приведенный график, можно сделать вывод, что полученное значение абсолютного давления в АВ на момент окончания технологического процесса обеспечивает бесперебойную работу ТМН в течение 14 сут с 10-кратным запасом времени работы ТМН (допустимое давление на выходе ТМН 1100 Па) без применения ФВН.

После внедрения предложенного способа оптимизации высоковакуумной системы обезгаживания в технологический процесс изготовления ЭВП процент выхода в брак ЭВП по причине выхода из строя ФВН составил 0%. Сокращена продолжительность работы ФВН в технологическом цикле вакуумирования и термическом обезгаживании внутреннего объема ЭВП с 14 сут до трех часов, что привело к улучшению качества вакуума и снижению наработки и электропотребления ФВН.

Подходы к определению микропримесей в пиролитическом нитриде бора

В.И. Румянцев, Л.Н. Кочерга, Д.М. Алешунин
ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: info@virial.ru

Пиролитический нитрид бора (ПНБ) – уникальный нанолaminaрный материал для применения в электронной, полупроводниковой, электротехнической и смежных отраслях техники. Уникальность ПНБ заключается в том, что это высокотемпературный поликристаллический радиопрозрачный диэлектрик, характеризующийся особой чистотой, высокой термостабильностью, газонепроницаемостью и коррозионной стойкостью.

Необходимо отметить, что физико-химический базис высокого уровня чистоты ПНБ – это метод его получения. Как конструкционные изделия, так и заготовки ПНБ получают методом химического газофазного осаждения на графитовом шаблоне заданной конфигурации с последующей механической обработкой или без нее.

Основная химическая реакция, реализуемая при традиционном способе получения ПНБ с использованием галогенидов бора и аммиака, может быть записана как $\text{BF}_3 + \text{NH}_3 = \text{BN} + 3\text{HF}$.

Базовый набор регулируемых технологических параметров включает в себя химический состав, концентрацию и расход реагентов, давление в системе, температуру поверхности осаждения. Варьируя эти факторы, можно осуществлять воздействие на механизм осаждения, включающий в себя целый ряд последовательно и параллельно развивающихся стадий.

Среди основных стадий можно выделить процессы полимеризации и циклизации в газовой фазе, транспорт продуктов реакции к поверхности, хемосорбцию образующихся молекул, поверхностную диффузию, зародышеобразование и рост твердой фазы.

Основные области применения ПНБ – производство полупроводников, мощная СВЧ-техника, высокотемпературная вакуумная оснастка и пр. В данных сферах применения критически важным является количество микропримесей (в первую очередь металлов) в нитриде бора, напрямую и самым существенным образом влияющее на качество получаемого продукта. Приемлемое суммарное количество микропримесей лежит в диапазоне 10-100 ppm и характеризует качество пиролитического нитрида бора.

Таким образом, при разработке и постановке на производство изделий из ПНБ повышенной чистоты в первую очередь необходимо решение задачи количественного оперативного контроля суммарной доли микропримесей металлов.

В настоящее время известен ряд аналитических методов, потенциально позволяющих решить эту задачу, а именно:

- рентгеновский энергодисперсионный микроанализ,
- оптико-эмиссионная спектроскопия дугового разряда,
- оптико-эмиссионная спектроскопия тлеющего разряда,
- масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP).

Указанные методы обладают достоинствами и недостатками. Основные достоинства – это работа с компактными образцами, а недостатки – это использование эталонных образцов (кроме ICP). Наиболее перспективные методы – это методы спектрометрии, такие как: метод спектрометрии тлеющего и дугового разряда, а также метод ICP. В ICP неоспоримым плюсом является возможность внутреннего эталонирования, а минусом – то, что перевод пробы в раствор и чувствительность метода позволяет определить элементы до 10^{-3} . При этом для оперативного производственного контроля конкретных изделий из ПНБ повышенной чистоты целесообразна разработка специализированных испытательных стендов, позволяющих проводить характеризацию изделия (например, тигля для MBE), гарантирующую необходимый комплексный уровень качества. Такого рода стенд разрабатывается ООО «Вириал» совместно с потенциальным потребителем продукции «Semitec» для внедрения в процедуру выходного/входного постоянного контроля.

Высокотемпературный керамический материал на основе карбида кремния с добавкой оксида эрбия

Е.С. Твердохлеб (Антонова), Н.А. Голубева, М.Г. Лисаченко, Л.А. Плясункова
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: lisachenkomg@technologiya.ru

Керамические материалы на основе карбида кремния широко применяются как конструкционные для многих областей техники благодаря высокой прочности и твердости, хорошей стойкости к окислению и сопротивлению термическому удару, а также возможности сохранения уровня механических свойств при высоких температурах.

За рубежом активно ведутся исследования по получению конструкционной высокотемпературной керамики на основе карбида кремния с использованием в качестве спекающих добавок тугоплавких оксидов редкоземельных элементов. Подобная высокотемпературная керамика перспективна для изготовления деталей и узлов ГТД с рабочей температурой ~ 1600 °С.

Актуальными являются исследования по разработке отечественных высокотемпературных керамических материалов на основе карбида кремния с использованием спекающих добавок в виде тугоплавких оксидов редкоземельных элементов, не уступающих зарубежным аналогам.

В настоящей работе исследовано влияние вида добавки и ее количества на фазовый состав и физико-механические свойства керамического материала на основе карбида кремния.

В качестве комплексных спекающих добавок использовали смеси оксида эрбия с нитридом алюминия и оксида эрбия с оксидом алюминия. Их использование позволяет снизить температуру спекания материалов и минимизировать негативное взаимодействие компонентов. Керамику получали из порошков α -карбида кремния отечественного производства методом горячего прессования в атмосфере N_2 при температуре 2000 ± 50 °С.

Керамический материал с добавкой 10 об. % (Er_2O_3-AlN) имеет прочность при статическом изгибе при комнатной температуре и при 1600 °С – 553 ± 27 МПа и 243 ± 13 МПа, соответственно. Прочность материала с 10 об. % ($Er_2O_3-Al_2O_3$) при комнатной температуре составляет 690 ± 16 МПа, а при 1600 °С – 180 ± 12 МПа. Низкие значения высокотемпературной прочности материала с добавкой ($Er_2O_3-Al_2O_3$) связаны с образованием легкоплавкой зернограничной фазы в виде твердого раствора эрбия в сиалоне, образующегося в результате спекания в атмосфере азота, с температурой размягчения около 1480 °С, и алюмината эрбия $Er_3Al_5O_{12}$.

Для получения высокотемпературного керамического материала на основе карбида кремния выбрали спекающую добавку в виде (Er_2O_3-AlN), так как образцы керамики этого состава показали более высокое значение предела прочности при температуре 1600 °С. Далее исследовали влияние количества добавки (Er_2O_3-AlN) на свойства керамики на основе SiC.

Установлено, что с увеличением количества спекающей добавки от 5 до 15 об. % при термообработке возрастает объемная доля жидкой фазы, что приводит к хорошему смачиванию SiC-частиц оксидным расплавом и равномерному распределению зернограничной фазы между зернами карбида кремния, и, как следствие, повышается прочность керамического материала как при комнатной температуре, так и при температуре 1600 °С: от 521 ± 31 МПа до 604 ± 17 МПа и от 236 ± 26 МПа до 472 ± 12 МПа, соответственно.

Максимальный уровень физико-механических характеристик получен на материале с добавкой 15 об. % (Er_2O_3-AlN): кажущаяся плотность $3,76$ г/см³, предел прочности при статическом изгибе при комнатной температуре (604 ± 17) МПа и при температуре 1600 °С (472 ± 12) МПа, критический коэффициент интенсивности напряжений $5,4$ МПа·м^{1/2} и микротвердость 19 ГПа.

Контроль качества технологических процессов с использованием контрольных карт

В.В. Кирюшина, Ю.Ю. Ковалева, **И.Ф. Георгиу**, А.В. Корулин, Т.Е. Быкова, И.А. Антошина, М.О. Забежайлов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Одним из перспективных инструментов контроля качества технологических процессов изготовления керамических и стеклопластиковых изделий является построение контрольных карт (ГОСТ Р ИСО 7870-1-2022). Метод контрольных карт используется для отражения изменений выбранных показателей качества во времени. Однако в отличие от других статистических инструментов (контрольный листок, диаграмма Парето, гистограмма, диаграмма Исикавы, стратификация данных, диаграмма рассеяния) с помощью метода контрольных карт возможно не только отслеживать временные зависимости показателей, но и корректировать технологический процесс получения материалов до того, как их ключевые свойства перестанут соответствовать нормативным требованиям. Важным преимуществом метода является возможность определения характера причин отклонения свойств от заданных уровней. Это позволяет установить относится ли причина к технологии изготовления или является сбоем технологического процесса, что в свою очередь позволит оперативно произвести корректирующие действия над процессом.

На первый взгляд, построение контрольных карт не вызывает трудностей: достаточно отложить по оси абсцисс порядковый номер выборочных данных, а по оси ординат – сам показатель качества с указанием контрольных границ и центральной линии (рис. 1). При необходимости на карту наносят предупреждающие линии.

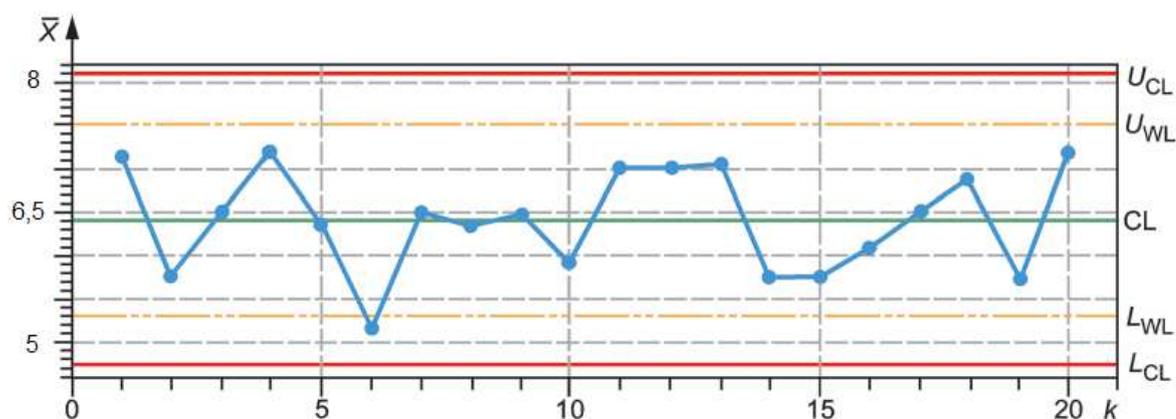


Рис. 1. Пример контрольной карты (\bar{X} -карта)

Несмотря на повсеместное распространение контрольных карт и различные программные средства для их автоматического построения, многие исследователи вместо контрольных карт используют обычные линейные графики и испытывают затруднения с их обработкой. Все это приводит к принятию ошибочных решений относительно корректировки технологического процесса и, тем самым, препятствует более эффективному использованию этого перспективного инструмента на практике.

В работе рассмотрено применение различных типов контрольных карт по количественному признаку для задач контроля качества вновь разрабатываемых и серийно выпускаемых изделий из керамических и стеклопластиковых материалов в АО «ОНПП» Технология» им. А.Г. Ромашина». В качестве контролируемых показателей качества выбраны основные свойства материалов, получаемые в результате испытаний

образцов при аттестации изделий на соответствие требованиям конструкторской и технологической документации.

Важно отметить, что решение подобного рода задач невозможно без цифровизации и автоматизации процессов проведения испытаний и получения их результатов. В АО «ОНПП» Технология» им. А.Г. Ромашина» была введена в эксплуатацию Лабораторная информационная система на базе 1С (ЛИС). Данная система обеспечивает оперативный контроль над ходом всех этапов испытательного процесса и накопление статистической информации о свойствах керамических и стеклопластиковых материалов для осуществления ее обработки и анализа.

Выбор типа контрольных карт определяется степенью серийности, точностью процессов и видом показателей качества. Так, для структурных свойств стеклопластикового материала в изделии, которое находится на этапе разработки, построены карты индивидуальных значений (X -карта) и скользящих размахов (mR -карта). Использование X и mR -карт рекомендовано также при разработке новых материалов и решении других исследовательских задач.

При контроле показателей качества серийно изготавливаемых изделий предпочтение за картами средних значений (\bar{X} -карта) и размахов (R -карта). Усреднение повышает чувствительность карт к выявлению малых систематических сдвигов (трендов) в процессах задолго до появления брака по несоответствию свойств материала. При этом ключевым моментом является выбор количества элементов в подгруппах (выборках) и установление границ регулирования, которые в дальнейшем будут использоваться для оценки степени статистической управляемости процесса и выявления особых причин отклонения свойств от установленных границ.

В качестве примера были проанализированы данные по кажущейся плотности изделий из кварцевой керамики, построены соответствующие карты. Обсуждены результаты проверки стабильности процесса с применением критериев серий. Показано, что \bar{X} - и R -карты объективно и в полной мере характеризуют технологический процесс и технологию изготовления при текущей периодичности получения данных. Построение данных карт также возможно при контроле качества в режиме реального времени.

Применение стандартизированных карт было рассмотрено для керамических изделий с различными допустимыми по техническим условиям границами к выбранному свойству. Достоинство таких карт состоит в представлении большого объема информации на одной карте, что облегчает операторский контроль. Но это и их недостаток, поскольку в случае обнаружения разладки, необходимо проведение дополнительных мероприятий по идентификации сбоя. Применение стандартизированных карт возможно только для отлаженных серийных процессов с устойчивыми параметрами функций распределения исследуемых свойств.

В случае если решение задач контроля качества лежит в более широком временном поле, а также для задач прогноза, когда важны ранее полученные результаты, можно использовать контрольные карты с памятью, среди которых самыми распространенными являются карта экспоненциально-взвешенных скользящих значений ($EWMA$ -карта) и карта кумулятивных сумм ($CUSUM$ -карта).

В работе продемонстрирован функционал и основные преимущества $CUSUM$ -карты по сравнению с X -картой на примере результатов испытаний образцов из технологического припуска керамического изделия на трехточечный изгиб. V -образная маска, наложенная на $CUSUM$ -карту, позволяет помимо разладки процесса, обнаружить его тренд и, таким образом, судить о характере смещения процесса. Карту кумулятивных сумм целесообразно использовать в случае управления технологическими процессами с относительно низким уровнем производительности, например, в условиях мелкосерийного и штучного производства.

Исследование применимости отечественных порошков карбида бора для изготовления ударопрочной керамики

Н.А. Голубева¹, Н.И. Ершова¹, Л.А. Плясункова¹, М.Г. Лисаченко¹, А.С. Нечепуренко²

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

²АО «УНИХИМ с ОЗ», г. Екатеринбург, Россия

E-mail: golubevana@technologiya.ru

Керамические материалы, несмотря на их высокую стоимость, находят широкое применение в элементах бронезащиты. С точки зрения сочетания весовых и механических характеристик наиболее перспективной является керамика на основе карбидов кремния и бора, при этом карбид бора В₄С обладает более низкой плотностью.

Максимальные физико-механические характеристики В₄С обеспечиваются технологией горячего прессования. Недостатком данного метода является низкая производительность и необходимость последующей дорогостоящей механической обработки.

Альтернативной технологией является метод реакционного спекания, основанный на низкотемпературном силицировании заготовок на основе полидисперсных порошков карбида бора с углеродом. Технология является высокопроизводительной и недорогой, и позволяет получать изделия заданной геометрии без дополнительной механической обработки.

Промышленное производство порошка карбида бора реализовано только в некоторых зарубежных странах. Самым крупным производителем является ПАО «Запорожский абразивный комбинат».

В рамках программы импортозамещения в России в АО "УНИХИМ с ОЗ" (г. Екатеринбург) разработана технология получения порошков В₄С.

Для решения задачи получения высококачественной керамики с применением отечественных порошков В₄С необходимо было оценить влияние их физических характеристик на свойства конечного продукта – реакционно-спечённого карбида бора.

В настоящей работе проведен анализ возможности применения отечественных порошков карбида бора для изготовления ударопрочной керамики, исследованы физико-химические характеристики порошков отечественного и импортного производства, проведен сравнительный анализ структурных и физико-механических свойств полученной на их основе керамики.

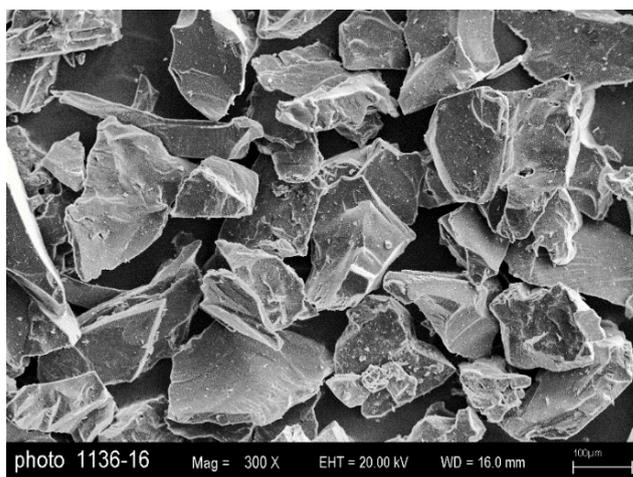
Сравнительный анализ химического состава порошков карбида бора отечественного и импортного производства представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав порошков В₄С отечественного и импортного производства

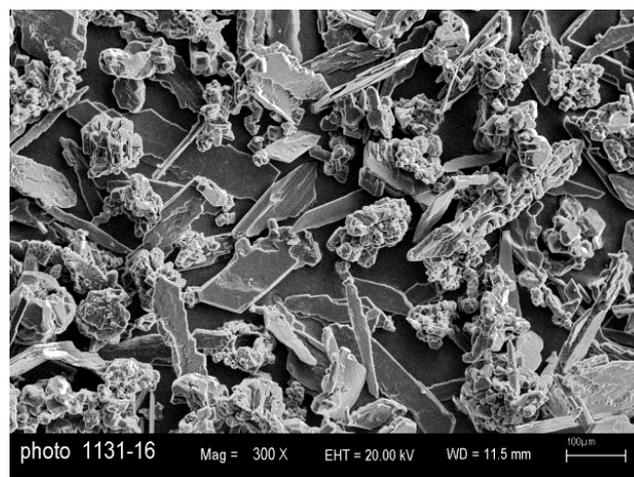
	Содержание основной фазы, %	Содержание примесей, %		Содержание свободного углерода, %
		Fe	В ₂ О ₃	
АО «УНИХИМ с ОЗ»	96,6-98,5	0,3	0,26	≤ 0,4
ПАО «Запорожабразив»	94-95	0,6	0,5	2

Исследование методами электронной микроскопии формы частиц порошков карбида бора показало, что порошки ПАО «Запорожабразив» имеют зерна обломочной формы (рис. 1а). Порошки В₄С АО «УНИХИМ с ОЗ» представляют собой смесь частиц, состоящую из конгломератов сросшихся кристаллов размером до 100 мкм и вытянутых зерен пластинчатой (игольчатой) морфологии (рис. 1б).

Экспериментальные образцы керамических материалов получали методом полусухого прессования с последующим силицированием в вакууме при температуре 1550 °С.



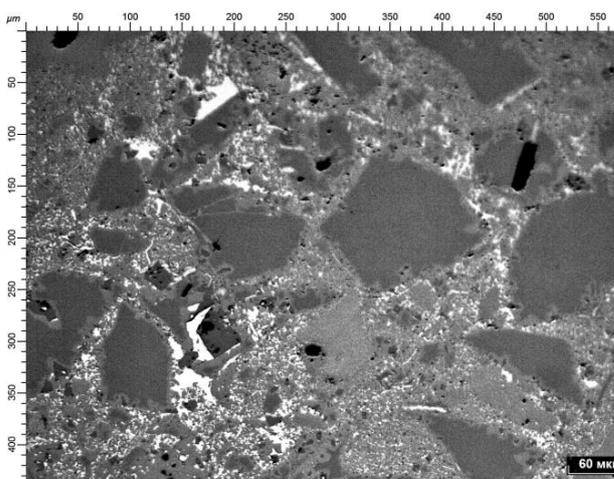
а



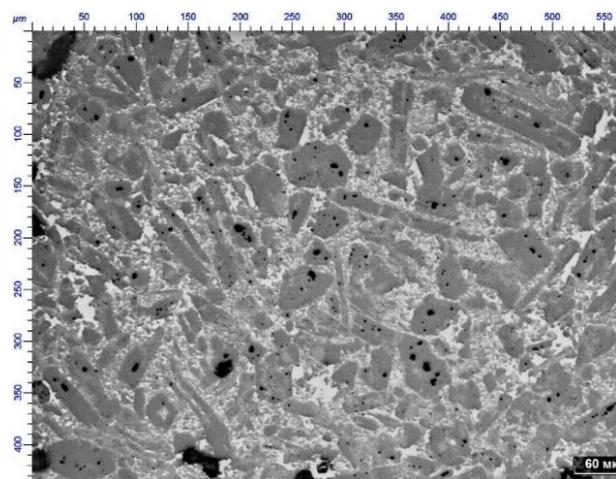
б

Рис. 1. Микроструктура порошка карбида бора фракции F 150:
а) ПАО «Запорожабразив»; б) АО «УНИХИМ с ОЗ»

Электронно-микроскопические и оптические исследования показали, что структура образцов на основе порошков ПАО «Запорожабразив» однородная, образована крупными и мелкими зернами обломочной формы, которые формируют плотный карбидный каркас (рис. 2а). Микроструктура керамики на основе порошков АО «УНИХИМ с ОЗ» образована призматическими зернами размером от 50 до 100 мкм и зернами неопределенной формы размером 3-10 мкм. Вытянутые зерна карбида бора имеют преимущественную ориентацию перпендикулярную оси прессования (рис. 2б). Такая микроструктура механически препятствует распространению трещины, тем самым снижает концентрацию напряжений.



а



б

Рис. 2. Микроструктура полированной поверхности образцов реакционно-спечённого карбида бора на основе порошков: а) ПАО «Запорожабразив»; б) АО «УНИХИМ с ОЗ»

Различие в формировании микроструктуры определяет различия в физико-механических свойствах, более высокие значения которых показывают преимущество ориентированной структуры материала.

Значения предела прочности при статическом изгибе и критического коэффициента интенсивности напряжений образцов, полученных из отечественных порошков, выше на 10-25%, чем на аналогичных составах из импортных, максимальные значения этих показателей достигают 350 МПа и $4,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ соответственно.

В результате проведенной работы показана возможность получения керамики на основе реакционно-спечённого карбида бора с высокими физико-механическими характеристиками из порошков отечественного производителя АО «УНИХИМ с ОЗ».

Влияние структуры порошков природного волластонита и спекающих добавок на физико-технические свойства керамики

Л.И. Горчакова¹, Ю.А. Перкин^{1,2}, Д.В. Харитонов^{1,2}

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

²РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Одним из перспективных материалов для цветной металлургии является керамика на основе волластонита $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. В настоящем исследовании рассматривается влияние структуры порошков природного волластонита и спекающих добавок на физико-технические свойства керамики.

Для массового производства разнообразных изделий из волластонита получили развитие классические методы керамической технологии, основанные на формовании заготовок из порошков природного волластонита с последующим их спеканием.

Дисперсность, фракционный состав и морфология частиц порошков волластонита зависят от условий их получения из природного минерала. Эти характеристики оказывают существенное влияние на физико-технические и эксплуатационные свойства керамических изделий.

В работе использовали порошки природного волластонита Верхне-Бадамского месторождения марок ВП-25, ВП-25F, МИВОЛЛ 40-97. Порошки различаются дисперсностью и морфологией частиц, но практически одинаковы по фазовому составу. Согласно результатам рентгенофазового анализа, основной кристаллической фазой всех марок используемых порошков является волластонит CaSiO_3 (трикл.), сопутствующие фазы – кальцит CaCO_3 (гексаг.), α -кварц SiO_2 (гексаг.). Также на рентгенограмме присутствует аморфное гало низкой интенсивности.

Результаты термогравиметрического анализа свидетельствуют о наличии в порошках заметного количества гидратированных форм силиката кальция.

С использованием лазерного анализатора было выявлено, что порошки волластонита различных марок содержат от 5 до 70 мас. % частиц размером менее 5 мкм, соотношение длины частиц к диаметру от 5 до 15. Удельная поверхность порошков, измеренная методом газопроницаемости, находится в пределах 2000-3000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Порошок волластонита предварительно прокаливают при 850 °С с целью удаления газообразных продуктов разложения кальцита CaCO_3 . В процессе термообработки морфология частиц порошка волластонита не претерпевает изменений, но удельная поверхность несколько снижается.

Рассмотрена технология получения керамики из природного волластонита с добавками, обеспечивающими относительно низкую температуру спекания. Для спекания силикатных систем применяют соединения бора. Борсодержащие добавки взаимодействуют с частицами волластонита, образуя низкотемпературную стеклофазу состава $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ в широком интервале температур. В присутствии расплава спекание ускоряется, так как облегчается скольжение твердых частиц, увеличивается площадь контактов между ними.

Наиболее эффективным спекающим агентом является аморфный бор, он взаимодействует с силикатами, начиная от температуры 500 °С. Для спекания достаточно ввести 0,5-1,0 мас. % бора. Температура обжига такой керамики не превышает 950 °С.

Дефицит и высокая стоимость аморфного бора ограничивает возможности его использования в серийном производстве керамических изделий. В качестве более доступных добавок опробованы борсодержащие кислородные соединения – борная кислота H_3BO_3 , пентаборат $\text{NH}_4\text{B}_5\text{O}_8$ и тетраборат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Образцы из порошков волластонита различных марок со спекающими добавками отформованы методом полусухого прессования при нагрузке 15 МПа и спечены при температуре 930 °С.

Для всех исследуемых марок волластонита механическая прочность керамики, отформованной из порошков, прошедших предварительную термообработку, в 1,5 раза выше, чем у керамики из необожженных порошков волластонита, и составляет 14 МПа и 8 МПа, соответственно.

Значения плотности и прочности образцов керамики, полученной как из обожженных, так и из необожженных порошков МИВОЛЛ 40-97 и ВП-25F сравнимы. Плотность образцов на основе ВП-25 выше на 20%, что обусловлено менее выраженной анизотропией его частиц и лучшей способностью к уплотнению.

Максимум прочности ~15 МПа для всех порошков волластонита достигается при введении 0,5 мас. % бора аморфного. Сравнимые значения механической прочности достигаются при введении в шихту не менее 5 мас. % кислородных соединений бора – борной кислоты либо боратов аммония.

Кислородные соединения бора имеют общий недостаток – высокую летучесть. Массовое содержание стеклофазы в спеченных образцах в пересчете на оксид бора определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП). Результаты анализа показывают, что в спеченной керамике в виде аморфной фазы сохраняется 70-80 мас. % от первоначального количества боратов аммония и не более 60 мас. % от борной кислоты.

Плотность керамики имеет максимум 1,6-1,8 г/см³ при введении кислородсодержащей добавки 6-8 мас. %. Прочность керамики почти линейно растет с увеличением содержания в ней стеклофазы, затем несколько снижается, когда количество испаряющейся субстанции возрастает настолько, что это приводит к разрыхлению керамической матрицы, а на поверхности изделий образуются стекловидные пятна.

Керамический материал, полученный спеканием природного волластонита с борсодержащими добавками, состоит из кристаллических фаз и стеклофазы, равномерно распределенной по границам пластинчатых частиц и в межзеренном пространстве. Увеличение прочности при спекании обусловлено формированием сростков пластин волластонита, сцементированных стеклофазой в местах контакта зерен.

Изделия из волластонита с частицами выраженной удлиненной морфологии имеют хорошую стойкость при циклическом воздействии расплава, а главное, не склонны к катастрофическому разрушению после появления первых трещин.

Испытания на термостойкость образцов керамики из волластонита проводили путем циклического нагрева до температуры 800 °С с последующим охлаждением на воздухе до температуры окружающей среды. Образцы с содержанием ~3 мас. % связанного в стеклофазе оксида бора выдерживают не менее 30 циклов «нагрев – охлаждение», но с дальнейшим ростом содержания стеклофазы термостойкость керамики снижается. Для сравнения отметим, что образцы керамики, полученной с добавлением 0,5 мас. % аморфного бора, несмотря на более высокую прочность, выдерживают не больше 7 циклов «нагрев – охлаждение» до появления первых трещин. Вероятно термостойкость керамики зависит не только от содержания стеклофазы, но и от температуры начала ее формирования при обжиге.

При циклическом воздействии расплава алюминия поверхность керамики постепенно разрыхляется, начинается налипание металла. Процесс идет тем интенсивнее, чем больше стеклофазы содержит керамика.

Из полученных данных следует вывод, что на термостойкость керамики влияет как морфология частиц волластонита, так и содержание в ней стеклофазы. Наилучшая термостойкость керамики и максимум прочности наблюдаются при разных содержаниях стеклофазы, следовательно, в целях обеспечения максимального эксплуатационного ресурса, состав керамики следует выбирать исходя из условий работы конкретных изделий.

Побочные процессы при исследовании керамических систем по данным высокотемпературной масс-спектрометрии

Н.А. Грибченкова, А.С. Смирнов, А.С. Алиханян

Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (ИОНХ РАН), г. Москва, Россия

E-mail: gribchenkova@igic.ras.ru

Часто получение и исследования керамических материалов проводят при высоких температурах, при которых реакционная способность веществ и скорости физических процессов значительно повышаются, что приводит к заметному течению побочных процессов, сказывающихся на результатах самого исследования или качестве получаемого материала. К такого рода нежелательным процессам относятся, например, испарение материала или отдельных его компонентов и/или взаимодействия материала с окружением. При высокотемпературных исследованиях, особенно в случае оксидных керамик, содержащих такой активный компонент как кислород, избежать полностью побочных взаимодействий практически невозможно, в связи с чем возникает необходимость минимизировать их воздействие оптимальным выбором материала контейнера для исследуемого вещества и/или учесть при интерпретации результатов эксперимента, что в свою очередь требует идентификации побочного процесса и оценки его воздействия на экспериментальные данные. Эффективным методом экспериментальной термодинамики для исследования физико-химических характеристик процессов парообразования, в том числе гетерогенных равновесий в конденсированной фазе является метод Кнудсеновской эффузионной (или высокотемпературной) масс-спектрометрии (КЭМС), позволяющий определять качественный и количественный состав насыщенного пара исследуемого вещества или системы в зависимости от температуры. Идентификация газовых компонентов и величины их парциальных давлений позволяют описывать реализующиеся в эффузионной камере равновесия и получать энергетические характеристики протекающих реакций. Таким образом, эксперименты КЭМС позволяют установить природу процесса, а также получить его термодинамические характеристики. Очевидно, что побочные процессы могут не приводить к образованию каких-либо газообразных продуктов реакций, которые можно обнаружить, анализируя насыщенный пар в камере Кнудсена, т.е. это различные взаимодействия в конденсированной фазе. Тем не менее, такие процессы могут быть установлены по изменению термодинамических активностей компонентов исследуемой системы, выраженных через парциальные давления продуктов парообразования последних. На основании опыта высокотемпературных КЭМС исследований оксидных систем в нашей лаборатории можно провести категоризацию побочных взаимодействий согласно их природе на физические и химические. В основе физических побочных процессов лежат явления массопереноса через газовую фазу, взаимного растворения, поверхностной сегрегации компонентов и различных видов диффузии в конденсированной фазе. Химические побочные взаимодействия представляют собой, как правило, реакции соединения с образованием сложных веществ, а также окислительно-восстановительные реакции. Согласно данным представлениям, в нашей работе практикуется «алгоритм» подбора материала контейнера для исследуемого вещества, включающий предварительную термодинамическую оценку, основанную на данных по фазовым равновесиям в системе «исследуемое вещество – материал эффузионной камеры», соответствующих диаграммам Эллингама, и вычислении энергий Гиббса вероятных побочных процессов по справочным данным, а также обязательную КЭМС экспериментальную апробацию материала с использованием чистых компонентов исследуемой системы. Интересно отметить, что в некоторых случаях воздействие кинетических факторов оказывается превалирующим над термодинамическими предпосылками.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания ИОНХ РАН.

Изучение влияния технологических параметров сборки на прочность клеевого соединения в системе «металл – герметик – керамика»

Д.В. Данилов, Е.В. Маслова, Е.В. Миронова, А.А. Анашкина
АО «ОНПП «Технология», г. Обнинск. Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Для соединения керамических оболочек с металлическим шпангоутом традиционно используется кремнийорганический герметик ВИКСИНТ У-2-28НТ (ТУ 38.303-04-04-90). При сборке герметик наносится на керамическую оболочку и на металлический шпангоут, после чего они соединяются, и собранное изделие помещается в стапель, где в соответствии с технологическим процессом (ТП) находится не менее 24 ч под давлением. За это время происходит отверждение герметика (формирование стабильной формы клеевого шва), а время полной вулканизации герметика составляет 72 ч, в течение которых происходит создание прочного соединения в системе «металл – герметик – керамика».

Для определения прочности клеевого соединения одновременно со сборкой изделия проводят сборку образцов-спутников (образцов), для чего соединяют (склеивают) посредством герметика металлические пластины с керамическими образцами, выдерживают в приспособлении под давлением и затем определяют предел прочности при сдвиге ($\tau_{сдв}$). После извлечения собранного изделия из стапеля и образцов из приспособления, согласно действующей технологии в течение 3-4 ч проводят сушку изделия и образцов к нему в сушильном шкафу при температуре 105 ± 5 °С.

Совершенствование и автоматизация технологии приготовления герметика, повышение однородности его состава и его улучшение качественных показателей продемонстрировали тенденцию к существенному сокращению необходимого времени выдержки собранного изделия под давлением.

Для изучения закономерностей формирования прочного соединения в системе «металл – герметик – керамика» от технологических параметров сборки был проведен ряд экспериментальных работ. Для этого были изготовлены десять партий образцов, собранных из металлических пластин и керамических образцов и соединенных герметиком ВИКСИНТ У-2-28НТ. Время выдержки под давлением изменяли, снижая от 21 до 12 ч с шагом 1 ч. Каждая партия включала в себя 24 образца, из которых 12 образцов были контрольными и выдерживались под давлением в течение 24 ч (эталонное время). Кроме того, в каждой партии перед испытаниями 6 образцов подвергали сушке и 6 образцов нет. Критериями оценки качества соединения были прочность при сдвиге и запас прочности, а также толщина клеевого шва.

Исходя из полученных данных видно, что снижение времени выдержки образцов под давлением не приводит к снижению прочности клеевого соединения в системе «керамика – герметик – металл» (рис. 1), а ее запас увеличивается до 230% (рис. 2).

Для оценки изменения толщины клеевого шва после снятия давления сразу после разборки приспособления и спустя 24 ч контролировали его толщину (рис. 3). При снижении времени выдержки образцов под давлением изменения толщины клеевого шва не отмечено, и ее значения находятся в пределах погрешности измерений.

Также показано, что сушка не оказывает влияния на прочность при сдвиге, запас прочности и толщину клеевого шва, независимо от времени выдержки образцов под давлением.

В ходе работы по изучению влияния технологических параметров сборки на прочность клеевого соединения в системе «металл – герметик – керамика» установлено следующее:

- уменьшение времени выдержки образцов под давлением не приводит к снижению прочности клеевого соединения и уменьшению запаса прочности;
- время выдержки под давлением не влияет на толщину клеевого шва;

- прочность клеевого соединения не зависит от сушки образцов после сборки.

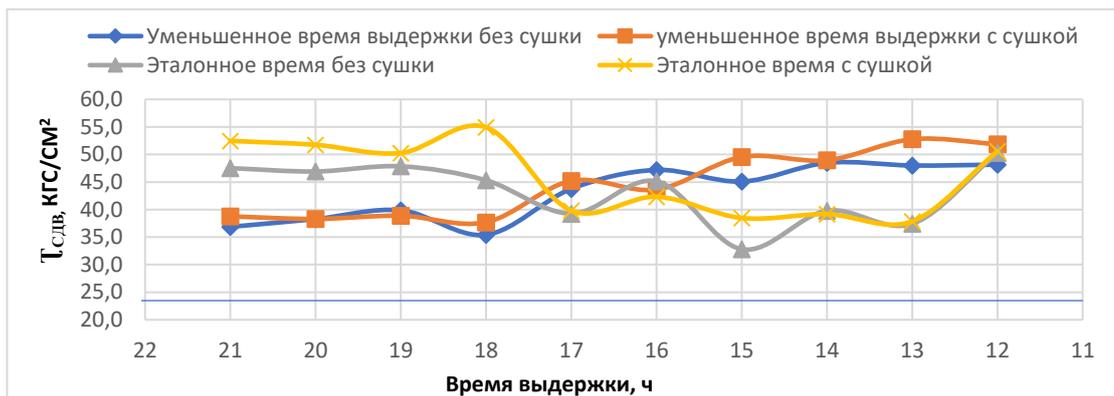


Рис. 1. Зависимость прочности клеевого соединения при сдвиге от времени выдержки под давлением и от наличия сушки

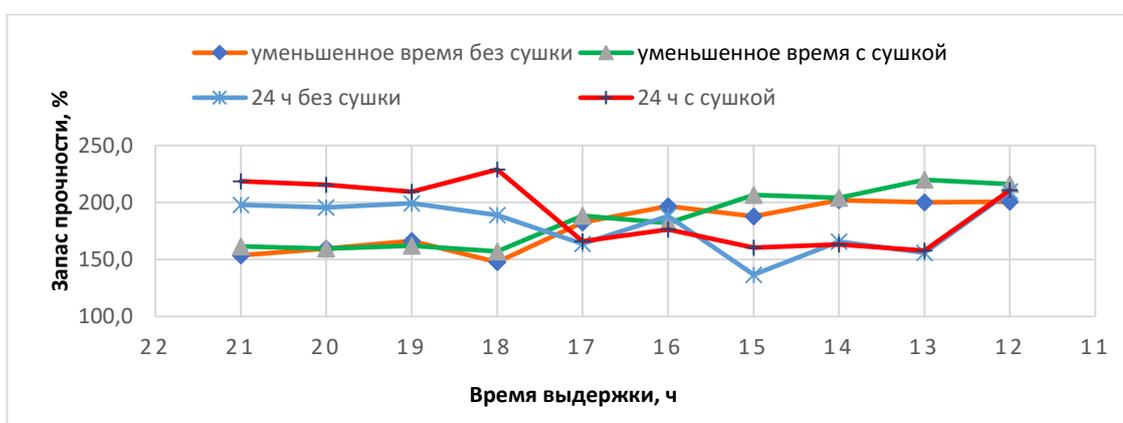


Рис. 2. Изменение запаса прочности клеевого соединения в зависимости от времени выдержки под давлением и от наличия сушки



Рис. 3. Изменение толщины клеевого шва, измеренной сразу после разборки приспособления и через 24 ч после разборки, в зависимости от времени выдержки под давлением и от наличия сушки

Таким образом, экспериментально подтверждено, что предел прочности при сдвиге достигает значений, соответствующих требованиям ТУ на изделия, в условиях выдержки от 12 до 21 ч, как при сушке после сборки, так и без нее, и показана возможность сокращения технологического цикла сборки за счет снижения длительности выдержки изделий и образцов под давлением и исключения операции сушки.

Фазовый состав, структура наночастиц матричной системы на основе ВКВС боксита композиционного состава

П.В. Дякин^{1,2}, Ю.Е. Пивинский¹, С.В. Вихман²

¹ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор», г. Санкт-Петербург, Россия, ²СПбГТИ (ТУ),

г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dyakin@mail.ru

При получении высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС), при мокром измельчении в условиях высокой объемной концентрации твердой фазы, повышенной температуры и предельного разжижения осуществляется «наработка» определенного количества наночастиц. В публикациях отмечена исключительная роль наночастиц в технологии ВКВС и керамобетонов. Целью настоящих исследований является изучение фазового состава и структуры наночастиц матричной системы на основе ВКВС композиционного состава: спеченный боксит Rota HD–10% ВДКС (высокодисперсное кварцевое стекло).

Исходные материалы: спеченный боксит марки Rota HD содержащий, мас. %: Al_2O_3 88,5, SiO_2 5, TiO_2 3,69, Fe_2O_3 1,32, щелочных и щелочноземельных оксидов (R_2O , CaO , MgO) 0,55. Фазовый состав боксита, мас. %: корунд 82, муллит 10-11, соединения титана 5-6, стеклофаза 2-4. Высокодисперсное кварцевое стекло, ВДКС: SiO_2 98,9%, Al_2O_3 0,7%. Методы исследований: распределение частиц по размерам определяли методом лазерной дифракции (прибор «Horiba LA-960»); фазовый состав частиц методом ИК-спектроскопии (ИК-спектрометр «Varian Scimitar 1000 FT-IR») и рентгенофазовый анализ (дифрактометр «Дифрей-401»). Исследования структуры образцов матричной системы, обожженных при различных температурах, проведены с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения «Tescan Mira 3».

ВКВС боксита композиционного состава получали в промышленной мельнице объемом $3,5 \text{ м}^3$. Свойства ВКВС: $\rho=2,72 \text{ г/см}^3$, $W=11,6\%$, объемное содержание твердой фазы $C_v=0,70$, медианный диаметр частиц $d_m=4,3 \text{ мкм}$, коэффициент полидисперсности $K_p=K_{80}/K_{20}=8$. Матричная система на основе ВКВС спеченного боксита марки Rota HD–10% ВДКС содержит 79% Al_2O_3 и 15,3% SiO_2 .

Разделение частиц твердой фазы ВКВС по фракциям осуществляли методом отстаивания ВКВС, разбавленной дистиллированной водой в соотношении 1:15, в мерном цилиндре. За время длительной выдержки в состоянии покоя в течение 320 сут произошло седиментационное расслоение суспензии на пять участков – уровней в соответствии с удельным весом и размером частиц (рис. 1а). Отбор проб из каждого уровня производили с помощью специального отборника. На рисунке 1 представлен цилиндр с разбавленной ВКВС (рис. 1а) и интегральное распределение частиц уровней 1а-4 по размерам (рис. 1б).

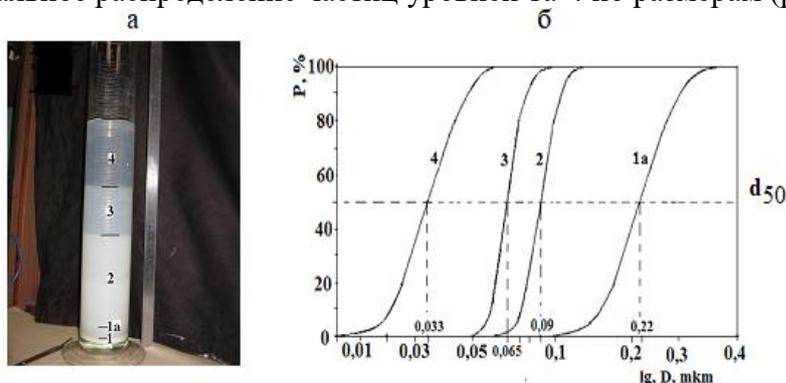


Рис. 1. Цилиндр с разбавленной ВКВС (а), интегральное распределение частиц по размерам уровней 1а-4 (б)

Показатели медианного размера частиц d_m уровней 1-4 составляют: 1– 4,3 мкм; 1а – 0,22 мкм; 2 – 0,09 мкм; 3 – 0,065 мкм; 4 – 0,033 мкм (рис. 1б).

С целью удаления влаги суспензии каждого уровня подвергали сушке при 120 °С. Анализ ИК-спектров показал наличие аморфного SiO_2 регистрируемого по линии поглощения при 1100 см^{-1} , кристаллического кварца – по линии поглощения при 800 см^{-1} , гидратных групп OH^- – поглощением в диапазоне 3400-3600 см^{-1} . Линии поглощения при 450 и 650 см^{-1} соответствуют высокотемпературной модификации Al_2O_3 . Муллит определяется поглощением в области около 550 см^{-1} . Результаты исследований фазового состава наночастиц матричной системы показывают, что основным процессом в изменении фазового состава после обжига при 1400 °С является образование вторичного муллита за счет взаимодействия SiO_2 с Al_2O_3 боксита. Методами классической химии определен химический состав наночастиц 4-го уровня: Al_2O_3 26,53%; SiO_2 58,9%; TiO_2 3,36%; Fe_2O_3 1,17%; R_2O 0,85%; CaO 1,73%; MgO 1%; примеси – 6,46%.

На рисунке 2 представлены электронные снимки структуры матричной системы после сушки 120 °С, обжига 1000 и 1150 °С, соответственно.

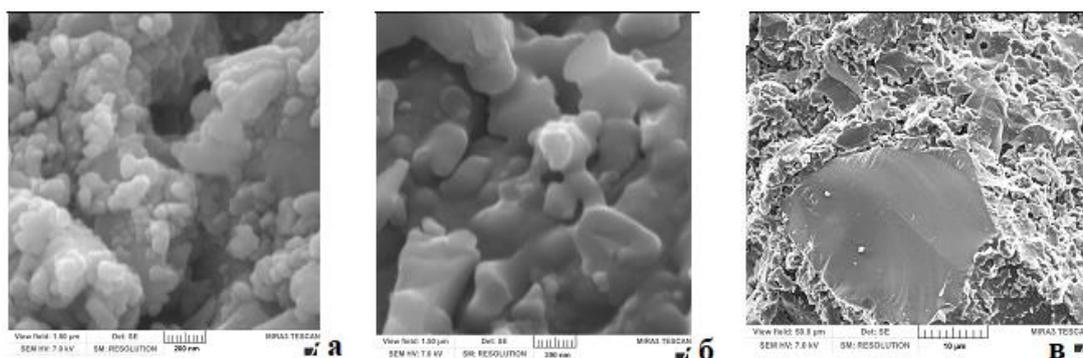


Рис. 2. Электронные снимки структуры матричной системы: а – после сушки при 120 °С, б – после обжига при 1000 °С, в – после обжига при 1150 °С

Анализ электронных снимков образцов матричной системы после сушки 120 °С и обжига 1000 °С (рис. 2а, б) показал, что после обжига при 1000 °С наблюдается начальная стадия спекания частиц, на этой стадии создаются и увеличиваются контакты между частицами, что способствует повышению прочности материала. При увеличении $T_{\text{обж}}$ до 1150 °С протекает дальнейшее спекание матричной системы с образованием прослойки-«оболочки» высокодисперсных частиц вокруг частиц большего размера (рис. 2в).

Изучен фазовый состав и структура наночастиц матричной системы на основе ВКВС боксита композиционного состава. Определена комплексная положительная роль наночастиц в технологии ВКВС и керамобетонов: на стадии получения ВКВС и формовочных систем они способствуют достижению оптимальных реотехнологических свойств; на стадии разогрева, обжига или службы определяют существенный рост прочности; способствуют формированию нанопористой структуры, непроницаемой для шлаков и расплавов, образованию вторичного муллита, что сопровождается определенным ростом объема, компенсирующим усадочные эффекты. При этом достигается объемопостоянство керамобетонов. Проявление данных явлений позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики керамобетонов и соответственно увеличить сроки службы тепловых агрегатов. На основе ВКВС боксита композиционного состава в АО «ДИНУР» осуществлено широкомасштабное производство как формованных, так и неформованных керамобетонов в системах: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-SiC-C}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ для черной металлургии – это муллитокорундовые изделия марки МКТП-85 для футеровки сталеразливочных ковшей, бойные плиты, горелочные камни, желобные массы оксиднокарбидноуглеродистого состава.

Разработка термостойких композиционных материалов для высоконагруженных конструкций

Я.Л. Жуковская, Д.А. Мельников, Д.С. Рюмин, И.А. Антошина, П.А. Степанов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

В настоящее время актуальной для авиа- и ракетостроительной промышленности является проблема разработки высокотемпературных материалов для конструкций, эксплуатируемых при температурах выше 1000 °С. К таким конструкциям могут быть отнесены элементы гиперзвуковых летательных аппаратов, например, головные обтекатели, защитные крышки и люки радиоэлектронной аппаратуры, узлы соединений. Композиционные материалы на основе неорганического алюмохромфосфатного связующего и кварцевого или кремнеземного текстурированного наполнителя обладают стабильными прочностными и диэлектрическими характеристиками в температурном диапазоне до 800 °С длительно, до 1200 °С кратковременно. Однако требования к высокотемпературным свойствам конструкционных материалов специального назначения постоянно растут.

Перспективным направлением в создании конструкций радиотехнического назначения, работающих в условиях повышенных температур, является разработка неорганических композиционных материалов, на основе модифицированных керамических шликеров, используемых в качестве связующего. В состав связок вводят различные инертные наполнители, с помощью которых можно регулировать механические, теплофизические, диэлектрические и другие свойства керамического композиционного материала (ККМ). В зависимости от условий эксплуатации в качестве армирующего наполнителя для данного типа композиционных материалов могут быть применены кварцевые, кремнеземные, алюмооксидные ткани, маты, жгуты и ровинги.

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» были подобраны составы неорганических связующих на основе кварцевого и алюмооксидного шликера, модифицированных различными добавками, со стабильными теплофизическими и диэлектрическими характеристиками в температурном диапазоне от 20 до 1600 °С.

Связующее №1 представляет собой раствор из корундомуллитового шликера, щелочного кремнезоля марки Nanosil-30 с 30%-м содержанием SiO₂ и хромалюмофосфатного связующего марки ФОСКОН 351.

Связующее №2 представляет собой раствор из кварцевого шликера, щелочного кремнезоля марки Nanosil-30 с 30%-м содержанием SiO₂ и хромалюмофосфатного связующего марки ФОСКОН 351.

Проведены исследования по определению влияния температуры термической обработки на структурные и теплофизические характеристики данных связующих. Полученные результаты позволили определить оптимальные режимы и конечные температуры формования и термической обработки композиционных материалов, на основе модифицированных керамических шликеров. Определена предельная термостойкость данных связующих, которая для модифицированного кварцевого шликера достигает 1200 °С, а для модифицированного алюмооксидного шликера – 1600 °С.

В качестве армирующих наполнителей для разрабатываемых ККМ выбраны стеклоткани, используемые в серийной продукции АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»: ткань кварцевая марки ТС8/3-К-ТО, ткань многослойная кремнеземная марки МКТ-2,5 и импортная жаропрочная стеклоткань марки PP Tech Flex 880.

Методом вакуумного формования были изготовлены образцы керамических композиционных материалов на основе неорганических шликеров и различных армирующих наполнителей. Проведены исследования структуры и физико-технических характеристик новых керамокомпозитов при различной температуре.

Разработка технологии получения материала на основе спеченного нитрида кремния с добавками оксида иттрия и оксида алюминия для гибридных высокоскоростных подшипников

А.А. Журавлев, К.Б. Шамшетдинов, Н.К. Георгиу, М.Г. Лисаченко
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Нитрид кремния Si_3N_4 обладает сравнительно низкой плотностью, высокой прочностью и ударной вязкостью, что в сочетании с превосходной стойкостью к истиранию обуславливает применение данного материала в качестве шариков для подшипников. Зарубежные компании из США, КНР производят и поставляют коммерчески доступные подшипники с керамическими шариками из Si_3N_4 под торговыми наименованиями Cerbec®, Mascera® и др. В России производства подобной продукции нет. В данной работе было опробовано получение шариков для подшипников из отечественного сырья (Si_3N_4) методом спекания под давлением азота.

Технология получения заготовок шариков из спечённого нитрида кремния включает следующие этапы: мокрый помол исходных компонентов, подготовка пресс-порошка, прессование заготовок образцов, спекание образцов в вакуум-компрессионной печи в атмосфере азота, механическая обработка шариков.

В качестве сырья был использован порошок $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ с равноосной формой частиц, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС); в качестве спекающих добавок были опробованы составы с оксидами иттрия и алюминия в молярных соотношениях 2:1, 1:1, 2:5, 3:5, 4:5. Наибольший уровень физико-механических свойств показали образцы керамики с добавкой оксида иттрия и оксида алюминия в молярном соотношении $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Al}_2\text{O}_3 = 3:5$, поэтому дальнейшие работы проводили с данным составом добавок. Физико-механические свойства керамики исследовали на образцах размером $10 \times 10 \times 70$ мм, полученных одноосным прессованием. В качестве среды для проведения помола использовали этиловый спирт, а в качестве связующего – поливинилпирролидон (ПВП) марки К-90. Оксиды иттрия и алюминия получали разложением нитрата иттрия и гидроксида алюминия в муфельной печи при 600°C в течение 13 ч. При этом получали агломераты порошков с высокой удельной поверхностью ($45 \text{ м}^2/\text{г}$ для Y_2O_3 и $164 \text{ м}^2/\text{г}$ для Al_2O_3). Помол и смешивание основного компонента Si_3N_4 с добавками проводили в планетарной мельнице в течение 24 ч при 300 об/мин. Общее количество спекающих добавок в смеси составило 12,5 мас. %. После помола шихту высушивали и добавляли связующее в виде водного 2%-го раствора ПВП в количестве 3 мас. %, компоненты смешивали, высушивали в сушильном шкафу до остаточной влажности 3-5%, а затем просеивали через сито с размером ячейки 0,63 мкм.

Образцы в форме шара получали холодным изостатическим прессованием при давлении 210 МПа. Спекание проводили в вакуум-компрессионной печи в атмосфере азота под давлением 2 МПа при температуре 1850°C и выдержке 5 ч. Кажущуюся плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания. Фазовый состав керамики определяли с помощью рентгеновского дифрактометра Empyrean. Изучение поверхности материала проводили на оптическом микроскопе Nikon SMZ1500. Измерения предела прочности при трехточечном изгибе проводили с использованием установки LFM-50. Микротвёрдость измеряли методом Виккерса (нагрузка 0,5 кг, время индентирования 10 с) на полированных поверхностях ($R_a \sim 0,03$ мкм) с помощью твердомера Struers DuraScan 50. Трещиностойкость K_{IC} оценивали согласно методу Палмквиста по длине радиальных трещин, формирующихся около отпечатка алмазной пирамиды при нагрузке 2 кг.

Физико-механические свойства материала в сравнении со свойствами Si_3N_4 подшипников Cerbec® приведены в таблице 1. На рисунке 1 представлены фотографии

шариков после спекания и механической обработки. На рисунке 2 представлены микрофотографии поверхности полированного шара.

Таблица 1. Физико-механические свойства спечённого Si_3N_4

Параметр	Полученные значения	Cerbec® (SN102)
Данные РФА	$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, $\text{Y}_5\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{N}$ (гексаг.), $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ (монокл.)	$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$
Плотность, г/см^3	$3,25 \pm 0,03$	3,23
Относительная плотность, %	96,7	99,5
Прочность на изгиб, МПа	725 ± 51	1000
Микротвердость, HV10	1400 ± 50	1490
Трещиностойкость K_{1C} , $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$5,2 \pm 0,3$	6

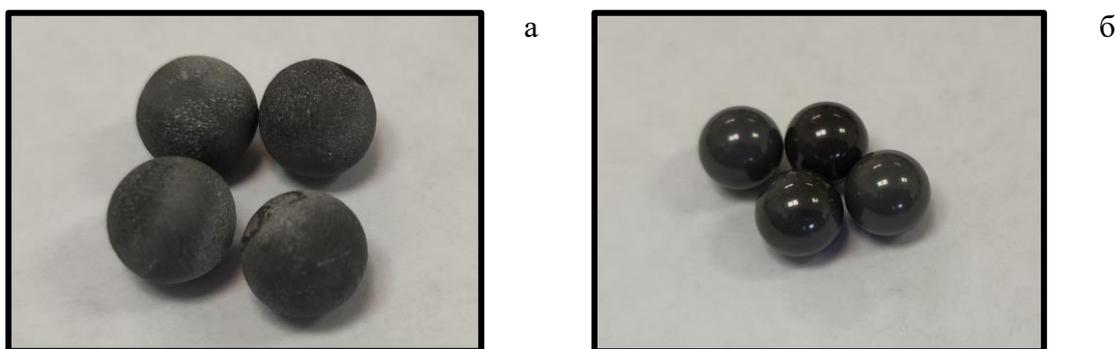


Рис. 1. Внешний вид образцов: а – после спекания, б – после механической обработки (шлифовка, полировка)

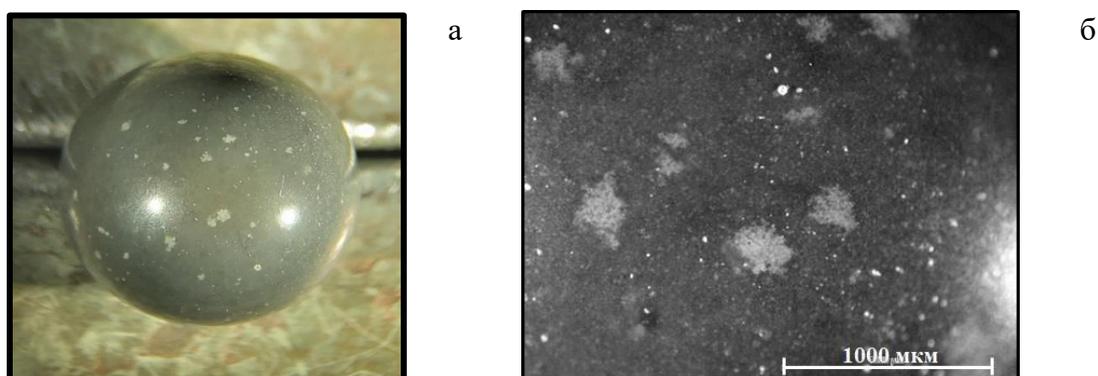


Рис. 2. Внешний вид полированного шарика: а – фото полированного шарика, б – фрагмент поверхности полированного шарика

На поверхности шара можно наблюдать светлые области, представляющие собой скопления межзёренной фазы, образующиеся, по-видимому, вследствие агломерирования спекающей добавки в процессе смешивания компонентов. Другой причиной может быть миграция и скопление оксидов иттрия и алюминия в процессе спекания материала.

Таким образом, из сырья отечественного производства получены заготовки спеченного Si_3N_4 шаровидной формы с относительной плотностью 96,7% и высоким уровнем физико-механических свойств: прочность на изгиб 725 ± 51 МПа, микротвердость 1400 ± 50 МПа, $K_{1C} = 5,2 \pm 0,3$ $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Вместе с тем полученный материал содержит области скопления межзёренной фазы, являющейся причиной неоднородности состава, что может снижать эксплуатационные характеристики изделий. Соответственно, требуется дальнейшая отработка технологии.

Определение прочностных и упругих характеристик деструктурирующих материалов при высокоскоростном нагреве

М.О. Забейлов¹, Р.А. Миронов¹, К.В. Клемазов², П.Ю. Якушкин¹

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия

E-mail: zabekhailovmo@technologiya.ru

Традиционно при высокотемпературных механических испытаниях материалов используют температурные камеры с омическими нагревателями из металла или керамики для осуществления нагрева исследуемых образцов до температуры испытаний. Нагрев в таких камерах происходит медленно (со скоростью <1 °C/c) вследствие необходимости прогрева всего рабочего пространства печи, включая футеровку. Получаемые механические характеристики материалов при таких скоростях нагрева адекватно описывают поведение материала при высоких температурах только в том случае, когда в материале не происходит необратимых изменений, например, термодеструкции, в процессе нагрева. Это справедливо в определенном начальном диапазоне температур нагрева, который для полимерных и композиционных материалов с полимерной матрицей ограничивается температурами ~100-300 °C, выше которых начинается деструкция полимера. Для высокотемпературных металлических, керамических и стеклообразных материалов этот диапазон ограничивается температурами начала размягчения, плавления, окисления, разложения материалов, которые, как правило, в этих материалах происходят при температурах выше 1000 °C. При нагреве материала до температуры, выше которой он перестает быть стабильным и претерпевает структурные и/или фазовые изменения, медленный нагрев при испытаниях материалов снижает точность, достоверность и однозначность получаемых результатов, так как результаты будут зависеть от степени изменения (превращения) материала, которая в свою очередь будет зависеть от режима нагрева. Решение проблемы возможно при использовании способа нагрева, который позволит нагреть материал быстрее и тем самым реализовать возможность воспроизведения режима нагрева, близкого к эксплуатационному.

Для определения механических характеристик деструктурирующих материалов при высокой скорости нагрева с возможностью реализации заданного режима нагрева в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» был разработан ряд методов с использованием индукционного нагрева, которые позволяют производить нагрев поверхности образца со скоростью до 100 °C/c при определении механических характеристик материалов при растяжении и сжатии (патенты РФ № 2538419, № 2711557, № 2789154, № 2789656).

При нагреве до температур ~1000 °C могут быть использованы металлические промежуточные нагреватели. При нагреве до более высоких температур используются промежуточные нагреватели из проводящей керамики, например, дибориды циркония и гафния, и другие. При помощи разработанных методов были исследованы механические характеристики кварцевой керамики (рис. 1), композиционного материала на основе кварцевой ткани и хромалюмофосфатного связующего до 1500°C (рис. 2), диборидов циркония и гафния до 1800 °C (рис. 3).

При исследовании кварцевой керамики было установлено, что при температуре 1450 °C относительная деформация достигает порядка 50%. Данный эффект связан с переходом SiO₂ в вязкотекучее состояние и появлением пластической деформации. Для композиционного материала на основе кварцевой ткани и хромалюмофосфатного связующего пластическая деформация наблюдается при температуре выше 1300 °C. При этом наблюдается микрофрагментация материала, сопровождающаяся появлением сетки трещин на поверхности. Для диборидов циркония и гафния наблюдается заметное падение прочности на ~30-80% при температурах 1700-1800 °C с переходом от хрупкого характера разрушения к пластическому.



Рис. 1. Образцы кварцевой керамики после нагрева до 1500 °С при механических испытаниях на растяжение



Рис. 2. Образцы композиционного материала на основе хромальмофосфатного связующего и кварцевой ткани после нагрева при механических испытаниях на растяжение



Рис. 3. Механические испытания на растяжение образца диборида циркония при нагреве до 1800 °С

Получение реакционносвязанного нитрида кремния аддитивным методом экструзии материала и исследование его свойств

В.С. Зайцев, И.Г. Михайлов, А.П. Возняк, А.О. Забежайлов, М.Г. Лисаченко
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: lisachenkomg@technologiya.ru

Керамика на основе нитрида кремния обладает уникальной совокупностью свойств, таких как высокие твёрдость, прочность, термостойкость, коррозионная и окислительная стойкость, хорошие диэлектрические характеристики. Это делает её перспективной для широкого круга задач, включая изготовление тиглей для устройств дозирования цветных металлов, режущего инструмента, элементов насосов, подшипников, компрессоров и газотурбинных двигателей, радиопрозрачных элементов конструкций и обтекателей летательных аппаратов.

Традиционные методы формования керамических заготовок, такие как шликерное литье или прессование, позволяют придавать изделиям простые формы. Крайне трудно получить тонкие криволинейные формы из-за ограничений методов традиционных технологий. Высокая твёрдость керамики на основе нитрида кремния ограничивает возможности механической обработки изделий после спекания. Применение аддитивных технологий для изготовления керамических заготовок позволит существенно расширить возможности в получении изделий из нитрида кремния самых разных форм, при этом не требуя дополнительной оснастки и сокращая время изготовления, что делает эту задачу весьма актуальной.

С целью формования керамических заготовок выбран аддитивный метод экструзии материала. Преимуществом аддитивного метода экструзии материала является возможность использования сырья, применяемого в традиционной керамической технологии, а для получения готового изделия могут применяться уже отработанные технологические операции, такие как удаление связующего и высокотемпературная термообработка. Как следствие, свойства керамического материала, получаемого аддитивным методом экструзии, близки к уровню свойств материалов, получаемых по традиционным керамическим технологиям. В аддитивном методе экструзии материала реализуется послойное нанесение сырья через сопло или жиклёр печатающей головки в области, соответствующей сечениям 3D-модели (см. ГОСТ Р 57588). Последовательными нанесениями слоев материала выращивается изделие заданных размеров.

В настоящей работе отрабатывались основные параметры процесса экструзии, такие как: скорость истечения сырья, толщина наносимого слоя, скорость перемещения печатающей головки. Для получения сплошного однородного изделия необходимо, чтобы нанесение полос производилось с шагом близким к диаметру сопла с небольшим перекрытием. В работе использовалось сопло диаметром 0,8 мм. В качестве сырья применялся термопластичный шликер кремния при температуре всех узлов установки на уровне 70 °С. Толщина слоя фиксировалась на значении 0,3 мм. Образцы для изучения свойств материала изготавливались при скорости перемещения подвижной головки 20 мм/с. Для этих параметров подбирался необходимый поток шликера, достаточный для незначительного перекрытия при контакте соседних полос. При этом, проводился дополнительный контроль массы получаемого изделия, для подтверждения достижения высокой плотности заполнения. Основные данные параметров аддитивного процесса экструзии материала, использованные при формовании образцов для изучения свойств материала, представлены в таблице 1.

В результате изготовлены образцы пластин для изучения предела прочности при трёхточечном изгибе материала в широком диапазоне температур от 20 до 1600 °С. После формования образцы прошли термообработку в атмосфере воздуха при температуре 200 °С

для частичного удаления связующего и затем термообработку в атмосфере азота при максимальной температуре 1500 °С.

Таблица 1. Параметры аддитивной экструзии материала для полученных образцов

Параметр аддитивной экструзии материала	Значение
Диаметр сопла	0,8 мм
Толщина слоя	0,3 мм
Скорость перемещения	20 мм/с
Температура экструзии	70 °С
Температура подложки	50 °С

Для проведения испытаний по определению предела прочности материала в широком интервале температур образцы механически обработали до размеров 7×7×60 мм. Методом гидростатического взвешивания на образцах определена кажущаяся плотность и открытая пористость получаемого материала. Среднее значение предела прочности при изгибе при комнатной температуре для таких образцов составляет (202±11) МПа, а при 1600 °С – (171±18) МПа (табл. 2).

Таблица 2. Свойства РСНК, полученного аддитивной экструзией материала

Свойство	Значение
Кажущаяся плотность	2,65±0,05 г/см ³
Открытая пористость	0,1-0,5%
Предел прочности при изгибе, 20 °С	202±11 МПа
Предел прочности при изгибе, 1600 °С	171±18 МПа

Для демонстрации возможности применения аддитивного метода экструзии материала к получению изделий из РСНК выращена заготовка вставки сложной формы для применения в высокотемпературных условиях в металлургической отрасли (рис. 1). Диаметр вставки составляет 200 мм. Время формования – 8 ч.



Рис. 1. Заготовка вставки для металлургической отрасли, полученная аддитивным методом экструзии материала (внешний диаметр 200 мм)

Теплозащитные радиопрозрачные антенные укрытия из волокнистых теплоизоляционных материалов

О.В. Томчани, И.М. Зайцев, А.П. Шадрин

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: lab.em@technologiya.ru

Волокнистые теплоизоляционные материалы (ТИМ) относятся к одним из наиболее распространенных для применения в качестве защиты конструкций от повышенной температуры или сохранения заданной температуры на элементах конструкций, что обусловлено их низкой теплопроводностью. Однако у этих материалов есть еще одно достоинство, обусловленное их высокопористой структурой и большой долей воздуха в составе, – низкие значения диэлектрических параметров (диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь). Это позволяет отнести эти материалы в разряд радиопрозрачных и использовать для защиты, в частности, антенных устройств. Правильный выбор компонента, образующего каркас ТИМ, позволит дополнительно максимально эффективно реализовать эти свойства.

Волокнистый теплоизоляционный материал ТЗМК-10 на основе кварцевого волокна известен по своему применению для теплозащиты космического корабля многоразового использования Буран, где были реализованы его высокая прочность, низкая теплопроводность, устойчивость к вибрационным нагрузкам. Использование аналогичного материала для теплозащитных радиопрозрачных укрытий антенн позволяет также реализовать низкие значения диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и возможность изготовления из материала прецизионных деталей со сложными поверхностями с точностью до 0,2 мм. С этой целью был разработан теплоизоляционный радиотехнический материал ТЗМК-14М ТУ 1-596-548-2018 с плотностью 0,135-0,160 г/см³, диэлектрические характеристики которого представлены в таблицах 1 и 2. Как видно из представленных данных, значения диэлектрических характеристик материала с увеличением плотности растут, но этот рост незначительный даже при превышении верхнего предела плотности материала, определенного в ТУ, что практически не влияет на показатели радиопрозрачности.

Недостатком материала ТЗМК-14М является его невысокая прочность (таблица 3), усложняющая технологический монтаж изделий из него. С увеличением плотности прочность волокнистых материалов растет, но растет и их теплопроводность. Поэтому при проектировании элементов конструкций необходимо учитывать взаимозависимость плотности, прочностных, теплоизоляционных и диэлектрических характеристик материала.

Таблица 1. Диэлектрическая проницаемость материала ТЗМК-14М различной плотности

Температура, °С	ε на частоте 10 ¹⁰ Гц для плотности, г/см ³ (объем выборки)							
	0,140 (7)	0,146 (24)	0,152 (47)	0,158 (58)	0,164 (19)	0,170 (17)	0,175 (3)	0,181 (2)
20	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15
50	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15
100	1,12	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15
150	1,12	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15
200	1,12	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15
250	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15
300	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15

Проведенные исследования подтвердили пригодность теплоизоляционного материала на основе кварцевых волокон с бóльшей плотностью для его использования в изделиях радиотехнического назначения (таблицы 3, 4). Более высокая прочность облегчает технологические операции по монтажу, радиотехнические характеристики сохраняются на

допустимом уровне и практически не зависят от плотности материала. В таблице 4 приведены изменения значений основных измеряемых радиотехнических параметров, вносимые теплозащитным укрытием.

Таблица 2. Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ материала ТЗМК-14М различной плотности

Температура, °С	$\text{tg}\delta$ на частоте 10^{10} Гц для плотности, г/см ³ (объем выборки)							
	0,140 (7)	0,146 (24)	0,152 (47)	0,158 (58)	0,164 (19)	0,170 (17)	0,175 (3)	0,181 (2)
20	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
50	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
100	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002
150	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0003	0,0002
200	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002
250	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003
300	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0005	0,0004	0,0003	0,0003

Таблица 3. Физико-механические свойства теплоизоляционного материала на основе кварцевых волокон в зависимости от плотности

Плотность, г/см ³	Прочность при сжатии при 10% деформации при 20 °С, МПа	Теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·К)	ϵ на частоте 10^{10} Гц при температуре, °С			$\text{tg}\delta$ на частоте 10^{10} Гц при температуре, °С		
			20	100	300	20	100	300
0,140	0,31	0,043	1,12	1,12	1,12	0,0001	0,0002	0,0003
0,158	0,34	0,048	1,13	1,13	1,13	0,0002	0,0003	0,0004
0,176	0,49	0,048	1,16	1,16	1,16	0,0004	0,0007	0,0009
0,220	0,66	0,053	1,18	1,18	1,18	0,0002	0,0004	0,0005
0,250	1,31	0,060	1,25	1,24	1,24	0,0007	0,0016	0,0006

Таблица 4. Радиотехнические характеристики системы антенна-теплоизоляционное укрытие

Плотность теплоизоляционного укрытия, г/см ³	Количество нанесенных на теплоизоляционное укрытие слоев покрытия на основе каучука СКТНФ (Б) ТУ 38.103129-77	Коэффициент прохождения КП min, %	Основная ошибка, мин	Крутизна основной ошибки
0,140	0	98,0	3,98	0,010
	4	97,2	1,96	0,006
0,190	0	98,5	3,91	0,010
	4	96,5	2,23	0,006
0,250	0	98,4	3,98	0,010
	4	97,0	1,97	0,004

Совершенствование технических средств контроля перемещений в процессе наземных теплопрочностных испытаний радиопрозрачных обтекателей

В.И. Фокин, В.С. Райлян, А.В. Терехин, Д.Е. Казарин

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

В процессе проведения наземных теплопрочностных испытаний радиопрозрачных обтекателей (РПО) одним из критериев жесткости и несущей способности РПО и одним из контролируемых параметров является перемещение точек поверхности обтекателя в заданном сечении в направлении приложения нагрузки. От величины этого параметра зависит работоспособность антенного устройства (АУ), находящегося во внутренней полости обтекателя.

В настоящее время контроль перемещения точек поверхности обтекателя осуществляют с помощью промежуточного упругого элемента, выполненного в виде штанги, верхний конец которой упирается во внутреннюю носовую часть обтекателя, а нижний конец жестко соединен с тензоэлементом, расположенным во внутренней полости обтекателя, который регистрирует механическую деформацию в плоскости прогиба штанги.

Недостатком указанного способа являются:

– создание изгибных напряжений штанги, которые необходимы для деформации тензоэлемента. Это приводит к наличию нерегламентированного усилия, которое прилагается к внутренней поверхности конструкции со стороны штанги;

– тензоэлемент, находящийся во внутренней полости обтекателя, подвергается тепловому воздействию и необходимо обеспечивать его охлаждение для получения корректных результатов измерения.

Целью данной работы является разработка устройства, позволяющего исключить нерегламентируемые воздействия на РПО, а также исключить необходимость охлаждения.

Авторами было разработано устройство на основе измерителя угла наклона (инклинометра) ИН-ДЗц, внесенного в реестр средств измерений (СИ). Фотография инклинометра и схема измерения перемещения точек поверхности с помощью него показаны на рисунках 1 и 2.

Принцип работы устройства следующий: в процессе испытаний при приложении поперечной нагрузки, обтекатель перемещается, изменяется угол наклона штанги, который фиксирует датчик угла наклона. Для малых перемещений величина линейного перемещения носка обтекателя равна длине дуги окружности, которую проходит конец стержня. Величина перемещения конца стержня определяется по формуле (1):

$$\Delta = (\alpha/360) \cdot 2\pi L, \quad (1)$$

где Δ – величина линейного перемещения конца стержня (мм), L – расстояние от оси вращения до конца стержня (мм), α – угол наклона стержня (градусы). Таким образом показания датчика угла наклона будут пропорциональны величине отклонения носка обтекателя.

Были проведены экспериментальные исследования разработанного устройства в процессе теплопрочностных испытаний натуральных обтекателей. При этом обтекатель подвергался максимальным по длительности и величине тепловым воздействиям. На рисунке 3 представлена зависимость перемещения от нагрузки.

Результаты экспериментальных исследований устройства контроля перемещения точек поверхности обтекателя на основе измерителя угла наклона (инклинометра) подтвердили возможность его применения в процессе проведения наземных теплопрочностных испытаний РПО. Погрешность при контроле перемещения с помощью разработанного устройства соответствует требованиям методик испытания и не превышает 0,5 мм в диапазоне от 0 до 30 мм.



Рис. 1. Внешний вид инклинометра ИН-Д3ц

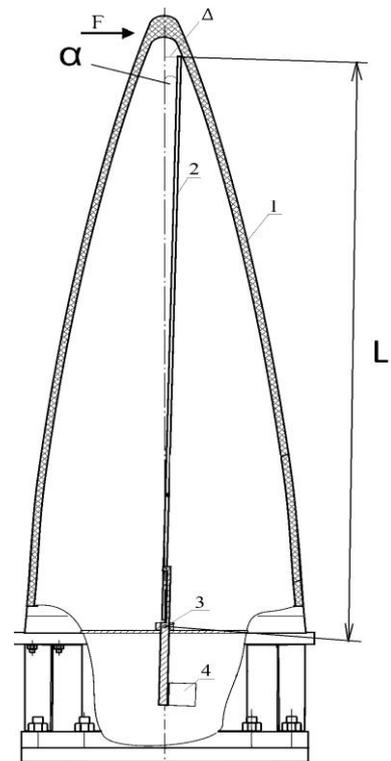


Рис. 2. Схема измерения перемещения носка:
1 – РПО; 2 – штанга; 3 – ось вращения;
4 – инклинометр; F – приложенная нагрузка

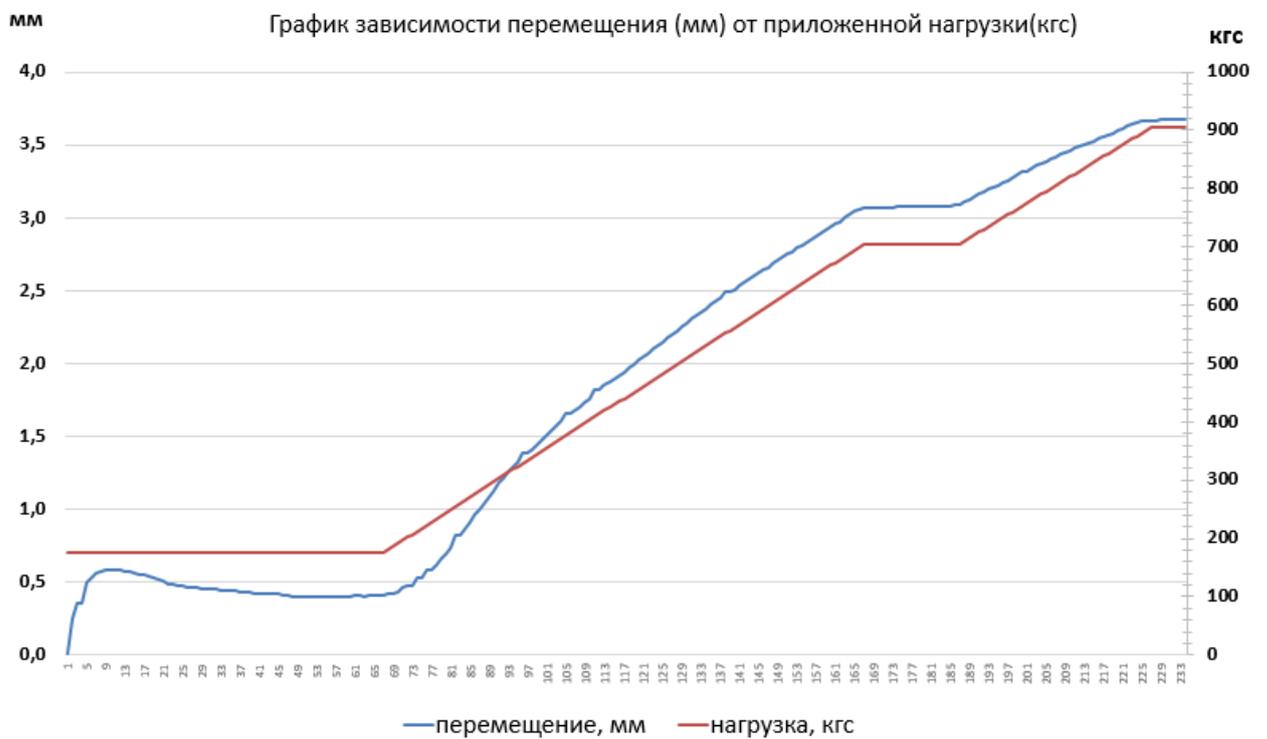


Рис. 3. График зависимости перемещений от приложенной нагрузки

Современный уровень потребительских свойств керамических и стеклокерамических материалов в условиях возрастания объемов производства

В.В. Кирюшина, Т.В. Зайчук, И.А. Северенков, А.А. Анашкина, М.О. Забежайлов, М.Ю. Русин

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Кварцевая керамика и стеклокерамические материалы многие годы, благодаря уникальному сочетанию потребительских свойств, являются основными материалами в производстве керамических головных радиопрозрачных элементов ракетной техники. Кварцевая керамика, разработанная в 50-х годах прошлого столетия, до сих пор незаменима в высокотеплонагруженных элементах конструкций летательных аппаратов. Стеклокерамические материалы, в частности литийалюмосиликатного (ЛАС) состава, синтезированные по керамической технологии в начале 2000-х годов, уверенно удерживают лидерство в производстве элементов конструкций летательных аппаратов авиационного базирования и открытого хранения.

В основе изготовления керамических радиопрозрачных изделий для ракетной техники лежит известная технология водного литья изделий из высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС) и их высокотемпературной термической обработки, сопровождающейся спеканием (для изделий из кварцевой керамики) или кристаллизацией и спеканием (для изделий из стеклокерамических материалов). Постоянные работы по совершенствованию и оптимизации технологических параметров особенно актуальны в условиях возрастающих объемов производства и направлены не только на обеспечение показателей качества изготавливаемых изделий в целом, но и на поддержание высокого уровня свойств материалов. Контроль свойств материалов, проводимый постоянно при аттестации керамических оболочек на соответствие требованиям конструкторской и технологической документации, а также в рамках периодических испытаний изделий, не всегда достаточен для понимания уровня качества материалов и технологии изготовления изделий из них.

Цель представленной работы состояла в актуализации данных по физико-техническим, теплофизическим, диэлектрическим и оптическим свойствам кварцевой керамики НИАСИТ (ТУ 1-596-195-2009), стеклокерамических материалов ОТМ-357 (ТУ 1-596-403-2000), ОТМ-357-О (ТУ 1-596-458-2005) и ОТМ-357-У (ТУ 1-596-454-2005), определении дополнительных свойств, а также сопоставлении полученных результатов с имеющимися в действующей нормативной документации. Исследование проводилось в соответствии с нормами СТО 596.01.167-2003 по паспортизации материалов. Общее количество изготовленных образцов составило 1600 шт.

Для рассматриваемых материалов были определены: кажущаяся плотность, пористость и водопоглощение, предел прочности и модуль упругости при статическом изгибе в зависимости от температуры, коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, удельная теплоемкость, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь и их температурные зависимости, ударная вязкость, показатели поглощения и рассеяния, микротвердость, критический коэффициент интенсивности напряжений.

Проведена систематизация и анализ результатов испытаний образцов и сравнение полученных значений свойств с данными ТУ на материалы. Помимо средних уровней, определены характеристики варибельности показателей свойств (стандартное отклонение, коэффициент вариации, доверительный интервал среднего), в том числе с учетом методических погрешностей, что дает возможность объективно оценить тенденции изменения показателей свойств.

Определяющее влияние на физико-технические свойства материалов неизбежно оказывают качественные показатели исходного сырья, связанные с особенностями технологии его изготовления на предприятиях-поставщиках.

Для изготовления изделий из кварцевой керамики наиболее важным показателем качества исходного сырья в виде труб прозрачного кварцевого стекла является его химическая чистота и, как следствие, устойчивость к кристаллизации. Работы, проведенные с поставщиками кварцевых труб, и внедрение их дополнительного входного контроля позволили существенно снизить вероятность нежелательной кристаллизации SiO_2 в процессе производства и сохранить уровень основных свойств материала на высоком уровне.

Электронно-микроскопический анализ не выявил наличие кристаллизации кварцевой керамики НИАСИТ во всех проанализированных образцах. Фрактографические исследования поверхности излома образцов после испытаний на трехточечный изгиб показали, что с увеличением плотности материала возрастает неоднородность процесса разрушения, что ведет к образованию признаков начала разрушения («фокус» и «зеркало» излома и зона «долома»). Уровень вновь определенных прочных показателей остается высоким и соответствует действующим ТУ.

Для изделий из стеклокерамических материалов наиболее важными и сложными технологическими этапами являются измельчение исходного ЛАС и приготовление ВКВС с определенным реологическим поведением. Результаты цикла работ последних лет, направленных на отработку и совершенствование процесса приготовления ВКВС, позволили улучшить их реологические показатели за счет оптимизации гранулометрического состава частиц твердой фазы и увеличения ее объемной доли в суспензии, что способствует более плотной упаковке частиц в процессе формования заготовок изделий, и, впоследствии при термической обработке – образованию высокоплотного прочного материала.

Так, для стеклокерамических материалов ОТМ-357, ОТМ-357-О, ОТМ-357-У полученные значения предела прочности при статическом изгибе оказались существенно выше, чем по данным ТУ во всем интервале температур, большие значения получены также для ударной вязкости стеклокерамики. Методами оптической и электронной микроскопии проведен фрактографический анализ образцов и определены дефекты структуры, вызывающие разрушение образцов при определении прочности при статическом изгибе, – это зерна частично закристаллизованного стекла, поры и их скопления. Установлено, что значения прочности снижаются с увеличением размера дефекта, что соответствует теории Гриффитса-Орвана.

Для определения удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности был применен метод лазерной вспышки, характеризующийся низкой погрешностью измерений по сравнению с использовавшимся ранее методом квазистационарного нагрева. Вновь полученные данные по ТКЛР, а также значения диэлектрических характеристик и характер их изменения при повышенных температурах остались на уровне значений ТУ.

Дополнительно к свойствам, имеющимся в действующих ТУ, были измерены оптические характеристики кварцевой керамики и стеклокерамических материалов, микротвердость, критический коэффициент интенсивности напряжений методом индентирования. Измерения предела прочности при статическом изгибе на «нестандартных» образцах (большого и меньшего размера) позволили оценить влияние масштабного фактора на предел прочности керамик.

Полученные результаты представляют интерес при разработке новых вариантов конструкций изделий, проведении расчетов их напряженно-деформированного состояния в условиях нагружения, прогнозировании предельных возможностей. Стабильность основных свойств материалов является важным индикатором качества технологических процессов и залогом успешного выполнения Гособоронзаказа.

Перспектива применения материала на основе пирогенного диоксида кремния в теплозащитных экранах ЛА

Р.А. Миронов, **П.В. Коваленко**, С.Б. Воробьев, В.В. Антонов, О.В. Томчани
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Для тепловой защиты элементов системы наведения, расположенных в головной части высокоскоростного летательного аппарата (ЛА), применяются теплозащитные экраны. Ранее был предложен подход к проектированию таких экранов, заключающийся в обеспечении послойной функциональности. Условно функции слоёв можно разделить на: 1) отражающая, 2) теплоизолирующая, 3) структурная, 4) радиопрозрачная. Тепловое излучение является основным механизмом внутреннего теплопереноса от разогретого корпуса ЛА к наружной границе экрана. Чтобы уменьшить нагрев экрана, авторами в ранних работах было разработано и произведено высокотемпературное отражающее покрытие на основе оксида иттербия, которое позволяет снизить температуру наружной границы экрана на 25%. Но даже с учётом этого она может достигать в современных ЛА температуры 1200 °С. При таких значениях температуры основной теплоизолирующий слой, предназначенный для обеспечения приемлемых температур на антенной аппаратуре, должен иметь минимально возможную теплопроводность. Известно, что материалы на основе мезо- и микропористого диоксида кремния, такие как аэрогели и пирогенный диоксид кремния, являются эффективными теплоизоляционными материалами (ТИМ). Малый размер пор и высокая пористость позволяют максимально снизить конвективную и кондуктивную составляющие теплопроводности. Однако эти материалы относятся к классу частично прозрачных материалов, поэтому актуальной задачей становится уменьшение в них переноса тепла за счёт излучения. Для этого в подобных материалах применяют специальные гасители – равномерно распределённые в объёме частицы различных материалов (карбида кремния, оксидов циркония и титана), имеющие малый размер, сравнимый с длиной волны излучения. Эффект гасителей обусловлен рассеянием и поглощением, которые количественно характеризуются оптическими свойствами (показателями рассеяния и поглощения, индикатрисой рассеяния). Проведённая ранее работа по исследованию оптических свойств пирогенного диоксида кремния позволила выбрать оптимальные параметры гасителя (материал, распределение по размерам частиц, объёмная доля), которые в наибольшей степени обеспечивали снижение радиационной составляющей теплопроводности. Таким образом, удалось добиться того, что суммарная, так называемая эффективная, теплопроводность ТИМ с применением гасителей достигла минимальных значений. Модель эффективной теплопроводности очень удобна с вычислительной точки зрения, так как при ее использовании для решения задач радиационно-кондуктивного теплопереноса, не требуется решать сложное интегро-дифференциальное уравнение переноса излучения для вычисления интенсивности. Однако она имеет ограниченную область применимости (низкая динамика нагрева, оптически толстые слои) и строгим образом обосновывается только в приближении Росселанда. Определение эффективной теплопроводности осуществляется калориметрическим способом, то есть не требует дополнительных оптических измерений или расчетов. Если условия измерения эффективной теплопроводности согласуются с границами применимости приближения Росселанда и оптические параметры можно считать не зависящими от длины волны, то полученная таким образом «фонная» теплопроводность является истинной теплопроводностью и может быть использована при решении строгих задач радиационно-кондуктивного теплопереноса. На рисунке 1 приведена температурная зависимость эффективной теплопроводности материала ТИМ-МП-К6 на основе пирогенного диоксида кремния с различными гасителями. Выбор приемлемого варианта необходимо делать, исходя из компромиссного решения по обеспечению

радиотехнических требований и требований по температурному ограничению объекта защиты (антенного устройства). Так как практическая апробация полученных вариантов ТИМ проводилась в сравнении с известным теплозащитным материалом на основе тонкого кварцевого волокна ТЗМК-10М, то на рисунке 1 также показаны свойства этого материала.

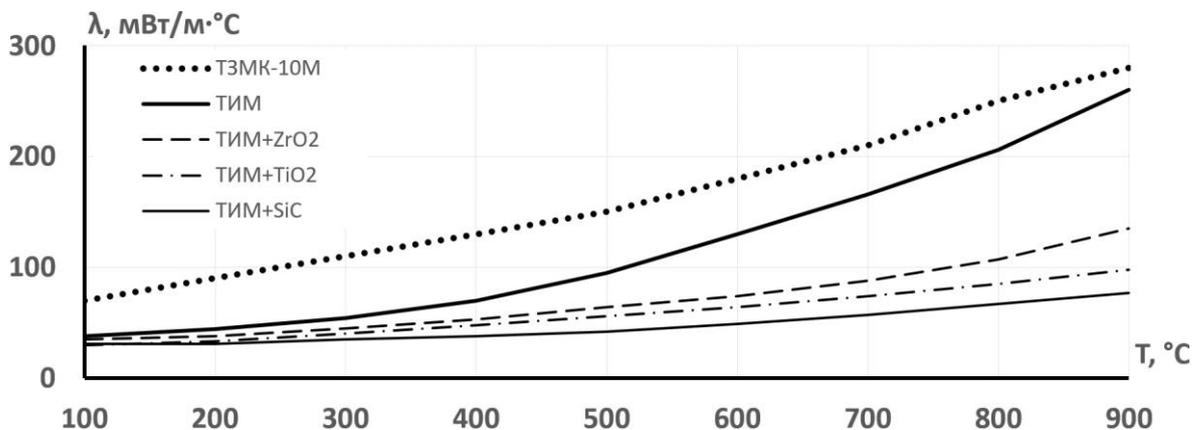


Рис. 1. Коэффициент эффективной теплопроводности материалов ТИМ-МП-К6 и ТЗМК-10М

Для наглядной демонстрации практического эффекта от снижения коэффициента теплопроводности основного слоя теплозащитного экрана был проведен нагрев двух одинаковых пластин толщиной 10 мм из материалов ТЗМК-10М и ТИМ-МП-К6 с гасителем из карбида кремния. Модельный режим кинетического нагрева был подобран, исходя из встречающихся в практике наибольшей температуры и темпа на внешней поверхности экрана. На рисунке 2 показано, что применение нового теплоизоляционного материала позволит снизить температуру внутренней поверхности экрана в 2,5 раза.

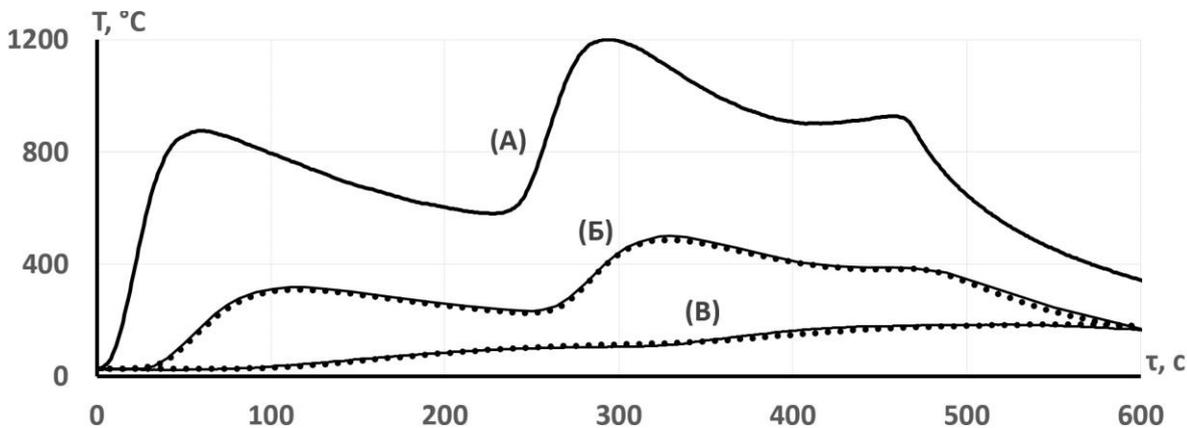


Рис. 2. Результаты нагрева образцов: линии – данные эксперимента, точки – данные расчёта по измеренной $\lambda_{эфф}$, (А) – температура нагреваемой поверхности, (Б), (В) – температура тыльной поверхности для материалов ТЗМК-10М и ТИМ-МП-К6+SiC, соответственно

Выводы. Выбранный принцип послойной функциональности теплозащитного экрана с исследовательским подходом к реализации максимальной эффективности каждой функции позволяет разработать оптимальную конструкцию экрана, удовлетворяющую заданным высоким требованиям. Увеличение отражённого от экрана падающего излучения в совокупности с уменьшением коэффициента эффективной теплопроводности изолирующего слоя даёт возможность пассивным способом обеспечить жёсткие требования по ограничению температуры на объекте защиты без использования активной системы охлаждения. Дальнейшие работы по созданию оптимального экрана планируется проводить в направлении детального исследования радиотехнических свойств ТИМ с наиболее эффективными гасителями, а также с целью решения комплекса задач по созданию серийно пригодной технологии производства экранов.

Сравнение погрешностей измерения диэлектрических свойств твердых материалов на сверхвысоких частотах различными резонансными методами

В.П. Крылов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Для определения диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков (ϵ) на сверхвысоких частотах используются резонансные методы, основанные на измерении в волноводном резонаторе, первый – широко распространенный метод измерения на фиксированной частоте, позволяет определять ϵ по изменению длины резонатора, во втором – методе фиксированной длины, определение ϵ осуществляется по измерению резонансной частоты резонатора с образцом выбираемой из частотного спектра амплитуды коэффициента передачи. Заявляется, что второй метод обладает повышенной точностью, но так как он значительно более сложный при практическом использовании, то в данной работе, для определения обоснованности применения метода фиксированной длины для достижения высокой потенциальной точности, проведено сравнение процедур измерения различными методами.

Из сравнения алгоритмов определения ϵ представленными методами видно, что определяющее отличие между ними состоит в нахождении решения трансцендентного уравнения при поиске фазовой постоянной, которая в методе фиксированной частоты связана с изменением геометрической длины резонатора, а в методе фиксированной длины с изменением резонансной частоты.

При этом, определяющий вклад в погрешность определения ϵ и в том и другом методе вносит погрешность, связанная с толщиной образца.

Для сравнительной оценки представленных методов проведены расчеты зависимости погрешности определения ϵ образца от толщины $\Delta d = 0,0005$ мм, длины резонатора $\Delta L_{p1} = 0,001$ мм и частоты $\Delta f = 10,0$ кГц на примере резонатора с внутренним диаметром 50 мм, с волной H_{01} , на частоте $f = 9,45$ ГГц, длиной $L_{p1} = 98,955$ мм в котором образец располагается на короткозамыкающем поршне.

На рисунке 1, приведены характерные зависимости $|\Delta\epsilon|$ от относительной толщины образца ($\frac{d}{\lambda}$) при погрешности определения толщины образца $|\Delta d| = 0,0005$ мм для сравнения рассматриваемых методов определения ϵ , а на рисунке 2 – те же зависимости при обычной точности изготовления образца с $|\Delta d| = 0,03$ мм.

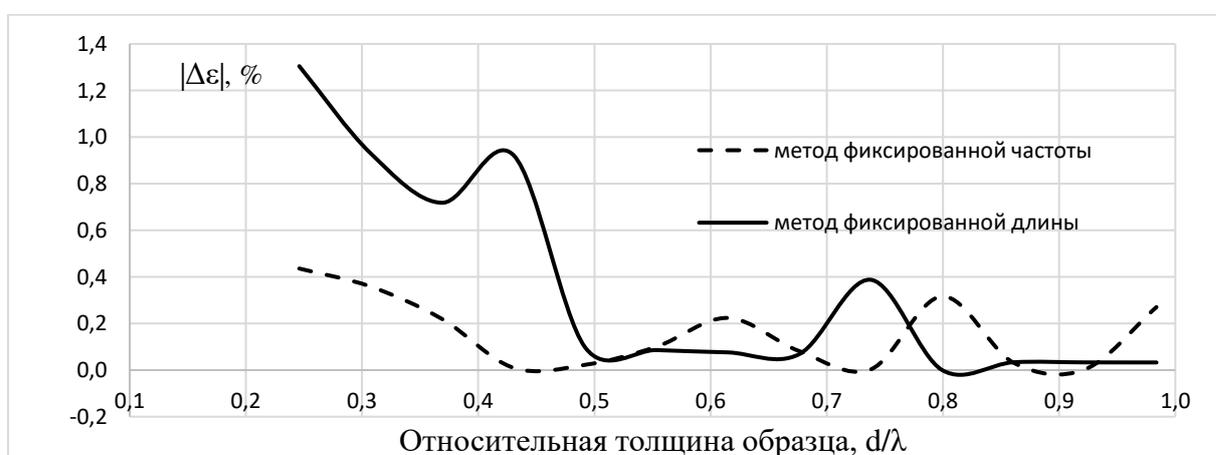


Рис. 1. Расчетная зависимость погрешности определения ϵ от толщины образца, полученная разными методами для повышенной точности изготовления образца по толщине

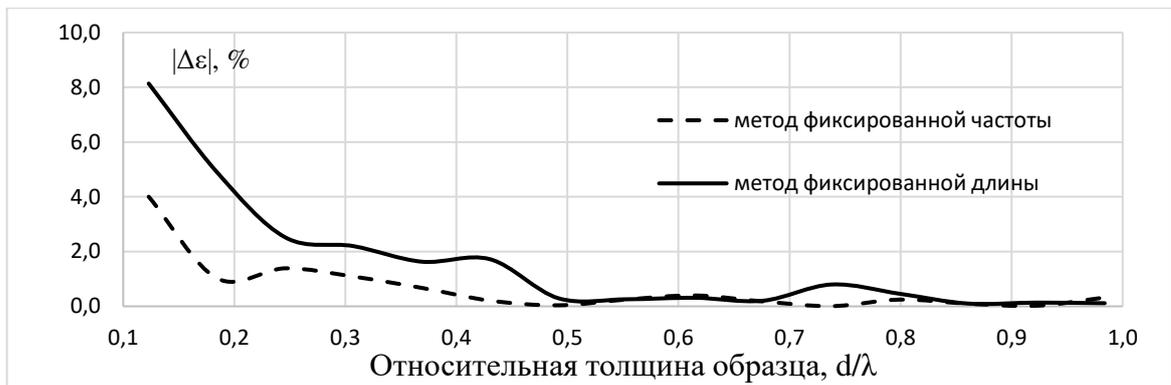


Рис. 2. Расчетная зависимость погрешности определения ϵ от толщины образца, полученная разными методами при точности изготовления образца, реализуемой в практических измерениях

Из приведенных зависимостей видно, что погрешность определения $|\Delta\epsilon|$ быстро падает с ростом толщины образца, и в области полуволновой толщины образца различие между методами по точности незначительное, при этом для обоих методов точность выше при повышении точности изготовления образца по толщине.

На основании расчетов погрешности определения ϵ в зависимости от точности изготовления полости резонатора по радиусу (ΔR) (рис. 3) можно сделать вывод о том, что значительным источником погрешности определения ϵ является точность изготовления полости резонатора.

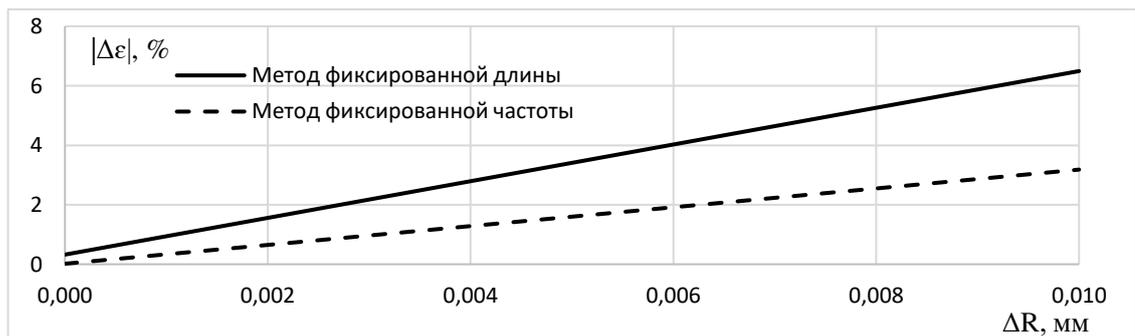


Рис. 3. Зависимость погрешности определения ϵ полуволнового образца от точности изготовления полости резонатора

Из рисунков видно, что в методе фиксированной частоты использование высокоточного механизма перемещения позволяет выполнять измерения ϵ с высокой точностью. В методе фиксированной длины резонатора повышение точности определения величины резонансной частоты колебаний не может привести к значительному повышению точности определения ϵ по сравнению с методом фиксированной частоты, так как в обоих методах потенциальная точность определяется физическим качеством изготовления полости резонатора, которая по геометрическим размерам, например, по радиусу, не может быть лучше, чем $|\Delta R| < 0,001$ мм на длине в 100 мм, а при заложенной в методах точности определения резонансной частоты $|\Delta f| < 10,0$ кГц, соответствует точности определения длины волны в волноводе $|\Delta\lambda_g| < 10^{-5}$ мм, что в практической механике не достижимо. Так же дело обстоит и с влиянием точности изготовления образца на точность определения диэлектрической проницаемости, которая в обоих методах одинакова и при заложенной точности изготовления $|\Delta d| = 0,0005$ мм соответствует точности установки резонансной частоты $|\Delta f| = 167,0$ кГц.

Сравнительный анализ точности измерений ϵ твердых диэлектриков методами фиксированной частоты и фиксированной длины, приведенными в ГОСТ Р 8.623-2015, показал, что потенциальная точность методов мало отличается друг от друга и поэтому использование метода фиксированной длины при усложнении процедуры измерений с целью повышения точности измерений не обосновано.

Высокотемпературные сложнооксидные керамики с литий-ионной проводимостью

Г.Б. Куншина, И.В. Бочарова

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН (ХТРЭМС КНЦ РАН), г. Апатиты, Россия

E-mail: g.kunshina@ksc.ru

Работа направлена на усовершенствование подходов к получению сложнооксидных керамик с высокими значениями литий-ионной проводимости и низкими значениями электронной проводимости для использования в качестве твердого электролита в аккумуляторах следующего поколения (полностью твердотельные, литий-серные и литий-воздушные). Полностью твердотельные неорганические аккумуляторы (ЛИА) являются новым типом литиевых аккумуляторов, которые могут найти применение в устройствах, работающих при повышенных давлениях, температурах и механических нагрузках.

Приводятся результаты физико-химического, термического и электрохимического исследования синтезированных материалов $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP), $\text{Li}_{1,5}\text{Al}_{0,5}\text{Ge}_{1,5}(\text{PO}_4)_3$ (LAGP) и $\text{Li}_{6,4}\text{Al}_{0,2}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (Al-LLZ) методами рентгенофазового анализа, дифференциально-термического анализа и спектроскопии электрохимического импеданса. Сравниваются простота и доступность синтеза порошков твердых электролитов, значение ионной проводимости керамических образцов, их механическая прочность, устойчивость при хранении на воздухе и стабильность в растворах солей лития (табл. 1). Изучены морфология и микроструктура методом сканирующей электронной микроскопии. Определены параметры кристаллической решетки методом Ритвельда.

Таблица 1. Электрофизические характеристики керамик с Li-ионной проводимостью

Твердый электролит	LATP	LAGP	Al-LLZ
Кристаллическая структура	NASICON		гранат
Пространственная группа	$R\bar{3}c$		$Ia\bar{3}d$
Рентгеновская плотность, г/см ³	2,95	3,41	5,1
Плотность керамики, %	90-92	85-88	78-83
Температура синтеза, °С	700	650	900
Температура спекания керамики, °С	1000	900	1150
Температура плавления, °С	1380	1105	1340
Общая ионная проводимость, См/см	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Энергия активации, эВ	0,21	0,28	0,39
Устойчивость на воздухе	+	+	-

Методом дифференциально-термического анализа исследовали термическую стабильность и определяли температуру плавления LATP, LAGP и Al-LLZ. Никаких термических эффектов, фазовых переходов и изменения массы не было обнаружено на термограмме керамик вплоть до температуры плавления. Высокая температура плавления обуславливает необходимость повышенной температуры спекания для получения керамики с высокой плотностью. С этой целью были использованы преимущества инновационного энергосберегающего метода искрового плазменного спекания. Значения удельной ионной проводимости LATP, LAGP и LLZ при комнатной температуре ($\sigma > 10^{-4}$ См/см), измеренные методом спектроскопии электрохимического импеданса, соответствовали максимальным значениям для твердых электролитов указанных составов. Изучена температурная зависимость ионной проводимости в интервале 25-200 °С и определена энергия активации проводимости (0,28-0,42 эВ). Электронная проводимость не превышала 10^{-8} См/см. Основываясь на электрохимических характеристиках, синтезированные твердые электролиты являются перспективными керамическими материалами для твердотельных ЛИА.

Новый композиционный материал твердый сплав-графит для производства трибологической продукции

А.И. Богданов, С.Ю. Курочкин, В.И. Румянцев
ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: KurochkinSU@virial.ru

В последние десятилетия керамические и твердосплавные материалы заняли прочное место в сфере триботехнических узлов. Несмотря на все положительные характеристики классических твердых сплавов, у них есть и общий недостаток, который приводит к ограничению их применения, а именно высокий коэффициент трения при работе в отсутствии или недостаточности смазки.

С учетом данных особенностей твердых сплавов в Институте сверхтвердых материалов АН УССР были разработаны твердые сплавы на основе сплавов группы ВН с добавками графита под маркой ВНГр (ВН20Гр2, ВН20Гр4 и др.), содержащие до 6 мас. % углерода в качестве твердой смазки. Позже данный материал был введен в документацию на специзделия в России.

В компании ООО «Вириал» в рамках импортозамещения были разработаны антифрикционные сплавы марок В20Н2Г-С и В20Н4Г-С, значительно превосходящие по своим структурным и физико-механическим характеристикам (распределение графита, пористость, прочность на изгиб, твердость) сплавы ВНГр.

Повышение эксплуатационных характеристик сплавов В20Н2Г-С и В20Н4Г-С было достигнуто за счет более равномерного распределения углерода в объеме материала, подбора температурно-временных режимов спекания и вариаций состава.

Фотографии микроструктуры антифрикционных сплавов В20Н4Г-С и В20Гр4 представлены на рисунке 1.

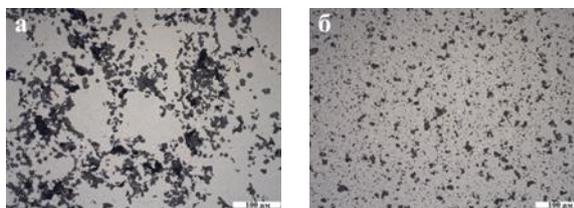


Рис. 1. Микроструктура антифрикционных сплавов, где:

а) микроструктура сплава В20Гр4, б) микроструктура сплава В20Н4Г-С

Сравнительные данные по физико-механическим характеристикам представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики сплавов марок ВН20Гр и В20НГ-С

Характеристика	Марка сплава			
	ВН20Гр2	В20Н2Г-С	ВН20Гр4	В20Н4Г-С
Плотность, г/см ³	11,7-12,2	12,2-12,4	10,0-11,8	11,2-11,4
Твердость, НРА	70	78	50	74
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	1100	1650	550	1200

Проведены сравнительные трибологические испытания (коэффициент трения и предельная осевая нагрузка) осевых опор, произведенных в ООО «Вириал» из сплавов В20Н2Г-С / В20Н4Г-С и ВК8. Установлено, что критические удельные нагрузки осевых опор из сплавов В20Н2Г-С / В20Н4Г-С имеют величины в диапазоне 9-13 МПа, что больше значений этого параметра (порядка 6-7 МПа) для осевых опор из сплава ВК8. Докритический коэффициент трения не превысил 0,01. Можно отметить хорошую прирабатываемость контактирующих поверхностей трения.

Поставленная задача по импортозамещению была выполнена, налажен выпуск крупногабаритных антифрикционных изделий из сплавов марок В20Н2Г-С и В20Н4Г-С.

Технологические особенности изготовления ДТП для высокотемпературных испытаний керамических изделий

В.Д. Малыгин, М.Ю. Русин, А.В. Терехин

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Датчики теплового потока (ДТП) могут быть использованы для измерения тепловых потоков на поверхности различных объектов, в частности, при измерении нестационарных тепловых потоков в условиях воздействия аэродинамических нагрузок при проведении как наземных, так и лётных тепловых и теплопрочностных испытаний элементов, в том числе и керамических, конструкции скоростных летательных аппаратов и объектов космической техники, а также для управления тепловыми потоками при проведении испытаний. В настоящее время для измерения плотности высокоинтенсивных тепловых потоков применяются, в основном, способы, основанные на схеме датчика Гардона (рис. 1).

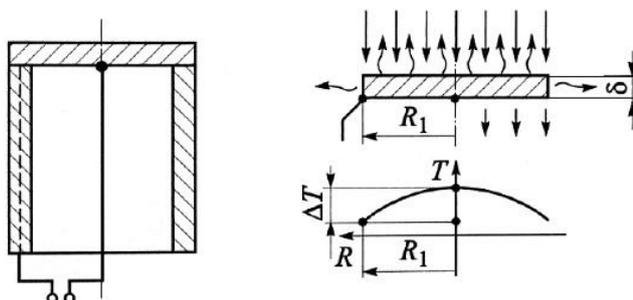


Рис. 1. Схема ДТП с поперечным градиентом температуры

Принцип работы датчика Гардона заключается в том, что плотность падающего потока пропорциональна перепаду температуры между центром и боковой поверхностью чувствительного элемента, представляющего собой термически тонкое тело (перепад температуры по толщине отсутствует). Для измерения перепада температуры в радиальном направлении используют дифференциальную термопару. Она состоит из чувствительного элемента и термоэлектродов, один из которых расположен по центру по продольной оси, а второй на боковой поверхности чувствительного элемента, размещенного в корпусе ДТП. Плотность падающего теплового потока, q_w , определяют по соотношению:

$$q_w = \frac{4\Delta T\lambda\delta}{R^2}$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

δ – толщина диска теплопринимающего элемента (ТВЭ);

ΔT – градиент температуры на диске ТВЭ;

R – радиус диска ТВЭ.

Наибольшее распространение для изготовления дифференциальных термопар получили медь и константан. Известно, что традиционный способ приварки медного провода к центру константанового диска ТВЭ имеет множество недостатков. Нами в ходе работ были разработаны и опробованы на практике несколько способов соединения медного провода с центром диска из константановой фольги, лишённые недостатков, присущих традиционной технологии. Это канальный метод (рис. 2), лазерный метод (рис. 3, 4) и электроразрядный метод (рис. 5, 6). На способы изготовления ТВЭ получено несколько патентов на изобретения.

Традиционные методы пайки или сварки места контакта диска ТВЭ и медного корпуса ДТП имеют множество недостатков. Для устранения недостатков пайки и сварки нами применён метод лазерной сварки, который имеет ряд преимуществ перед традиционными методами, таких как локализация нагрева, кратковременность протекающих процессов и др.

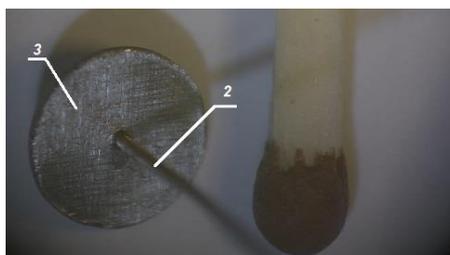


Рис. 2. ТВЭ, изготовленный каналным способом

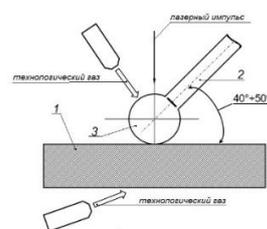


Рис. 3. Схема изготовления ТВЭ лазерным способом

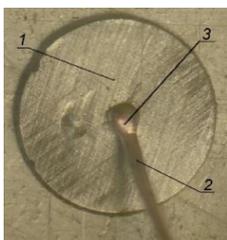


Рис. 4. ТВЭ, изготовленный лазерным способом

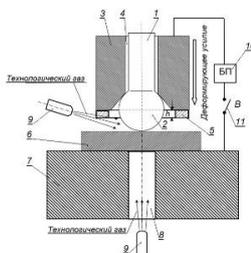


Рис. 5. Схема изготовления ТВЭ электроразрядным способом



Рис. 6. ТВЭ, изготовленный электроразрядным способом

Однако поскольку медь имеет высокий коэффициент отражения (0,7-0,85) в диапазоне длин волн 0,8-3 мкм электромагнитного спектра, то КПД сварки очень низок, поскольку большая часть энергии, генерируемой лазером, переотражается в окружающее пространство. Мощности лазера не хватает для формирования глубокой сварочной ванны и проведения качественной сварки. Для увеличения КПД мы пошли по пути увеличения коэффициента поглощения в диапазоне длины волны излучения лазера. Кроме этого, при формировании сплошного кольцевого спая константанового спая ТВЭ и медного корпуса ДТП, была разработана технология предварительной вальцовки диска ТВЭ в медный корпус ДТП с последующим формированием замкнутого кольцевого проплавного шва (рис.7-9).

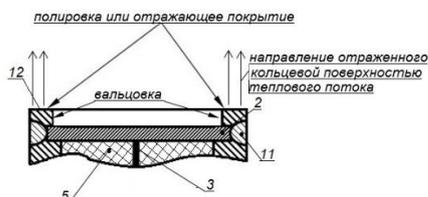


Рис. 7. Схема вальцовки и сварки ТВЭ и корпуса ДТП



Рис. 8. Шлиф ТВЭ



Рис. 9. Внешний вид лазерного проплавного шва

Были изготовлены как неохлаждаемые (рис. 10), так и охлаждаемые (рис. 11) ДТП.



Рис. 10. Неохлаждаемый ДТП

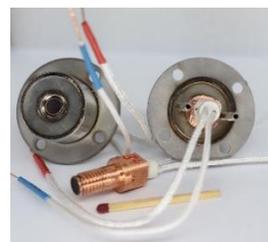


Рис. 11. Охлаждаемый ДТП

В ходе испытаний датчиков был зафиксирован диапазон измерений теплового потока свыше 1900 кВт/м², а их чувствительность находилась в диапазоне 2,5-3,9 мкВ м²/кВт.

Обеспечение высокого уровня надежности радиопрозрачных элементов защиты антенных устройств

А.В. Медведев, С.М. Кубахов, А.Н. Прасолов, В.В. Кирюшина, С.Б. Воробьёв, В.В. Антонов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: medvedevav@technologiya.ru

Изложены результаты опытно-конструкторской разработки радиопрозрачной крышки (РПК), являющейся частью корпуса высокоскоростного летательного аппарата (ЛА), предназначенной для защиты антенных устройств бортовой приёмо-передающей аппаратуры от прямого воздействия аэродинамического потока.

В качестве показателя, характеризующего надёжность РПК, заказчиком установлен коэффициент боевой работы ($K_{б.р.}$), представляющий собой вероятность того, что в течение всего срока эксплуатации РПК будет находиться в исправном состоянии и безотказно проработает в условиях, оговоренных в техническом задании (ТЗ). Требуемый уровень $K_{б.р.(тр)} \geq 0,99999$, что значительно превышает ранее предъявлявшиеся требования к изделиям-аналогам.

На этапе эскизного проектирования, исходя из требований ТЗ и опыта АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» по разработке подобных конструкций элементов ЛА, материалом для разработки РПК была выбрана кварцевая керамика НИАСИТ (ТУ 1-596-195-2009) с пропиткой термостойким кремнийорганическим связующим МФСС-8 (ТУ 2229-01-64570284-2011). Данный материал обладает достаточной механической прочностью при воздействии аэродинамических, вибрационных, ударных нагрузок и инерционных перегрузок, высокой термостойкостью, теплозащитными функциями, стабильностью диэлектрических характеристик в широком интервале температур. Отработанный технологический процесс обеспечивает однородность свойств материала как в отдельном изделии, так и повторяемость свойств в изделиях разных партий.

Проведённые расчёты напряжённо-деформированного состояния РПК при воздействии теплового потока и внешнего давления показали работоспособность выбранного материала в конструкции. Однако согласно предварительному расчёту надёжности, основанному на сопоставлении максимальных расчётных напряжений и прочностных свойств кварцевой керамики, $K_{б.р.} \approx 0,99995 \leq K_{б.р.(тр)}$.

Было принято решение продолжить разработку, получить результаты испытаний макетов РПК, в том числе в составе основного изделия, и провести уточняющий расчёт $K_{б.р.}$. При этом дополнительно прорабатывались вопросы повышения уровня надёжности РПК за счёт внедрения ряда конструктивных улучшений, оптимизации технологического процесса и использования методов неразрушающего контроля на всех этапах изготовления РПК.

Последовательная реализация выбранных мероприятий по повышению надёжности РПК завершились успешным проведением оценочных и предварительных испытаний опытных образцов РПК, а также испытаний на сохраняемость и натурных испытаний в составе антенного блока. После окончания режимов испытаний каких-либо механических повреждений РПК не обнаружено. По результатам данных испытаний с применением расчётно-экспериментального метода был проведён уточняющий расчёт надёжности, согласно которому достигнутый уровень коэффициента боевой работы в течение всего срока эксплуатации РПК составил $K_{б.р.} \approx 1,00000$, что выше уровня, требуемого ТЗ.

В дальнейшем успешное проведение государственных испытаний основного изделия, укомплектованного изготовленной и поставленной АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» РПК, подтвердило высокий уровень надёжности конструкции РПК, что открывает перспективы для внедрения РПК в серийное производство.

Конструкция антенного обтекателя с увеличенной несущей способностью

С.М. Кубахов, М.Ю. Русин, А.Н. Хора, Д.А. Рогов, С.Б. Воробьёв, **А.В. Медведев**
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: medvedevav@technologiya.ru

Основными источниками технических затруднений, возникающих при проектировании конструкций головных антенных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов из керамических материалов, являются противоречивые требования к их соединению с металлическим корпусом ракеты. Повышенная хрупкость, низкая прочность, а также существенное отличие нашедших применение на практике керамических материалов по температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) от, например, стеклопластиков или металлов, существенно осложняет разработку подобных конструкций.

Из опыта разработки конструкций обтекателей, включающих в себя неметаллические оболочки из хрупких материалов, поведение которых характеризуется отсутствием вязкопластического деформирования, известно, что начало разрушения подобных критических элементов локализуется в области стыка с соединительными металлическими элементами. Обычно, зона начала растрескивания может располагаться как в сжатой торцевой части оболочки, контактирующей с ответной опорной поверхностью следующего отсека, так и в зоне растяжения оболочки. Уровень силового воздействия и связанных в них напряжений в зоне растяжения керамики определяется контактными усилиями и величиной распора от нагретого внутреннего шпангоута, связанного с внутренней поверхностью оболочки упругим адгезивом.

В работе приведено описание конструктивных решений, направленных на повышение температурных и силовых эксплуатационных параметров керамической оболочки радиопрозрачного обтекателя (РПО), позволивших повысить несущую способность конструкции.

При экспериментальных отработках конструкций РПО было отмечено следующее явление: на шпангоутах изделий, показавших большой запас прочности по результатам теплопрочностных испытаний, наблюдались остаточные пластические деформации внутреннего металлического шпангоута. Для выявления связанных с этим эффектом закономерностей была создана трёхмерная модель изделия, учитывающая все его конструктивные особенности. По результатам моделирования режима испытаний, выполненного в конечно-элементном программном комплексе, установлено, что деформируемая часть шпангоута выполняет функцию компенсатора жёсткости и приводит к перераспределению напряжений в керамической оболочке, локализующихся обычно в достаточно ограниченном пространстве, что является критичным для хрупких материалов, в более обширную область в окружном направлении. Уточнение размеров компенсатора жёсткости (длины и толщины стенки) проводится расчётным путём для обеспечения достаточной прочности и необходимой пластичности в наиболее нагруженной его области. По результатам проработок данной конструкции оптимальная толщина стенки компенсатора жёсткости находится в пределах от 0,3 до 0,7 толщины стенки шпангоута у его торца.

Смещение компенсатора жёсткости к носку оболочки на величину не менее толщины оболочки у основания обусловлено как необходимостью снижения распорных температурных напряжений в торцевой области оболочки при прогреве шпангоута, так и для обеспечения необходимого уровня деформации его обечайки с допущением пластичности в наиболее нагруженной её области.

Количество и геометрические размеры секторов крепёжного бурта, служащих для образования байонетного соединения обтекателя с корпусом ракеты также определяется при проектировании конструкции из условия допущения возникновения пластических деформаций в наиболее нагруженной области компенсатора жёсткости.

На рисунке 1 представлено изображение торцевой области антенного обтекателя, включающего керамическую оболочку 1, металлический шпангоут 2, соединённый телескопически эластичным клеем-герметиком 3 с внутренней поверхностью оболочки. К торцу шпангоута 2 жёстко присоединён (выполнен с ним за одно целое) смещённый к носку оболочки 1 на величину не менее толщины оболочки у её торца компенсатор жёсткости в виде кольцевой обечайки 4, выступающей за торец оболочки 1, толщиной стенки не менее $1/3$ толщины стенки шпангоута у его торца. Выступающая часть обечайки компенсатора жёсткости выполнена с крепёжным буртом в виде равномерно расположенных по окружности секторов, служащих для образования байонетного соединения обтекателя с корпусом ракеты, а наружный диаметр крепёжного бурта выполнен соизмеримым с наружным диаметром шпангоута у его торца.

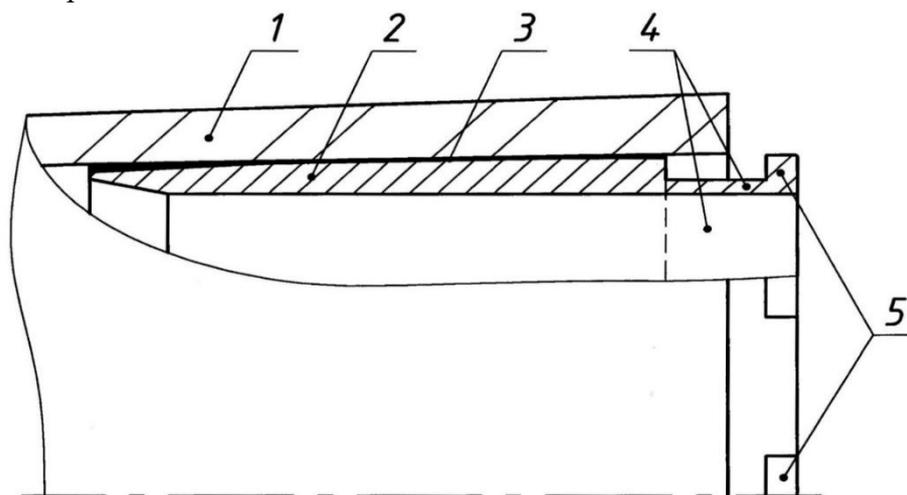


Рис. 1. Схема предлагаемой конструкции обтекателя с компенсатором жёсткости: 1 – оболочка обтекателя из керамического материала, 2 – металлический шпангоут, 3 – эластичный клей-герметик, 4 – компенсатор жёсткости, 5 – крепёжный бурт

Результатами экспериментально-теоретических исследований напряжённо-деформированного состояния (НДС) керамической оболочки от несимметричных силовых воздействий на обтекатель и анализом результатов стендовых испытаний на предельные возможности разработанных и разрабатываемых конструкций обтекателей установлено, что:

- несущая способность обтекателя с оболочкой из кварцевой керамики по предлагаемому техническому решению с компенсатором жёсткости, которая стабильно превышает на 20-30% несущую способность конструкции без компенсатора жёсткости. При этом было зафиксировано наличие остаточных пластических деформаций в наиболее нагруженной области кольцевой обечайки и её крепёжного бурта;

- существует зависимость НДС керамической оболочки в области её контакта с передней частью шпангоута при упругих и упругопластических деформациях в наиболее нагруженной области кольцевой обечайки компенсатора жёсткости и его крепёжного бурта от вариаций их геометрических параметров.

Осевое смещение наиболее нагруженных от несимметричного силового воздействия секторов крепёжного бурта компенсатора жёсткости, определяющегося пластическим деформированием его кольцевой обечайки, обеспечивает перераспределение по окружности силового потока от смежных элементов механической связи и приводит к увеличению несущей способности обтекателя на 20-30%, то есть, компенсирует жёсткое взаимодействие переднего края шпангоута с керамической оболочкой.

Таким образом, доказаны рациональность, целесообразность и значимость введения компенсатора жёсткости в конструкцию обтекателя. Лётными испытаниями подтверждена надёжность использования предлагаемого решения при выполнении комплекса требований к обтекателям современных ракет.

Оценка влияния траектории развертки на сверхразрешение радиолокационных изображений

С.И. Паскробка, В.Ю. Цветков, В.И. Брилевский

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: vtsvet@bsuir.by

Радиолокационное зондирование в СВЧ диапазоне является эффективным методом анализа свойств материалов. За счет фокусировки и регистрации отраженного от поверхности объектов излучения формируются радиолокационные изображения (РЛИ). Для повышения пространственного разрешения РЛИ по двум координатам могут использоваться серии РЛИ низкого пространственного разрешения, в которых каждое следующее РЛИ смещено относительно предыдущего по диагонали на некоторую контролируемую долю размера одного пикселя для возможности оценки перераспределения энергии по пикселям и использования этой информации для прогнозирования неоднородности распределения энергии внутри каждого пикселя. В таком случае для формирования серии исходных РЛИ низкого пространственного разрешения используется диагональная линейная развертка.

Альтернативой диагональной линейной развертки является круговая развертка. Такая развертка технологически проще реализуется и позволяет достичь высокой скорости формирования РЛИ низкого разрешения благодаря непрерывному движению радиоприемной матрицы без затрат времени на разгон и торможение, характерных для диагональной линейной развертки.

Для реализации алгоритма сверхразрешения необходимо, чтобы количество изображений низкого разрешения составляло 2^N , где N – положительное целое. Поэтому, круговая траектория сканирования рассматривается на растре размером $2^N \times 2^N$. В качестве примера на рисунке 1 приведено формирование траектории круговой развертки по 64 точкам на растре 32×32 точки. В этом случае изначально траектория круговой развертки состоит из 88 точек растра, наиболее близких к вписанной в границы пикселя окружности. Это множество точек разбивается на четыре подмножества по 22 точки по количеству секторов (номера секторов показаны на рисунке 1 в центре траектории круговой развертки).

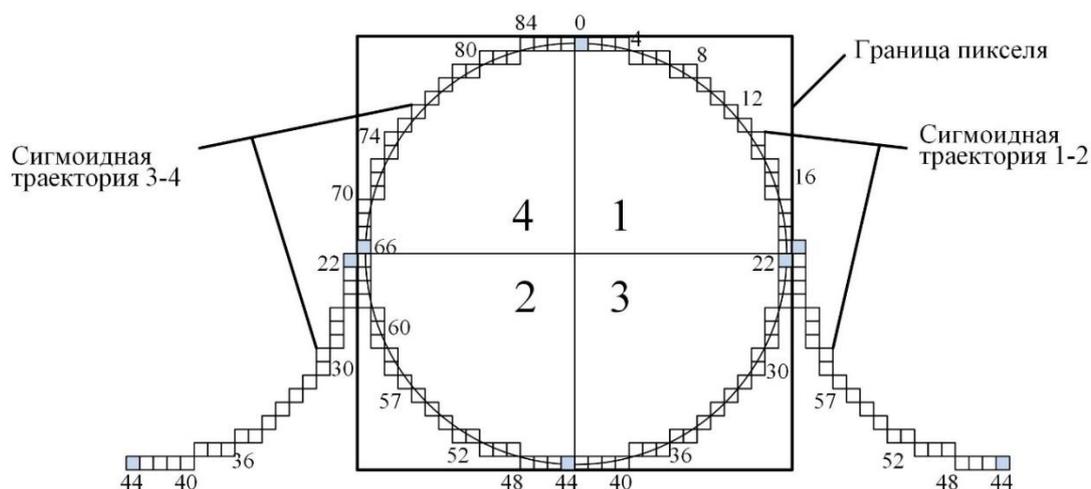


Рис. 1. Преобразование круговой траектории сканирования в две сигмоидные траектории

В результате смещения 66-й точки четвертого сектора и всех точек второго сектора на пиксель (на 32 точки растра) вправо формируется первая диагональная сигмоидная траектория сканирования, по которой радиоприемная матрица перемещается сверху вниз и слева направо. В результате смещения всех точек третьего сектора и 44-й точки второго сектора на пиксель (на 32 точки растра) влево формируется вторая диагональная сигмоидная траектория

сканирования, по которой радиоприемная матрица перемещается сверху вниз и справа налево. Поскольку при круговом сканировании направления движения радиоприемной матрицы в первом, втором и третьем, четвертом секторах не совпадают, РЛИ, формируемые при перемещении радиоприемной матрицы во втором и четвертом секторах, буферизируются и выбираются из буфера в обратном порядке. Причем, из 22 точек траектории в каждом из четырех секторов используются только 16 точек, расположенных примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. В результате из 88 точек траектории круговой развертки для формирования траекторий двух диагональных сигмоидных разверток выбираются 64 точки.

Диагональная сигмоидная траектория совпадает с диагональной линейной траекторией в трех точках: начальной, средней и конечной. Отклонение сигмоидной траектории от линейной вносит ошибки в сверхразрешение. Для оценки влияния таких отклонений на алгоритм сверхразрешения произведена оценка качества РЛИ высокого разрешения 512×512 пикселей, восстанавливаемых по 64-м РЛИ низкого разрешения 8×8 пикселей, полученных в результате кругового сканирования. Алгоритм сверхразрешения включает 5 итераций повышения разрешения на основе интерполяции значений пикселей пары изображений по значениям ближайшего соседнего пикселя с последующим перемножением, нормированием и пороговой обработкой без учета отклонения сигмоидной траектории развертки от линейной.

На рисунке 2 приведены фрагменты 32×32 пикселя РЛИ высокого пространственного разрешения 512×512 пикселей с динамическим диапазоном 256 уровней: эталонного и восстановленных с помощью диагональных линейной и сигмоидной разверток по 64-м РЛИ низкого разрешения без и с пороговой обработкой. Для удобства сравнения результатов нанесен контур (рис. 2 б-ж), соединяющий значимые точки эталонного фрагмента (рис. 2 а).

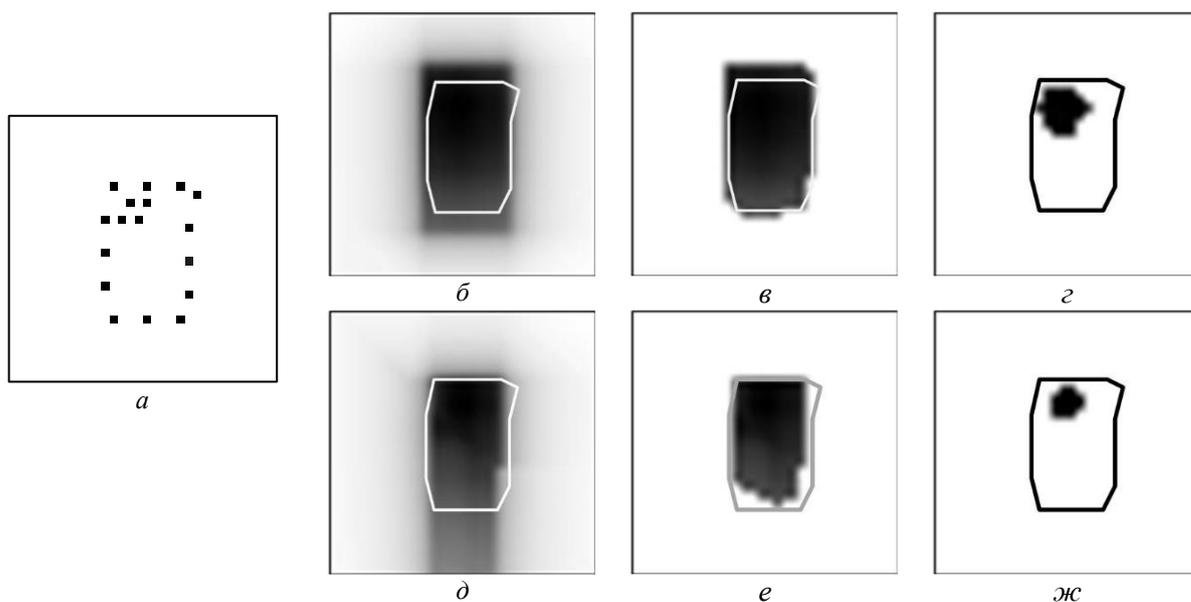


Рис. 2. Фрагменты 32×32 пикселя радиолокационных изображений высокого пространственного разрешения 512×512 пикселей с динамическим диапазоном 256 уровней: *а* – эталонный; *б* – восстановленный с помощью линейной развертки; *в* – восстановленный с помощью линейной развертки с порогом 80; *г* – восстановленный с помощью линейной развертки с порогом 10; *д* – восстановленный с помощью сигмоидной развертки; *е* – восстановленный с помощью сигмоидной развертки с порогом 80; *ж* – восстановленный с помощью сигмоидной развертки с порогом 10

Из рисунков 2 б и 2 д следует, что сигмоидная развертка вносит сравнительно большую ошибку относительно линейной развертки. Однако, как показано на рисунках 2 в, г и 2 е, ж, после пороговой обработки ошибка сверхразрешения значительно уменьшается.

Алгоритмы калибровки векторных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн

Т.К. Толочко, **А.В. Сайков**, А.А. Саяява, Е.А. Скачок, И.В. Чернов, О.В. Руховец, А.А. Попов, С.М. Лапшин, В.В. Кузьма, Е.С. Кедо, М.М. Касперович, К.С. Ерохин
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: alekseys.7@ya.ru

Для обеспечения высокой точности при измерениях в миллиметровом диапазоне длин волн разработана линейка генераторов сигналов Г4-МВМ. Данные генераторы используют синтез частот и имеют пределы допустимой относительной погрешности установки частоты выходного сигнала не более $\pm 2 \cdot 10^{-7}$. Выход СВЧ сигнала представлен волноводным фланцем со стандартным сечением в соответствии с ГОСТ 13317-89, что позволяет напрямую подключать широкий спектр устройств без дополнительных КВП и обеспечивает точное воспроизведение уровня мощности и хорошее согласование. Генерация СВЧ сигнала идет как в непрерывном режиме на фиксированной частоте и мощности, так и в режимах перестройки. Генератор позволяет формировать радиоимпульс с фронтом менее 10 нс за счет использования разработанных модуляторов. Реализована перестройка как по частоте, так и по мощности либо одновременно и по частоте, и по мощности. Перестройка осуществляется либо шаговая в некотором заданном диапазоне перестраиваемого параметра, либо по списку фиксированных значений. Для синхронизации перестройки с другими устройствами на задней панели генератора присутствует разъем «Синхронизации», который несет логические сигналы об этапах перестройки. Возможно дистанционное управление по интерфейсам USB, Ethernet, RS-485, RS-232, CAN с помощью системы команд по стандарту SCPI.

Для решения проблемы измерения коэффициентов отражения и передачи широкополосных радиотехнических устройств в СВЧ-диапазоне длин волн разработана линейка панорамных измерителей КСВН и ослабления типа Р2-МВМ и измерители комплексных коэффициентов отражения и передачи типа Р4-МВМ. Актуальной является проблема измерения коэффициентов отражения и передачи широкополосных радиотехнических устройств в СВЧ-диапазоне длин волн. Для ее решения используются панорамные измерители КСВН и ослабления типа Р2-МВМ, или скалярные анализаторы цепей, позволяющие осуществлять измерения амплитудных параметров. Для определения и амплитудных, и фазовых параметров применяются измерители комплексных коэффициентов отражения и передачи типа Р4-МВМ, или векторные анализаторы цепей, представленные в волноводном исполнении от 8,15 до 178,4 ГГц и в коаксиальном до 20 ГГц. Все волноводные фланцы соответствуют ГОСТу. Форм-фактор приборов позволяет легко подключать волноводные устройства для измерения, так как внешний преобразователь подключен к измерительному блоку с помощью гибкого коаксиального кабеля. Измеритель измеряет модули коэффициентов отражения в диапазоне от 0 до минус 32 дБ, а модули коэффициентов передачи – в диапазоне от 0 до минус 40 дБ и 55 дБ для Р2-МВМ и Р4-МВМ соответственно. В измерителях реализованы векторные калибровки, обеспечивающие высокую точность измерений. К прибору прилагается комплекты аттестованных мер КСВН, меры фазового сдвига, меры согласованной нагрузки и короткозамыкателя.

В докладе приводится алгоритм калибровки на основе калибровочных мер: короткозамкнутая нагрузка, согласованная нагрузка, рассогласованная нагрузка, мера фазового сдвига. Приводятся сравнительные графики погрешностей измерений со стандартной калибровкой и улучшенной. Новые алгоритмы позволили повысить точность измерений на 40%.

Автоматизированная система тестирования радиотехнических систем

С.С. Гурский, М.С. Свирид, В.В. Иванец, В.В. Коледа, Д.А. Лисов
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: maxim_sv@tut.by

В «Научно-производственно-образовательном инновационном центре СВЧ технологий и их метрологического обеспечения» научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники разработан и изготовлен комплекс, в состав которого входит устройство формирования сложных радиотехнических сигналов в СВЧ-диапазоне.

В докладе представлены результаты разработки комплекса для исследований и измерения параметров и характеристик радиотехнических средств (РТС). Комплекс предназначен для формирования сигналов сверхширокополосного диапазона частот от 2 до 298 ГГц в измерительных системах, где требуется генерация сложных радиотехнических сигналов: антенные измерения, исследование характеристик радаров и электродинамических параметров материалов.

Поставленная задача достигается тем, что в комплексе формируются квадратурные сигналы результатов суммирования полезного сигнала с шумами, мешающими отражениями и помехами. Производится генерация когерентных сигналов в аналоговом виде по четырём каналам, а сменные модули инфрадинного переносчика частоты и антенн формируют сигналы, излучаемые в пространство. Сменные блоки обеспечивают каскадное последовательное смешивание основного сигнала с частотой гетеродина. Подбор сменных модулей с заданной частотой гетеродина позволяет обеспечить излучение сигнала в СВЧ и КВЧ диапазонах частот.

Комплекс состоит из четырех основных системных блоков. Первый из них – блок генерации модулированного сигнала с различными законами модуляции. Второй блок представляет собой приемную систему, состоящую из четырех антенн и устройства автокалибровки. Третьим блоком является трехкоординатная механическая платформа, обеспечивающая пространственную ориентацию антенн. Автоматизированное рабочее место (АРМ) управляющего комплексом оператора – четвертый системный блок.

Основой системного блока генерации является опорный задающий автогенератор с высокой стабильностью частоты, сменные модули конвертеров частоты и сменные антенные модули. Формирование четырех каналов аналоговых радиосигналов начинается с цифровых синтезаторов частоты, сигналы с которых после цифро-аналогового преобразования (ЦАП) проходят трехкратный инфрадинный перенос частоты вверх и подаются на антенны. Второй и третий преобразователи выполнены в виде сменных модулей, что позволяет обеспечить возможность формирования радиосигналов в диапазоне частот от 2 до 298 ГГц.

Необходимо отметить возможность измерения диаграммы направленности антенн через минимально возможные углы разрешения в вертикальной и горизонтальной плоскостях, что обуславливается новой функциональной возможностью комплекса – проверкой статистических гипотез для выполнения задач пеленгации и распознавания сигнальных портретов РТС.

Метрологическое обеспечение средств измерений миллиметрового диапазона длин волн

А.С. Волюнец, **Т.К. Толочко**, М.М. Касперович, Н.А. Певнева, А.Е. Байко, М.А. Гончарик, А.Н. Кузюков, С.М. Лапшин, И.В. Чернов, Ю.В. Шевалдина
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: t.tolochko@bsuir.by

Научно-производственно-образовательным инновационным центром сверхвысокочастотных (СВЧ) технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9) БГУИР решаются задачи по разработке, производству и метрологическому обеспечению средств измерений миллиметрового диапазона длин волн в соответствии с потребностями промышленности и экономики страны. В целях обеспечения единства измерений в данном диапазоне длин волн Центром 1.9 БГУИР выполняются задания «Создать национальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц» и «Создать национальный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц» подпрограммы «Эталоны Беларуси» государственной научно-технической программы «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование», 2021-2025 годы.

Разрабатываемые эталоны предназначены:

- для воспроизведения, хранения и передачи размера единиц мощности и ослабления электромагнитных колебаний рабочим средствам измерений с целью обеспечения единства измерений в Республике Беларусь;

- поверки, калибровки, метрологической экспертизы и испытаний с целью утверждения типа измерителей и преобразователей мощности, скалярных и векторных анализаторов цепей и измерительных аттенуаторов диапазона миллиметровых длин волн;

Эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний, обобщенная структурная схема которого представлена на рисунке 1, содержит генератор СВЧ, СВЧ измерительный тракт, гетеродин, индикаторную часть, ПЭВМ, комплекты соединительных коаксиальных и интерфейсных кабелей.

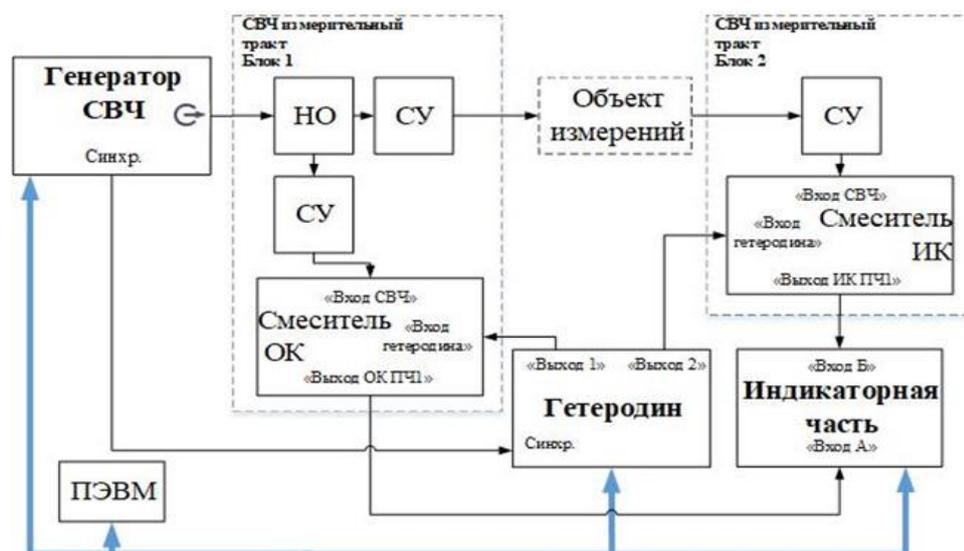


Рис. 1. Обобщенная структурная схема эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц:

СУ – согласующее устройство; НО – направленный ответвитель;
ОК – опорный канал; ИК – измерительный канал

Принцип действия эталона основан на преобразовании частоты в ОК и ИК на постоянную промежуточную частоту (ПЧ) 20 кГц. Преобразование частоты осуществляется в три этапа. Гармонический сигнал от генератора СВЧ с помощью направленного ответвителя (НО) делится на два канала: измерительный (ИК) и опорный (ОК). В ИК СВЧ сигнал проходит через объект измерений (ОИ) – исследуемый четырехполюсник, после чего сигнал, амплитуда которого пропорциональна измеряемой величине ослабления попадает на высокочастотный вход смесителя ИК. В ОК сигнал поступает на высокочастотный вход смесителя ОК. На гетеродинные входы смесителей поступают сигналы от гетеродина. Смесители ИК и ОК обеспечивают первый этап преобразования частоты. Сигнал с выхода смесителя ИК поступает на вход канала Б индикаторной части, в качестве которой используется прибор для измерения ослабления ДК1-28. Сигнал с выхода смесителя ОК поступает на вход канала А индикаторной части. В индикаторной части осуществляются второй и третий этап преобразования частоты: на частоты 20 МГц и 20 кГц, соответственно. Сигналы генератора СВЧ и гетеродина синхронизированы. В индикаторной части осуществляется измерение отношений уровней сигналов в каналах А и Б, производится отсчет измеряемого разностного ослабления.

Эталон единицы мощности электромагнитных колебаний, обобщенная структурная схема которого представлена на рисунке 2, содержит источники сигналов, устройства сличения, высокоточные измерители поглощаемой мощности.

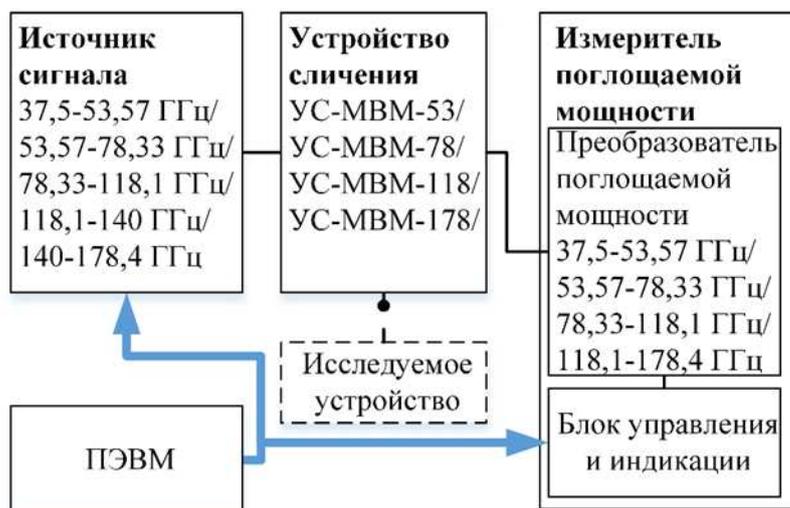


Рис. 2. Обобщенная структурная схема эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц

СВЧ сигнал с выхода источника сигнала поступает на вход устройства сличения, в котором часть мощности ответвляется в боковое плечо и поступает на вход измерителя поглощаемой мощности. Мощность, измеренная высокоточным измерителем поглощаемой мощности во вспомогательном канале, пропорциональна мощности, падающей на вход исследуемого устройства.

Разрабатываемые эталоны обеспечат техническую независимость для отраслей экономики и промышленности, в которых осуществляются измерения в миллиметровом диапазоне длин волн, так как исключают необходимость обращаться в зарубежные организации для получения единиц величин, обеспечат возможность проведения метрологической оценки средств измерений миллиметрового диапазона длин волн, что внесет вклад в развитие и устойчивое функционирование существующих технических систем, требующих проведения высокоточных измерений в диапазоне миллиметровых длин волн.

Термостойкий керамический материал кордиеритового состава

Н.А. Михалевская, М.К. Алексеев, А.А. Анашкина, Г.И. Куликова
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

В производстве и переработке алюминия для смешивания расплава металла с легирующими добавками используют печи-миксеры с целью получения сплавов нужного состава. Системы нагрева этих миксеров представляют собой трубчатые нагреватели, собранные с помощью установочных керамических изоляторов. На протяжении последних трех лет АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» изготавливает и поставляет в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск) такие изоляторы из корундового материала ТСМ-303.

Несмотря на высокие электрофизические и прочностные свойства корундовой керамики, она имеет относительно низкую термостойкость, что в условиях эксплуатации нагревателей, сопровождающейся циклическими термическими нагрузками, приводит к преждевременному разрушению изоляторов и снижению срока службы нагревательной сборки в целом. В связи с этим возникла необходимость разработки нового керамического материала с повышенной стойкостью к температурным перепадам для увеличения ресурса работы системы нагрева.

Одним из перспективных материалов, работоспособных в качестве изоляторов в конструкции нагревателей, является кордиеритовая керамика, которая характеризуется высокими электроизоляционными свойствами и термостойкостью благодаря низкому коэффициенту термического расширения. Для получения такой керамики можно использовать дешевое и доступное природное сырье, позволяющее существенно снизить стоимость ее производства.

В настоящей работе в качестве исходного сырья использованы порошки талька ТМК-28, муллита ПМЛП-3, электрокорунда F1500 и связующее «наносил-30» в соотношении 33 тальк : 57 муллит : 10 электрокорунд + 10 наносил-30 (мас. %), что обеспечивает образование в составе керамики кордиерита и близкого по свойствам сапфирина в суммарном количестве до 60 мас. %.

Выбор талька ТМК-28 обусловлен высоким содержанием MgO (≥ 30 мас. %), доступностью, дешевизной и хорошей прессуемостью; электрокорунда F1500 – высокой активностью к спеканию; муллита ПМЛП-3 – высокой температурой плавления и существенным отличием от кордиерита по КТЛР; кремнезоля «наносил-30» – высоким содержанием SiO₂ (30 % мас.) и хорошими пластифицирующими свойствами.

Для разработки кордиеритовой керамики использован способ полусухого прессования шихты на основе выбранных сырьевых материалов при давлении в диапазоне 20-90 МПа с последующим обжигом заготовок при температурах в интервале 1250-1375 °С.

Установлено, что давление прессования 50-60 МПа является оптимальным, обеспечивает получение и бездефектных заготовок, и керамики с плотностью 2,02-2,05 г/см³, пористостью 25-27% и прочностью при изгибе 40-42 МПа после обжига при 1350 °С. Прочность спеченного материала имеет максимальные значения (≥ 40 МПа) при использовании порошков муллита с удельной поверхностью 3250 см²/г.

В интервале температур обжига 1250-1350 °С прочность керамики увеличивается от 13 до 40 МПа по мере спекания компонентов; при дальнейшем повышении температуры происходит плавление и деформация изделий. Оптимальная температура обжига материала – 1350 °С.

Согласно данным РФА, с ростом температуры обжига до 1350 °С наблюдается увеличение образующегося кордиерита и сапфирина до 60 мас. % при одновременном

снижении содержания муллита до 30 мас. %, что свидетельствует о синтезе кордиерита с участием последнего (рис. 1).

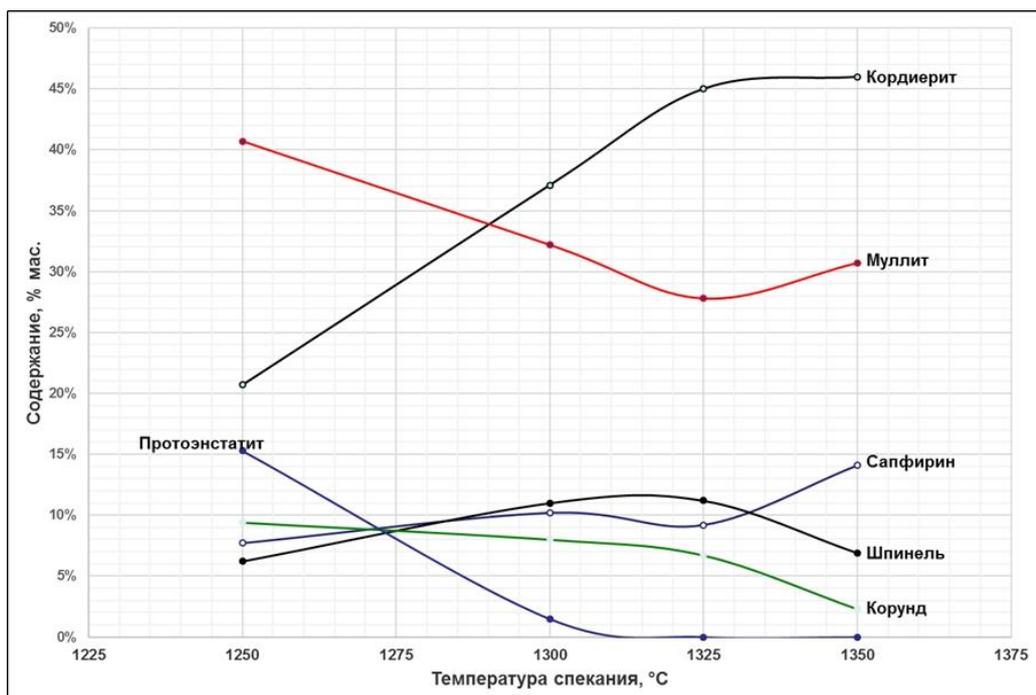


Рис. 1. Изменение фазового состава керамики в зависимости от температуры обжига

Разработана ресурсосберегающая технология получения материала кордиеритового состава, основными этапами которой являются следующие операции: приготовление пресс-порошка путем протирки через сито порошковых компонентов со связующим; прессование заготовок в металлических пресс-формах при давлении 50-60 МПа и обжиг их при 1350 °C.

Разработанный материал содержит около 45 % кордиерита, 15 % сапфирина и 30 % муллита, имеет низкий КТЛР $(2-4) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне температур 20-1200 °C и высокую термостойкость – более 30 циклов «1000 °C – вода» без видимых изменений образцов, что более чем в 10 раз выше термостойкости изоляторов из корундовой керамики ТСМ-303.

Изготовлена опытная партия изоляторов в количестве 100 шт. (рис. 2), которые в составе двух сборок нагревателей миксера успешно прошли заводские испытания в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики».



Рис. 2. Опытная партия изоляторов из керамики кордиеритового состава для нагревателей миксера

Получение наноструктурных керамических порошков для дентальной имплантологии

В.И. Антипов, А.Г. Колмаков, Ю.Э. Мухина, Е.Е. Баранов

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия

E-mail: mukhina.j.e.imet@yandex.ru

В современной стоматологии благодаря появлению новых наукоемких технологий и методик дентальная имплантология стала стремительно выходить на передовые позиции. Стоматологическое лечение с использованием имплантов вызывает огромный интерес у специалистов и привлекает все большее количество пациентов. Данный вид лечения широко применяется за рубежом, а также успешно используется рядом российских клиник. Одним из ключевых моментов в данном способе протезирования является разработка качественных материалов для изготовления несъемных ортопедических конструкций.

К зуботехническим материалам для имплантов предъявляются чрезвычайно жесткие требования. Они должны обладать химической стабильностью, хорошей биосовместимостью с живой тканью человеческого организма и одновременно характеризоваться высокими показателями механической прочности и трещиностойкости. Желательно также, чтобы материал обладал пониженной теплопроводностью и имел бы окраску, схожую с цветом естественных тканей зубов.

Указанным требованиям отвечает конструкционная керамика на основе оксида циркония состава $ZrO_2 + 3 \text{ моль } \% Y_2O_3$. Данный тип керамики привлекает внимание врачей-стоматологов не только своими эстетическими характеристиками и хорошей биосовместимостью, но также и высокими механическими свойствами. Изделия из ультрадисперсных цирконоиттриевых порошков имеют прочность $\sim 900 \text{ МПа}$, а также обладают повышенной трещиностойкостью порядка $5-8 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Но этот вид керамики имеет существенный недостаток. При работе в горячих водных растворах наблюдается постепенная деградация материала, обусловленная спонтанными полиморфными превращениями, сопровождаемыми появлением множественных микротрещин.

Научно доказано, что более значительной гидростабильностью обладает циркониевая керамика, стабилизированная SeO_2 . Важным моментом является еще и то, что циркониево-цериевая керамика обладает повышенной трещиностойкостью, порядка $10-12 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, что весьма существенно для зубопротезных материалов.

В настоящем исследовании предпринята попытка получения субмикронных наноструктурированных керамических порошков состава $ZrO_2 + 12 \text{ моль } \% SeO_2$ методом ультразвукового распылительного пиролиза из жидких аэрозолей, который позволяет синтезировать порошки без образования агломератов.

Рабочий раствор, содержащий необходимые компоненты, с помощью ультразвукового генератора преобразуется в аэрозольный туман, капли которого, увлекаемые потоком газ-реагента, поступают в горячую зону кварцевого генератора, помещенного внутрь проходной печи.

Здесь в каждой отдельной капле аэрозоля при взаимодействии с газом-реагентом, протекает синтез продукта, который на выходе реактора осаждается в специальном сборнике-уловителе в виде субмикронных сферических частиц. При этом важно то, что в процессе протекающего синтеза исключен контакт между образующимися частицами, и, как следствие этого, не происходит их спекание с образованием прочных агломератов.

Циркониево-цериевые порошки получали на экспериментальной технологической установке ультразвукового распылительного пиролиза, в которой образование аэрозольной среды обеспечивалось с помощью серийного ультразвукового ингалятора «Альбеда ИН-72» с рабочей резонансной частотой 2,6 МГц. Синтез порошка осуществлялся при температуре $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ в потоке воздуха, нагнетаемого вместе с аэрозолем внутрь трубчатого кварцевого

генератора с длиной рабочей зоны 1 м. Для приготовления рабочих растворов использовали водорастворимые смеси неорганических солей – кристаллогидратов хлорида циркония. Из полученных порошков, минуя предварительную обработку (механическое измельчение, грануляцию), методом одноосного прессования были приготовлены экспериментальные круглые таблетки для металлографических исследований, а также бруски размером 4×3×60 мм для механических испытаний на трехточечный изгиб.

Электронно-микроскопические исследования синтезированных порошков показали, что частицы обладают сферической морфологией и не собираются в агломераты.

В результате анализа распределения частиц по размерам установлено, что средний размер частиц равен 0,84 мкм при стандартном отклонении (величине, характеризующей разброс частиц по размерам) ~ 0,39 мкм.

Рентгеноструктурный анализ порошков показал 100%-е содержание тетрагональной модификации твердого раствора диоксида циркония и церия. При этом необходимо отметить, что в частицах формируется наноразмерная поликристаллическая структура, о чем свидетельствует анализ ширины пиков рентгенограмм, выполненный по методике Шерера. Согласно проведенным расчетам размер внутренних кристаллитов составляет примерно 16 нм.

Для оценки склонности порошков к спеканию были проведены серии двухчасовых обжигов отпрессованных образцов при температурах 1450, 1500 и 1550 °С. В качестве эталонной величины взято теоретическое значение плотности материала, равное 6,29 г/см³. С ростом температуры спекания плотность материала повышается и при 1550 °С достигает 99,6%. Одновременно с возрастанием плотности наблюдался и рост среднего размера зерна с 0,63 мкм при 1450 °С до 2,14 мкм при 1550 °С.

Важно отметить, что при низкой температуре спекания (1450 °С), когда процессы рекристаллизационного роста зерен еще не столь ощутимы, средний размер зерна в структуре образца спеченного материала (0,63 мкм) оказывается меньше размера исходных частиц в порошках (0,84 мкм). Это еще раз косвенным образом указывает на наличие в исходных частицах нанофрагментарной поликристаллической структуры. А именно, в ходе спекания на ранней стадии протекает первичная рекристаллизация и размер внутренней нанофрагментарной структуры частиц порошка как бы «наследуется» структурой уже спеченного материала.

Подобное явление наблюдалось и в микроструктуре керамики из порошков состава $ZrO_2 + 3 \text{ моль } \% Y_2O_3$. Микроструктура керамических образцов характеризуется однородным распределением равноосных зерен с невысоким разбросом их по размерам. В образце, спеченном при 1450 °С, еще наблюдается наличие остаточных пор, о чем свидетельствует и невысокая плотность материала в таких образцах.

Наилучшие механические свойства продемонстрировали образцы керамики, спеченной при 1550 °С. Средний предел прочности материала в таких образцах составил 683 МПа, а трещиностойкость 12,7 МПа·м^{1/2}.

Полученные в ходе проведенных исследований данные о технологических особенностях, структуре и механических характеристиках новой керамики, спеченной на основе аэрозольных порошков состава $ZrO_2 + 12 \text{ моль } \% CeO_2$, свидетельствуют о достаточно высоком уровне достигнутых свойств. Механические характеристики нового материала сопоставимы с аналогичными характеристиками керамик из ультрадисперсного сырья. В то же время, получение керамики из исследованных порошков не требует применения специальных дорогостоящих методов компактирования, позволяя ограничиваться традиционными способами порошковой технологии. Кроме того, из технологической цепочки полностью исключаются дорогостоящие операции предварительной подготовки порошкового сырья.

Изготовление неагломерирующихся керамических нанопорошков методом ультразвукового распылительного пиролиза

В.И. Антипов, А.Г. Колмаков, Ю.Э. Мухина, Е.Е. Баранов

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия

E-mail: mukhina.j.e.imet@yandex.ru

В последнее время заметно возрос интерес к субмикронным порошкам, полученным с помощью ультразвукового распылительного пиролиза растворов минеральных солей, позволяющего синтезировать порошки различных соединений с уникальными физико-химическими характеристиками. В зависимости от температурно-временных режимов процесса метод позволяет направленно менять структуру частиц от аморфного состояния до кристаллического, а при определённых режимах получать наноструктурированные субмикронные порошки. При спекании таких наноструктурированных порошков происходит активный диффузионный массоперенос, способствующий эффективному уплотнению материала.

Для получения аэрозоля используются рабочие растворы, представляющие собой водорастворимые или растворимые в органических жидкостях соединения компонентов, с заданным элементным и фазовым составом. С помощью ультразвукового генератора рабочий раствор превращается в многокапельную взвесь (туман) из капель микронного размера, которая увлекается потоком газа-реагента в горячую зону проходного высокотемпературного реактора, где в отдельных каплях и протекает процесс пиролиза.

Далее синтезированные порошки поступают в специальный сборник. Достоинство способа заключается в том, что, варьируя концентрации компонентов в рабочем растворе, скорость потока газа-реагента и состав газовой смеси, а также меняя температуру в горячей зоне реактора и профиль её нагрева, можно целенаправленно влиять на характеристики получаемых порошков.

Получаемые таким способом порошки характеризуются сферической морфологией частиц, узким фракционным составом порошка, а в порошковой массе отсутствием трудно разрушаемых агломератов.

Обычно, данный способ позволяет получать частицы преимущественно субмикронного и микронного размеров, которые обладают заметно более низкой активностью при спекании по сравнению с ультрадисперсными порошками (УДП). Однако проведённые исследования позволили установить, что при определённых режимах ведения процесса в частицах формируется наноразмерная полифрагментарная структура с развитой сетью межфазных границ.

Используя рентгеновский метод оценки областей когерентного рассеяния (ОКР), удалось установить характер распределения по размерам внутривчастичных зерен в таких порошках. Обнаружено, что, при среднем диаметре частиц 0,8 мкм, величина внутривчастичных фрагментов (поликристаллических зерен) лежит в наноразмерной области, а их средний размер равен ~ 26 нм.

Для проверки аналитических выводов о роли полинанофрагментарной внутренней структуры аэрозольных частиц в процессе спекания была проведена сравнительная оценка полученных экспериментальных данных с результатами опытов по спеканию УДП. Исследования проводили на порошках фазового состава – $ZrO_2 + 3 \text{ моль } \% Y_2O_3$. В ходе сравнительного анализа сопоставляли два типа порошков со средним размером частиц 0,23 мкм, и УДП со средним размером 0,027 мкм. Средний размер частиц в исследованных порошках на порядок меньше, чем в УДП.

Видно, что наноструктурированные порошки имеют типичную для них сферическую морфологию и не образуют многочастичных плотных агрегатов, а УДП – агломерированы.

Проведя анализ уширения рентгеновских пиков на рентгенограммах, удалось установить, что средний размер внутричастичных фрагментов (зёрен) в аэрозольных порошках составляет ~11,2 нм, а в УДП – 21-27 нм.

Для исследования кинетики спекания порошков методом водного шликерного литья были приготовлены заготовки в виде таблеток \varnothing 30×3 мм. При этом обнаружилось, что плотность этих образцов заметно отличается от плотности образцов из УДП. Для формовок из этих порошков она составляла 58,2% относительно теоретической плотности циркониево-иттриевой стабилизированной керамики, равной 6,02 г/см³. Для формовок из УДП плотность оказалась гораздо меньше и составила 42,4%. Такое различие можно объяснить сильной локальной неоднородностью упаковки ультрадисперсных частиц, что негативно сказывается на качестве материала после спекания. Отформованные таблетки подвергали часовому обжигу в печи с воздушной средой в интервале температур 800-1450 °С с пошаговой градацией термических режимов в 50 °С.

Характер прироста плотности по мере повышения температуры спекания у заготовок из наноструктурированных порошков существенно отличается от аналогичного показателя для УДП из монокристаллических частиц. Уплотнение образцов как из наноструктурированных порошков, так и из ультрадисперсных частиц, происходит при температуре спекания 800 °С. С этого момента в ходе последующего повышения температуры начинается интенсивный рост плотности, который затем сменяется завершающим периодом спада интенсивности прироста плотности, достигая её предельного значения при 1450 °С. Пройдя поэтапно все указанные стадии уплотнения, образцы из наноструктурированных порошков уже при 1200 °С достигают плотности 99,6%. При спекании УДП в интервале 800-1000 °С также наблюдается интенсивный прирост плотности, однако с дальнейшим повышением температуры этот прирост практически останавливается. При температуре 1450 °С плотность заготовок из УДП достигает 94%, имея слабую тенденцию к дальнейшему увеличению. Такой характер уплотнения УДП можно объяснить существенной неоднородностью упаковки наноразмерных частиц в исходном компакте. Высокая интенсивность прироста плотности в интервале температур 800-1000 °С обеспечивается главным образом за счёт активного спекания наночастиц внутри первоначальных агломератов. При завершении данного процесса в сформировавшихся плотных внутриагломератных областях происходит интенсивная рекристаллизация, приводящая к уменьшению разветвлённости межзеренных границ и, как следствие этого, к снижению доли объёмной составляющей диффузионного массопереноса. Таким образом, на конечной стадии спекания ресурсы для заполнения оставшихся межагломератных пор оказываются практически исчерпанными.

Показано, что можно успешно спекать порошки, состоящие из достаточно крупных (микронных и субмикронных) частиц при наличии в них полифрагментарной наноструктуры. В этом случае кинетика процесса спекания наноструктурированных частиц существенно отличается от спекания УДП, и общеизвестная взаимосвязь между дисперсностью порошка и степенью его активности при спекании нарушается. При спекании наноструктурированных порошков основное значение приобретает структурный фактор. Используя наноструктурированные порошки, можно сформировать в спечённом материале однородную поликристаллическую структуру, размер зерна в которой оказывается меньше исходных порошковых частиц.

Выявленные особенности наноструктурных порошков, особенно отсутствие склонности к образованию многочастичных прочных агломератов, подтверждают их преимущество перед УДП.

Спекание прозрачной керамики на основе оксинитрида алюминия

И.Б. Опарина

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия

E-mail: ibo@imet.ac.ru

Проведены исследования, позволившие установить технологические особенности спекания, влияющие на свойства керамики на основе поликристаллического кубического оксинитрида алюминия. Увеличение степени прозрачности керамики напрямую зависит от чистоты используемых высокодисперсных монофракционных порошков. Даже незначительное наличие второй фазы с образованием рассеивающих центров резко снижает светопропускание. Поэтому для изготовления прозрачной керамики необходимо использовать сырье высокой чистоты и избегать его загрязнения в процессе обработки. Второе условие получения высокоплотной прозрачной керамики – это измельчение порошка до мелкодисперсного состояния.

Порошок оксинитрида алюминия можно синтезировать разными методами: твердофазным, газофазным и микроволновым, карботермическим восстановлением и азотированием. Карботермический метод по сравнению с другими более предпочтителен за счет его преимуществ в производстве. Однако и этот метод зависит от чистоты сырья и условий спекания.

Для приготовления смеси использовали особо чистые порошки: AlN и Al₂O₃. Смесь имела следующий состав: 30-37 моль % AlN и 70-63 моль % α-Al₂O₃. Для получения мелкодисперсной смеси порошки размалывали в шаровой мельнице с шарами из оксида алюминия, продолжительность размола составляла 16 ч. После измельчения смесь прокачивали в тиглях в течение 4 ч при температуре 1600-1750 °С в атмосфере азота. При обжиге Al₂O₃ реагирует с AlN с образованием кубического оксинитрида алюминия. В результате получили однородный порошок оксинитрида алюминия со средним размером частиц менее 1,0 мкм. Полученную суспензию тщательно высушивали.

На второй стадии измельчения как правило добавляют легирующие добавки оксидов редких металлов. При введении таких добавок существенно усиливается эффект их воздействия на процессы удаления пор при последующем спекании. Основной принцип при выборе добавок, влияющих на микроструктуру и свойства керамики – это использование оксидов, образующих твердые растворы. Общее количество добавок, присутствующих в ходе спекания, не должно превышать 0,5% от исходной массы.

В качестве уплотняющей добавки, образующей с оксинитридом алюминия твердый раствор, способствующий полному удалению пор и увеличению прозрачности материала, применяли Y₂O₃.

Спекание – один из методов получения керамики на основе оксинитрида алюминия. В данной работе применяли метод горячего прессования. Порошок оксинитрида алюминия формовали в виде таблеток диаметром 20 мм и толщиной 2 мм при низком давлении, а затем подвергали изостатическому прессованию в холодном состоянии при 200 МПа. Заготовки спекали без давления в печи в атмосфере азота около 20 ч. Температура спекания была выше 1900 °С, но ниже температуры солидуса алюминиевого оксинитрида (~2140 °С).

Спеченная керамика оксинитрида алюминия была отшлифована и отполирована до блеска с обеих сторон до толщины 1 мм.

В результате проведенных работ была получена полупрозрачная керамика оксинитрида алюминия. Рентгеноструктурный анализ показал, что реакция прошла успешно с образованием основной фазы оксинитрида алюминия, однако также в минимальных количествах была обнаружена фаза AlN.

Разработка фундаментальных основ нового технологического процесса синтеза нитридной керамики на основе твердых растворов Zr-U, Zr-Nb

А.И. Огарков¹, И.А. Ковалев¹, Г.П. Кочанов¹, А.В. Шокодько¹, Д.П. Шорников^{1,2},
Б.А. Тарасов^{1,2}, С.В. Шевцов¹, Л.О. Львов^{1,3}, Е.А. Шокодько¹, А.Н. Рогова¹,
А.А. Половинкин¹, С.С. Стрельникова¹, А.С. Чернявский¹, К.А. Солнцев^{1,3}

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ³МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
E-mail: aogarkov@imet.ac.ru

В рамках подхода окислительного конструирования впервые реализован процесс полной нитридации образцов проката Zr-U, Zr-Nb в атмосфере азота при температурах ниже, вблизи и выше температуры перитектической реакции. Экспериментально показана возможность синтеза в одностадийном технологическом процессе плотной керамики заданной формы на основе смешанных нитридов и композитов на их основе.

Исследованы кинетические зависимости рассматриваемых процессов.

Предложена термодинамическая модель конденсированных фаз в тройной системе U-Zr-N при 298-2800 К, а также в тройной системе Nb-Zr-N при 298-3000 К.

Показана взаимосвязь структуры созданной керамики и композитов на ее основе и текстуры исходных твердых растворов Zr-U, Zr-Nb.

Выявлены особенности диффузионных процессов в рамках высокотемпературной нитридации твердых растворов Zr-U, Zr-Nb по всему объему керамики в зависимости от температурно-временных параметров процесса.

Изучено распределение твердости по сечению созданной керамики.

Показана химическая и термическая стойкость созданной керамики на основе смешанных нитридов Zr(U)N, Zr(Nb)N и композитов на ее основе.

Результаты проведенных структурных исследований свидетельствуют о высокой устойчивости структурного, фазового и композиционного состояния Zr(Nb)N к воздействию облучения высокоэнергетическими ионами ксенона (рис. 1).

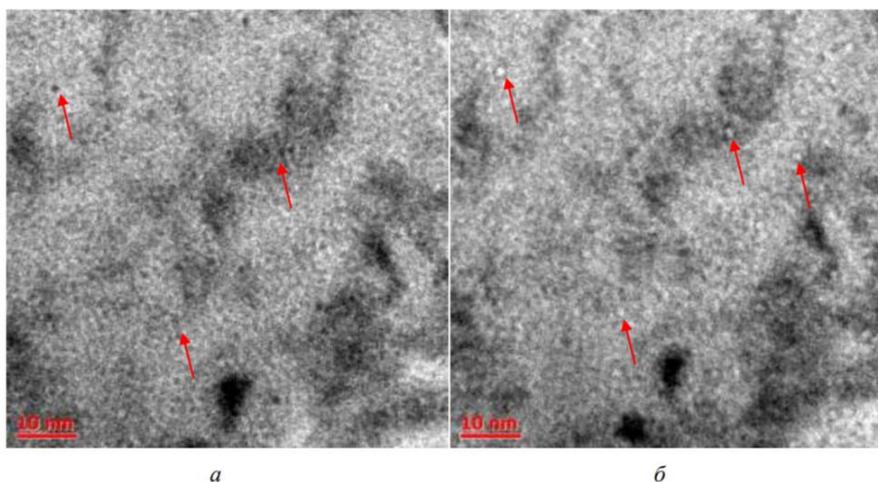


Рис. 1. ПЭМ-изображения в режиме высокого разрешения структуры облученного образца Zr(Nb)N (300 сна; расстояние от поверхности ~1250-1320 нм):
a – режим "overfocus"; *б* – режим "underfocus";
стрелками указана разреженная пористость

Исследование выполнено за счет гранта РФФ, проект № 20-13-00392

Влияние гранулированного наполнителя на скорость набора при шликерном литье

О.Д. Пашков^{1,2}, Д.В. Харитонов^{1,2}, Д.А. Михалевский¹

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

² РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Кварцевая керамика занимает отдельную нишу керамических материалов, так как имеет ряд уникальных свойств, определяющих её применение в изделиях технического назначения и огнеупорах. Распространенным способом ее получения является формование заготовок методом водного шликерного литья в гипсовые формы с последующим спеканием. Для получения кварцевой керамики с высоким уровнем свойств водный шликер на основе кварцевого стекла должен быть высококонцентрированным с содержанием твердой фазы не менее 70%. Метод отличается простотой аппаратного оформления и позволяет формовать сложнопрофильные крупногабаритные изделия. Особенностью метода является существенная продолжительность формования: так, для набора массы толщиной около 20 мм требуется не менее 10 ч. Поэтому для получения более толстостенных изделий необходимо совершенствование и улучшение данного метода. В представленной работе предложен метод шликерного литья с использованием пористого наполнителя.

Для эксперимента использовали шликеры на основе кварцевого стекла с объемной долей твердой фазы не менее $C_v = 0,70$, а также пористый наполнитель, полученный гранулированием порошка из кварцевого стекла. Порошок получали посредством мокрого помола кварцевого стекла, сушки массы в гипсовой форме и сухого помола высушенной массы до тонкодисперсного состояния. Тонкодисперсный порошок гранулировали в смесителе-грануляторе с применением временной технологической связки. Гранулированный материал протирали через сито с размером ячейки 1,6 мм, после чего просеивали на сите с размером ячейки 0,3 мм. Сушку гранулированного наполнителя размером 0,3-1,6 мм проводили на воздухе.

Подготовленный наполнитель постепенно вводили в шликер при постоянном перемешивании для предотвращения комкования и для равномерного распределения гранул в объеме шликера, количество наполнителя составляло 10 мас. %.

Скорость набора определяли по нарастанию слоя, набранного на стенке гипсовой формы. Время полного набора образца без использования наполнителя составляет 6 ч, применение наполнителя позволило сократить время набора до 3 ч. Свойства полученных образцов после обжига соответствовали таковым без наполнителя (табл. 1).

Таблица 1. Свойства полученных образцов

Наименование параметра	Массовое содержание гранул, %	
	0	10
Плотность, г/см ³	1,94	1,95
Открытая пористость, %	11,05	11,25
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	35,1	47,2

Полученные в данной работе результаты подтверждают гипотезу о положительном влиянии гранулированного наполнителя на время формования заготовок методом литья из водных шликеров кварцевого стекла.

Научным интересом для дальнейших работ являются: оценка влияния количества наполнителя, количества временной технологической связки, фракционного состава твердой фазы на реологию системы и свойства материала. Успешное решение задачи выбора оптимальных параметров позволит разработать технологию изготовления толстостенных изделий.

Интенсификация шликерного литья в технологии получения специальных волластонитовых огнеупоров

Ю.А. Перкин^{1,2}, Д.В. Харитонов^{1,2}, Д.А. Михалевский², Л.И. Горчакова²

¹РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия;

²АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Развитие технологии производства алюминиевых конструкций, модернизация технологического парка литейного оборудования, применение новых компонентов в литейном производстве требует внедрения новых, более стойких к воздействию расплава, огнеупоров.

В условиях острой конкуренции на мировом алюминиевом рынке актуальным становится повышение качества выпускаемой продукции, оптимизация расходов на литье с целью минимизации цен на алюминиевый профиль, а также обеспечение экологической чистоты производственных процессов.

В Европе и США ведутся активные работы по созданию специальных огнеупоров для производства алюминия и их широкому внедрению по всему миру. Большая часть номенклатуры керамических изделий – огнеупоры кальций-силикатного состава, в которых основной фазой является волластонит $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. В ходе модернизации процессов литья алюминия объем потребления специальных огнеупоров постоянно растет.

В цветной металлургии волластонит широко используется в качестве материала для сменных керамических комплектующих различного назначения, в том числе как заменитель асбеста.

Для формования фасонных и крупногабаритных изделий из волластонита классическим является метод водного шликерного литья в гипсовые формы. Данный способ технологически прост, не требует специального оборудования, предполагает использование недорогих и несложных в изготовлении гипсовых форм.

Изделия, полученные шликерным литьем, подлежат длительной подвялке и сушке сначала на воздухе, затем в печи. Обжиг изделий проводят в электропечи в воздушной среде при температуре 800-900 °С. Высокая дисперсность глины, а также наличие в каолинитах щелочных соединений – плавней, обуславливают спекание при низких температурах. В процессе спекания уплотнения керамики практически не происходит, объемная усадка не превышает 1%.

Длительность технологического процесса получения изделий из волластонита методом шликерного литья в гипсовые формы составляет не менее двух недель. Самым длительным этапом является процесс формования и занимает от трех до десяти дней в зависимости от размеров и конфигурации изделия. В связи с этим целью данной работы является повышение производительности операции формования изделий из волластонита.

Одним из известных способов формования керамических изделий санитарно-технического назначения является метод литья под давлением в полимерные формы. В его основе лежит использование внешнего давления, под действием которого шликер поступает в закрытую полимерную форму. Такая форма, в отличие от гипсовой, не требует длительной сушки между циклами формования. Форма восстанавливает свои качества после промывки в воде, долговечна в эксплуатации. Этот метод мы опробовали для интенсификации процесса литья изделий из волластонита.

В работе использовали шликер на основе порошка волластонита, удельная поверхность которого, определенная методом воздухопроницаемости на приборе типа ПСХ, находится в пределах 2500-4000 $\text{см}^2/\text{г}$. В качестве пластификатора в шликер добавляли по 10 мас. % каолина и глины, а также разжижающий электролит – кальцинированную соду и жидкое стекло. Воду вводили из расчета обеспечения влажности суспензии 29-32 мас. %. Шликер стабилен в щелочной области, рН составляет 10,4-10,6.

На основании результатов экспериментальной работы по формированию изделий при приложенном давлении от 1 до 7 атм и длительности выдержки от 0,5 до 4 ч был выбран оптимальный режим формирования – давление 5 атм, длительность выдержки 3 ч. Установлено, что величина давления влияет на скорость формирования, но не оказывает существенного влияния на свойства полученных изделий.

Структура образцов изделий наглядно представлена микрофотографиями (рис. 1), полученными на сканирующем электронном микроскопе. Заметно, что габитус волластонита сохраняется, это означает, что разрушения игольчатых частиц на всех технологических переделах не происходит (рис. 1а). Для сравнения показана микроструктура керамики, полученной классическим литьем в гипсовую форму (рис. 1б). Очевидно, что структуры идентичны.

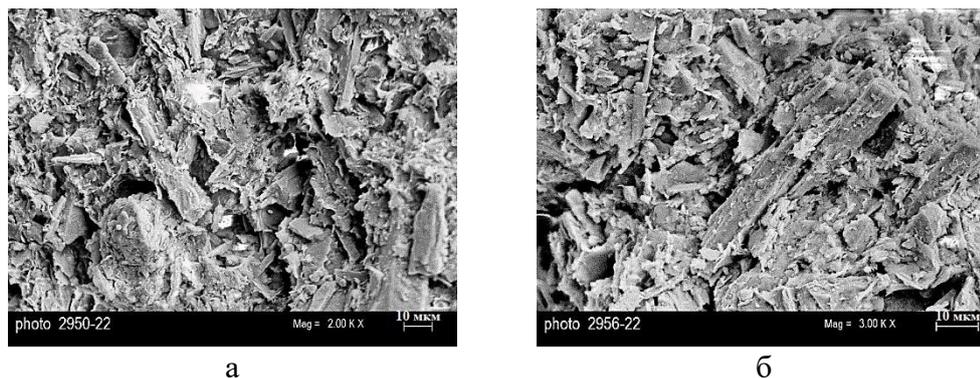


Рис. 1. Микроструктура керамического материала изделий, полученных методами:
а – литья под давлением в полимерную форму; б – литья в гипсовую форму

На установке Eprugear был выполнен рентгенофазовый анализ (РФА) поверхности изделия. Обнаружено, что основными кристаллическими фазами являются: волластонит (трикл.), волластонит (монокл.), α -кварц SiO_2 (гексаг.), а также сопутствующие фазы диоксида $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ (монокл.) и алюмината кальция CaAl_2O_4 (орторомб.). Фаза триклинного волластонита является основной, как и в порошке концентрата природного волластонита, являющегося основным компонентом формовочной массы.

Результаты эксперимента показали, что свойства материала изделий, полученных методом литья под давлением, сравнимы с данными для изделий, полученных классическим литьем (табл. 1), при этом длительность формирования сокращается практически в 100 раз. Изделия, полученные предложенным методом, отличаются отсутствием видимых дефектов и более равномерной структурой.

Таблица 1. Свойства волластонитовой керамики, полученной разными методами формирования

Параметр	Литье под давлением	Классическое литье
Плотность, г/см^3	1,70-1,73	1,59-1,62
Пористость, %	33,7-35,6	37,7-38,6
Предел прочности при сжатии, МПа	18-22	19-23
Термостойкость (число циклов 20-1000 °С)	18-23	17-21
Разноплотность, %	1	3
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,5-0,6	0,5-0,6
Длительность формирования, ч	1,5-4	120-170

В настоящее время на предприятии АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» активно ведется работа над оптимизацией способов получения волластонитовой керамики, что является важным направлением развития производства специальной фасонной керамики для алюминиевой промышленности.

Исследование закономерностей получения газоплотных твердых электролитов в системе ZrO_2 – Y_2O_3 – Sc_2O_3 для твердооксидных топливных элементов

Р.А. Пимкин^{1,2}, Е.А. Кораблева¹, Д.В. Харитонов^{1,2}

¹АО «ОНПП Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

²РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

В настоящее время встает острая потребность в автономных альтернативных источниках энергии. Одними из перспективных альтернативных источников электроэнергии являются твердооксидные топливные элементы, ТОТЭ, – это электрохимические устройства, в которых энергия топлива в результате химической реакции переходит в электрическую. По сравнению с обычными электромеханическими преобразователями они показывают гораздо более высокий КПД, который достигает 85%. Эффективность функционирования твердооксидного топливного элемента во многом зависит от свойств твердого электролита. Основным материалом для твердого электролита является диоксид циркония. В связи с тем, что диоксид циркония обладает свойством обратного полиморфизма, то для обеспечения устойчивости структуры его стабилизируют путем введения оксидов различных металлов.

Одними из основных материалов для твердых электролитов являются материалы из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (ZrO_2 – Y_2O_3). Эти материалы обладают структурой со стабильной кубической фазой диоксида циркония, однако для обеспечения достаточной проводимости для них необходима рабочая температура не менее 1000 °С, что сокращает срок службы ТОТЭ в связи с быстрым износом металлических интерконнекторов и других составных элементов ТОТЭ. В литературе есть сведения о том, что более высокий уровень ионной проводимости по сравнению ZrO_2 – Y_2O_3 имеют материалы, изготавливаемые из ZrO_2 – Sc_2O_3 , что позволяет, кроме того, снизить и рабочую температуру ТОТЭ. Однако в материалах ZrO_2 – Sc_2O_3 наблюдается нестабильность кубической фазы ZrO_2 , которая при температуре при 1000°С переходит в тетрагональную, что приводит к деградации свойств материала в процессе эксплуатации.

Целью данного исследования было определение физико-химических параметров синтеза порошков на основе ZrO_2 с комплексной стабилизирующей добавкой из оксидов иттрия и скандия, обладающих свойствами, необходимыми для спекания и создания плотной структуры и получения высоких значений ионной проводимости. Высокая ионная проводимость материалов обеспечивается введением Sc_2O_3 , а стабильность кубической фазы ZrO_2 при рабочих температурах обеспечивается введением Y_2O_3 .

Для получения плотной структуры твердого электролита на основе диоксида циркония в качестве исходного порошка перспективны порошки, получаемые методом химического осаждения из растворов соответствующих солей. Данный метод позволяет регулировать морфологические характеристики частиц на стадии осаждения и обеспечивает равномерность распределения вводимых добавок. Исходные порошки получали тремя способами. Количество компонентов при получении порошков каждым из трех способов было одинаковым.

В первом способе (ZrScY-1) состав осаждался из водных растворов солей циркония, иттрия и скандия. Во втором способе (ZrScY-2) нитрат скандия добавляли после сушки порошка, полученного химическим осаждением из раствора солей циркония и иттрия, в роторном испарителе. Затем полученную смесь, перетирали через капроновую сетку и сушили в сушильном шкафу.

В третьем способе (ZrScY-3) состав получали методом химического осаждения, при котором исходные соли не растворялись предварительно в воде, а были взяты в виде сухой смеси солей.

Механоактивацию полученных порошков проводили путем мокрого помола в бисерной мельнице при скорости вращения 5000 об/мин в течение 2 ч. Согласно результатам определения гранулометрического состава методом лазерной дифракции, размер агломератов в порошке состава ZrScY-3, заметно меньше, чем в порошках ZrScY-1 и ZrScY-2. Следовательно порошок данного состава имеет менее прочные и более пористые агломераты, которые легко разрушаются до 1-2 мкм при бисерном помоле. Образцы материалов получали пленочным литьем, и спекали при 1600-1700 °С в течение 2 ч на пористых подложках из оксида алюминия, имеющих открытую пористость 40%.

Определение ионной проводимости полученных образцов твердых электролитов при нагреве до 1000 °С проводили четырехзондовым методом. При температуре около 450 °С у образцов твердого электролита появлялась ионная проводимость, и при дальнейшем нагреве с шагом в 50 °С приборы фиксировали её значения.

На графике (рис. 1) представлены значения ионной проводимости образцов твердых электролитов при разных температурах.

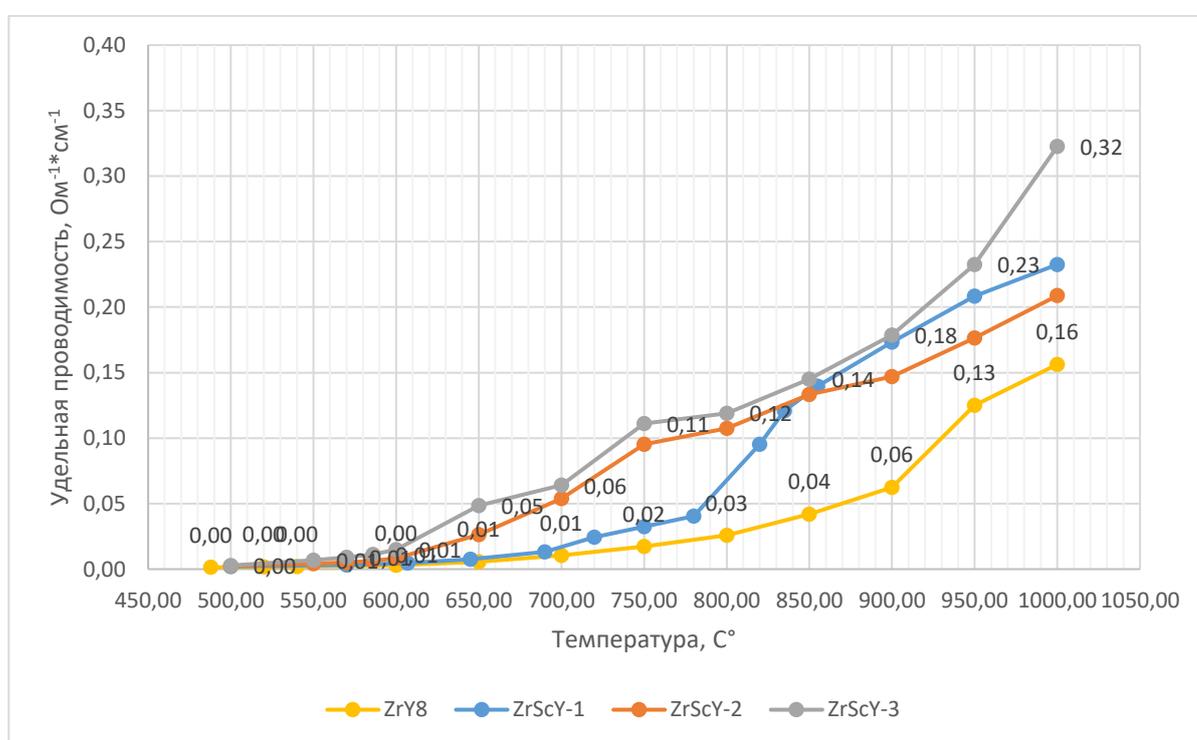


Рис. 1. Зависимость ионной проводимости образцов твердых электролитов от температуры

Во всем диапазоне температур материалы из диоксида циркония, стабилизированного $\text{Sc}_2\text{O}_3+\text{Y}_2\text{O}_3$, имеют более высокую ионную проводимость, чем материал из диоксида циркония, стабилизированного только оксидом иттрия ZrY8. В рассматриваемом диапазоне температур лучшие результаты отмечены у материала ZrScY-3, а при температуре 1000°С его ионная проводимость в 2 раза выше ионной проводимости ZrY8. Стабильность кубической фазы ZrO_2 у материала ZrScY-3 подтверждена результатами измерений фазового состава до и после длительного температурного воздействия в течение 96 ч при 1000° С. Таким образом, метод химического осаждения, при котором исходные соли предварительно не растворялись в воде и были взяты в виде сухой смеси солей, позволяет получать исходные порошки оптимального гранулометрического состава, необходимого для создания высокоплотного материала с высоким уровнем ионной проводимости и стабильной кубической фазой ZrO_2 .

Разработка головного радиопрозрачного обтекателя для высокоскоростного летательного аппарата

В.В. Антонов, С.Б. Воробьев, П.В. Коваленко, В.Г. Кулиш, С.И. Латыш, М.Е. Полетаев
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: vasyukovmv@technologiya.ru

Основной целью работы являлось создание конструкции головного радиопрозрачного обтекателя высокоскоростного летательного аппарата (ЛА).

Рост скоростей и длительности полета ЛА создает условия высокотемпературного аэродинамического воздействия на обтекатель, что приводит к нагреву находящейся под обтекателем антенного устройства (АУ) головки самонаведения (ГСН), превышающему допустимый для ее надежного функционирования уровень.

Также повышенный нагрев оболочки в зоне узла соединения обтекателя с соседним отсеком ЛА не позволяет использовать в конструкции наиболее оптимальный вариант непосредственного соединения керамической оболочки с металлическим стыковым шпангоутом с помощью термостойких адгезивов.

Нагрев элементов АУ ГСН сверх допустимого обусловлен переизлучением тепла от нагретой до высоких температур внутренней поверхности керамической оболочки в радиопрозрачной зоне. При автономных полетах ЛА в течение длительного времени (до 10-15 мин) с возрастанием нагрева наружной поверхности обтекателя на отдельных участках траектории до 1500-1700 °С при полуволновой толщине стенки керамической оболочки из материала НИАСИТ максимальная температура внутренней поверхности стенки может достигать 1000-1200 °С. При таком тепловом состоянии внутри оболочки температура в центре и на периферии зеркала антенны за счет переотражений тепла от внутренней поверхности стенки оболочки может достичь 400-450 °С, что неприемлемо для обеспечения надежной работы АУ ГСН. Кроме того, при непосредственном соединении оболочки и шпангоута температура в клеевом соединении также повышается до 450-500 °С и растягивающие напряжения в оболочке от распора шпангоутом, за счет значительной разницы ТКЛР их материалов, превышают предел прочности керамического материала.

Увеличение толщины оболочки обтекателя с целью уменьшения теплового воздействия на АУ приводит к снижению ее радиотехнических характеристик (РТХ) и, соответственно, к ухудшению работы ГСН.

Одним из способов дополнительной защиты АУ ГСН от теплового аэродинамического воздействия является применение под оболочкой обтекателя теплозащитного экрана (ТЗЭ). С целью минимального влияния экрана на прохождение электромагнитной волны его выполняют сферической формы с центром сферы, совпадающей с осью вращения АУ.

На первом этапе были проведены радиотехнические расчеты, в результате которых были определены оптимальные толщины керамической оболочки и находящегося под ней ТЗЭ. При этом наилучшими радиотехническими показателями в радиопрозрачной зоне являлся экран с трехслойной стенкой, где внешние слои выполнены из термостойкого стеклопластика на неорганическом связующем с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,0-3,5$, а внутренний слой из термостойкого материала с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1,2-1,4$ и коэффициентом теплопроводности $\lambda \leq 0,1$ Вт/м·К. Расчеты показали, что применение ТЗЭ под керамической оболочкой обеспечивает требуемые РТХ. При этом тепловое состояние указанной комбинации оболочки и ТЗЭ обеспечило требуемый уровень защиты от нагрева элементов АУ.

Следующим этапом проектирования было создание работоспособного узла соединения обтекателя к корпусу соседнего отсека ЛА. Классическая конструкция соединения керамической оболочки с металлическим шпангоутом из прецизионного сплава с минимальным температурным коэффициентом теплового расширения (ТКЛР) посредством традиционно используемого по данному назначению клея-герметика не обеспечивала

работоспособность как по температурным напряжениям в оболочке за счет распора шпангоута, так и по термостойкости клея-герметика.

Нами предложен узел соединения, содержащий между оболочкой и шпангоутом теплоизоляционное кольцо, выполненное как одно целое с экраном из материала его внешних слоев, и соединенное с керамической оболочкой и металлическим шпангоутом термостойким адгезивом.

В автономном полете ЛА в закрытой внутренней полости обтекателя, образованной экраном и внутренней поверхностью оболочки (над экраном), происходит увеличение давления за счет нагрева воздуха, что может приводить к потере устойчивости экрана и даже к катастрофическому разрушению обтекателя. Для решения данной задачи в вершине экрана была установлена втулка из термостойкого диэлектрического материала.

Общий вид конструкции разработанного обтекателя представлен на рисунке 1.

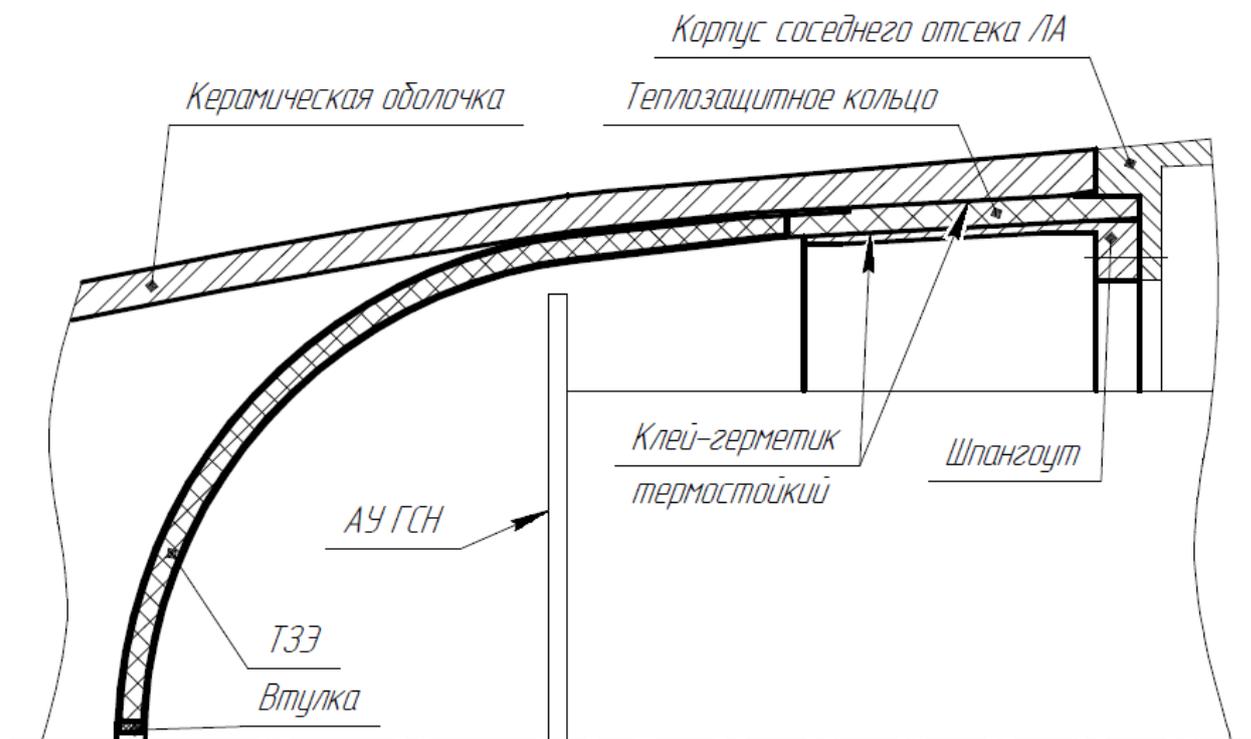


Рис. 1. Общий вид конструкции обтекателя высокоскоростного ЛА

Проведенным расчетом и экспериментально подтверждено, что применение трехслойного радиопрозрачного теплозащитного экрана в предлагаемой конструкции обтекателя позволяет уменьшить нагрев АУ ГСН на 300-350 °С, что допустимо для нормальной работы системы наведения, а теплоизоляционное кольцо в узле соединения позволяет снизить температуру металлического шпангоута на 200-250 °С, т.е. до приемлемого уровня возникающих от распора шпангоута напряжений в оболочке. При этом коэффициент пропускания электромагнитной энергии непосредственно через ТЗЭ в широкой полосе частот (до 1 ГГц) достигает 0,95-0,98, что, в целом, обеспечивает высокие радиотехнические характеристики антенного обтекателя в этом диапазоне.

Достигнутым результатом разработки явилось создание работоспособной конструкции антенного обтекателя высокоскоростного ЛА для условий повышенного нестационарного аэродинамического воздействия общей длительностью до 10 мин, а также создание во внутренней полости обтекателя необходимых температурных условий для обеспечения работоспособности АУ ГСН.

Технология спеченного карбида бора

Я.Г. Дятлова, Н.П. Булатова, А.И. Овсиенко, С.Ю. Бойков, В.И. Румянцев
ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: info@virial.ru

Материалы на основе карбида бора характеризуются выдающимися свойствами: твердостью по Виккерсу 3770 кг/мм², температурой плавления 2427 °С, низкой плотностью 2,52 г/см³, высоким модулем упругости 450 ГПа, высокой химической стойкостью, большим сечением поглощения нейтронов, высокой стойкостью к ударным нагрузкам и износу.

Высокий уровень свойств карбида бора обеспечивает керамике на его основе обширный список областей применения: использование в легкой натальной брони, поглотителях нейтронов, а также износостойких изделиях.

Спекание карбида бора является сложной задачей по причине низкого коэффициента самодиффузии, прочных высококовалентных связей В–С (доля ковалентных связей в В₄С – 93,94%), высокой стойкости к зернограничному скольжению, высокой температуры плавления, отсутствию пластичности.

Распространенными способами получения керамики на основе карбида бора являются:

- горячее прессование, однако этот способ является низкопроизводительным, дорогостоящим, не позволяющим получать изделия сложной формы,
- реакционное спекание, в результате которого в материале формируются сопутствующие фазы, ухудшающие свойства материала.

Целью данной работы является получение керамики на основе карбида бора спеканием без давления.

В качестве исходных порошков карбида бора (В₄С) использовали измельченный порошок фракции М3 и активирующую спекание добавку – технический углерод. Формование заготовок осуществляли одноосным прессованием на автоматическом гидравлическом прессе, спекание проводили в вакуумной печи при температуре 2100-2200 °С в атмосфере аргона. На образцах из спеченного материала определяли кажущуюся плотность методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 20018-74), твердость и трещиностойкость индентационным методом (ИСО 14705), предел прочности при поперечном изгибе по трем точкам (ГОСТ 20019-74), модуль упругости (Юнга) с помощью звукового резонанса (ИСО 17561), микроструктуру материала исследовали с помощью оптической микроскопии.

В таблице 1 и на рисунке 1 представлены результаты аттестации физико-механических свойств и микроструктуры спеченного карбида бора в сравнении с образцами горячепрессованного (ТУ 3988-033-2304-2805-2013) и реакционноспеченного (ТУ 3988-034-23042805-2013) карбида бора.

Таблица 1. Результат аттестации спеченного, горячепрессованного и реакционноспеченного карбида бора

Материал	Спеченный карбид бора (SBC)	Горячепрессованный карбид бора (HPBC)	Реакционноспеченный карбид бора (SBBC)
Плотность, г/см ³	2,30-2,42	2,50-2,55	2,55-2,70
Прочность при изгибе, МПа	200-220	390-450	250-280
Модуль Юнга, ГПа	350-390	430-480	400
Твердость (по Виккерсу), ГПа	30-32	35-38	25-30
Трещиностойкость, МПа·м ^{1/2}	3,0-3,5	2-3	3,5-4,5

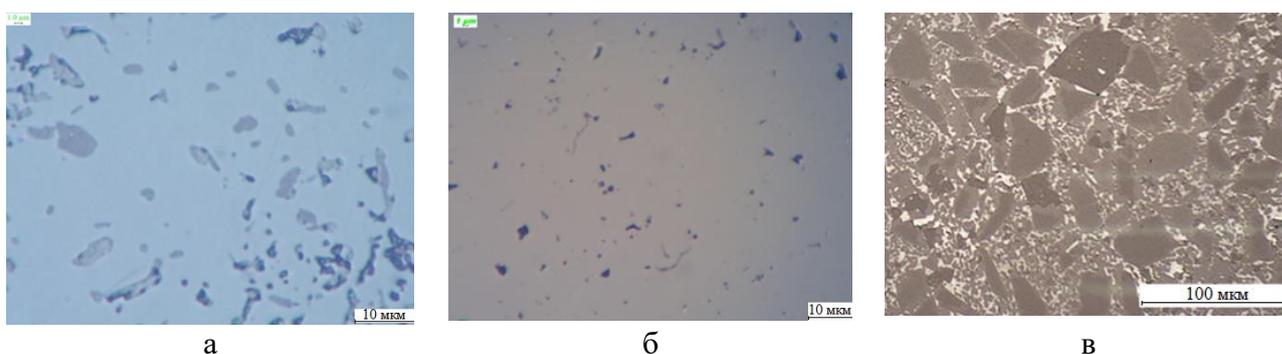


Рис. 1. Микроструктура карбида бора:
а – спеченного; б – горячепрессованного; в – реакционноспеченного

При горячем прессовании карбида бора на исходный порошок одновременно воздействует высокая температура и давление, позволяющие получить материал с высокой плотностью. При реакционном спекании уплотнение и структурообразование происходит при значительно более низких температурах (1450-1550 °С) за счет химических реакций с расплавом кремния, направленных на образование вторичных фаз. Свободное спекание реализовывали при температуре, не сильно превышающей температуру горячего прессования (2100-2200 °С), но за счет достижения равномерного распределения активирующей добавки – высокодисперсного углерода с развитой поверхностью для активации спекания частиц карбида бора – в результате реакции восстановления и удаления оксидной пленки с поверхности частиц удалось получить материал с высокой плотностью и физико-механическими свойствами, практически не уступающими горячепрессованному и реакционноспеченному материалу. Такой способ спекания материала позволяет получать изделия более сложной формы, чем при горячем прессовании, а также обеспечивает большую производительность и более низкую плотность материала в отличие от реакционноспеченного благодаря отсутствию посторонних фаз.

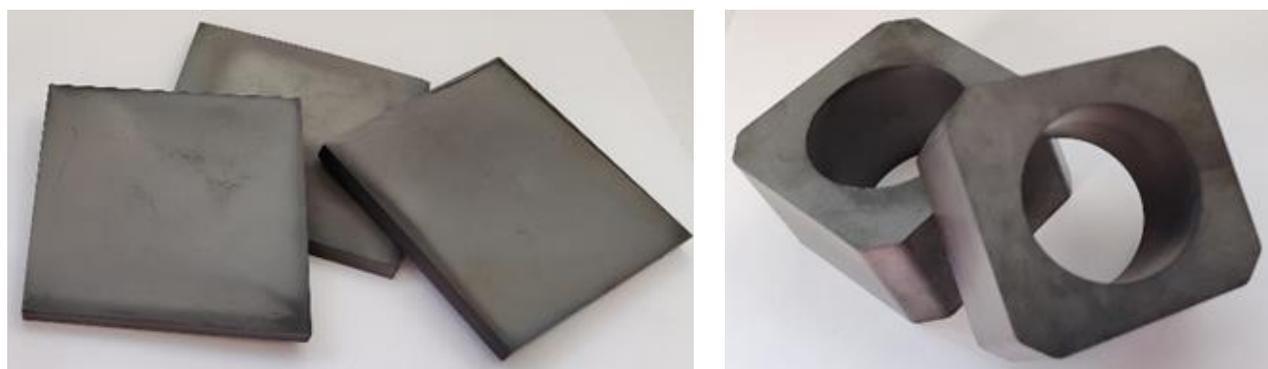


Рис. 2. Изделия, полученные свободным спеканием карбида бора

На основании результатов проведенных исследований разработана технология свободного спекания карбида бора, позволяющая изготавливать сложнопрофильные изделия. Полученный уровень физико-механических свойств керамики на основе свободно спеченного карбида бора сопоставим с уровнем свойств керамики, полученной горячим прессованием и реакционным спеканием.

Анализ стабильности технологического процесса производства изделий из керамических материалов с помощью контрольных карт альтернативного вида

А.А. Рамазанова, В.В. Кирюшина

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Технологический процесс (ТП) представляет собой последовательность связанных операций, направленных на достижение конечного результата – создание продукции заданного качества. Любой ТП, в том числе и ТП производства изделий из керамических материалов, сопровождается технологическими потерями (браком), которые выявляются различными методами неразрушающего контроля. Причинами технологических потерь могут быть некачественное исходное сырье, износ технологического оборудования, несоблюдение требований технологической документации, человеческий фактор и прочее.

Количество (доля) технологических потерь является важным индикатором состояния ТП, определяющим его стабильность. Нарушение стабильности ТП сопровождается увеличением доли некондиционной продукции и ведет к дополнительным материальным и временным затратам, а также существенным финансовым убыткам. Поэтому весьма важно и актуально иметь доступный инструмент для управления ТП, вовремя сигнализировать о нарушении стабильности ТП, обоснованно планировать мероприятия, направленные на улучшение качественных показателей.

Данная работа является частью проводимых в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» исследований по разработке методики выявления закономерностей появления брака и нарушения стабильности ТП производства изделий из керамических материалов с применением статистических средств. В качестве инструмента контроля ТП рассмотрены контрольные карты Шухарта.

Ранее специалистами АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» уже прорабатывался вопрос применения контрольных карт для анализа брака. Был проведен анализ и исследование возможности применения карт средних значений и размахов (\bar{X} и R -карты), основанных на нормальном законе распределения коэффициента запуска. Однако такой подход не вполне корректен на малых временных отрезках наблюдения за ТП (за счет специфики расчета коэффициента запуска).

В данном исследовании показателем, характеризующим качество ТП, было выбрано количество забракованных изделий в последовательно идущих выборках, что привело к использованию карт по альтернативному признаку.

Апробация выбранного статистического инструмента проведена на примере анализа стабильности серийного ТП производства изделия из кварцевой керамики за 2023 год. Информация о технологических потерях взята из «цифрового двойника» ТП, который позволяет отслеживать ход и состояние каждого изделия на каждой технологической операции. Рассмотрена как общая выборка изделий, изготовленных за год, так и выборки по производственным участкам.

Контрольные карты альтернативного вида имеют несколько разновидностей. Для правильного выбора карты был проведен анализ распределения брака в последовательных выборках разного размера. Установлено, что распределение количества брака в выборках относится к распределению редких событий и не противоречит распределению Пуассона с интенсивностью $\lambda = 3,33$ (рис. 1).

Для построения была выбрана C -карта, в основе которой лежит распределение Пуассона и постоянство объема контролируемых изделий. Применение C -карты оправдано в ситуациях, когда несоответствия (брак) разбросаны по непрерывному потоку продукции и явно выражена средняя доля, а также в случаях, когда несоответствия появляются за счет многих потенциальных причин и могут быть обнаружены в одной контролируемой единице.

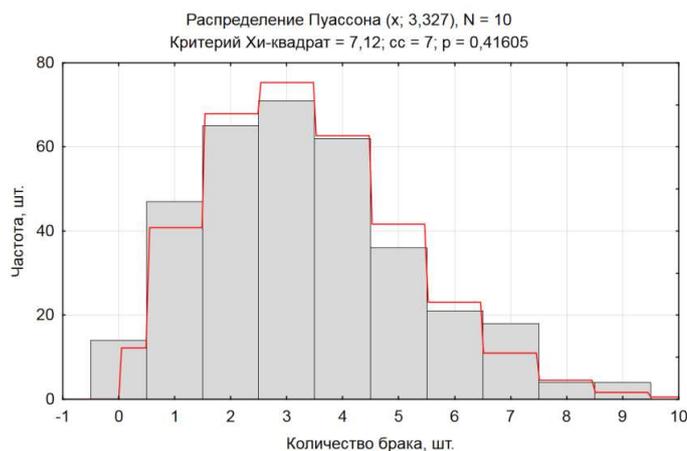


Рис. 1. Распределение количества брака в выборках размером 10 изделий

Первоначально С-карта была построена за два месяца изготовления изделий. Оценен средний уровень брака, который, исходя из технологических и экономических соображений, оказался вполне приемлемым. Критерии серий, которые в свою очередь были адаптированы под рассматриваемый ТП производства, показали отсутствие особых причин нарушения стабильности. На основе среднего значения процесса рассчитана и зафиксирована для дальнейшего контроля верхняя контрольная граница (ВКГ). Нижняя контрольная граница (НКГ) принята равной нулю, поскольку интерес представляло только превышение числа забракованных изделий в выборке.

Далее была построена С-карта за весь период (рис. 2). Выявлены периоды нарушения стабильного состояния ТП, что на графике отмечено точками, выходящими за ВКГ. Отмечено, что начало 2023 года характеризуется стабильным уровнем технологических потерь рассматриваемого изделия. Первоначально, нарушение стабильности ТП наблюдалось во второй декаде мая, затем в первых и последних числах июля. После этого появление периодов нарушения стабильности ТП участилось. Проведен анализ их количества и причин, которые могли инициировать повышение брака, рассмотрены сопутствующие этому производственные ситуации. Построение С-карт по производственным участкам позволило выявить операции, на которых намечилось возрастание количества брака.

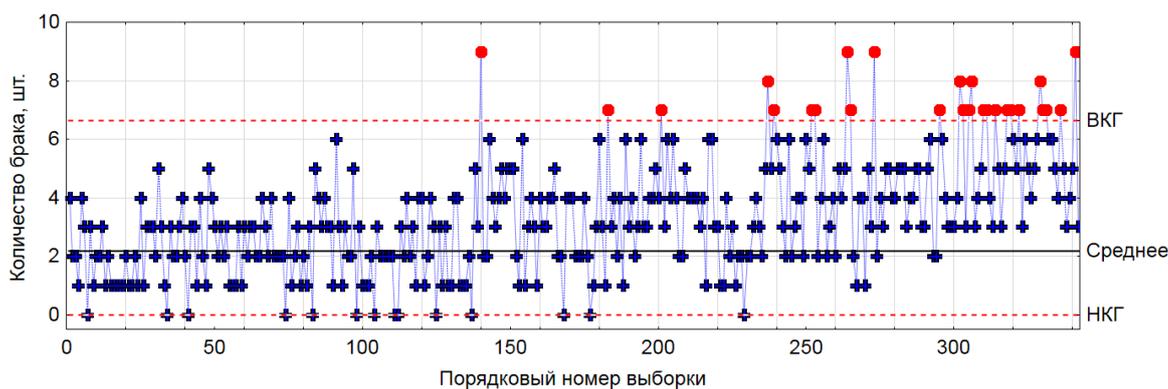


Рис. 2. Контрольная карта С-вида по количеству брака

Выводы относительно стабильности ТП, сделанные на основе контрольных карт, построенных по имеющимся производственным данным за 2023 год, не противоречат результатам технологических исследований, проведенных на производстве.

В качестве дальнейших работ по данному направлению планируется рассмотреть возможность применения контрольных карт альтернативного вида для анализа стабильности ТП в режиме реального времени.

Керамика из трикальцийфосфатов, допированных марганцем и стронцием

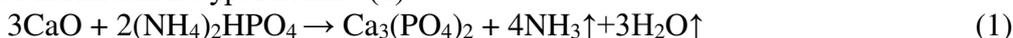
А.П. Рыжов¹, И.В. Фадеева², А.В. Кнотько¹, Н.А. Андреева², И.И. Селезнева³

¹МГУ им. Ломоносова, г. Москва, Россия; ²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия; ³Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН (ИТЭБ РАН), г. Пущино, Россия

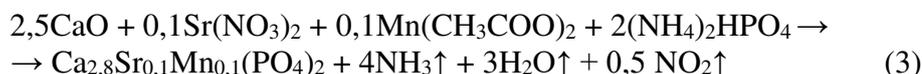
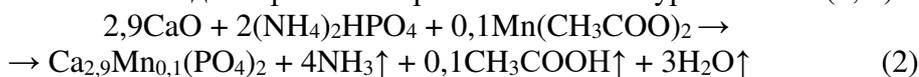
E-mail: r_alex94@mail.ru

Керамика из трикальцийфосфата (ТКФ, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) в последние годы активно используется в медицине для замещения дефектов костной ткани, возникающих в результате травм или обширных хирургических вмешательств. Это связано с тем, что ТКФ имеет химическое и фазовое сходство с минеральным составом человеческой кости. Одним из частых осложнений во время операций и в послеоперационном периоде является госпитальная инфекция, вызванная различными бактериями. Госпитальная инфекция приводит к увеличению сроков лечения и часто требует проведения повторных операций. Для борьбы с госпитальными инфекциями традиционно применяются антибиотики, однако в современную эпоху проблема антибиотикорезистентности становится все более актуальной. Данное исследование направлено на разработку способа обеспечения антибактериальной активности керамических материалов путем допирования ТКФ ионами марганца и стронция, обладающими антибактериальной активностью.

ТКФ синтезировали с использованием механоактивации. Количества исходных реагентов рассчитывали по уравнению (1):



ТКФ, допированный марганцем и стронцием, также синтезировали с использованием механоактивации. Содержание марганца и стронция составляло 1,71 мас. % и 1,75 мас. %, соответственно. Количества исходных реагентов рассчитывали по уравнениям (2, 3):



Активацию исходных реагентов осуществляли в планетарной мельнице при скорости оборотов 300 мин^{-1} в течение 30 мин, после чего добавляли в барабаны по 200 мл дистиллированной воды. Перемешивание с такой же скоростью продолжали в течение получаса, затем сформировавшийся продукт отфильтровывали на воронке Бюхнера и сушили в сушильном шкафу при $110 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 12-14 ч. Для формирования требуемой структуры витлокита осадок прокаливали при $900 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч.

Элементный анализ проводили с использованием атомно-абсорбционного спектрометра Perkin Elmer 2100 (Perkin Elmer, США). Согласно полученным данным, содержание марганца и стронция составляло 1,68 и 2,72 мас. %, соответственно, что согласуется с данными, рассчитанными для формулы $\text{Ca}_{2,8}\text{Sr}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}(\text{PO}_4)_2$

Из синтезированных порошков формовали диски диаметром 5 мм путем двухстороннего одноосного прессования при общем давлении прессования 800 кгс. Обжиг сформованных образцов проводили в камерной печи с силитовыми нагревателями при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч.

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов проводили с помощью дифрактометра с вращающимся анодом Rigaku D/MAX-2500 (Япония) в режиме «на отражение» с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Согласно данным РФА, образцы керамики являлись однофазными со структурой витлокита.

ИК-спектры синтезированных соединений регистрировали с помощью ИК-Фурье спектрометра Nicolet Avatar-330 (ThermoFisher Scientific, США), диапазон съёмки 4000-

400 см⁻¹, с разрешением 0,9 см⁻¹. В ИК-спектрах обнаруживаются полосы, относящиеся к колебаниям PO₄⁻³, H₂O. Вид ИК-спектров характерен для ТКФ.

Микроструктура керамики после обжига при 1150 °С (рис. 1) неоднородная: присутствуют зерна размером от 2 до 8 мкм.

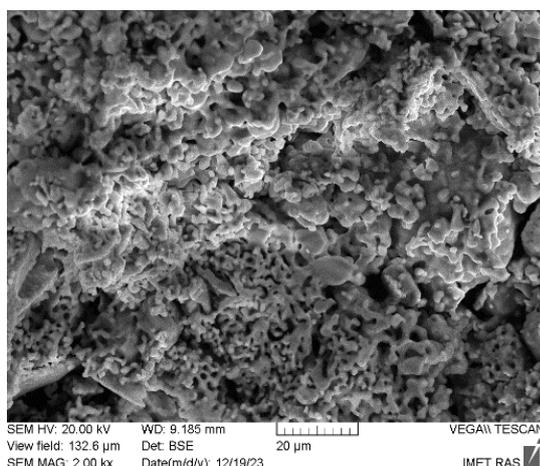


Рис. 1. Микроструктура керамики из Ca_{2,8}Mn_{0,1}Sr_{0,1}(PO₄)₂

Клетки пульпы зуба человека (DPSC) выделяли из зачатка третьего моляра, извлеченного по ортодонтическим показаниям по методике, описанной ранее [Mesenchymal stem cells from human dental pulp: isolation, characteristics, and potencies of targeted differentiation Poltavtseva R.A., Pavlovich S.V., Klimantsev I.V., Tyutyunnik N.V., Grebennik T.K., Nikolaeva A.V., Sukhikh G.T., Nikonova Y.A., Selezneva I.I., Yaroslavtseva A.K., Stepanenko V.N., Esipov R.S. Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2014. Т. 158. № 1. С. 164-169]. Для проведения исследований использовали клетки на 3-4 пассаже.

Для изучения адгезивных характеристик материалов и определения их способности поддерживать пролиферативную активность клеток проводили посев DPSC на поверхность исследуемых материалов в концентрации 40 тыс.кл/см² (среда DMEM/F12 + 10% FBS). В качестве контрольных образцов использовались посеы на покровных стеклах. После окончания культивирования на 1, 3 и 7 сут проводили оценку морфологии и жизнеспособности клеток, культивируемых на поверхности исследуемых материалов с использованием флуоресцентного микроскопа Axiovert 200. Для проведения анализа использовали метод флуоресцентного окрашивания клеток препаратом SYTO 9 и иодидом пропидия.

Поведение керамики в модельных жидкостях изучали в физиологическом растворе с ТРИС-буфером при pH 7,4 и температуре 37 °С. О растворимости керамик судили по изменению концентрации ионов кальция в растворе. Согласно полученным данным, через 28 сут с начала эксперимента концентрация ионов кальция перестает изменяться, что свидетельствует об установлении динамического равновесия между ионами кальция, перешедшими в раствор из керамики и ионами кальция, удалившимися из раствора ввиду образования биологического апатита.

По результатам всех проведенных исследований, полученные керамические материалы могут быть рекомендованы к использованию в медицине после дополнительных испытаний *in vivo* на лабораторных животных.

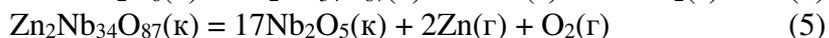
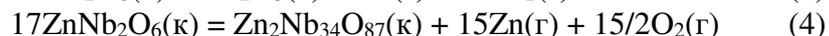
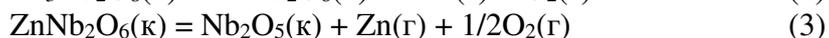
Синтез и изучение керамики проводились при финансовой поддержке Министерства науки и образования, грант № 075-00320-24-00. Биологические исследования проводились по Госзаданию № 075-00224-24-01.

Высокотемпературное масс-спектральное исследование термодинамики парообразования системы ZnO–Nb₂O₅

А.С. Смирнов, Н.А. Грибченкова, К.Г. Сморгачев, А.С. Алиханян
Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (ИОНХ РАН),
г. Москва, Россия
E-mail: smirnovas@igic.ras.ru

Получение и эксплуатация керамических материалов часто связана с высокими температурами, при которых возможны процессы сублимации компонентов материала, что приводит к изменению его состава и свойств. Исследования фазовых и химических равновесий при высоких температурах позволяют определять границы эксплуатации и осуществлять поиск оптимальных условий синтеза разрабатываемых керамических материалов. Метод высокотемпературной масс-спектрометрии является наиболее информативным методом физико-химического анализа, дающим возможность исследовать фазовые превращения и химические реакции с участием газовой фазы. Высокотемпературная масс-спектрометрия сочетает эффузионный метод Кнудсена и масс-спектральный анализ газовой фазы и предоставляет сведения о термодинамике парообразования индивидуальных соединений и систем, включающие состав насыщенного пара, парциальные давления компонентов газовой фазы, активности компонентов конденсированной фазы, стандартные энергии Гиббса и энтальпии реакций и стандартные энтальпии образования соединений.

В нашей лаборатории впервые выполнены исследования процессов парообразования квази-бинарной системы ZnO–Nb₂O₅. Эксперименты по испарению проводились на высокотемпературном масс-спектрометре МС-1301 с использованием кварцевых камер Кнудсена в диапазоне температур 1223–1465 К. Образцы ряда составов в данной системе были получены методом твердофазного синтеза при температуре 1173 К на воздухе. По данным рентгенофазового анализа в системе существуют два низкотемпературных смешанных оксида ZnNb₂O₆ и Zn₃Nb₂O₈ и высокотемпературный оксид Zn₂Nb₃₄O₈₇, который ниже 1358 К не устойчив, области твердых растворов в квази-бинарной системе не обнаружены. В результате изотермических экспериментов установлено, что парообразование во всём диапазоне составов происходит инконгруэнтно, при этом газовая фаза представлена только продуктами сублимации ZnO, что приводит к обогащению конденсированной фазы нелетучим компонентом и перемещению фигуративной точки в фазовом пространстве в сторону Nb₂O₅. На основе зарегистрированных масс-спектров были рассчитаны парциальные давления Zn и O₂, найдены активности компонентов конденсированной фазы. Стандартные энтальпии гетерофазных реакций (1-5) определены по «второму и третьему законам термодинамики», вычислены стандартные энтальпии образования ниобатов цинка: $\Delta_f H^\circ_{298}$ (ZnNb₂O₆, к) = $-2292,4 \pm 19,9$ кДж/моль, $\Delta_f H^\circ_{298}$ (Zn₃Nb₂O₈, к) = $-2992,0 \pm 30,2$ кДж/моль, $\Delta_f H^\circ_{298}$ (Zn₂Nb₃₄O₈₇, к) = $-33056,1 \pm 15,0$ кДж/моль. В качестве графической интерпретации процессов парообразования построено принципиальное *p*-*x*-сечение фазовой диаграммы системы ZnO–Nb₂O₅ при T = 1353 К и 1443 К.



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 21-13-00086. Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

Исследования по разработке горячепрессованного материала на основе нитрида бора

Е.И. Соломатина¹, Н.А. Голубева¹, Н.С. Лазарев¹, М.Г. Лисаченко¹, Л.А. Плясункова¹,
А.С. Нечепуренко²

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

²АО «УНИХИМ с ОЗ», г. Екатеринбург, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Гексагональный нитрид бора (BN) обладает ценным набором свойств, таких как стойкость к термоудару, высокое электросопротивление (10^{12} - 10^{14} Ом·см), нетоксичность, обрабатываемость стальными режущими инструментами, химическая инертность к большинству химических соединений, несмачиваемость расплавами металлов, солей и стекол.

Однако получение керамики из нитрида бора представляет собой нетривиальную задачу. Сочетание свойств нитрида бора, таких как химическая инертность и высокая температура плавления, создает большие сложности в технологии изготовления изделий на его основе.

Для получения керамики на основе BN применяются спекающие добавки в виде оксидов, боридов и карбидов. Они существенно снижают высокотемпературную прочность, термостойкость и диэлектрические свойства керамики. Без применения спекающих добавок керамику из нитрида бора можно получить только из активных к спеканию низкотемпературных порошков разупорядоченной турбостратной структуры.

В рамках данной работы были проведены исследования по разработке керамического материала на основе нитрида бора из порошков турбостратной структуры, получаемого методом горячего прессования. Изучено влияние параметров прессования и содержания спекающей добавки (оксида бора) на физико-механические и теплофизические характеристики материала в широком диапазоне температур.

В качестве исходного сырья использовали порошки нитрида бора турбостратного ТУ 20.13.64-022-49534204-2018, производства АО «УНИХИМ с ОЗ», с индексом графитации не более 20 с содержанием B_2O_3 в количестве 0,1, 0,3, 0,6 и 2,6 мас. %.

В процессе отработки параметров горячего прессования установлено, что физико-механические характеристики образцов, полученные при одинаковых параметрах, возрастают с увеличением содержания оксида бора от 0,1 до 2,6 мас. % в исходных порошках. Увеличение содержания B_2O_3 в исходных порошках позволяет увеличивать давление прессования и получать заготовки изделий с более высокой плотностью.

С повышением температуры горячего прессования от 1800 до 2000 °С существенно облегчается переход турбостратной структуры в гексагональную, сокращается длительность режима и происходит удаление свободного оксида бора.

На основании многочисленных экспериментальных данных были определены оптимальные параметры горячего прессования: температура прессования – 2000 °С, выдержка при конечной температуре 30 мин, давление прессования 50-80 кгс/см² для турбостратных порошков с содержанием B_2O_3 от 0,1 до 2,6 мас. %.

Установлено, что все физико-механические свойства горячепрессованного нитрида бора зависят от химической чистоты исходного порошка. Исследование влияния количества оксида бора на механическую прочность горячепрессованной керамики из нитрида бора показало, что прочность образцов при 20 °С увеличивается на 70% с ростом содержания оксида бора с 0,1 до 2,6 мас. %. Однако, чем больше в материале содержание B_2O_3 , тем больше деградирует высокотемпературная прочность образцов (рис. 1).

При исследовании теплофизических свойств было установлено, что с увеличением содержания оксида бора в горячепрессованном нитриде бора от 0,1 до 2,6 мас. % коэффициент теплопроводности снижается почти в 3 раза.

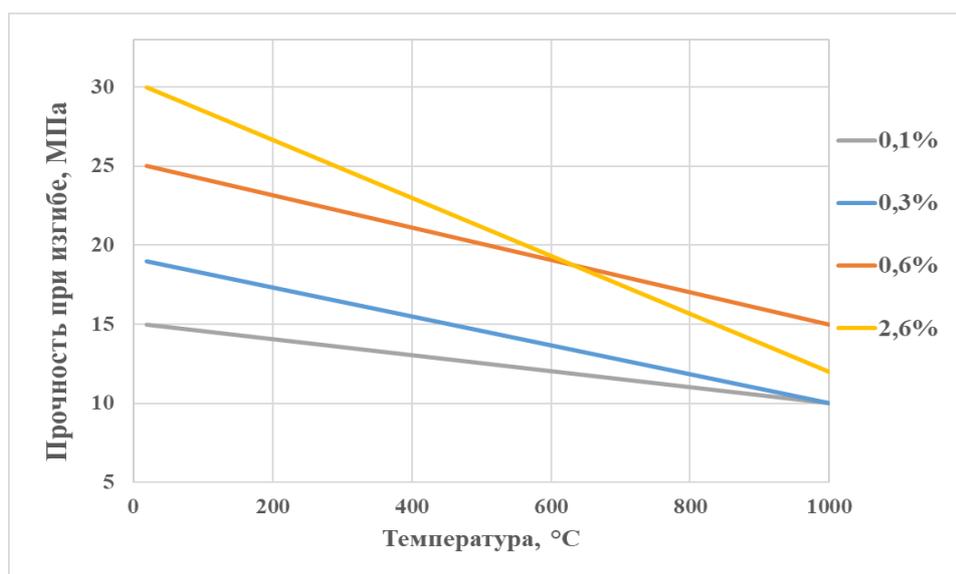


Рис. 1. Температурная зависимость прочности при изгибе горячепрессованного BN с различным содержанием B_2O_3

Следует отметить, что важной особенностью горячепрессованных материалов, является анизотропия свойств в направлениях перпендикулярном и параллельном оси прессования. Это является следствием частичной ориентации тонких пластинчатых частиц нитрида бора в процессе горячего прессования. Анализ физико-механических свойств показывает, что прочность материала в зависимости от направления оси прессования отличается почти 2 раза.

В горячепрессованных материалах наблюдается также и анизотропия теплопроводности и ТКЛР. Горячепрессованный нитрид бора в плоскости, перпендикулярной оси прессования, имеет отрицательные значения ТКЛР, который в интервале температур от 100 до 1000 °C возрастает от -14 до $-3 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, соответственно. Параллельно оси прессования значения ТКЛР для BN находятся в диапазоне от 0 до $7 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

Проведенные исследования показали, что содержание B_2O_3 в исходном порошке определяет физико-механические характеристики горячепрессованного материала. Поэтому возможно получение целого спектра марок горячепрессованной керамики на основе нитрида бора с различными физико-механическими свойствами, для различных условий её эксплуатации. Внешний вид изделий из горячепрессованного нитрида бора представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Внешний вид заготовок и изделий из BN

Ударноволновое нагружение в производстве комплектующих магнетронных распылительных систем

Л.В. Судник¹, А.Р. Лученок¹, А.Ф. Ильюшенко¹, Н.В. Гапоненко², А.В. Семченко³
¹НИИ импульсных процессов с опытным производством НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь; ²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь; ³ГГУ им. Франциска Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь
E-mail: lsudnik@tut.by

Методы вакуумного распыления находят широкое применение для нанесения функциональных покрытий в различных отраслях промышленности. В качестве источника распыления используют одно- и многокомпонентные мишени (катоды), которые должны иметь заданный состав, высокую плотность, химическую чистоту и однородную структуру.

Одной из важнейших проблем остается задача получения высокоплотных композиционных мишеней для вакуумного распыления с однородной структурой и равномерным объемным распределением компонентов.

Основными технологическими приемами при изготовлении мишеней для вакуумного распыления являются литье и методы порошковой металлургии, заключающиеся в прессовании и спекании порошков.

Целью исследований являлось установление эффективности использования ударноволнового нагружения для формирования мишеней с прогнозируемыми свойствами.

Перспективным способом получения изделий из порошковых материалов является взрывное прессование. Взрывные технологии основаны на физико-химических и физико-механических процессах, протекающих в веществе под действием ударных волн. Ударные волны генерируются либо при детонации конденсированного взрывчатого вещества, находящегося в контакте с исходным материалом, либо при столкновении с ним ударника, разгоняемого до высоких скоростей продуктами детонации. В материалах при этом развивается высокое давление (порядка 10 ГПа), многократно превышающее их динамические пределы текучести, которое распространяется по веществу с высокой скоростью (скорость нагружения 200-800 м/с и выше). Вследствие малой длительности процесса (порядка 10^{-6} с) и тепловой инерции вещества, его нагрев, обусловленный сжатием и внутренним трением, как правило, мало влияет на поведение вещества в этих условиях.

В связи с плоской формой большинства мишеней в работе использованы схемы плоского прессования с линейным фронтом детонации. В качестве исходных материалов для проведения исследований выбраны наноструктурированные порошки оксида титана TiO_2 , оксида цинка ZnO , легированного оксидом алюминия Al_2O_3 , и порошок вольфрама.

Ударно-волновая обработка порошков осуществлялась с использованием известных схем и методов импульсного прессования. В качестве взрывчатых веществ (ВВ) использовалось аммиачно-селитренное ВВ аммонит № 6ЖВ со скоростью детонации около 4000 м/с.

Как правило, в процессе ударноволновой обработки образуются плотные прессовки из обрабатываемого порошка. В ряде случаев возникала необходимость размола спрессованных порошков и повторного компактирования. Для облегчения размола активированных порошковых материалов в исходную порошковую шихту вводили 4-6 об. % органического растворителя (бензин «Калоша»).

В результате импульсного нагружения порошка оксида цинка, легированного 5% оксида алюминия, и порошка вольфрама, увлажненного 4-6 об. % бензина «Калоша», получены прессовки с многочисленными расслойными и поперечными трещинами, упрощающими процесс размола. Причем в активированном материале увеличиваются значения микронапряжений от 0,08 до 0,31%, снижается размер кристаллов оксида цинка

от 32,9 до 26,9 нм. Размер кристаллов оксида алюминия изменяется от 1,3 до 5,5 нм. При этом фазовый состав не изменяется, а параметры ячейки изменяются незначительно. При повышении влажности смеси более 8 об. % из-за сильного увеличения импульсного давления происходило разрушение оснастки (контейнера) и потеря активированного материала.

Большое количество переменных, используемых в реальных процессах прессования (вид ВВ, высота заряда, толщина пуансона и основания, забойка заряда ВВ) значительно затрудняют расчет параметров амплитуды и длительности ударноволнового воздействия.

Для оценки энергосиловых параметров импульсного нагружения использована безразмерная величина r , характеризующая относительную величину ударноволнового воздействия на вещество.

$$r = \frac{\rho_{ВВ} \cdot H_{ВВ}}{\rho_{пор} \cdot H_{пор}}, \quad (1)$$

где: r – сила ударной волны;

$\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ, г/см³;

$\rho_{пор}$ – плотность порошкового тела, г/см³;

$H_{ВВ}$ – высота заряда ВВ, мм;

$H_{пор}$ – высота порошка, мм.

Для контроля влияния предварительной ударноволновой обработки на свойства порошков проведено сравнение спекаемости прессовок из исходного порошка вольфрама, порошка оксида цинка и порошка вольфрама после импульсной активации при различной силе ударноволнового воздействия $r = 0,5-3$.

Показано, что после взрывной обработки повышается удельная поверхность порошка вольфрама, насыпная масса, масса утряски, дефектность структуры.

Для порошка оксида титана TiO_2 увеличиваются значения микронапряжений от 0 до 0,16%, уменьшается размер кристаллов от 32 до 25,6 нм. При неизменном содержании фазы TiO_2 параметр ячейки изменяется незначительно.

Максимальные изменения плотности прессовок во время вакуумного спекания наблюдаются в области значений безразмерного параметра $r = 0,5-1$. Получены однородные качественные мишени для вакуумного распыления. Относительная плотность мишеней достигает значений 85%. Увеличение безразмерного параметра r до 2-3 приводит к снижению плотности спеченных прессовок до 84-85% при плотности неактивированных прессовок 83%.

Снижение плотности спеченных прессовок можно объяснить перегревом и окислением исходного порошка вольфрама в процессе ударноволновой активации при увеличении безразмерного параметра r до 2-3. Поэтому оптимальные значения интенсивности ударноволновой активации ограничиваются значениями $r = 0,5-1$.

За счет ударноволновой обработки оказалось реальным заметно изменить дефектное состояние порошков, что наряду с их измельчением способствовало снижению температуры спекания, а также повышению структурного совершенства изготовленных изделий. Кроме того, ударноволновая обработка наноструктурированных порошков позволяет значительно улучшить технологические свойства исходных порошков. Значительно повышается их насыпная масса и масса утряски. Это позволяет существенно сократить энергозатраты, обеспечить надежность работы термического оборудования за счет снижения температуры спекания на 200 °С и более, и тем самым значительно удешевить процесс создания рассматриваемых объектов. Положительный эффект ударноволновой активации порошков является следствием развиваемого высокого уровня локальных механических напряжений и температур в частицах порошка, что, несмотря на кратковременность процесса, вызывает резкую интенсификацию межчастичных взаимодействий. Последнее, в свою очередь, приводит к накоплению различного рода дефектов и повышению термодинамической активности.

Исследование влияния механической обработки на физико-механические свойства керамики на основе диоксида циркония

И.Ю. Тимохин^{1,2}, Е.А. Кораблева¹, Д.В. Харитонов^{1,3}

¹АО «ОНПП Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия, ³РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Керамика на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидами иттрия или магния, представляет интерес в качестве конструкционного материала, обладающего высокими термомеханическими свойствами, такими как, прочность при изгибе, вязкость разрушения и возможность выдерживать термоудар при воздействии расплавленных металлов. Кроме того, она обладает природной особенностью – существованием в трех кристаллических формах: моноклинной, тетрагональной и кубической. При определенных условиях диоксид циркония может переходить из одной кристаллической структуры в другую, что приводит к изменению физико-механических свойств. Достижение высоких значений физико-механических свойств керамики возможно при условии получения плотности материала близкой к теоретической и отсутствии пористости, которые зависят от всех этапов технологии – подготовки исходного порошка, способа компактирования и режимов спекания, способа и режимов механической обработки.

Целью исследования было изучение влияния режимов алмазного шлифования, как метода механической обработки, на структуру и термомеханические свойства керамики на основе диоксида циркония на примере системы $ZrO_2 - 6$ моль % MgO .

Наноразмерные порошки состава $ZrO_2 - 6$ моль % MgO получали методом химического соосаждения из растворов хлористых солей циркония и магния. Проведены фазовый и электронно-микроскопический анализы частиц и агломератов наночастиц порошка. В качестве метода компактирования образцов выбран способ холодного изостатического прессования при максимальных давлениях $P_{1max} = 55$ МПа и $P_{2max} = 200$ МПа с последующим спеканием при температуре 1700 °С в течение 4 ч.

В данной работе представлены результаты, полученные при различной глубине алмазного шлифования образцов пористого и высокоплотного керамических материалов состава $ZrO_2 - 6$ моль % MgO . Образцы различной плотности были механически обработаны при глубине резания $0,003-0,01$ мм. С использованием электронного микроскопа была исследована микроструктура и определены механические свойства пористой и высокоплотной керамики.

Установлено, что при алмазном шлифовании высокоплотных образцов, полученных прессованием при $P_{2max} = 200$ МПа, создаются условия для реализации фазового перехода на поверхности только высокоплотных образцов. Моноклинная кристаллическая модификация ZrO_2 под действием поверхностных напряжений, возникающих из-за давления алмазного шлифовальный круга на поверхность образца, переходит в тетрагональную почти на 30%. В объеме образца фазовый переход не происходит. Показано, что механическая обработка способствует созданию напряженной структуры в приповерхностных слоях керамики с образованием тетрагональной фазы, что приводит к увеличению K_{1c} с $4,3$ до $6,4$ МПа/м^{1/2}.

Механическая обработка пористых образцов с открытой пористостью 5-7%, полученных прессованием при $P_{1max} = 55$ МПа, не приводит к фазовому переходу в приповерхностных слоях керамики и K_{1c} имеет прежние значения в пределах $3,8-4,3$ МПа/м^{1/2}.

Таким образом, зная влияние механической обработки на структуру и K_{1c} , можно более точно прогнозировать надежность и долговечность эксплуатации изделий из диоксида циркония, работающих в экстремальных условиях.

Керамика из трикальцийфосфата, полученная с использованием аддитивных технологий

М.М. Новиков¹, И.В. Фадеева², О.С. Антонова², И.И. Селезнева³, Н.М. Марков⁴

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия; ³Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН (ИТЭБ РАН), г. Пущино, Россия; ⁴НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева, г. Москва, Россия

E-mail: fadeeva_inna@mail.ru

Керамика из фосфатов кальция и, в частности, из трикальцийфосфата (ТКФ, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), в настоящее время используется в хирургии костных тканей для их восстановления в связи с тем, что по химическому составу ТКФ подобен минеральной составляющей костной ткани человека. ТКФ способен резорбироваться в жидкостях организма с образованием нетоксичных для организма ионов кальция и фосфат-ионов, которые используются организмом для формирования новой костной ткани. Успех клинического применения биоматериалов требует соответствия их формы, структуры и биомеханических характеристик реальным замещаемым фрагментам организма. Ежегодно в мире проводятся тысячи восстановительных операций с замещением костной ткани имплантатами и эндопротезами. Имплантат должен быть изготовлен из биосовместимого материала, обладать достаточной прочностью и иметь большую площадь поверхности, контактирующей с костью, поэтому очень важно обеспечить максимально точное соответствие геометрии имплантата дефекту в области повреждения.

Современные методы компьютерной томографии позволяют получить цифровую модель дефекта, а технологии аддитивного производства позволяют с высокой точностью, по этой модели воспроизвести геометрию утраченного фрагмента. Целью данной работы являлось получение керамики, заданной геометрической формы из ТКФ с использованием аддитивного производства и исследование её микроструктуры и поведения в жидкости, моделирующей жидкости организма.

ТКФ синтезировали методом осаждения из водных растворов солей нитрата кальция и двухзамещенного фосфата аммония с последующей термообработкой при 900 °С.

Фазовый состав определяли с помощью дифрактометра с вращающимся анодом Rigaku D/MAX-2500 (Япония) в режиме «на отражение» с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Согласно данным РФА, синтезированный порошок является однофазным со структурой витлокита.

Новые разработки в области аддитивного производства, использующие методы проекционной печати (DLP и LCD 3D-принтеры) для воспроизведения последовательных слоев цифровой модели могут успешно применяться для производства керамических изделий из фотополимерной пасты с керамическим наполнителем. В данной работе использовался модифицированный LCD 3D-принтер, в котором формирование слоя фотополимерной керамической пасты происходило на движущейся ленте, прозрачной для УФ-излучения (рис. 1). Этот процесс позволяет использовать керамические пасты высокой вязкости с малым содержанием фотополимерного связующего, но является технически более сложным для реализации и требует дополнительной оснастки.

После изготовления полимер-керамических изделий проводилось выжигание полимерного связующего и окончательное спекание керамики для получения заданных параметров пористости и прочности. Керамику изготавливали из порошка трикальцийфосфата, полученного методом осаждения при pH 6,0-6,5 из водных растворов солей нитрата кальция и двухзамещенного фосфата аммония. Обжиг образцов, напечатанных на LCD 3D-принтере, проводили при температуре 1100 °С.



Рис. 1. Модифицированный LCD 3D-принтер для изготовления полимер-керамических изделий

Микроструктуру керамики изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega II SBU (Tescan, Чехия). Микроструктура керамики из ТКФ однородная, размер зерна составляет 2-3 мкм, размер пор от менее 1 до 2 мкм (рис. 2).

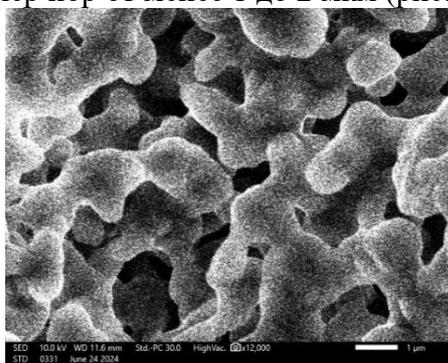


Рис. 2. Микроструктура керамики, полученной с использованием 3D-прототипирования, температура обжига 1150 °С

Для исследования биосовместимости были изготовлены образцы керамики диаметром 5 мм и толщиной 1,5-2 мм. Биосовместимость полученных образцов изучали *in vitro* методом прямого контакта на культурах стволовых клеток человека, выделенных из пульпы зуба (DPSC). Клетки хорошо распластаны на керамике, количество мертвых клеток единичное в поле зрения (рис. 3).

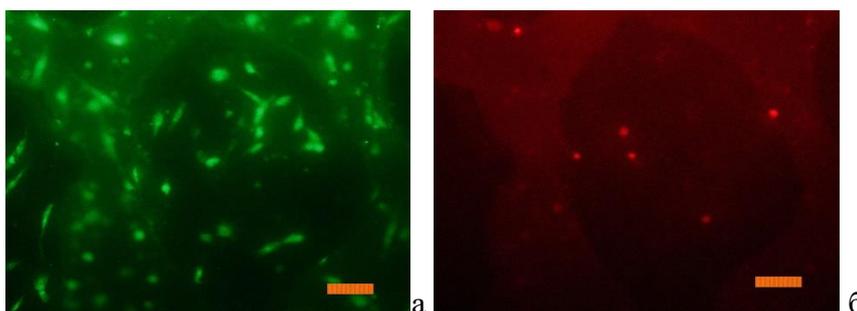


Рис. 3. Внешний вид трансформированных клеток DPSC через 24 ч после инокуляции на поверхности образцов: а – окраска всех клеток, б – окраска мертвых клеток иодидом пропидия

По данным исследований образцы керамики из ТКФ являются биосовместимыми.

Синтез и изучение керамики проводились при финансовой поддержке Министерства науки и образования, грант №075-00320-24-00. Стереолитографическая 3D-печать проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». Биологические исследования проводились по Госзаданию № 075-00224-24-01.

Алюмооксидные композиционные материалы на основе бентонитфосфатной связки

Н.В. Филатова, Н.Ф. Косенко, М.С. Малоиван

ИГХТУ, г. Иваново, Россия

E-mail: zyanata@mail.ru

Бентонитфосфатная связка, синтезированная нами, относится к геополимерным материалам. Фосфатные связки, полученные с использованием силикатов алюминия/алюмосиликатных материалов (т.е. содержащих соответственно октаэдрически или тетраэдрически координированный алюминий), представляют интерес для синтеза высокотемпературных композиционных материалов, поскольку позволяют ввести в состав изделия ценный компонент – муллит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, обладающий высокой огнеупорностью, химической и термической стойкостью. Геополимеры (ГП) обладают такими важными свойствами, как возможность синтеза при низких и средних температурах, высокой экономичностью, отличной тепло- и коррозионной стойкостью, способностью к иммобилизации вредных веществ и отходов и т.д. ГП и композиты на их основе могут формировать керамическую структуру с регулируемыми механическими, теплотехническими, электрическими и прочими свойствами. Разработанные в разных странах до настоящего времени многочисленные составы ГП являются фактически затвердевшими вяжущими композициями, полученными затворением порошков различных алюмосиликатов (природных, искусственных, отходов производства) щелочными растворами, ортофосфорной кислотой (ОФК), растворами фосфатов. Соотношение между жидкой и твердой фазой в них колеблется от 0,8-1,0 до 0,28-0,45. Вместе с тем на основе ГП возможно получение связок с более высоким соотношением Ж/Т в целях последующего изготовления композиционных материалов по керамической технологии (рис. 1).

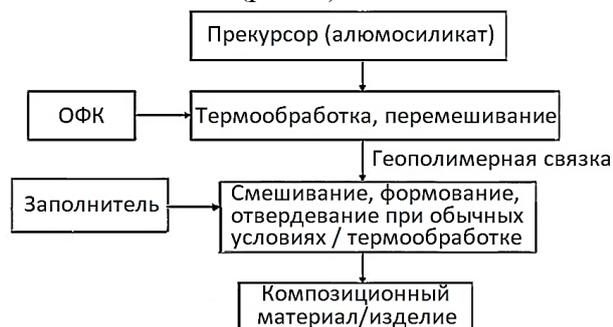


Рис. 1. Схема формирования композиционного материала/изделия на основе геополимерной фосфатной связки

В качестве заполнителей использовали алюмооксидные порошки плавяного корунда (КП), глинозема марок ГК, Г-00 и реактивного глинозема. Предварительно были определены характеристики данных порошков и бентонита, используемого для синтеза связки.

Установлены оптимальные составы, позволившие получить композиты с высокой прочностью (около 100 МПа) и низким водопоглощением (7-9%). Композиты на геополимерной связке практически не уступали по прочности материалам на классических неорганических фосфатных связках, в частности алюмоборфосфатной, а при пониженной температуре спекания (1000 °С) даже превосходили их. Свойства материалов (при прочих равных условиях) улучшались в ряду заполнителей: ГК < Г-00 < КП.

С помощью рентгенофазового анализа получена информация о формах фосфатов алюминия и кремния, образующихся в ходе обжига при различных температурах как в самой связке, так и алюмооксидных композитах на их основе.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР (Тема № FZZW-2024-0004)

Влияние оксида скандия и оксида лютетия на фазовый состав СВС композиций на основе нитрида кремния.

И.А Шibaков, В.В. Загоржевский

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН (ИСМАН), г. Черноголовка, Россия

E-mail: igorecio@gmail.com

Одним из направлений повышения высокотемпературной прочности керамики является использование в качестве исходного сырья композиционных порошков, для получения которых перспективно использовать метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) за счет высокой энергоэффективности, производительности и одностадийности процесса. Использование оксидов редкоземельных элементов при синтезе композиционных порошков позволит повысить высокотемпературную прочность керамических материалов на основе нитрида кремния. Целью данной работы являлось изучение влияния оксида лютетия и оксида скандия на процесс получения СВС композиций $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Lu}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Sc}_2\text{O}_3$ и фазовый состав продуктов синтеза.

Для синтеза композиционных порошков использовали СВС-реактор объемом 30 л. Рабочее давление процесса составляло 40 атм. Состав исходной шихты включал следующие компоненты: Si (23 и 21 мас. %), $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, Lu_2O_3 и Sc_2O_3 , рассчитанные так, что их количество в композициях составляло 12, 14, 16, мас. %, и 5, 8, 10 мас. %, соответственно.

При исследовании влияния количества оксидной добавки на температуру горения было установлено, что при увеличении доли оксида в шихте температура горения возрастает от 1567 до 1614 °С (рис. 1а) для оксида скандия и от 1490 до 1618 °С для оксида лютетия (рис. 1б). Увеличение температуры горения связано с образованием силикатных соединений лютетия и скандия.

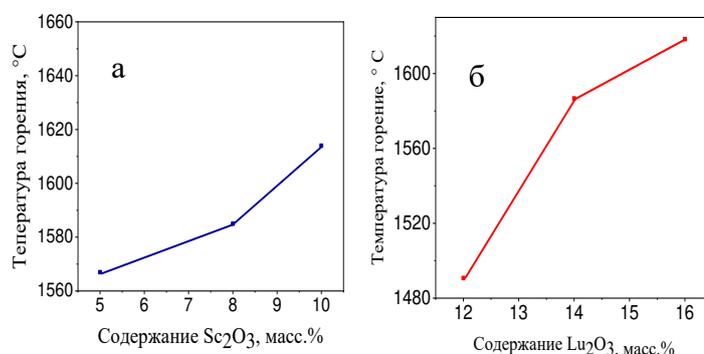


Рис. 1. Зависимость температуры горения от содержания оксида редкоземельного элемента в шихте: а – Sc_2O_3 , б – Lu_2O_3

Рентгенофазовый анализ показал, что при добавлении Sc_2O_3 в шихту в количестве 5, 8 и 10 мас. % на рентгенограммах присутствуют пики соединения, которое не удалось расшифровать, другие вторичные кристаллические фазы отсутствуют. Нитрид кремния представлен в основном в альфа модификации с содержанием в продукте синтеза 92 мас. %

При использовании добавки Lu_2O_3 состав вторичных фаз представлен моносиликатом и дисиликатом лютетия. Установлено, что при синтезе композиций возникает разница температур по вертикальному сечению шихты. Центральная область имеет максимальную температуру. РФА композиций $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Lu}_2\text{O}_3$ показал, что в верхней части спека образуется дисиликат лютетия моноклинной сингонии. В центральной части спека формируется дисиликат лютетия тетрагональной сингонии. Содержание $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ в продукте синтеза составляет 86 мас. %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00085, <https://rscf.ru/project/24-23-00085/>

Пиролитический нитрид бора в виде трубок для нагревателей эмиссионных узлов

Л.Н. Кочерга¹, Д.М. Алешунин¹, Я.А. Назарова^{2,3}, А.А. Берг^{2,4}, А.А. Шелемей²

¹ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия; ²АО «ОКБ «Факел», г. Калининград, Россия,

³БФУ им. Иммануила Канта, г. Калининград, Россия, ⁴КГТУ, г. Калининград, Россия

E-mail: info@virial.ru; info@fakel-russia.com

Пиролитический нитрид бора (ПНБ) – это материал, получаемый посредством химического осаждения из газовой фазы, который широко используют для изготовления огнеупорных изделий. Они имеют преимущество в сравнении с изделиями из горячепрессованного нитрида бора (BN), так как ПНБ обычно содержит минимальное количество примесей (чистота 99,99%) и является более плотным, так как он не имеет пор, имеющих в горячепрессованных изделиях. ПНБ обладает высокими электроизоляционными свойствами, химической стойкостью, термостойкостью, небольшим коэффициентом поглощения СВЧ-энергии.

Для импортозамещения ПНБ иностранного производства, применяемого в узле эмиссионном катода в виде трубки нагревателя, был выбран ПНБ отечественного производства.

Для исследования образцов заготовок ПНБ были проведены работы по входному контролю их внешнего вида, контролю электросопротивления, а также по изготовлению деталей из заготовок и дальнейшей оценке влияния на их характеристики высоких температур.

В результате входного контроля были выявлены множественные отклонения по внешнему виду (отслоения на торце, множественные обнажения нижележащих слоев на наружной поверхности детали (все образцы), протяженная трещина на детали), не соответствующие конструкторской документации (КД). Электросопротивление соответствовало требованиям КД и составляло не менее 50 МОм.

В связи с тем, что иностранный производитель поставлял не заготовки, а готовые детали с размерами, соответствующими КД, появилась необходимость в отработке механической обработки заготовок из ПНБ. В соответствии с КД была проведена обработка по наружному и внутреннему диаметрам. Обработка производилась на универсальном токарно-винторезном станке.

При механической обработке заготовок ПНБ алмазным резцом происходит деформирование и скалывание слоев материала, что приводит к образованию областей с отслоением, преимущественно по торцу детали (рис. 1).

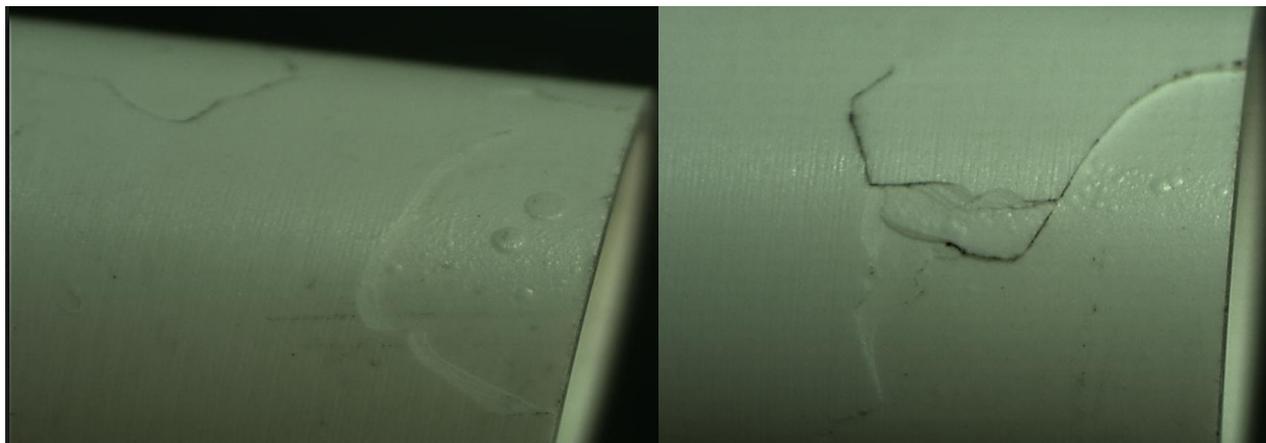


Рис. 1. Отслоения на заготовках из пиролитического нитрида бора

По результатам проведенных работ совместно с выбранным производителем были разработаны мероприятия по минимизации дефектов при изготовлении деталей из заготовок, в которые были включены:

- изменение инструмента для механической обработки;
- корректировка технологии на предприятии-изготовителе заготовок для увеличения плотности прилегания слоев и сокращения рисков отслоений.

Путем подбора оптимального режима механической обработки были получены детали с более гладкой поверхностью (рис. 2).

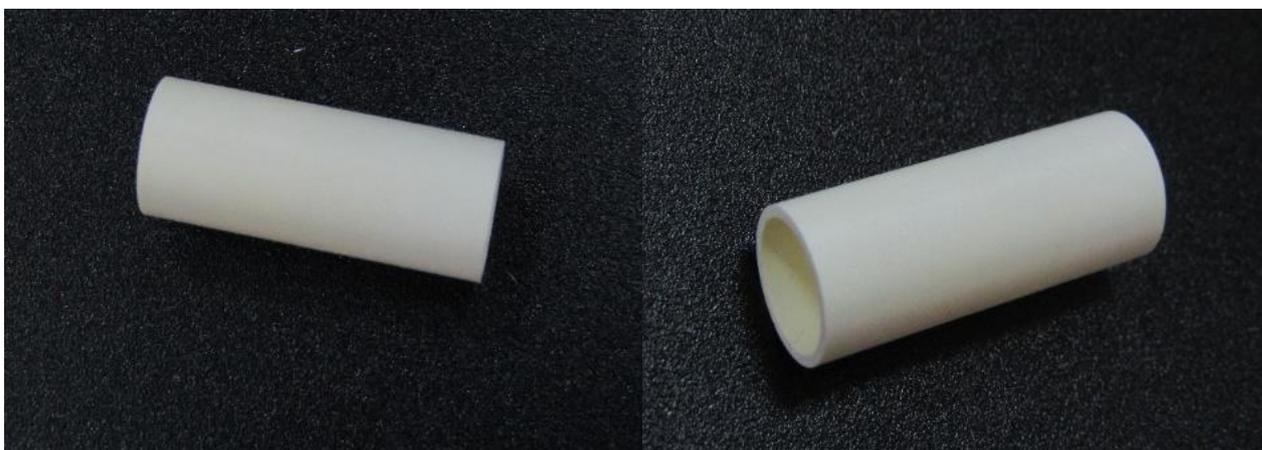


Рис. 2. Детали из заготовок ПНБ

Изучение влияния высоких температур на основные характеристики образцов проводили с учётом эксплуатационных температур деталей в составе штатных сборочных единиц и возможностей термического оборудования.

Керамические образцы подвергались следующему термическому воздействию:

- нагрев трубок до $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ на воздухе с выдержкой при этой температуре $t = 180$ мин и охлаждение с печью;
- нагрев трубок до $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ на воздухе с выдержкой $t = 30$ мин и охлаждение с печью;
- термоудар трубок по следующему режиму: нагрев трубок до $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ на воздухе, выдержка $t = 30$ мин и охлаждение в воде.

После каждого этапа испытаний выполняли контроль геометрических размеров и контроль электрического сопротивления. Во всех случаях изменения внешнего вида, размеров образцов и электросопротивления выявлены не были.

Кроме того, были проведены испытания катода из ПНБ в составе СПД-100 на ударные нагрузки с амплитудой ускорения $700g$ и длительностью ударного импульса $0,2$ мс, которые показали положительный результат. В ходе дальнейшей работы с отечественным производителем изготовленные трубки из ПНБ показали аналогичные результаты испытаний и в других типах СПД.

Выводы:

1. Трубки из керамических заготовок ПНБ от нового поставщика успешно прошли испытания в составе катода.
2. В результате проведенной работы была освоена технология осаждения пиролитического нитрида бора, освоена технология механической обработки керамических заготовок, для получения деталей в соответствии с КД.
3. По результатам проведенных испытаний материал ПНБ отечественного производителя внедрен в действующую конструкцию стационарных плазменных двигателей, что позволило обеспечить независимость от импортного материала.

Совершенствование применяемых и разработка новых методов и специальных технических средств для неразрушающего контроля изделий из керамических и полимерно-композиционных материалов

С.И. Минин, А.В. Терехин, Д.И. Чулков, А.А. Филатов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Одной из ключевых проблем развития существующей методологии технологического контроля наукоемких изделий из керамических и полимерно-композиционных материалов (ПКМ) в процессе их серийного производства является необходимость повышения достоверности, информативности и производительности контроля. Одним из наиболее эффективных путей решения данной проблемы является совершенствование применяемых методов контроля, а также разработках новых методов и создание технических средств для их реализации.

Для улучшения качества ультразвукового контроля разработаны и изготовлены ультразвуковые специализированные преобразователи и призмы, не имеющие аналогов в РФ и мире (рис. 1).

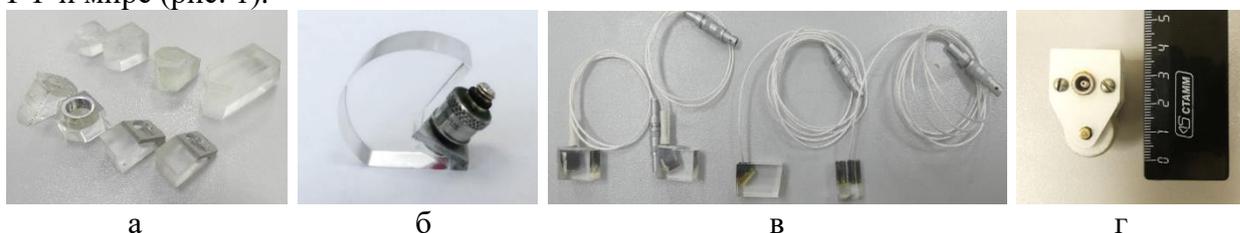


Рис. 1. Призмы и ультразвуковые преобразователи: а, б – призмы, в, г- преобразователи

Конструкция призм за счет специальной геометрической формы уменьшает акустические шумы и позволяет выполнять ультразвуковой контроль в дальней зоне диаграммы направленности – зоне равномерной интенсивности ультразвукового поля. Проведена апробация изготовленных преобразователей и призм при проведении контроля изделий из керамических материалов, а также изделий из полимерно-композиционных материалов, показавшая их высокую работоспособность. Кроме того, разработан и изготовлен блок ультразвуковых преобразователей, позволяющий при автоматизированном контроле определять форму обнаруженных несплошностей (рис. 2). Применение многоканального цифрового ультразвукового дефектоскопа с блоком ультразвуковых преобразователей позволяет не только определять форму обнаруженных несплошностей, но и сократить время контроля, уменьшить влияние человеческого фактора на результаты контроля, хранить результаты контроля в ЭВМ. Иммерсионный вариант проведения контроля, при котором изделие полностью погружается в воду, позволяет выполнять контроль даже заготовок керамических изделий, шероховатость их поверхности не влияет на качество акустического контакта. С целью повышения производительности ультразвукового контроля разработаны автоматизированные устройства с вертикальным (рис.3, а) и горизонтальным (рис. 3, б) расположением изделий при контроле.



Рис. 2. Блок ультразвуковых преобразователей

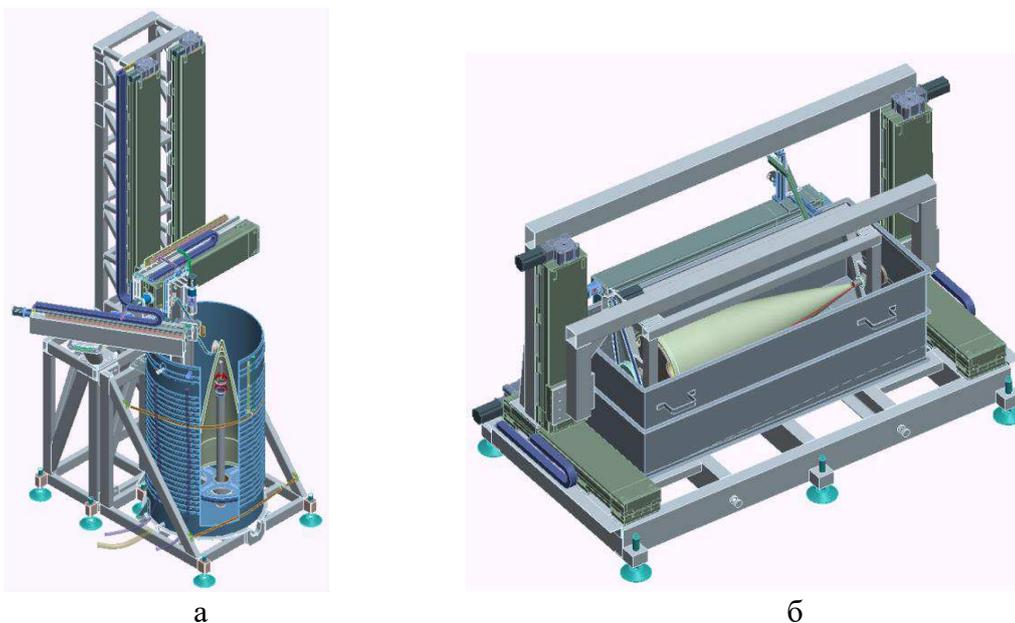


Рис. 3. Внешний вид автоматизированного устройства с вертикальным (а) и горизонтальным (б) расположением контролируемых изделий во время контроля

Для повышения чувствительности и достоверности неразрушающего контроля изделий из керамических и полимерно-композиционных материалов, разработаны и изготовлены в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16811-2016 «Ультразвуковой контроль. Настройка чувствительности и диапазона» контрольные образцы (рис. 4). Применение контрольных образцов при настройке ультразвуковых дефектоскопов позволяет поднять чувствительность контроля на 6-8 дБ, тем самым обнаруживать поры и трещины в керамических изделиях от 1,5 мм, а в полимерно-композитных изделиях – расслоения от 12 мм.



Рис. 4. Общий вид контрольных образцов: а) керамических, б) из ПКМ

По результатам проведения работы по совершенствованию применяемых методов и отработке новых методов неразрушающего контроля изделий из керамических и полимерно-композиционных материалов получено 15 патентов, что подтверждает ее новизну.

Повышена достоверность применяемых методов и технических средств неразрушающего контроля, выросло качество и информативность контроля изделий из керамических и полимерно-композиционных материалов.

Способ контроля высоты поверхностных трещин в изделиях из конструкционной керамики при помощи дифракции ультразвуковых волн

С.И. Минин, А.В. Терехин, Д.И. Чулков, А.А. Филатов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

В настоящей работе предлагается способ измерения высоты трещин при помощи ультразвуковых волн. В основе большинства способов, реализующих ультразвуковые методы неразрушающего контроля, используется лучевое представление о распространении и рассеянии ультразвуковых волн на дефектах, размеры которых существенно больше длины волны, подчиняющееся законам геометрической оптики. Законы геометрической оптики позволяют корректно описывать поля распространения и рассеяния ультразвуковых волн в широком интервале углов падения, частот колебаний и форм отражателей. Однако существуют области, в которых законы геометрической оптики не выполняются и составляющие ультразвуковые поля представляют собой дифракционные поля. В данном случае, под дифракцией понимается явление, возникающее при взаимодействии ультразвуковой волны с препятствием и заключающееся в изменении амплитуды и фазы ультразвуковой волны и её отклонении от прямолинейного пути распространения. В соответствии с этим представлением законы геометрической оптики нарушаются в переходных областях, где образуются не учитываемые этими законами дифракционные поля.

Решение дифракционных задач рассеивания ультразвуковых волн в однородном твердом теле сводится к решению волновых уравнений Гельмгольца для потенциалов смещения в результирующей продольной l и поперечной t волн:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi + k_l^2 \varphi = 0 \\ \nabla^2 A + k_t^2 A = 0 \end{cases}$$

где $k_l = w/c_l$ и $k_t = w/c_t$ волновые числа для продольных и поперечных волн, w – циклическая частота,

$$\nabla = \frac{\partial \varphi}{\partial x} i + \frac{\partial \varphi}{\partial y} j + \frac{\partial \varphi}{\partial z} k$$
 – оператор Гамильтона,

i, j, k – единичные орты декартовой системы координат,

c_l, c_t – скорости продольных и поперечных волн.

Граничными условиями является равенство нулю нормальных и касательных напряжений на границе раздела сред.

Дифракционные поправки зависят от волнового числа, площади излучателя, пройденного ультразвуковой волной расстояния от излучателя до приемника.

В практике ультразвукового контроля давно замечено явление ослабления донного сигнала при расположении преобразователя над трещиной, ориентированной вдоль направления распространения волны, причем как для металлов, так и для керамики. Ослабление донного сигнала связано с образованием дифрагированных головных и боковых волн. При распространении продольной ультразвуковой волны вдоль трещины часть ее энергии в результате взаимодействия с краями трещины переходит в две головные волны, в свою очередь излучающие две боковые поперечные волны, отходящие под третьим критическим углом. При обратном ходе продольной волны вновь излучаются головные и боковые волны, которые могут быть приняты приемным преобразователем. Амплитуда дифрагированных волн существенно меньше амплитуды ультразвуковой волны, образовавшей их. Таким образом, по отношению амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей по трещине, затем отраженной от противоположной поверхности контролируемого изделия и вернувшейся назад на ультразвуковой преобразователь ($A_{тр}$), к амплитуде ультразвуковой волны, прошедшей по контролируемой бездефектной области материала изделия, отраженной от противоположной поверхности контролируемого

изделия и вернувшейся назад на ультразвуковой преобразователь ($A_{\text{дон}}$) можно оперативно, с технологической точки зрения, контролировать высоту поверхностных трещин (рис. 1).

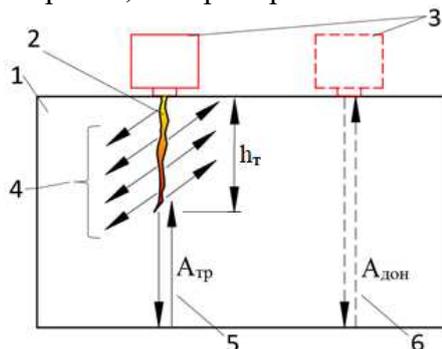


Рис. 1. Схематическая иллюстрация дифракционного ослабления донного сигнала: 1 – объект контроля; 2 – вертикально-ориентированная трещина высотой h_T ; 3 – прямой высокочастотный пьезоэлектрический преобразователь; 4 – направление распространения боковых поперечных волн; 5 – донный эхо-сигнал $A_{\text{гр}}$ при наличии трещины; 6 – донный эхо-сигнал $A_{\text{дон}}$ без трещины

По результатам проведенных измерений определены отношения величины амплитуды донного эхо-сигнала продольной ультразвуковой волны, прошедшей по трещине и отраженной от противоположной стенки изделия, к величине амплитуды донного эхо-сигнала продольной ультразвуковой волны, прошедшей по бездефектному участку ($A_{\text{гр}}/A_{\text{дон}}$) и построены зависимости между отношением $A_{\text{гр}}/A_{\text{дон}}$ и высотой трещин (h_T) для стекло- и кварцевой керамики. Полученные зависимости представлены на рисунке 2.

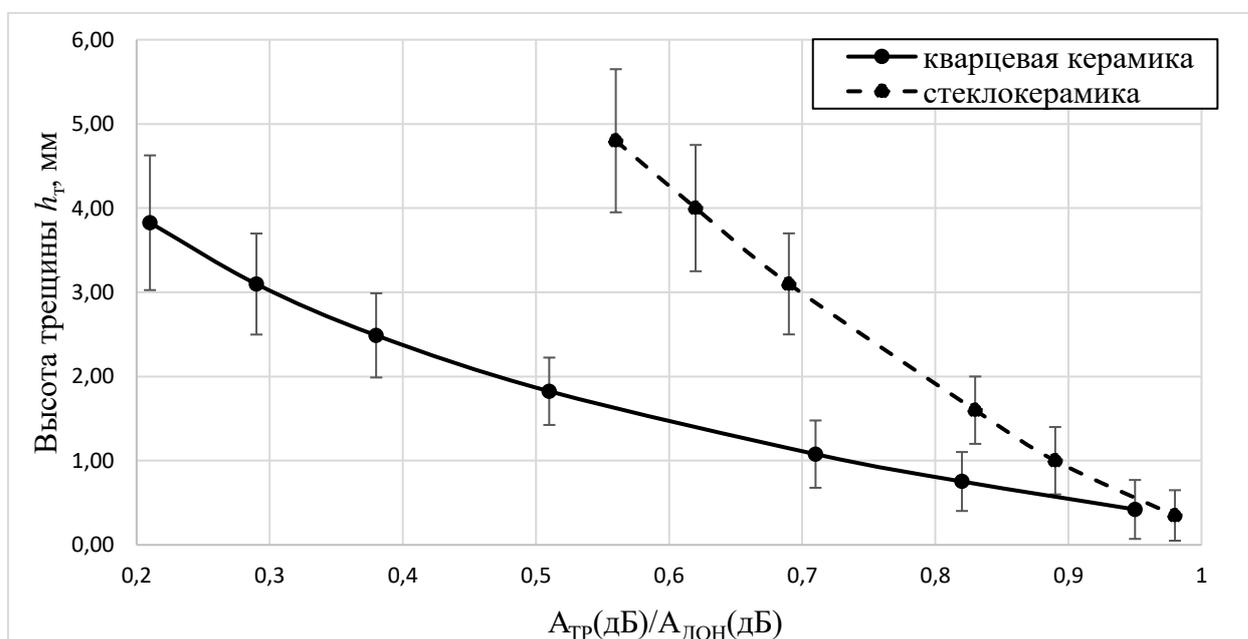


Рис. 2. Зависимости между отношением $A_{\text{гр}}/A_{\text{дон}}$ и высотой вертикально ориентированных плоскостных дефектов (трещин) в стекло- и кварцевой керамике

Установленные экспериментальные зависимости (рис. 2) использованы для экспресс-контроля высоты поверхностных трещин. При отклонении трещин от перпендикулярности к основанию керамических изделий на угол не более 30° погрешность определения высоты трещин не превышает 20%. Результаты определения высоты трещин предложенным способом используются при принятии решения о механической доработке заготовки изделия, снижая при этом необоснованную перебраковку.

Разработка комбинированного ультразвукового метода контроля многослойных клеевых соединений узла заделки РПО высокоскоростных ЛА

А.В. Терехин, С.И. Минин, Д.И. Чулков, А.А. Филатов, В.С. Разкевич
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Основным элементом высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) ракетной техники, во многом определяющим их характеристики, является радиопрозрачный антенный обтекатель (РПО), представляющий собой конструкцию из радиопрозрачной керамической оболочки и металлического шпангоута, соединенных посредством адгезионного слоя. Для дополнительной тепловой защиты антенного оборудования при продолжительном высокотемпературном аэродинамическом нагреве в конструкцию узла заделки РПО включают теплозащитные экраны (ТЗЭ), выполненные из композиционных материалов на основе неорганических матриц.

Соединение керамической оболочки РПО и ТЗЭ в сборе со шпангоутом осуществляется через клеевой слой высокотемпературного клея-герметика (рис. 1). Наличие зон непрочлеивания в данном соединении снижает надежность конструкции РПО и может привести к выходу из строя ЛА. В связи с этим возникает необходимость обеспечения неразрушающего контроля (НК) качества данного соединения на наличие непрочлеивания.

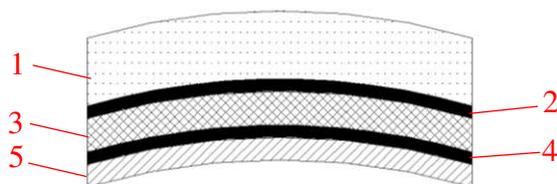


Рис. 1. Состав стенки РПО в зоне склейки: 1 – керамическая оболочка; 2 – клеевой слой; 3 – теплозащитный экран; 4 – клеевой слой; 5 – шпангоут

Для контроля качества клеевого соединения между ТЗЭ и шпангоутом используется рентгенографический метод (рис. 2а). Однако для контроля клеевого соединения между керамической оболочкой и ТЗЭ в сборе со шпангоутом этот метод не нашел применения (рис. 2б) ввиду низкого радиографического контраста, вызванного большой разностью плотности материалов конструкции и малой величиной клеевого зазора ($0,4 \pm 0,2$ мм), соизмеримого с абсолютной чувствительностью метода ($> 0,5$ мм).

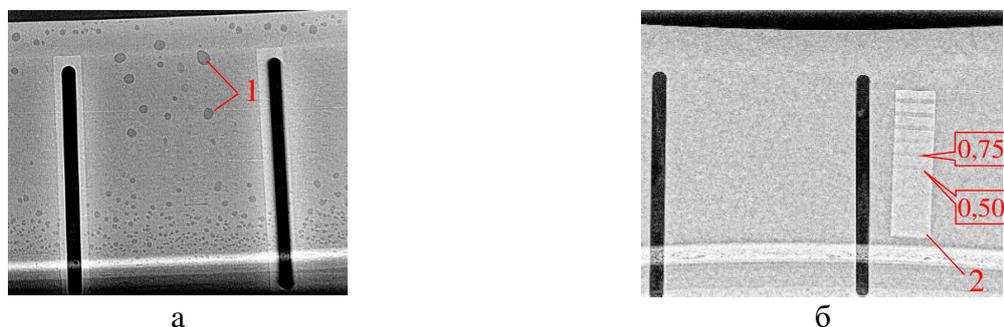


Рис. 2. Рентгеновский снимок с непрочлеиваниями в клеевом соединении «ТЗЭ – шпангоут» (а) и зоны клеевого соединения «керамическая оболочка – ТЗЭ в сборе со шпангоутом» с канавочным эталоном (б)

Для контроля рассматриваемого соединения было предложено использовать комбинацию из двух методов НК – реверберационного и теневого методов ультразвукового контроля (рис. 3). При этом теневой метод ультразвукового контроля используется для

уточнения результатов контроля реверберационным методом и определения границ непрочлея.

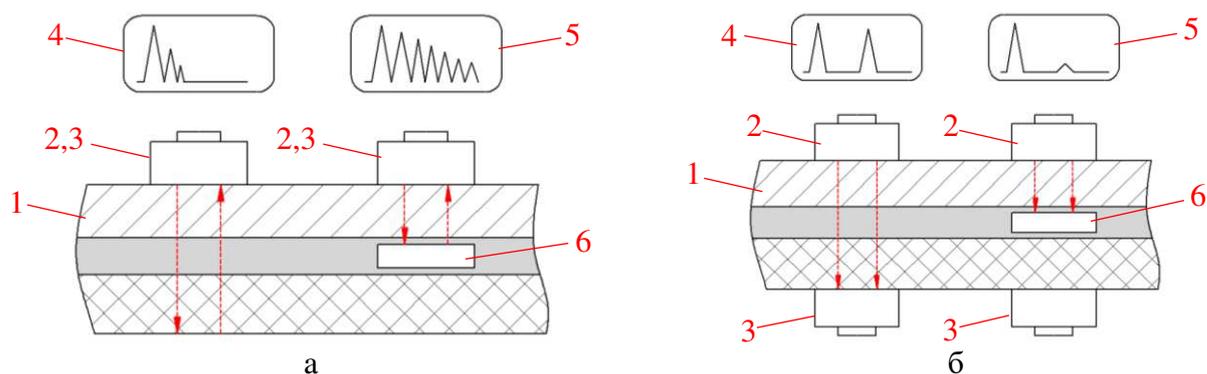


Рис. 3. Схема реализации контроля реверберационным (а) и теньвым (б) ультразвуковыми методами 1 – объект контроля; 2 – источник ультразвуковых волн; 3 – приёмник ультразвуковых волн; 4, 5 – осциллограммы ультразвукового сигнала в области отсутствия и наличия непрочлея; 6 – непрочлея клеевого слоя

С учётом различных акустических сопротивлений материалов рассматриваемой конструкции РПО определены оптимальные параметры ультразвуковых преобразователей. Экспериментально установлено, что для обеспечения требуемой чувствительности реверберационного метода резонансная частота ультразвуковых колебаний должна быть не ниже 2,25 МГц. Для уменьшения коэффициента отражения и увеличения коэффициента прохождения ультразвуковой волны между преобразователем и поверхностью контролируемой конструкции предложено использовать контактные жидкости: водный спиртовой раствор и глицерин.

В ходе проведённых работ разработан и изготовлен из забракованного изделия контрольный образец (КО) с имитатором непрочлея в клеевом соединении между керамической оболочкой и ТЗЭ. При настройке ультразвукового дефектоскопа на КО обеспечивается возможность выявления непрочлея с минимальным линейным размером до 3,5 мм (рис. 4).

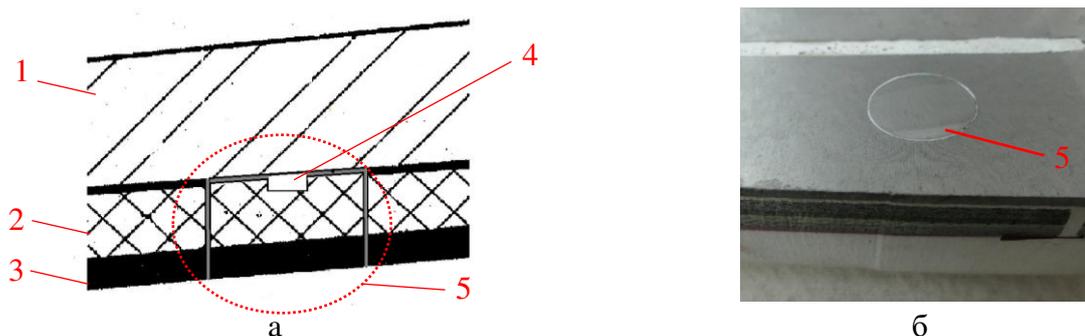


Рис. 4. Эскиз (а) и фотография (б) контрольного образца с имитатором непрочлея:

1 – керамическая оболочка, 2 – теплозащитный экран, 3 – шпангоут,
4 – имитатор непрочлея (отверстие диаметром 3,5 мм), 5 – составная заглушка

На образцах серийных изделий проведена апробация предложенных методов НК, по результатам которой минимальная площадь обнаруживаемого непрочлея, подтверждаемая методом рентгеновской компьютерной томографии, составляет 1,5 см².

По результатам проведённых работ разработана методика НК непрочлея в клеевом соединении между керамической оболочкой и ТЗЭ в сборе со шпангоутом при помощи ультразвуковых волн, а также получены 2 патента РФ на изобретение.

Автоматизированная система теплопрочностных испытаний керамических изделий на основе отечественных модулей

А.В. Терехин, В.С. Райлян, В.И. Фокин, **А.С. Усеня**, К.В. Корольков
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

В связи с ростом скорости и маневренности полета современных ЛА возрастает интенсивность аэродинамического нагрева его элементов, особенно головной части. Для выполнения возрастающих требований к теплозащите головной части ЛА, требуется применение новых высокотемпературных материалов, в частности композиционных и керамических.

Важное место при создании элементов сверхзвуковых ЛА занимают теплопрочностные испытания. Теплопрочностные испытания в наземных условиях должны обеспечивать воспроизведение расчетных распределенных температурных полей и нагрузок, воздействующих на объект испытаний с высокой точностью и синхронностью при достаточном уровне быстродействия по каждому управляемому параметру. Для обеспечения указанных требований необходима разработка специальных многоканальных информационно-управляющих систем наземных теплопрочностных испытаний. В настоящее время задача создания таких систем усложняется в связи с ограничениями доступа к зарубежным компонентам и модулям информационно-измерительных систем.

Целью данной работы является разработка и исследование автоматизированной системы теплопрочностных испытаний керамических изделий, условное обозначение – АНИС (автоматизация научно-исследовательских систем), на основе отечественных измерительных и управляющих модулей.

В работе определены основные для теплопрочностных испытаний требования к системе управления в части архитектуры, функциональных возможностей, быстродействия, алгоритма регулирования. Описана структура аппаратного и программного обеспечения, а также функциональные возможности разрабатываемой системы.

Основой аппаратного обеспечения АНИС являются модули ввода/вывода сигналов, обеспечивающие измерение параметров испытания и формирование управляющего воздействия для задания требуемых режимов. Исходя из задач обеспечения комплексных исследований работоспособности и экспериментальной отработки в наземных условиях конструкций ЛА, к этим модулям предъявляются следующие минимальные требования:

- измерение сигналов термопар с компенсацией температуры холодного спая;
- измерение сигналов датчиков на основе тензометрических схем;
- измерение унифицированных сигналов 4-20 мА и 0-10 В для измерения сигналов с динамометров, датчиков давления и т.п.;
- генерация сигналов управления в диапазоне ± 10 В;
- возможность объединения в общую систему по стандартным интерфейсам для интеграции с существующим ПО АНИС.

Исходя из описанных выше требований, проведен обзор отечественных производителей средств измерений и автоматизации, произведена закупка образцов наиболее подходящих модулей ввода/вывода сигналов и сборка макета перспективной системы АНИС-1М на базе импортозамещенных компонентов.

Макет перспективной системы АНИС-1М опробован в качестве системы измерения и автоматизированного управления при проведении теплопрочностных испытаний. Проведены экспериментальные исследования параметров системы в различных конфигурациях:

- время отклика управляющего канала на изменение сигнала канала обратной связи;
- частота опроса измерительных каналов;
- точность регулирования при различных темпах нагрева от 2 до 200 °С/с;

– точность регулирования при воспроизведении типовых режимов теплопрочностных испытаний на натуральных керамических изделиях.

Схема системы теплопрочностных испытаний приведена на рисунке 1.

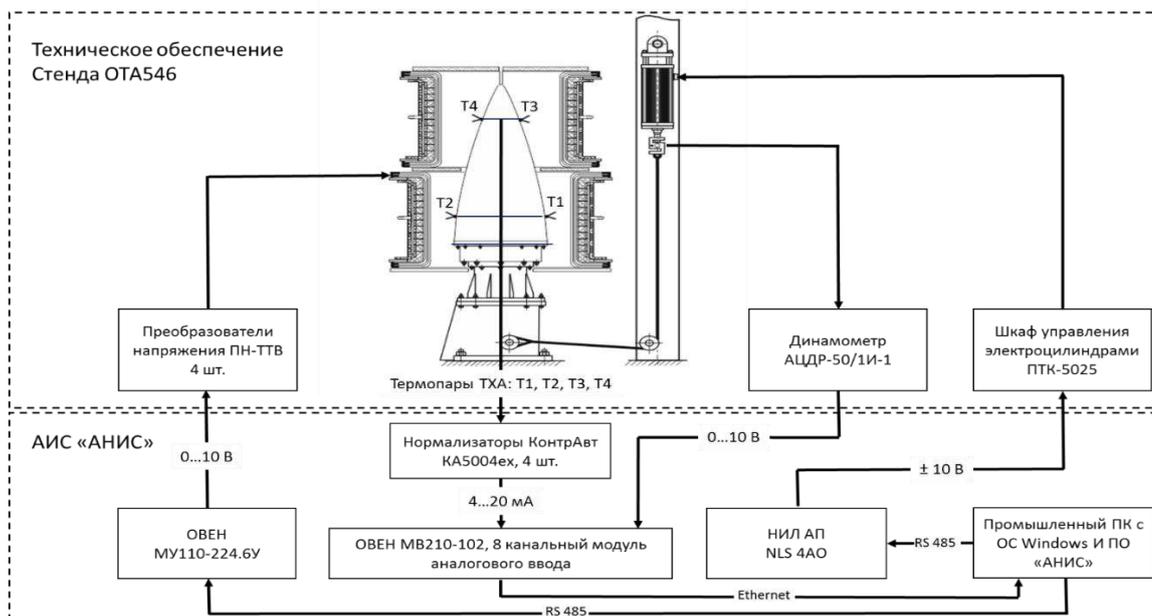


Рис. 1. Схема системы теплопрочностных испытаний с использованием макета системы АНИС-1М

Результаты нагрева и силового нагружения показывают, что система обеспечивает поддержание заданного режима в пределах допустимых отклонений.

На рисунке 2 приведен типовой график изменения температуры при автоматическом управлении нагревом.

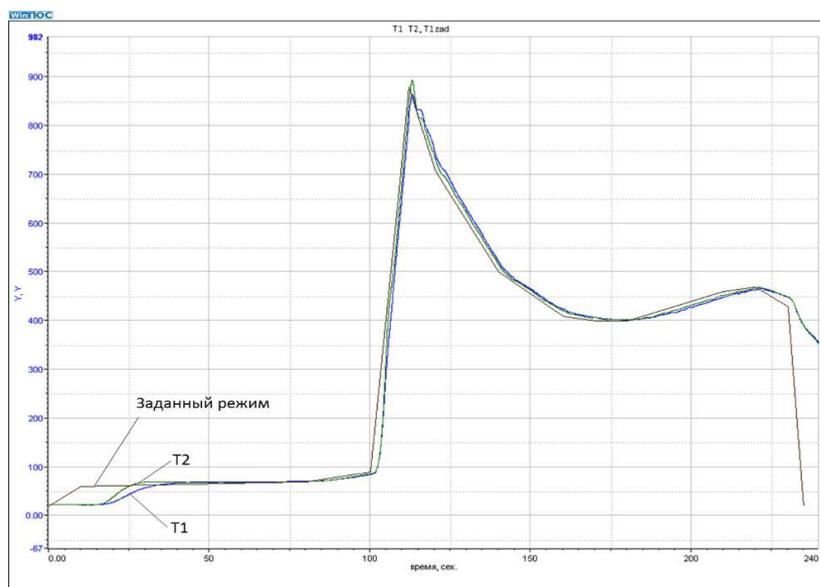


Рис. 2. Типовой график изменения температуры режима теплопрочностных испытаний

Результаты исследования подтвердили возможность создания автоматизированной системы теплопрочностных испытаний керамических изделий с требуемыми характеристиками на базе отечественных компонентов. На основе экспериментальной отработки выбраны измерительные и управляющие модули, которые обеспечивают параметры испытаний.

Исследование высокотемпературных поглощающих покрытий для наземных тепловых испытаний элементов конструкций высокоскоростных летательных аппаратов на стендах радиационного нагрева

В.И. Фокин, А.В. Терехин, В.С. Райлян, М.Ю. Русин
АО «ОИПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Нанесение на внешнюю поверхность объекта испытаний покрытий с высокой поглощательной способностью является важной операцией методики воспроизведения тепловых режимов в процессе наземных испытаний элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА) на стендах радиационного нагрева. Основными функциями покрытий при этом являются интенсификация передачи тепла от нагревателей к объекту испытания, а также выравнивание поглощательной способности поверхности для достижения равномерного распределения температурного поля.

В настоящее время при наземных тепловых испытаниях элементов ЛА широко применяется высокотемпературное покрытие на основе оксида хрома (Cr_2O_3), однако, низкая поглощательная способность указанного покрытия (около 0,3) в спектре излучения нитей накала кварцевых галогенных ламп (0,8-3 мкм) существенно ограничивает возможности наземного испытательного оборудования по воспроизведению заданных для высокоскоростных ЛА тепловых режимов. Целью работы является проведение исследований высокотемпературных поглощающих покрытий для применения при наземных тепловых и теплопрочностных испытаниях на существующих испытательных стендах с предельной температурой нагрева до 1600 °С.

Проведены исследования покрытий на основе SiC , HfB_2 , Si_3N_4 , MoSi_2 , в сравнении с покрытием Cr_2O_3 (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид керамических образцов после нанесения высокотемпературных поглощающих покрытий

Определены интегральные и спектральные (в диапазоне излучения кварцевых галогенных ламп) излучательные способности исследуемых материалов. Проведены сравнительные эксперименты по проверке эффективности покрытий с точки зрения поглощения лучистого потока, а также эксперименты с нагревом покрытий, нанесенных на образцы из конструкционной кварцевой керамики, до 1600 °С.

Графики изменения температуры наружной поверхности образцов при нагреве от 20 до 1200 °С и от 600 до 1600 °С приведены на рисунках 2 и 3.

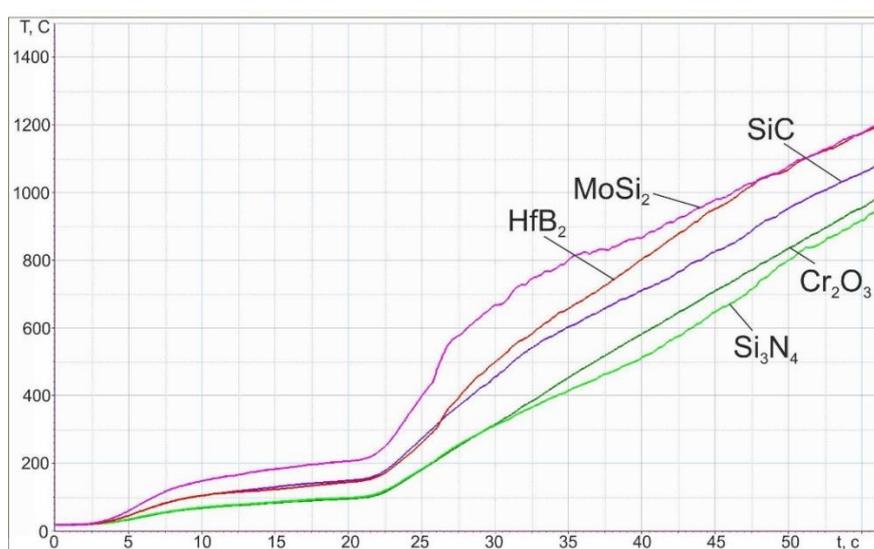


Рис. 2. Графики изменения температуры на наружной поверхности керамических образцов при нагреве до 1200 °С

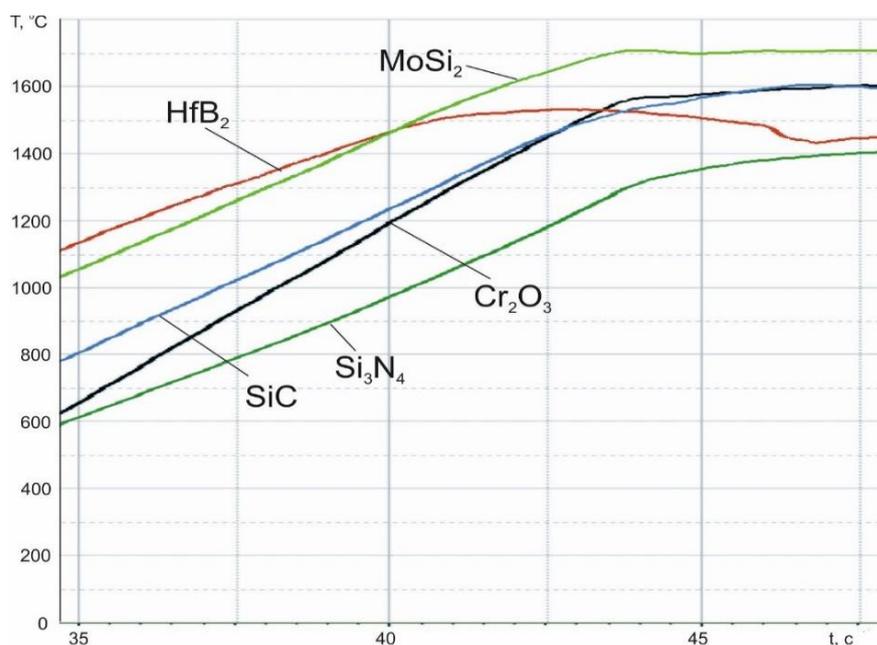


Рис. 3. Графики изменения температуры на наружной поверхности керамических образцов при нагреве от 600 до 1600 °С

Исследование показало, что наиболее эффективным для наземных тепловых испытаний элементов конструкций высокоскоростных ЛА является покрытие из порошка MoSi₂, которое обеспечивает увеличение скорости нагрева в 2 раза по сравнению с Cr₂O₃ в диапазоне температур до 800 °С. Указанное покрытие подтвердило свою работоспособность до температуры 1700 °С. Данное покрытие можно рекомендовать (после отработки технологии нанесения на поверхность объекта испытаний) для использования в действующих испытательных установках на основе кварцевых галогенных ламп при экспериментальной отработке и наземных испытаниях элементов конструкций высокоскоростных ЛА.

Пресс-форма для формования заготовок лопаток турбин перспективных газотурбинных двигателей

С.А. Мешков, К.А. Шошин, В.В. Антонов, С.Б. Воробьев, И.Е. Суханов, М.Г. Лисаченко
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Из года в год растут требования, предъявляемые к газотурбинным двигателям в области повышения эффективности их работы, в частности ресурсостойкости. А это значит, что при разработке перспективных газотурбинных двигателей повышаются требования и к их составным частям, особенно к лопаткам турбин, которые должны иметь как повышенную теплостойкость, так и высокую прочность.

Свойства жаропрочных сплавов, используемых в настоящее время в качестве материала для лопаток турбин, этим требованиям уже не соответствуют. Перспективными материалами, обеспечивающими заданный спектр свойств, являются керамические материалы на основе кремния, такие как нитрид кремния и карбид кремния. Однако применение таких материалов вызывает значительные трудности с механической постобработкой изготовленных из них изделий, что обусловлено физико-механическими свойствами самого материала, в частности, высокой твердостью. Это приводит к необходимости использовать дорогостоящий инструмент. Помимо этого, сложный профиль лопаток предъявляет высокие требования к обрабатываемому оборудованию по точности, скорости и степеням свободы. А это, в свою очередь, приводит к необходимости использовать дорогие, современные 5-осевые и 6-осевые обрабатывающие центры с ЧПУ.

Одним из самых перспективных способов изготовления таких изделий является использование метода горячего шликерного литья под давлением, позволяющего получить сложный профиль изделия сразу, без последующей механической обработки его профиля.

Конструктивные особенности лопатки турбины потребовали нестандартных подходов при проектировании оснастки, и в результате работы специалистами АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» была разработана пресс-форма с уникальной конструкцией, позволяющая достичь поставленных целей. Разработанная пресс-форма включает в себя корпус 1, знак, разборную форму 2 с формообразующими поверхностями, элементы фиксации 3 формы, литниковое кольцо с литниковыми каналами, а также верхнюю 6 и нижнюю 7 крышки. Форма выполнена из двух частей с возможностью их перемещения по окружности, ось которой совпадает с общей осью поверхностей лопатки. позиционирование формы относительно корпуса осуществляется кольцевыми выступами 4, входящими в кольцевые пазы 5 в корпусе пресс-формы, причем оси выступов и пазов совпадают с общей осью поверхностей лопатки. В корпусе пресс-формы расположены кулачки, при провороте которых происходит предварительное раскрытие формы. Одной из проблем при создании данной формы являлось наличие обратного угла у профиля лопатки, не позволяющего снять корпус формы. Для решения данной задачи был введен толкатель 8,двигающийся с помощью винта 9 в прямом и обратном направлении, что позволяет снимать корпус формы после процесса формования.

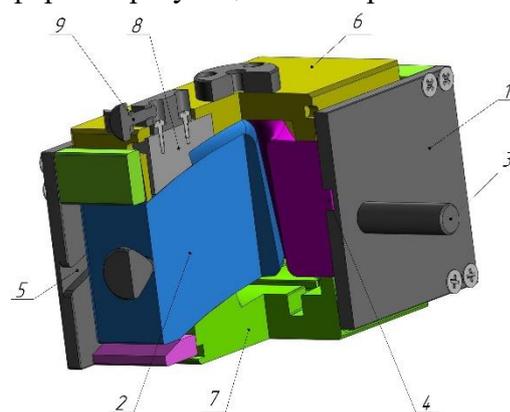


Рис. 1. Пресс-форма.

Данная пресс-форма была изготовлена и введена в эксплуатацию. Полученные изделия отвечают всем заявленным требованиям. Таким образом, в ходе проведенной работы была разработана уникальная конструкция пресс-формы, позволяющая получить лопатку с заданной геометрией без механической обработки, что отражено в патенте РФ №2818884.

Технология изделий из частично стабилизированного диоксида циркония для импортозамещающих комплектующих твердоэлектrolитных сенсоров

Е.Б. Брызгина, Е.Н. Павлова
АО «ЭКОН», г. Обнинск, Россия
e-mail: econ@econobninsk.ru

В докладе содержится информация о подходах к разработке изделий, замещающих импортные чувствительные элементы. Описаны принципы работы с материалом – диоксидом циркония, частично стабилизированным оксидом иттрия. Также сообщаются сведения о процессе формирования изделий, описана конструкция чувствительного элемента (рис. 1, 2). В ходе работы над чувствительным элементом заданной формы проявился дефект, а именно: растрескивание на этапе предварительного спекания (удаления связки). Наиболее вероятная причина: внутренние напряжения, возникающие при термообработке вследствие особенностей формы детали.



Рис. 1. Чувствительный элемент после предварительного спекания



Рис. 2. Чувствительные элементы после окончательного обжига

В результате проведенной работы над устранением данного дефекта были получены данные о необходимых параметрах для спекания изделий характерной формы из частично стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония, также была разработана технология изготовления чувствительных элементов, сравнимых по характеристикам с импортными. Данные элементы успешно применяются в промышленности.

Секция II

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ**

Применение несущих анизотридных конструкций на основе технологии мокрой автоматизированной намотки в силовых элементах летательных аппаратов

А.А. Склезнев

АО «Центр перспективных разработок», г. Хотьково, Россия

E-mail: skleznev@crism-cat.ru

Среди конструктивно-силовых схем, используемых в различных летательных аппаратах – преимущественно ракетно-космической направленности – в последние двадцать лет значительное распространение получила сетчатая или анизотридная конструкция силовых элементов (рис. 1).



Рис. 1. Анизотридная структура силового корпуса космического аппарата

Основными несущими элементами в сетчатых конструкциях являются ребра из однонаправленного полимерного композитного материала, обеспечивающие одновременно изгибную и мембранную жесткости конструкции. В качестве армирующего материала ребер может применяться ровинг любой природы: стекло-, угле-, органо- или базальтопластик, в зависимости от поставленных перед конструкцией задач.

В работе приводится обзор конструктивных решений и применяемых технологических процессов их реализации в области анизотридных силовых структур – оболочек, обтекателей, отсеков, адаптеров полезной нагрузки. Проводится анализ указанных конструктивных решений и их сравнение с другими конструктивно-силовыми схемами на основе действующих нагрузок, массовых характеристик и применяемых конструкторско-технологических решений, технологических процессов их изготовления.

Для проведения обзора были исследованы патентные документы (с глубиной поиска до 20 лет), научно-технические материалы, включая статьи, опубликованные с 2010 года. Показана динамика патентной и публикационной активности по годам, определены основные страны, ведущие исследования в данной тематике, приведена информация по успешно реализованным решениям.

На основании выполненных обзора и анализа определено, что сфера применения не ограничивается реализованными на данный момент решениями. В работе оценены возможные направления будущего применения сетчатых анизотридных структур в качестве элементов летательных аппаратов.

Выкладка композитных изделий в точный размер

В.В. Якунин

ООО «Нева Технолоджи», г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vyacheslav.yakunin@nevatec.ru

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», а также на других предприятиях авиационной и космической отраслей, на протяжении многих лет успешно используются многие технологические и программные решения, значительно оптимизирующие процессы производства изделий из ПКМ, в том числе процессы ручной выкладки. После конструкторской и технологической подготовки специализированные программные комплексы производят экспорт данных для систем автоматизированного раскроя, систем лазерного проецирования для ручной выкладки, а также систем контроля геометрии. Данный подход позволяет значительно увеличить качество готовой продукции, а главное – сократить сроки на производство каждого изделия. Однако, технология ручной выкладки, как и другие существующие технологии изготовления изделий из ПКМ, имеет определенный ряд ограничений. Один из нюансов – в связи с наличием погрешностей на различных этапах производства (отклонения геометрии оснасток, погрешность толщины слоя материала, погрешность контуров вырезанных слоёв, ошибки рабочих при самой выкладке и пр.) форма полученного изделия может значительно выходить за допуск, предполагаемый на первых этапах создания изделия.

Тема доклада напрямую связана с увеличением эффективности производства изделий из ПКМ при использовании технологии ручной выкладки. Рассматривается инновационный, но в то же время уже проверенный, подход объединения в один комплекс технологических и метрологических систем, широко применяемых на различных производствах. В первую очередь речь идет о минимизации отклонений получаемого изделия от формы первоначальной трёхмерной цифровой модели, что отражается на многих параметрах конечного изделия – аэродинамика, прочность, масса и пр.

В докладе рассматривается пример комбинированного использования трех систем – раскройного плоттера, лазерного проектора, высокоточного бесконтактного сканера, а также управляющего программного модуля. Комплекс позволяет проводить промежуточный контроль формы объекта, по результатам которого в случае необходимости происходит автоматическое создание разверток слоев для выкройки на системе автоматической резки, а далее осуществляется проецирование положения данных слоёв на оснастке. После выкладки дополнительных слоев происходит новая проверка, и, в случае положительного результата проверки, процесс производства переходит на следующий этап.



Рис. 1. Принципиальная схема работы комплекса по выкладке в точный размер

Современные композитные материалы в бронезащите

И.А. Беспалов

АО «НИИ стали», г. Москва, Россия

E-mail: Bespalovvv@mail.ru

Специальная военная операция показала острую необходимость защиты личного состава вооруженных сил и военной техники от разного рода осколочных боеприпасов.

При этом разработчикам средств защиты необходимо как оперативно вносить изменения в конструкции вновь выпускаемой военной техники, так и не менее оперативно модернизировать существующую. При этом наиболее остро встает вопрос массы дополнительной защиты, поскольку техника может быть на нее не рассчитана.

Разработчикам средств защиты давно известны броневые композитные материалы. Их начинали применять еще во время вьетнамской войны. Однако их применение всегда сдерживалось стоимостью (по сравнению с броневой сталью) и сравнительно коротким сроком сохранения своих свойств (также по сравнению со сталью).

Также известно, что наибольшую эффективность композитные материалы показывают против осколков – компактных ударников, которых можно остановить, запутав и затормозив высокопрочными нитями в составе композитного материала. Чтобы остановить пулю с острой головой и высокотвердым сердечником, композитного материала в чистом виде недостаточно. Тут нужен высокотвердый слой керамики или твердого металла, который сломает острую и твердую голову пуле. А вот удержать образовавшиеся при этом осколки с успехом может композитный материал.

Так вот, условия СВО дали новый толчок к применению композитных материалов в бронезащите.

Композитные материалы применяют в двух случаях:

1. Организовать противоосколочную защиту военной техники, ранее вообще не бронированной: командно-штабные машины, машины связи, кабины обычных грузовиков, РЛС систем ПВО (БУК, ТОР, Панцирь и др) и РЭБ и т.п.

2. Усилить защищенность легкобронированной техники.

В первом случае наибольшее применение находят прессованные композитные панели из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Так называемый UD-материал, в котором нити СВМПЭ уложены вплотную друг к другу в ортогональных направлениях и склеены пленкой, прессуется в несколько слоев, с нагревом, для получения жесткой пластины толщиной от 6 до 14 мм. Для защиты от солнечной радиации и климатических факторов в процессе прессования добавляют покровную ткань, которая также придает цвет или камуфляжный рисунок. В таблице 1 приведена противоосколочная стойкость пластин из СВМПЭ по отношению к модельному осколку – стальному шариком массой 1 г (ГОСТ Р 55623).

Таблица 1. Противоосколочная стойкость пластин из СВМПЭ

Толщина пластины, мм	6	8	10	14
Противоосколочная стойкость $V_{50\%}$, м/с	650	800	950	1300

Такие пластины можно установить внутри корпуса машины, клеить внутрь сэндвич-панели утеплителя кузова машины или прикрепить снаружи машины.

Большим плюсом данного материала является его радиопрозрачность.

Толщину здесь следует выбирать из разумного компромисса «масса–стоимость–стойкость». Учитывая начальную скорость вылета осколков из боеприпаса (800–1200) м/с и разброс массы осколков от 0,1 до 100 г (в зависимости от боеприпаса), можно предположить,

что тонкие пластины (от 6 до 8 мм) смогут защитить от большинства осколков при дистанции подрыва (30-50) м – для артиллерийских снарядов и мин, а толстые пластины (от 10 до 14 мм) – от большинства осколков снарядов при дистанции подрыва (10–30) м и боевых частей РСЗО или тактических ракет при дистанции подрыва (30-50) м.

Во втором случае, когда нужно усилить уже имеющуюся броню, возможны два варианта применения композитного материала: приклеить его к броне или установить с небольшим зазором с тыла от брони.

В случае приклеивания композит помогает работать самой броне при ударе. Так, если 4 мм броневой стали пробивается пулей 7Н10 при скорости 650 м/с, то с приклеенным слоем 6 мм арамидного композита такая структура выдерживает воздействие той же пули со скоростью 850 м/с (при увеличении массы на 20 %).

Однако при приклеивании у композитного материала мало возможности улавливать сноп осколков при пробитии брони. Чтобы снизить ущерб от вторичных осколков при пробитии брони заведомо более мощным средством, чем то, на которое она рассчитана, композитные пластины, чаще всего из СВМПЭ, устанавливают с зазором относительно брони в (10–40) мм. В этом случае получают размеры зоны поражения вторичными осколками на расстоянии 400 мм от брони, приведенные в таблице 2. Зона поражения оценивалась по диаметру круга пробоин в картонном экране. Данные получены по одному эксперименту в каждом случае. Требуется дополнительная статистика.

Таблица 2. Диаметр зоны поражения осколками

Структура,	6 мм сталь	6 мм сталь + 6 мм СВМПЭ	6 мм сталь + 8 мм СВМПЭ	6 мм сталь + 10 мм СВМПЭ	6 мм сталь 6 мм сталь	6 мм сталь 6 мм сталь + 8 мм СВМПЭ	6 мм сталь 6 мм сталь + 10 мм СВМПЭ
Тип пробивающей пули	7,62 мм бронебойная				12,7 мм бронебойная		
Диаметр зоны поражения осколками, мм	200	180	150	50	180	100	20

Однако даже эти данные говорят о том, что применение композитного подбоя, расположенного как вплотную, так и с зазором относительно основной металлической брони, позволяет увеличить выживаемость бронемашин и ее экипажа/десанта за счет повышения защитных свойств самой брони и за счет уменьшения потока осколков в заброневом пространстве при пробитии. На расстоянии 400 мм от брони площадь сечения потока осколком можно уменьшить в десятки раз – до (16-81) раз.

Наибольшее применение в бронезащите нашли композитные материалы на основе арамидных нитей (чаще всего в виде ткани) и на основе волокон сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Таким образом, композитные материалы на основе арамидных тканей и СВМПЭ необходимо внедрять в ближайшее время во все конструкции военной техники для повышения защищенности личного состава и ценного, жизненно важного оборудования.

Разработки ООО НПО «Программируемые композиты» в области 3D-ткачества

М.В. Киселев, А.М. Киселев

ООО НПО «Программируемые композиты», г. Кострома, Россия

E-mail: kisselev50@mail.ru

На сегодняшний день отсутствие современного качественного отечественного оборудования для текстильной отрасли стало проблемой номер один. Еще сложнее обстоит ситуация с оборудованием и программным обеспечением для реализации технологии 3D-ткачества. В тезисах приведены результаты многолетней работы научно-производственного объединения ООО «Программируемые композиты» в направлении развития технологии 3D-ткачества в нашей стране. Работы велись в соответствии с перспективными задачами концепции сквозного проектирования изделий из композиционных материалов на основе 3D-тканых каркасов.

Для проектирования структуры цельнотканых преформ сложной конфигурации на уровне нити разработано программное обеспечение, позволяющее проектировать геометрическую модель преформы по технологии 3D-ткачества и автоматизированно формировать управляющую программу для оборудования с помощью специализированного САМ-модуля. Пример построения фрагмента 3D-ткани и картона для системы управления зевобразованием станка приведен на рисунке 1.

Во всех станках, представленных ниже, реализован данный САМ-модуль, который может быть применен как к ремизной системе управления зевобразованием, так и к машине Жаккарда. Следующая производственная проблема, с которой столкнулось наше предприятие в своей работе – это подготовка нити к ткачеству. Разработан новый перемоточный крутильно-тростильный станок для мелкосерийного и единичного производства с возможностью выполнения комплекса исследовательских работ по влиянию параметров кручения и трощения на прочность нити. 3D-модель станка представлена на рисунке 2. Преимуществом данной модели является то, что все движения в станке реализованы с использованием сервоприводов и позволяют получить на любой катушке любую структуру намотки с контролем заданного натяжения нити.

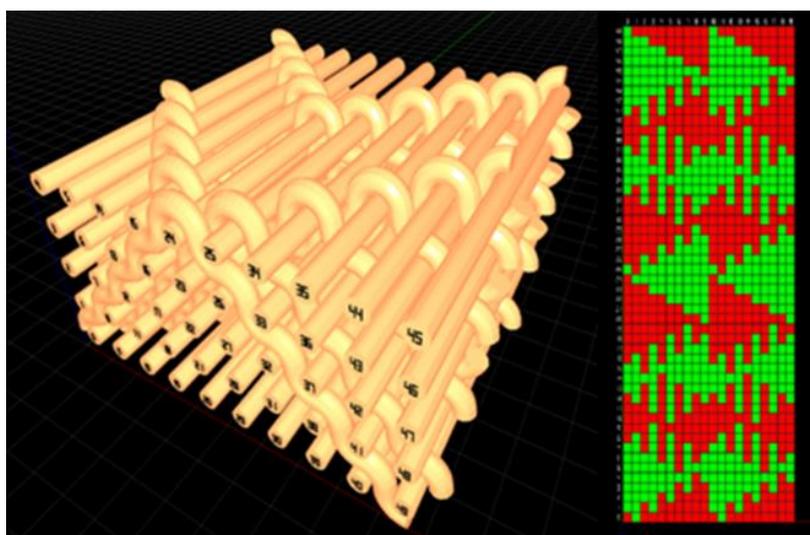


Рис. 1. Пример построения фрагмента 3D-ткани и картона для системы управления зевобразованием станка

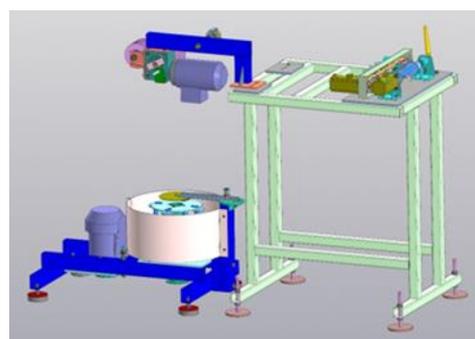


Рис. 2. 3D-модель перемоточно-крутильно-тростильного станка

Сегодня текстильная промышленность испытывает дефицит специалистов в области 3D-ткачества. Но чтобы изучать технологию, соответствующие приемы и оснастку, необходимо иметь учебные стенды или экспериментальные установки. Для достижения

данных целей на предприятии был сконструирован экспериментальный станок для изучения технологии 3D-ткачества. САМ-модуль управления данным станком и внешний вид 3D-станка представлен на рисунке 3.

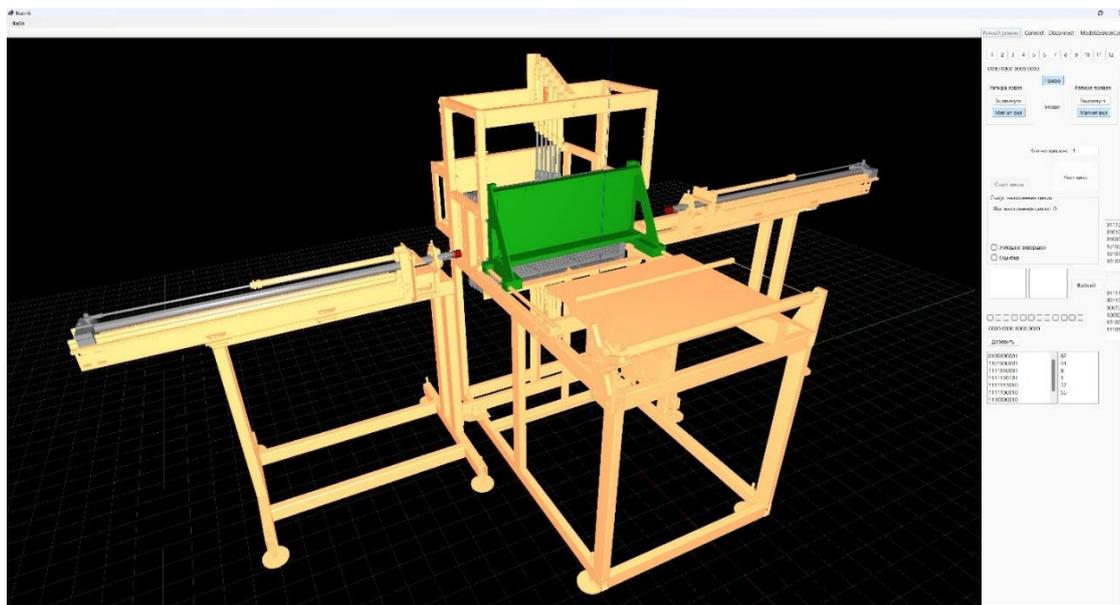


Рис. 3. САМ модуль управлением экспериментальным станком и внешний вид 3D-станка

Конечно, главной задачей является разработка промышленного оборудования для использования его на производстве. Для этих целей разработан цифровой программно-аппаратный комплекс для реализации технологии 3D-ткачества. Работы финансировались Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере – договор № 204ГРЦТС10-D5/65198 от 24.12.2020. САМ-модуль управлением данным станком и внешний вид 3D-станка представлен на рисунке 4.

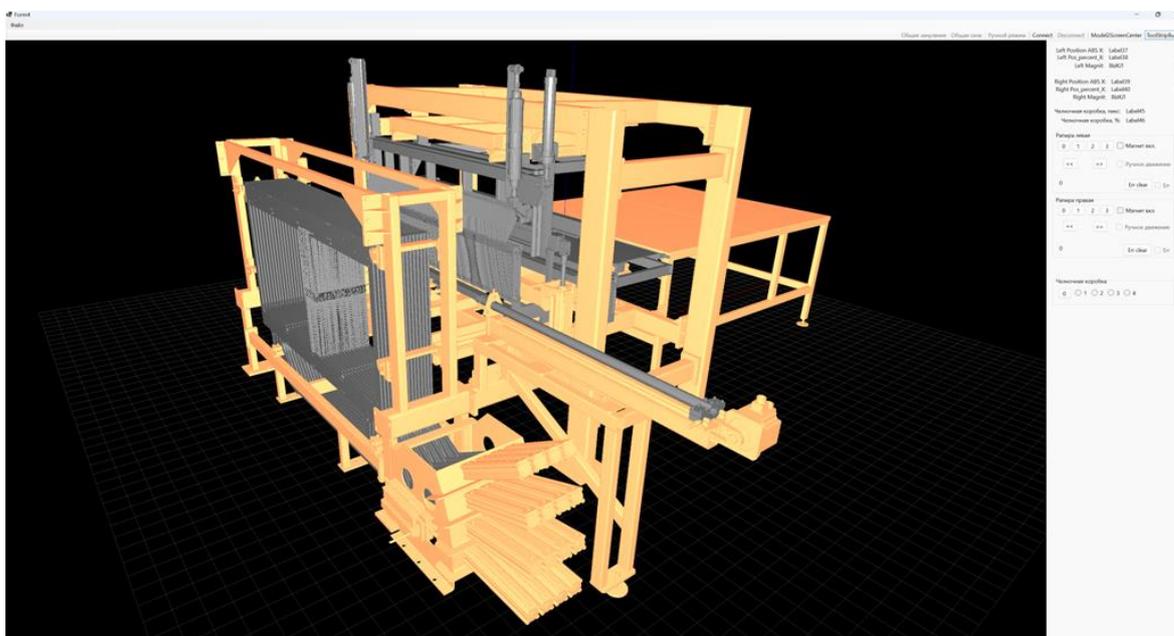


Рис. 4. Цифровой программно-аппаратный комплекс для реализации технологии 3D-ткачества

Принцип построения данных станков основан на реализации заданных движений в том количестве и с теми параметрами, которые нужны для получения заданной продукции в соответствии с разработанным техпроцессом. Заправочная ширина по основе – 150 см.

Влияние остаточных температурных напряжений на прочность композитных элементов конструкций

Д.А. Стекольников, О.Г. Лайкова
ООО «СКТБ «Пластик», г. Сызрань, Россия
E-mail: sopromatt@mail.ru

Создание поколения ракетно-космической техники с тактико-техническими характеристиками, которые опережают перспективные мировые аналоги, является одной из важных государственных задач. Успешное решение указанной задачи опирается на современные достижения в области проектирования, конструирования, технологии изготовления и сборки изделий из современных конструкционных материалов, в том числе композитов.

Применение композиционных материалов (КМ) зачастую приводит к необходимости создания новых подходов к изготовлению деталей, совершенствованию принципов конструирования как непосредственно деталей, узлов, так и конструкции в целом. Для достижения максимального положительного эффекта от применения КМ непосредственно в конструкциях необходимо решить целый комплекс разнонаправленных задач, связанных не только с конструированием изделия, но и с выбором химических, механических и тепловых воздействий.

Одними из самых востребованных в современных реалиях являются силовые космические размеростабильные композитные конструкции. Стоит отметить, что для обеспечения высоких технологических и эксплуатационных параметров указанных конструкций необходимо учитывать ползучесть волокнистых КМ при различных параметрах окружающей среды. С точки зрения практики проектирования размеростабильных силовых конструкций значительный интерес представляет зависимость прочности элемента композитной конструкции от технологических и эксплуатационных температурных воздействием с учетом ползучести при различных схемах армирования.

Эффективные характеристики слоистого композита возможно получить расчётным способом по свойствам матрицы и наполнителя и их объёмному содержанию в композите, либо с помощью эксперимента путём измерений в зависимости от вида нагружения. Первый способ не всегда обеспечивает получение точных характеристик, однако является универсальным при проектных и сравнительных расчётах, а также при выборе технологических режимов изготовления изделия или его элементов. Экспериментальный путь является наиболее достоверным, хотя и довольно трудоёмким, что связано, в первую очередь, с необходимостью повторения эксперимента при изменении как соотношения, так и непосредственно самих компонентов КМ. Для сравнительного анализа расчётных и экспериментальных значений механических характеристик многослойного КМ были изготовлены плоские образцы углепластика с различными схемами армирования. При изготовлении образцов была использована лента углеродная конструкционная в качестве наполнителя и эпоксиноволачная фенольнобакелитовая смола в качестве связующего.

Авторами также проведён анализ влияния остаточных температурных напряжений, возникающих в процессе охлаждения при изготовлении, на прочностные характеристики композита и, как следствие, несущую способность слоистых композитных конструкций, который показал возможность снижения значений остаточных напряжений с помощью использования определённых технологических приёмов.

Проведённые работы позволили создать элемент силовой размеростабильной слоистой космической конструкции из волокнистых КМ с высокими характеристиками несущей способности, для которой найдены решения на уровне синтеза материала с минимально возможными коэффициентами температурного расширения с учётом его вязкоупругих свойств и результатов проектных расчётов с применением комплексных подходов конструирования и технологии изготовления. Полученные результаты имеют прикладное значение и могут быть использованы предприятиями композитной отрасли при создании целого ряда перспективных изделий из волокнистых композиционных материалов.

Методы построения определяющих соотношений для вязкоупругих сред

А.М. Думанский, М.А. Алимов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), г. Москва, Россия

Email: aldumans@yandex.ru

Проектирование и подбор материалов для элементов конструкций современной техники, особенно аэрокосмического назначения, требует разработки методов построения определяющих соотношений, связывающих механические свойства с условиями эксплуатации, включая экстремальные. Сложный комплекс воздействий на конструкции подразумевает создание адекватных моделей, позволяющих описывать текущее состояние конструкции и материала.

Практически все конструкции эксплуатируются при переменных режимах механического и иных типов воздействия, и определяющие соотношения должны включать параметр времени. К такого рода соотношениям можно отнести уравнения вязкоупругости, производных дробного порядка и наследственных соотношений интегрального типа, базирующиеся на суперпозиции Больцмана – как возможности учета предыстории воздействий.

Представления теории вязкоупругости основаны на последовательно-параллельном соединении упругих пружин и вязких сопротивлений приводят к моделям дифференциального типа. Увеличение числа элементов повышает порядок дифференциального уравнения. Основную сложность представляет не решение уравнения, а составление адекватного дифференциального уравнения, отражающего реакцию материала на широкий спектр внешних воздействий. Для решения задач используют известные стандартные модели, относящие материалы к двум условно разделяющимся типам: твердым или жидким. Для удовлетворения опытным данным используются обобщенные модели, включающие большое количество элементов. Понятие дробное производной естественным образом вытекает из попытки осреднения механического поведения упругой пружины и вязкого элемента, которые имеют в рамках теории вязкоупругости производные нулевого и первого порядка. В этом случае нет необходимости увеличивать порядок дифференциального уравнения для повышения точности описания механических свойств. Следует отметить, что интегральная форма представления дробной производной является частным случаем соотношений наследственного типа, которые представляют собой наиболее общую форму связи между напряжениями и деформациями.

Общая теория построения определяющих соотношений основана на установлении связи между материальными функциями, определяющими различные формы внешнего воздействия. К таким функциям относятся функции ползучести, релаксации, экспериментально определяемые при проведении соответствующих испытаний, при циклическом нагружении определяются комплексные модули и тангенс угла механических потерь.

Для практических задач наряду с классическими методами решения дифференциальных и интегральных уравнений используются интегральные преобразования и операторные методы, позволяющие формализовать получаемые решения и устанавливать связь между материальными функциями. Использование теории обобщенных функций позволяет получать решения задач, связанных с динамическими и ударными воздействиями. Использование теории обобщенных функций позволяет также оценивать механическое поведение материалов при сложных, переменных во времени, нагрузках, например, при ступенчатом, пилообразном, трапецеидальном циклах нагружения.

Развитые методы аналогий, изменяющие шкалу времени, позволяют учитывать влияние температуры, влажности, радиационных и других воздействий.

Влияние процесса уплотнения на свойства полимерных композиционных материалов

А.А. Алексеев, А.А. Климов, М.Ю. Корниенко, А.А. Носов
АО «ВНИИНМ», г. Москва, Россия
E-mail: AntAnAlekseev@bochvar.ru

Углепластики обладают комплексом уникальных механических и теплофизических свойств, что обеспечивает их эффективное использование в качестве высоконагруженных конструкционных материалов. Основными преимуществами конструкций из углепластиков являются малая масса, высокая прочность, жесткость и износостойкость, а также уникальные теплофизические и трибологические свойства. Эти характеристики сильно зависят от величины структурных дефектов, плотности композита. Для уменьшения пористости материалов часто используют методы формования с применением давления.

Сначала перед процессом теплового прессования подготавливается стальная пресс-форма с полостью под размеры заготовки из полимерного композиционного материала, а также стержень под внутренний диаметр заготовки для предотвращения ее разрушения в процессе приложения давления.

Формование армированной углеволокном полимерной матрицы из ПЭЭК производится в вакуумно-компрессионной печи с графитовыми нагревателями и футеровкой, которая позволяет проводить высокотемпературный отжиг тугоплавких материалов до 2100 °С при давлении прессования до 200 МПа, что обеспечивает получение высокоплотных заготовок с плотностью, близкой или равной теоретической.

После подготовки в полость матрицы пресс-формы загружается предварительно формованный композиционный материал, во внутреннем диаметре которого установлен стальной стержень. При замыкании пресс-формы под действием силы пресса вакуумно-компрессионной установки верхний пуансон создает давление на прессуемый материал. Под действием этого давления и теплоты от нагретой пресс-формы материал размягчается и заполняет формообразующую полость пресс-формы.

Прессование армированной полимерной матрицы в вакууме при давлении 10^{-3} Па проводится по режиму в два этапа. Первый этап – нагрев до температуры плавления связующего, выдержка при этой температуре при пониженном давлении. Данная температура обеспечивает нахождение связующего в состоянии низкой вязкости, вместе с тем, не превышая температуру начала деструктивных процессов, что увеличивает степень пропитки углепластика. После выдержки проводится остывание печи до температуры стеклования полимера, после чего проводится выдержка при повышенном давлении. По окончании выдержки температуру в рабочей камере установки постепенно снижают вплоть до полного остывания, затем давление прессования также снимают. Далее пресс-форма раскрывается, и из нее извлекается заготовка. После очистки и удаления остаточных дефектов после проведенного высокотемпературного режима технологическая оснастка может использоваться снова.

После проведения теплового прессования полученная заготовка направлялась на металлографический анализ на сканирующем электронном микроскопе. Установлено, что трещины и поры в структуре композита отсутствуют, средняя плотность, измеренная методом гидростатического взвешивания, возросла до 1,81 г/см³ (100 % от теоретической), а предел прочности на растяжение композиционного материала увеличился на 20 % от исходного состояния композита.

Конструктивно-технологические особенности при проектировании и изготовлении локальных зон усиления в крупногабаритных трехслойных изделиях из полимерных композиционных материалов

Н.В. Степанов, А.А. Смирнов, В.О. Петров

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», Обнинск, Россия

E-mail: stepanov@technologiya.ru

При разработке крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), предусматривающих формирование локальных усиления, а также последующую установку металлических комплектующих, важно учитывать технологические особенности изготовления композитной части изделия и установки металлических комплектующих. Особое внимание при этом следует уделять зонам локальных усиления, выступающим за основной теоретический контур, и примыкающим к этим зонам изделиям из металла (кронштейнам, фитингам, втулкам и т.п.).

На рисунке 1 представлен корпус двигательного отсека перспективного пилотируемого транспортного корабля нового поколения (ПТТК НП) «Орел», усиленный продольными и поперечными элементами трапецевидного сечения и оборудованный рядом металлических комплектующих, предназначенных для соединения в зоне стыка со смежными отсеками и для установки навесного оборудования. Следует отметить, что в изделии использовано более шестисот элементов из алюминиевых и титановых сплавов



Рис. 1. Корпус двигательного отсека ПТТК НП «Орел»

В связи с особенностями вакуум-автоклавного формования усиления следует учитывать увеличение размеров выложенного из препрега пакета в ходе приложения давления и закладывать данное обстоятельство в допуски при проектировании изделия. Кроме того, необходимо принимать во внимание тот факт, что на крупногабаритном изделии криволинейной геометрии сложно зафиксировать расположение формирующих оснащений (цулаг), что ведет за собой смещение усиливающих элементов. В ряде случаев это может привести к проблемам выполнения заложенных в конструкторской документации допусков, а при расположении металлических элементов вплотную к усилениям из ПКМ или с частичным перекрытием не позволяет провести монтаж без доработки (рис. 2).



Рис. 2. Установка кронштейнов с частичным перекрытием продольных усиливающих элементов

Для минимизации трудностей при монтаже элементов оснащения следует придерживаться нижеизложенных рекомендаций:

- при проектировании увеличивать допуск (как правило, до 3-5 мм при габаритных размерах изделия более 2000 мм) на расположение усиливающих элементов и, при возможности, размеры данных элементов;
- не допускать размещения металлических деталей вплотную к композитным усилениям или с частичным их перекрытием;
- учитывать возможные смещения усиления в процессе вакуум-автоклавного формования;
- закладывать в конструктив изделия технологические припуски, обрабатываемые в процессе проведения монтажно-сборочных работ и не влияющие на массовые и прочностные характеристики изделия в целом;
- при разработке технологии формования усиления следует обеспечить, с одной стороны, свободный ход цулаг, с другой – их взаимофиксацию для ограничения смещений усиливающих элементов из ПКМ в процессе формования.

Создание крупногабаритных ферм, разворачиваемых в космическом пространстве из трансформируемых углепластиковых элементов

О.А. Белов¹, А.П. Белоглазов², А.В. Верстаков³, А.Г. Еремин³

¹АО «Решетнев», г. Москва, Россия; ²ООО «Ниагара», г. Москва, Россия;

³МАИ (НИУ), г. Москва, Россия

E-mail: and.eremin0604@yandex.ru

Усложнение задач, возлагаемых на космические аппараты (КА), вызывают необходимость разработки конструкций, ранее не применявшихся в космической технике. Среди них организация трансформируемых систем в виде различных ферм, способных в стартовом положении пребывать в компактном, сложенном состоянии и затем после вывода на орбиту КА выдвигаться на заданное расстояние. В настоящее время разработан ряд таких конструкций, функционирование которых основано или на раздвижении сложенных жестких элементов – типа «телескоп», – либо на раскладывании сложенных балок – типа «кузнечик» – с последующей фиксацией в развернутом виде. Все эти системы характеризуются достаточно большими габаритами в стартовом положении и, соответственно, массой.

Предлагаемая к рассмотрению система трансформирования основана на формировании фермы из первоначально гибких элементов, которые в стартовом положении КА могут быть компактно свернуты, а затем при раскручивании и соединении способны образовывать жесткую конструкцию. В качестве гибкого, формирующего ферму элемента выбран рукав из сваренных ультразвуком по кромкам углепластиковых лент на основе термопластичного связующего, например, полиэфирэфиркетона. Ферма образуется из трех рукавов, сматываемых с трех барабанов, размещенных на принадлежащем КА основании по сторонам равностороннего треугольника. Рукава при разматывании образуют в сечении чечевицеобразную форму с плоскими по краям кромками (рис. 1).

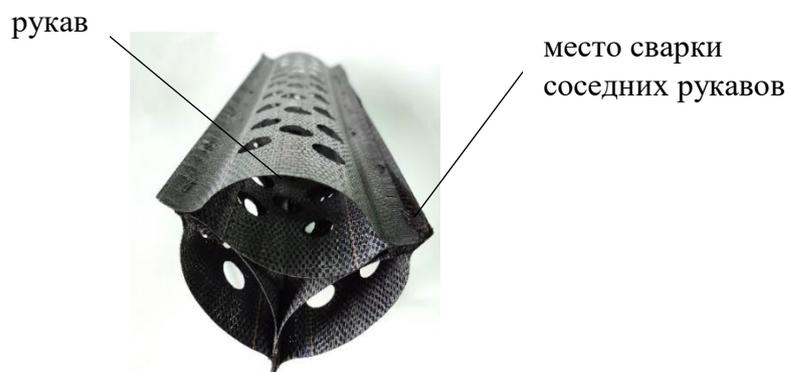


Рис. 1. Поперечный профиль фермы

Крепление рукавов между собой обеспечивается также ультразвуковой сваркой, выполняемой роликами, через которые проходят плоские кромки соседних рукавов. В результате формируется ферма из углепластиковых рукавов с сечением, представляющим треугольник из трех чечевицеобразных профилей, которая способна в орбитальном положении КА отодвинуть от него площадку с размещенным на ней оборудованием. Сама площадка закреплена на торце соединенных в единую конструкцию рукавов.

Расчет жесткостных и прочностных характеристик полученной конструкции проводился в программном комплексе ANSYS. Были рассмотрены различные варианты

Разработка технологии изготовления панели прирабатываемой сложной геометрической формы ДУ ПД-14 с подбором материалов отечественного производства

Д.А. Волков, А.В. Горлов, А.В. Осауленко, И.В. Поздеева, **А.А. Шаяхметов**
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Одной из важнейших задач при разработке перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) является обеспечение минимально допустимых зазоров между рабочими лопатками и корпусом вентилятора, компрессора или турбины с целью повышения их коэффициента полезного действия (КПД).

Согласно зарубежным и отечественным исследованиям, до 5% КПД двигателя теряется из-за больших радиальных зазоров. Допуски изготовления и тепловые деформации деталей ГТД в процессе работы двигателя определяют минимальный радиальный зазор, гарантирующий отсутствие касания корпуса наружной кромкой лопаток. Во избежание поломок и износа лопаток разрабатываются конструкции панелей со специальными уплотнительными и способными к истиранию материалами.

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» создано серийное производство композитных прирабатываемых панелей для двигательных установок (ДУ) отечественных самолетов нового поколения – ДУ ПД-14.

Разработанная на раннем этапе конструкция прирабатываемой панели имела существенный недостаток, связанный с отсутствием защиты от сколов прирабатываемого сектора панели, расположенной в проточной части двигателя. С целью решения данной проблемы была разработана усиленная стеклопластиком в зонах воздействия льда со стороны направления потока конструкция прирабатываемых панелей, изготовление которых проводилось в соответствии с программой по импортозамещению основных материалов.

В обеспечение достижения поставленной цели были выполнены следующие работы:

1. Проведен выбор отечественных импортозамещающих материалов для применения в многослойных композиционных прирабатываемых панелях двигателя ПД-14.
2. Получены сравнительные прочностные характеристики материалов отечественного и импортного производства, используемых при изготовлении прирабатываемых панелей, эксплуатируемых при рабочих температурах до 150 °С.
3. Разработана технология изготовления прирабатываемых панелей усиленной конструкции (рис. 1) с использованием выбранных отечественных материалов.
4. Проведены работы по контролю прирабатываемых панелей усиленной конструкции, изготовленных из выбранных отечественных материалов, на соответствие конструкторской документации.



Рис. 1. Прирабатываемая панель ДУ ПД-14

В результате проведенной работы был разработан технологический процесс изготовления прирабатываемых панелей ДУ ПД-14. Технологическое освоение новых материалов производства НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ», АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», ООО «ИТЕКМА», а также разработки ПАО «ОДК-Сатурн» позволило обеспечить возможность изготовления прирабатываемых панелей для ДУ ПД-14 на отечественной базе материалов.

Органопластики на основе арамидных волокон, технологические особенности применения при изготовлении элементов конструкций

Г.С. Кулагина, Г.Ф. Железина, Н.А. Соловьева, А.Ч. Кан, Д.С. Кондрашова, Т.Р. Аюпов
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва, Россия
E-mail: organit611@viam.ru

Органопластики на основе арамидных волокон – материалы, обладающие уникальным комплексом свойств – таких как низкая плотность, высокая прочность при растяжении, стойкость к удару, эрозионному воздействию, механическим повреждениям и вибро-акустическим нагрузкам, – благодаря которым они нашли широкое применение в различных типах конструкций.

В данной работе рассмотрены примеры применения арамидных органопластиков в авиастроении и технологические особенности изготовления элементов конструкций из органопластиков.

Конструкционные и ударостойкие органопластики применяются для изготовления средненагруженных элементов конструкций. Это легкие обшивки планера вертолета, обшивки хвостовых секций, несущих винтов вертолетов, обшивки зализов и носков крыла самолетов, панели пола и др. Органопластики со специальной структурой используются для изготовления деталей, подвергающихся в процессе эксплуатации механическому удару, в том числе высокоэнергетическому воздействию, – перегородка кабины экипажа самолета, защитные кожухи.

Изготовление элементов конструкций из арамидных органопластиков осуществляется из препрегов, содержащих армирующий наполнитель (ткань, жгут) и реакционноспособное связующее (эпоксидное, фенолоформальдегидное) растворного или расплавного типов методом выкладки с последующим автоклавным или прессовым формованием. Данная технология позволяет производить формование крупногабаритных деталей со сложной конфигурацией и поверхностью кривизны.

В таблице 1 приведены некоторые свойства современных конструкционных и ударостойких органопластиков на основе арамидных волокон, разрабатываемых в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Другой способ применения арамидного органопластика – в качестве лакирующего слоя на поверхности ПКМ, например, угле-, стеклопластиков или металлических сплавов. Так, предложено использовать органопластики в составе защитных экранов, обеспечивающих «птицестойкость» закрылков самолета с обшивками из углепластика. Были проведены испытания конструктивно-подобных образцов в виде трехслойные сотовых панелей типовой конструкции с двумя обшивками из углепластика, а также с сотовым наполнителем из фольги на стойкость к механическому удару падающего груза массой 9 кг с высоты 30 м. В ходе испытаний показана эффективность применения органопластиков и выбрана оптимальная структура защитного экрана, включающая ударостойкий органопластик толщиной 0,9 мм и конструкционный герметичный органопластик. Предложено размещать экраны на фронтальной и тыльной сторонах закрылка.

Другой технологией, применяемой при изготовлении конструкций из арамидных органопластиков, является метод намотки нити или жгута, пропитанных связующим, на поверхности оснастки с формированием детали требуемой формы и толщины с последующем отверждением связующего. Методом мокрой намотки изготавливают, например, корпуса вентилятора газотурбинных авиационных двигателей, способные во внештатных ситуациях (например, при попадании в двигатель инородных тел) обеспечить защиту планера и систем жизнеобеспечения самолета от повреждения осколками разрушенных механизмов. Метод намотки также реализован при изготовлении силовых элементов конструкций. Особенность данного технологического решения заключается в

применении однонаправленного препрега в виде ленты на основе расплавленного связующего и арамидного жгута. Способ реализован при изготовлении торсиона рулевого винта вертолета, органопластик в данной конструкции способен выдерживать высокие растягивающие нагрузки 2000 МПа.

Таблица 1. Свойства органопластиков различного назначения на основе арамидных волокон

Характеристика	Тип органопластика		
	Однонаправленный органопластик	Конструкционный органопластик повышенной водостойкости	Ударостойкий органопластик
Состав (наполнитель; связующее)	Жгут из арамидных нитей Русар-НТ, 600 текс; Расплавное связующее на основе эпоксидных смол и термопластичного модификатора.	Ткань из арамидных нитей Русар-НТ, поверхностная плотность 80-90 г/м ² ; Расплавное связующее на основе эпоксидных смол и термопластичного модификатора.	Ткань из арамидных нитей Руслан, поверхностная плотность 220 г/м ² ; Клеевая пленка на основе фенольных смол и каучука.
Технология	Препреговая; Автоклавное формование.		
Плотность, г/ м ²	1381–1385	1340	1020–1100
Толщина монослоя, мм	0,22	0,125	-
Модуль упругости при растяжении, ГПа	97–106	38–43	8,0–8,2
Прочность при растяжении, МПа	1920–2200	800–960	650–720
Модуль упругости при изгибе, ГПа	72–75	25–32	1,6–2,1
Прочность при изгибе, МПа	800–830	460–530	38–43
Ударная вязкость, кДж/м ²	295–310	230–290	–
Стойкость к баллистическому воздействию по АП-25 п. 25.795	–	–	Непробитие листа с поверхностной плотностью 5,4 кг/м ²

Таким образом, в работе рассмотрены технологические особенности применения арамидных органопластиков в авиационных конструкциях различного назначения и показана их эффективность в решении различного рода конструкционных задач.

Новые разработки АО «НИИ полимеров» в области полимерных материалов

П.В. Корниенко, В.П. Луконин
АО «НИИ полимеров», г. Дзержинск, Россия
E-mail: kornienko@nicp.ru

Научно-исследовательский институт химии и технологии полимеров имени академика В.А. Каргина на протяжении 75 лет является одним из ведущих научно-производственных центров компетенции в области разработки и получения различных полимерных материалов. В докладе представлены основные результаты научно-исследовательской деятельности АО «НИИ полимеров» за последние годы.

Ключевыми продуктовыми направлениями института являются:

- конструкционные вспененные материалы;
- органическое стекло и оптические (со)полимеры;
- клеевые и герметизирующие материалы;
- (со)полимеры винилового ряда.

Разработана и внедрена в производство технология получения конструкционных теплостойких полигларимидных пенопластов «Акримид» на основе сополимеров акрилонитрила и метакриловой кислоты. Установлены основные физико-химические закономерности процессов синтеза и пенообразования, влияние природы и концентрации функциональных компонентов на комплекс параметров пеноматериалов. Уникальный комплекс температурно-деформационных параметров полимерной матрицы позволяет безальтернативно применять «Акримид» в качестве легкого внутреннего наполнителя в современных технологиях формирования многослойных композитных деталей и элементов авиационного и технического назначения.

Изучены рецептурно-технологические особенности получения конструкционных пенопластов на основе поливинилхлорида. Особенностью таких пеноматериалов является наличие в структуре полимерной матрицы взаимопроникающих полимерных сеток из термопластичного ПВХ и системы, сформированной в результате комплекса химических взаимодействий изоцианатных, аминных и ангидридных групп. Установлены основные закономерности влияния химической структуры полимер-полимерной матрицы на физико-химические и температурно-деформационные свойства пенопластов.

Разработаны методы получения оптических конструкционных полимеров различного назначения. Показана принципиальная возможность получения оптических конструкционных полимеров с теплостойкостью (180–185) °С на основе сополимеров малеимидов, метакриловой кислоты, эфиров α -оксиакриловой кислоты и стирола. Установлены рецептурно-технологические параметры получения оптических детекторов квантовых частиц на основе полиметилметакрилата с применением функциональных органических соединений (системы функциональных добавок (первичный сцинтиллятор – спектросмещающий «агент»)) в области (400–420) нм. Разработаны технологические подходы для получения оптического монолита на основе полиметилметакрилата толщиной 300 мм для применения в остеклении техники, работающей под сверхвысоким давлением. Определены рецептурные составляющие процессов получения функциональных светофильтров различного назначения.

Разработан ряд анаэробных адгезивов (клеи, фиксаторы, герметики, связующие, антипоры и др.) на основе (мет)акрилатов, уретан(мет)акрилатов и др.: тиксотропный герметик Анатерм-527 с повышенной вязкостью и «контролируемой» прочностью; Анатерм-508 для уплотнения неподвижных разъемных фланцев; термоотверждаемая композиция Анатерм-116 для склеивания материалов с различными коэффициентами термического расширения; Анатерм-ПК82 горячего отверждения для вакуумной пропитки литевых деталей; термоотверждаемая композиция Анатерм-222 для склеивания металлов, в том числе

алюминия и его сплавов; Анатерм-118 для сборки латунной трубопроводной арматуры; Анатерм-53 двойного механизма отверждения, способный быстро отверждаться в узком металлическом зазоре и на поверхности изделий под действием УФ-излучения при автоматической сборке.

Созданы новые марки цианакрилатных клеев Анатерм ЭЦА-В и Анатерм ЭЭЦА, сочетающие в себе быстроту склеивания, прочность соединения и легкость нанесения. Анатерм ЭЭЦА нашёл применение при производстве медицинских изделий.

Разработаны защитно-упрочняющие УФ-отверждаемые полимерные покрытия для оптических кварцевых волокон Квант-408/409, используемые при производстве оптического кабеля, покрытия Квант-410/411, которые применяются при создании волоконно-оптических гироскопов, а также клеи УФ-отверждения Квант-501, Квант-502, Квант-501М, обеспечивающие необходимые характеристики клеевых соединений при создании различных оптических приборов.

Для получения многослойных изделий конструкционной оптики в качестве промежуточных склеивающих материалов разработаны склеивающая полиуретановая заливочная композиция Унигерм-ПУ-1, а также пленочные клеи на основе полиуретана и поливинилбутирала, обеспечивающих комплекс оптических, физико-механических и адгезионных параметров.

Изучено влияние рецептурно-технологических параметров получения высокодисперсных (со)полимеров метил(мет)акрилата на химический и гранулометрический состав (микро)суспензионных частиц (со)полимера. Разработанные (со)полимеры находят широкое применение в быстроотверждаемых формовочных композициях различного назначения.

Разработаны методы синтеза низкомолекулярного и высокомолекулярного полифениленоксида – суперконструкционного полимера с уникальным комплексом физико-химических свойств, позволяющим применять разработанные материалы в изготовлении высокоэффективных диффузионных газоразделительных мембран специального назначения.

Созданы новые сополимерные клеи с постоянной липкостью на основе акриловых мономеров. Полученные адгезивы применяются в медицине для получения специальных пластырей.

Определены рецептурно-технологические параметры получения низкомолекулярного полистирола, применяемого в качестве загустителя в герметизирующих композициях и обеспечивающего необходимую вязкость с требуемыми показателями их «жизнеспособности».

Исследовано влияние химической природы и концентрации эмульгирующих систем для водных высококонцентрированных акриловых латексов, широко применяемых в качестве пленкообразующих полимеров в лакокрасочных материалах, клеях и герметиках. Разработан эффективный метод получения анионоактивных эмульгаторов на основе аммонийных или натриевых солей сульфэтоксилированных оксиэтилированных алкилфенолов.

Применение конструкционных клеев ИТЕКМА в авиакосмической отрасли

В.Н. Кондратьев

ООО «ИТЕКМА», г. Москва, Россия

E-mail: sales@itecma.ru

В связи с введением санкций против предприятий авиационной отрасли России особенно остро встал вопрос об импортозамещении полимерных композиционных материалов (ПКМ), применение которых по мере развития новых программ постоянно увеличивается. После успешного замещения углеродных лент и эпоксидных связующих иностранного производства для изготовления композитных кессона крыла и центроплана самолета МС-21 перед компанией ООО «ИТЕКМА» со стороны АО «АэроКомпозит» и ПАО «Корпорация «ИРКУТ» (ПАО «Яковлев») была поставлена новая, не менее амбициозная, задача замены зарубежных эпоксидных клеев холодного отверждения Hysol 9394 и Hysol 9396. Эти клеи нашли широкое применение при изготовлении большинства гражданских самолетов во всем мире, а также при ремонте композитных деталей без съема с воздушного судна (ВС) благодаря высокой адгезии к ПКМ, отличным физико-механическим свойствам, химической стойкости и технологичности.

ООО «ИТЕКМА» совместно с АО «ИНУМиТ» разработало собственную линейку эпоксидных клеев А-77Н с низкой вязкостью и тиксотропный АТ-44К с температурой эксплуатации от минус 60 до плюс 250 °С, не уступающие по своим характеристикам зарубежным аналогам (рис. 1).



Рис. 1. Семейство эпоксидных клеев холодного отверждения ООО «ИТЕКМА»

При исследовании конструктивно-подобных образцов (КПО) с приклеенными к ним накладками на основе стеклоткани ТСТ/ЭЗ, пропитанными клеем А-77Н, моделирующих зону ремонта композитных лонжеронов МС-21, выявлено, что клей А-77Н обладает отличным сопротивлением циклическим нагрузкам. Разрушение и отслаивание накладок, изготовленных на основе клея А-77Н, не происходило даже после 1 000 000 циклов нагружений, а остаточная прочность при растяжении КПО составляла более 420 МПа.

Также проведено опробование тиксотропного клея АТ-44К в качестве «жидкой прокладки» в конструкции крыла перспективного широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета в качестве альтернативы стальным, что позволит снизить трудоемкость сборочного процесса и снизить массу конечного изделия.

Помимо конструкционных эпоксидных клеев, используемых в конструкции планера самолета МС-21, перед отечественным авиастроением остро стал вопрос импортозамещения интерьерных материалов, используемых при изготовлении внутренней отделки воздушного судна (панели пола, панели багажного отсека, сервисные зоны и т.д.).

ООО «ИТЕКМА» совместно АО «ИНУМиТ» разработали собственную линейку интерьерных материалов (препреги, паста, клеевые и вспенивающиеся клеевые пленки), в том числе тиксотропный клей (рис. 2), использующийся для формирования, склеивания готовых интерьерных композиционных панелей и их ремонта – АТ-44FR, который является аналогом клея 3M™ Scotch-Weld™ EC-7256 В/А.



Рис. 2. Пример применения клея АТ-44FR при изготовлении панелей интерьера ВС

Проведенные исследования показали, что АТ-44FR обладает высокой адгезией к ПКМ и удовлетворяет АП-25 Приложения F, часть I (a) и (b) (рис. 3). АТ-44FR успешно прошел опробование в конструкциях АО «УЗГА».



Рис. 3. Образец клея АТ-44FR после проведения испытаний по АП-25 Приложения F, часть I (a) и (b)

Лакокрасочные покрытия на основе полиорганосилоксанов модифицированных синтетическими термостойкими низкомолекулярными каучуками

П.А. Журавлев^{1,2}, М.А. Солдатов¹, Е.В. Миронова², А.В. Будаев^{1,2}

¹РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия;

²АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

В результате стремительного развития технологий авиастроения совершенствуются конструкции и агрегаты летательных аппаратов, что создает прецедент для эксплуатации на новых скоростных режимах. Для защиты антенного блока ракеты от перегрева материал для антенного обтекателя должен обладать хорошими теплоизоляционными свойствами, в частности низкой теплопроводностью. Радиопрозрачный антенный обтекатель принимает основную долю тепловых нагрузок на себя. Для защиты антенного блока используется конструкция из пористой кварцевой керамики, которая обладает комплексом свойств, а именно высокой термостойкостью, стабильными диэлектрическими свойствами, прочностью и хорошими теплозащитными свойствами. Одним из наиболее острых вопросов является защита поверхности кварцевой керамики от влаги окружающей среды. Для этих целей используют лакокрасочное покрытие снаружи и пропитывающий состав внутри.

Для защиты керамики от влаги применяют эпоксидные, фторопластовые и кремнийорганические покрытия. К разным типам изделий из керамики в зависимости от назначения предъявляются разнообразные требования по термостойкости, светостойкости и износостойкости. Например, эпоксидные ЛКМ обладают превосходными физико-химическими свойствами, но ограниченной термостойкостью до 250 °С. Кремнийорганические покрытия на основе полиорганосилоксанов, наоборот, имеют высокую термостойкость в виду природы силоксановой связи, но невысокие физико-химические свойства. В отличие от эпоксидных соединений проблему полиорганосилоксанов можно решить двумя способами: синтезом полиорганосилоксанов с лучшими прочностными характеристиками и модификацией. В данном докладе речь пойдет о способе модификации. Модификация с целью повышения эластичности за счет удлинения цепи полимера называется флексибилизацией. Флексибилизаторы бывают двух видов: инертные и с реакционноспособными группами. Инертные соединения, как правило, улетучиваются с течением времени при комнатной температуре и в силу своей химической природы не могут реагировать с модифицируемым полимером. Существенный недостаток таких веществ заключается в росте внутренних напряжений, снижении эластичности и снижении адгезионной прочности полимера с удалением добавки из системы. Реакционноспособные соединения лишены этого недостатка, поскольку они реагируют с олигомером за счет наличия функциональных групп, образуя цельную молекулу.

Химическая модификация может достигаться путем нарушения соотношения реагирующих в процессе отверждения функциональных групп. В составе модификаторов, как правило, содержится одна или несколько функциональных групп. Монофункциональные модификаторы, участвуя в реакции образования трехмерной полимерной матрицы, уменьшают общую функциональность системы и обрывают цепь. Полифункциональные модификаторы могут увеличивать межзольное расстояние в полимерной матрице за счет большей молекулярной массы, обеспечивая более свободное движение поперечно сшитой структуры под воздействием сил. Такими модификаторами могут послужить силиконовые термостойкие низкомолекулярные каучуки.

При работе с эластомерными добавками особое внимание следует уделить вопросу адгезии, так как зачастую имеет место ослабление адгезионных связей ввиду появившихся напряжений в системе. Именно поэтому для создания прочного и надежного адгезионного контакта нужно учитывать химическое сродство покрытия и материала. Исходя из этих

соображений для модификации были выбраны кремнийорганические связующие, так как известно, что между кремнийорганическим полимером и поверхностью керамики имеет место химическое сродство и образуются ковалентные связи, что улучшает адгезию.

В работе исследовалось влияние кремнийорганического каучука с концевыми гидроксильными группами на физико-механические свойства смеси полифенилсилоксана с глифталевой смолой. При отверждении компонентов протекает процесс поликонденсации СКТН и полиорганосилоксана, что увеличивает его молекулярную массу и усиливает структуру. Как известно, прочность плёнок возрастает с увеличением молекулярной массы полимера и степенью кристалличности.

В таблице 1 результаты испытаний систем с добавлением эластомерной добавки.

Таблица 1. Результаты испытаний систем с СКТН

Модификатор	СКТН А		СКТН Б		Без модификатора
	0,5	3	0,5	1	
Количество СКТН, м.ч.	0,5	3	0,5	1	0
Адгезия по методу решетчатых надрезов, балл, не более	1	1	1	2	1
Адгезия методом отрыва, МПа	1,5	1,8	0,8	0,6	0,8
Прочность пленки при ударе, см	100	60	25	20	55
Твердость покрытия по маятниковому прибору, усл. ед.	0,827	0,747	0,793	0,879	0,601
Эластичность пленки при изгибе, мм, не более	1	4	6	6	3

По результатам испытаний наблюдается улучшение свойств покрытий при модификации полифенилсилоксана с добавкой глифталевой смолы силиконовым термостойким низкомолекулярным каучуком марки А. В результате модификации СКТН А 0,5 м.ч. на 100 м.ч. кремнийорганического олигомера происходит существенное экстремальное увеличение ударно-прочностных свойств. Покрытие такого состава отличается хорошим внешним видом, розливом и блеском, не имеет фазовых включений и расслоений. Системы СКТН Б – полифенилсилоксан, СКТН А – полифенилсилоксан гетерогенны при содержании модификатора более 0,5 м.ч. по всей области фазовой диаграммы ввиду фазового разделения. Возможно соединения имеют ограниченную совместимость, и этот вопрос открыт для исследования. Модификатор, не растворившийся в полиорганосилоксане, локализуется в виде гетерофазных включений неправильной формы и может выполнять роль пластификатора. Дополнительно при введении в такие покрытия 1 м.ч. АГМ-9 улучшились визуальные характеристики покрытий, гетерофазные включения стали едва различимыми, но в то же время значительно ухудшились прочностные характеристики. Системы с АГМ-9 обладают повышенной твердостью и хрупкостью, вероятно, причиной этому послужило увеличение степени сшивки системы.

Полученные модифицированные при помощи СКТН-А смолы на основе полифенилсилоксана перспективны для создания на их основе грунт-эмалевых кремнийорганических лакокрасочных покрытий с улучшенными физико-механическими характеристиками для защиты поверхностей из пористой кварцевой керамики.

Клеевые препреги пониженной горючести

А.И. Старков, К.Е. Куцевич

НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва, Россия

E-mail: starkov_a@inbox.ru

У современных пассажирских магистральных самолетов площадь панелей, применяемых в конструкции интерьера и пола, составляет несколько сотен квадратных метров, при том что масса 1 м^2 – от 1,5 до 4 кг в зависимости от назначения панели. Вместе с тем, к материалам, применяемым в интерьерах воздушных судов, а также транспортных средств, предъявляются требования авиационных правил АП-25 по пожаробезопасности.

Ввиду существенного объема, занимаемого сотовыми конструкциями, в том числе панелями пола, во внутренней части самолета, а также ввиду наличия требований авиационных правил АП-25 к горючести конструкций панелей пола, в настоящее время необходима разработка составов и технологий изготовления композиционных материалов пониженной горючести на основе клеевых препрегов с теплостойкостью $80 \text{ }^\circ\text{C}$ и соответствующих требованиям АП-25 (приложение F, часть I) для изготовления деталей внутренней части самолета, в том числе сотовой конструкции панелей пола.

Исходя из анализа характера изменения реологических характеристик связующего в динамическом режиме, исследования времени гелеобразования связующего марки ВСК-14-6 в зависимости от температуры, определен температурный диапазон переработки клеевого связующего марки ВСК-14-6 в ходе технологического процесса изготовления клеевого препрега.

Использование двух- или многоступенчатого режима нагрева при отверждении связующего позволяет заметно снизить интенсивность его саморазогрева и обеспечить равномерность отверждения композиционного материала по всей толщине. С учетом установленной температуры пика реакции отверждения клеевого связующего марки ВСК-14-6 был смоделирован трехступенчатый температурно-временной режим отверждения клеевого препрега углепластика марки ВКУ-59. Режим отверждения разработан с учетом тепловыделений в процессе отверждения клеевого связующего.

Микроструктура углепластика подтверждает вывод о высокой проникающей способности данного связующего и его способности заполнять пространство между моноволокнами наполнителя размером меньше 1 мкм , благодаря чему формируется композиционный материал, который обладает бездефектной структурой, высоким качеством с минимальным разбросом механических характеристик. Значимым различием строения граничного слоя «волокно–матрица» в углепластике и стеклопластике является наличие выраженных радиально ориентированных образований микродисперсной фазы в граничном слое в углепластике. Кроме этого, за счет оптимальных реологических характеристик связующего марки ВСК-14-6 пониженной горючести при температурах его переработки в клеевой препрег за счет равномерного распределения связующего в межволоконном пространстве наполнителя достигается эффект экранирования связующим моноволокон наполнителя, что также подтверждается результатами исследования микроструктуры материалов. Следствием этого является достижение пониженной горючести разработанных композиционных материалов – углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68.

Одним из важнейших вопросов обеспечения пожаробезопасности является надёжность экранирования зон с высокой вероятностью возникновения пожара (пожароопасных зон) от других элементов планера, пассажирских и багажно-грузовых отсеков.

Установлено, что углепластик марки ВКУ-59 и стеклопластик марки ВПС-68 на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 по классификации АП-25 (приложение F, часть I, п. 853 а, i) по горючести классифицируются как самозатухающие.

Установлено, что образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых препрегов угле- и стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 отвечают требованиям АП-25 (приложение F, часть I).

Углепластик марки ВКУ-59 со схемой армирования $[0/-45/90/+45]_{4s}$ после воздействия внешних факторов демонстрирует высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств при изгибе и сжатии. Уровень сохранения свойств при сжатии при температуре испытаний 20 °С лежит в интервале от 83,6 до 93,7% относительно исходных значений, при температуре испытаний 80 °С – от 80,2 до 96,7%. Уровень свойств при изгибе при температуре испытаний 20 °С изменяется от 87,8 до 103,8% относительно исходных значений, при температуре испытаний 80 °С – от 71,5 до 102,3%. Высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств, в том числе при повышенной температуре, свидетельствует о стойкости углепластика марки ВКУ-59 к факторам внешней среды и действию химических сред, таким как вода, влага, топливо ТС-1 и масло ИПМ-10.

Уровень свойств при сжатии относительно исходных значений для стеклопластика марки ВПС-68 со схемой армирования $[0]_{13}$ при температуре испытания 20 °С находится в интервале от 68,7 до 88,2%, при 80 °С – от 70,1 до 103,4 %; при изгибе при 20 °С – от 81,2 до 104,5%, при 80 °С – от 69,8 до 105,8%. Высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств при изгибе, в том числе при рабочей температуре, свидетельствует о стойкости стеклопластика марки ВПС-68 к воздействиям факторов внешней среды и химических сред, таких как вода, влага, топливо ТС-1 и масло ИПМ-10.

Выявлены технологические особенности процессов формования композиционных материалов из препрегов на основе клеевого связующего ВСК-14-6 и угле- и стеклонаполнителя, учитывающие характер изменения реологических характеристик связующего в процессе его отверждения, что обеспечивает изготовление композиционных материалов различного типа – толстостенных, характеризующихся равномерным распределением связующего по объему материала, и трехслойных сотовых, отличающихся отсутствием потеков связующего по торцам сотового заполнителя – и достижение максимальной прочности клеевой конструкции.

Проведена сравнительная оценка образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 в сопоставлении с существующими панелями пола для изделий Ил-114, Ил-96, Ту-204, Ту-214.

Влияние режима отверждения на физико-механические свойства бисмалеимидного пленочного клея

В.Н. Мосиук, М.В. Ерёмин, О.В. Томчани

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: lab.em@technologiya.ru

Многослойные сотовые конструкции в настоящее время широко внедрены в изделия авиационной отрасли, обеспечивая легкость изделий при сохранении высокой прочности. Одним из компонентов для их изготовления являются пленочные клеи, определяющие прочностные свойства конструкции, выбор которых также зависит от требуемой максимальной рабочей температуры.

Для реализации максимальных значений теплостойкости и прочностных свойств разработчики пленочных клеев наиболее часто прибегают к модификации состава. Другим возможным способом варьирования характеристик в требуемом направлении является изменение режима отверждения. При разработке в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» бисмалеимидного пленочного клея ВПК-1 ТУ 1-596-586-2024 проводились исследования по влиянию режимов отверждения на его физико-механические свойства.

В таблице 1 приведены данные по влиянию температурно-временного режима отверждения пленочного клея ВПК-1 на температуру стеклования (T_g), определенную методом динамического механического анализа по падению модуля упругости.

Таблица 1. Зависимость температуры стеклования от температурно-временных режимов отверждения

Номер режима отверждения	Время выдержки, ч, при температуре, °С							T_g , °С
	170	220	230	240	250	260	270	
1	4	-	6	-	-	-	-	236
2	4	-	6	-	-	1	-	261
3	4	-	6	-	-	2	-	271
4	4	-	6	-	-	3	-	272
5	4	-	6	-	-	4	-	274
6	4	-	6	-	-	5	-	277
7	4	-	6	-	-	-	2	283
8	4	2	-	-	8	-	-	270
9	1	-	6	-	-	-	-	241
10	1	-	-	2	-	-	-	244
11	1	-	-	-	2	-	-	250
12	1	-	-	-	-	2	-	276
13	1	-	-	-	-	-	2	282

Анализ полученных данных показывает, что значения температуры стеклования повышаются как при увеличении длительности последней ступени изотермической выдержки (режимы 1-6), так и при росте ее температуры (режимы 8-13).

Одновременно с температурой стеклования режим отверждения оказывает влияние и на прочностные характеристики клеевого соединения. В таблице 2 приведена зависимость прочности при сдвиге клеевого соединения пластин из алюминиевого сплава Д16АТ от температуры стеклования при различных режимах отверждения.

Таблица 2. Зависимость прочности при сдвиге клеевого соединения от температуры стеклования

T _g , °C		236	240	241	243	250	270	276	280	283	287
Прочность клеевого соединения при сдвиге, МПа	при 25 °C	23,0	22,0	22,5	22,5	23,7	22,4	20,8	20,0	19,7	18,7
	при 250 °C	16,0	15,4	15,5	15,4	14,2	13,7	14,0	14,0	13,3	13,5

В большинстве случаев упруго-прочностные свойства реактопластов при повышении температуры испытаний сохраняются до достижения температуры стеклования, после чего происходит их резкое снижение, что связано с увеличением подвижности сегментов полимерной цепи. В клеевых соединениях эта зависимость более сложная и определяется не только свойствами самого материала, но и его взаимодействием со склеиваемыми поверхностями, а также, как показывают исследования, трещиностойкостью системы при температуре испытаний.

Как видно из представленных данных, режимы отверждения, позволяющие достигнуть температуры стеклования выше 270 °C, приводят к заметному снижению прочностных свойств разработанного пленочного клея при температуре помещения. Прочность при сдвиге клеевого соединения при повышенной температуре еще более чувствительна к выбранному режиму отверждения. Так, максимальных значений прочности при сдвиге при 250 °C удастся достигнуть при температуре стеклования пленочного клея (236-245) °C (рис. 1).

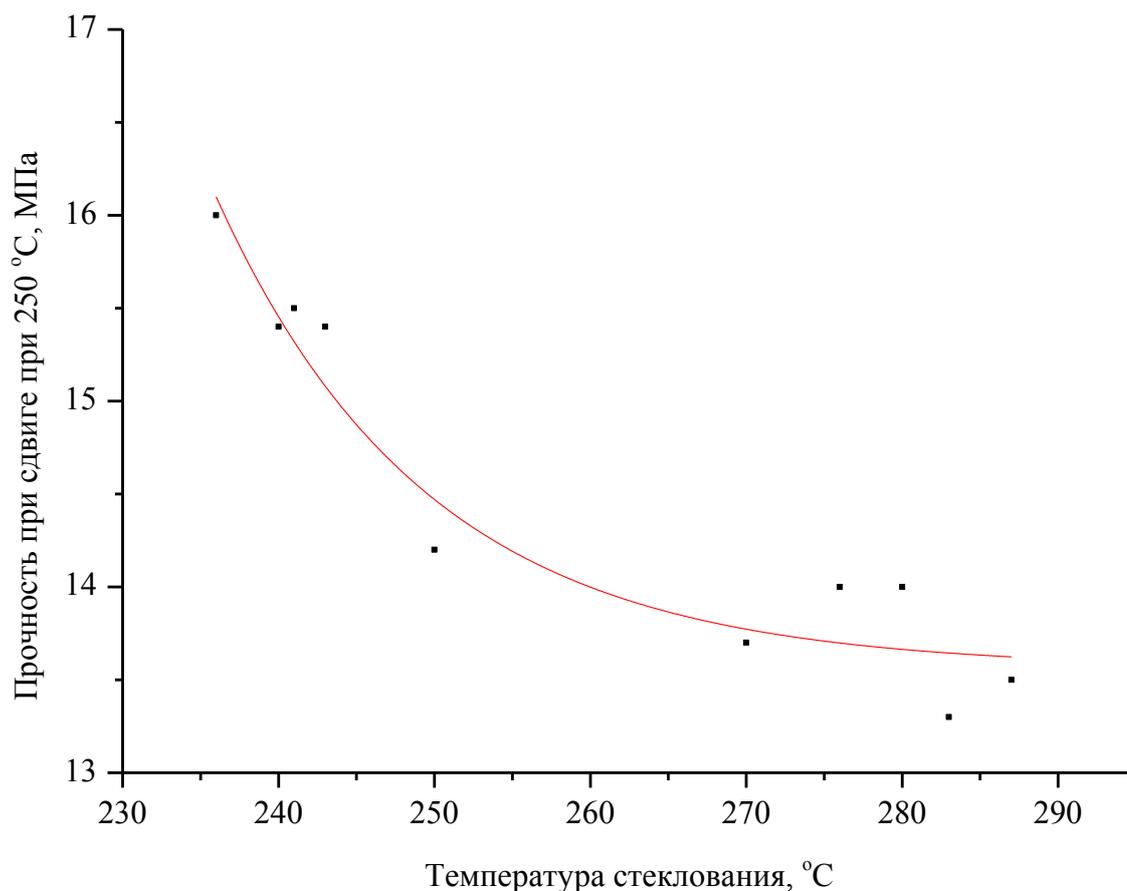


Рис.1. Зависимость прочности при сдвиге клеевого соединения при 250 °C от температуры стеклования

Влияние диоксида титана на течение расплава полипропиленовых композитов, наполненных скорлупой фундука

Н.Б. Арзуманова, Н.Т. Кахраманов

Институт полимерных материалов Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, г. Сумгайыт, Азербайджан

E-mail: arzumanova-nushaba@rambler.ru

Использование агроотходов в полимерных композитах – это не только шаг к устойчивому развитию, но и возможность для более эффективной утилизации отходов сельского хозяйства. Это инновационное решение, способствующее созданию более экологически чистых материалов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Скорлупа различных орехов является отличным источником возобновляемых лигноцеллюлозных материалов, который в больших количествах образуется на предприятиях по переработке орехов. Использование этих отходов в материаловедении позволит создать устойчивые и экономически эффективные полимерные композиционные материалы. Это может быть интересным направлением исследований, так как использование натуральных наполнителей может привести к улучшению свойств полимерных материалов и снижению их стоимости.

Свойства композитов на основе натурального волокна и полиолефина зависят от нескольких факторов. Основным недостатком при использовании агроотходов является относительно плохая совместимость с гидрофобной полимерной матрицей, что часто приводит к плохим механическим свойствам. Для достижения хорошей совместимости между полимерной матрицей и натуральным волокном требуется участие третьего компонента, который способствует взаимодействию гидрофобного полимера с гидрофильной скорлупой ореха, что в конечном итоге приводит к усилению межфазной адгезии и улучшает свойства композитов. Исходя из этого, целью данного исследования является изучение влияния диоксида титана как третьего компонента на текучесть расплава композитов на основе полипропилена, наполненных скорлупой фундука.

Фундук (лат. *Corylus avellana*), в частности, является одним из самых популярных и широко выращиваемых орехов в мире, который способен производить скорлупу большими объемами. В 2022-2023 гг мировой урожай фундука составил 585150 метрических тонн (в пересчёте на ядра), что является самым высоким показателем за последнее десятилетие. В связи с этим скорлупа фундука, полученная на местном рынке, была использована в качестве объекта исследования (рис. 1). Скорлупа фундука была измельчена до частиц необходимого размера, а размер частиц был определён с помощью прибора Mastersizer 3000 компании Malvern Instruments Ltd.



Рис. 1. Фундук (лат. *Corylus avellana*): а – скорлупа фундука; б – мука скорлупы фундука

Рандом сополимер полипропилена марки Hyosung Topilene R200P был использован в качестве связующего компонента (полимерной матрицы) в полимерных композиционных материалах. Он имеет плотность 0,900 г/см³, относительное удлинение при разрыве 830%, предел текучести при растяжении 27 МПа, модуль упругости при растяжении 900 МПа и показатель текучести расплава 0,25 г/10мин (230 °С/2,16 кг).

Для усиления межфазной адгезии между связующим компонентом (полимерной матрицей) и наполнителем в качестве добавки был использован диоксид титана. Диоксид титана [Титан оксид (IV) (двуокись)] – амфотерный оксид четырёхвалентного титана. В данной работе был использован пигментная марка Ctimea TiOx-220 диоксида титана производства российской предприятия ООО «Титановые инвестиции», его получают из ильменитовой руды с дальнейшей обработкой гидроксидами и оксидами металлов. Диоксид титана пигментный марки Ctimea TiOx-220 порошок белого цвета, не имеет специфического запаха, является нетоксичным, пожаро- и взрывобезопасным.

Полимерные композиты, содержащие полипропилен, диоксид титана и порошок скорлупы фундука получали путём смешивания на вальцах при температуре 170 °С. Полипропилен расплавляли на вальцах в течение восьми минут, после чего по частям добавляли диоксид титана, а затем порошок скорлупы фундука. Содержание диоксида титана была 1 мас. %, а содержание скорлупы фундука в композитах варьировалось от 1 до 30 мас. %. Полученный полимерный композит прессовали для изготовления пластин толщиной 1 мм при температуре 170 °С и выдерживали под давлением в течение 30 мин.

Показатель текучести расплава полимерных композитов определяли на капиллярном реометре марки CEAST MF50 фирмы INSTRON (Италия) согласно ASTM D1238. Измерение проводится при стандартном капилляре, имеющий высоту 8 мм и диаметр отверстия 2,095 мм. Вес испытываемого полимерного материала составлял 4,0 г. Время разогрева полимерного композиционного материала составила 7±0,5 мин. Показатель текучести расплава определяли под нагрузкой 2,16 кг при температуре 230 °С. Результатом испытания является выдавленная масса за единицу времени, указываемая в г/10 мин.

Метод определения показателя текучести расплава – широко признанный метод измерения, используемый для оценки текучести или вязкости расплава полимерных материалов. Индекс текучести обратно пропорционален вязкости расплава. Чем больше показатель текучести расплава полимерного материала, тем меньше его вязкость. Он помогает определить, насколько легко расплавленный полимерный материал будет течь во время обработки. Введение наполнителей в полимеры может оказать существенное влияние на их показатель текучести расплава.

Результаты проведённых исследований показали, что введение 1 мас. % диоксида титана улучшило показатель текучести расплава композитов на основе полипропилена и скорлупы фундука (5-20 мас. %) и привело к увеличению показателя текучести расплава в 1,3-1,6 раза. Это связано с тем, что диоксид титана увеличивает межмолекулярный свободный объём между полимерными цепями и снижает вязкость композитов, что в конечном итоге приводит к улучшению показателя текучести расплава композитов. С увеличением содержания скорлупы фундука до 30 мас. % наблюдалось снижение показателя текучести расплава. Поскольку вязкость течения расплава является результатом внутреннего трения, можно сказать, что с увеличением содержания скорлупы фундука внутреннее трение увеличивается, что приводит к увеличению вязкости расплава и, как следствие, к снижению показателя текучести расплава.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что использование лигноцеллюлозных наполнителей, таких как скорлупа орехов, в полимерных композитах представляет собой инновационное и экологически устойчивое решение для утилизации сельскохозяйственных отходов. Результаты исследования показали, что использование диоксида титана привело к улучшению межфазной адгезии между наполнителем из агроотходов и матричным полимером.

Опыт отработки нового термостойкого ПКМ на основе фталонитрильного связующего на примере детали авиационного двигателя

Д.А. Волков¹, А.В. Горлов¹, И.В. Зельнева¹, Е.А. Хандорина¹, С.А. Гусев²

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

²ООО «Итекма», г. Подольск, Россия

E-mail: volkovda@technologiya.ru

В настоящее время применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) находит все более широкое применение в производстве, особенно в области авиакосмической техники и авиационного двигателестроения. В последнем случае условия работы, по естественным причинам, не ограничиваются конструкциями, работающими при нормальных условиях эксплуатации. Функционирование ряда деталей сопровождается достаточно существенным нагревом, где свойства широко освоенных эпоксидных и даже фенольно-формальдегидных связующих систем не обеспечивают требуемую теплостойкость и работоспособность конструкции.

С учетом прогресса отечественного материаловедения и появления новых, ранее являвшихся исключительно импортными, отечественных высокотемпературных смол открыты возможности применения ПКМ в ранее не достижимых для них узлах и агрегатах. Новые материалы на основе бисмалеимидных и фталонитрильных смол позволяют конструкторам и технологам, занятым разработкой авиационных двигательных установок, применить ПКМ в том числе для капотирования горячей части газотурбинных двигателей.

В настоящей работе рассмотрен опыт конструктивно-технологической отработки нового ПКМ на основе фталонитрильного связующего и углеродной ткани для изготовления сложнопрофильной оболочечной детали в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

В ходе отработки материала были выявлены периодические факты появления расслоений. Решение задачи по выявлению и устранению причин расслоений основывалось на применении комплексного подхода «материал–конструкция–технология» в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.

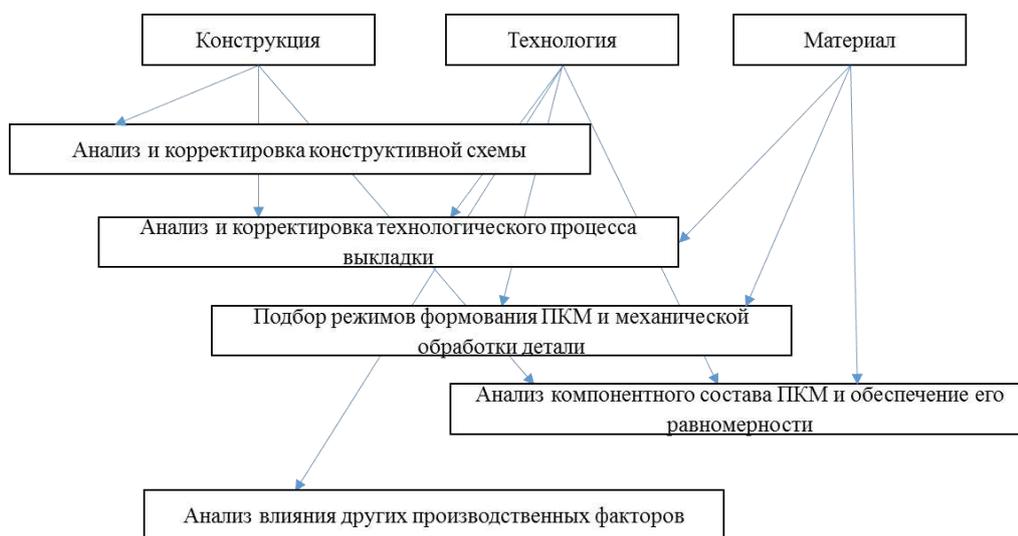


Рис. 1. Типологическая схема распределения задач отработки материала

Комплексность подхода включала оптимизацию конструктивного облика детали, обеспечение качества материала, корректировку параметров технологического процесса. Итогом работы стало исключение фактов проявления расслоений.

Конструкционные полиглютаримидные пенопласты на основе (со)полимеров акрилонитрила и метакриловой кислоты

А.Н. Сафонов^{1,2}, И.А. Шалагинова¹, П.В. Корниенко¹

¹АО «НИИ полимеров», г. Дзержинск, Россия;

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

E-mail: Safonov@nicp.ru

Благодаря высокой прочности и жесткости в сочетании с низкой массой композитные сэндвич-конструкции с успехом используются в качестве структурной многослойной основы во многих высокотехнологичных областях, таких как аэрокосмическая промышленность, судостроение, производство железнодорожного транспорта и др. В качестве легкого заполнителя в таких композитах применяют жесткие пенопласты.

Отдельным сегментом промышленных технологий получения многослойных композитов является применение поли(мет)акрилимидных (П(М)И) пенопластов, обладающих превосходной механической прочностью, закрытой ячеистой структурой, а также исключительной термостойкостью благодаря наличию в структуре глютаримидных циклов. С 70-х годов XX века разработки и производственные мощности П(М)И пенопластов были сосредоточены за рубежом. Однако, в 2010-х годах в АО «НИИ полимеров» открыто новое для отечественной науки направление – разработка научно-технических основ получения конструкционных П(М)И пенопластов на основе (мет)акриловых сополимеров.

За последние годы разработан и внедрен в производство ряд вспененных материалов конструкционного назначения.

Установлено, что с помощью регулирования рецептурно-технологических параметров процесса синтеза блочных сополимеров и последующего процесса их вспенивания возможно управлять химической структурой полимерной матрицы и получать вспененные материалы с высокими значениями теплостойкости (160-210 °С) и прочности (в том числе при повышенных температурах). Результатом данной работы является разработка технологии получения П(М)И пенопластов на основе блочных сополимеров акрилонитрила (АН) и метакриловой кислоты (МАК), которые в настоящее время промышленно выпускаются под маркой «Акримид» в диапазоне плотности 40-120 кг/м³ при прочности на сжатие 1,2-3,5 МПа и пределе прочности на разрыв 2,3-4,5 МПа соответственно.

Еще одним направлением «НИИ полимеров» в сегменте конструкционных П(М)И пенопластов является разработка вспененных материалов на основе дисперсных частиц сополимеров АН-МАК. Такой подход к созданию пенопластов позволяет получать материалы с заданными геометрическими параметрами, в то время как размеры и форма П(М)И пенопластов на основе блочных сополимеров ограничены размерами и геометрией исходных блоков. Установлено, что с помощью регулирования температурных параметров процесса вспенивания частиц сополимеров АН-МАК размером от 1 до 10 мкм возможно получение вспененных материалов в диапазоне плотности 60-170 кг/м³. Показано, что прочностные параметры таких пенопластов составляют 56-68% от соответствующих по плотности пенопластов на основе блочных монолитов. Исследования показали, что П(М)И пенопласты на основе частиц сополимеров АН-МАК обладают высокой термостабильностью (температура разложения около 350 °С) и устойчивостью к длительному воздействию высоких температур (до 170 °С).

Разработанные методы формования пенопластов из отдельных частиц позволяют в перспективе получать функциональные пенопласты для различных технологий применения – чистые полимерные пены, функционально наполненные пены, пенопласты-заготовки сложной формы (исключение процессов механической обработки) и других технологических направлений.

Разработка полимерных композиционных материалов с фталонитрильной матрицей для длительной эксплуатации изделий при 300 °С

О.С. Морозов, А.В. Иванченко, В. Н. Кондратьев, А.А. Кондратьева, М.С. Лобанова, А.В. Кепман
АО «ИНУМиТ», г. Москва, Россия
E-mail: morozov.o@inumit.ru

На сегодняшний день успехи в исследовании новых полимеров всё чаще позволяют использовать полимерные материалы в жестких условиях в аэрокосмической, военной и морской промышленности. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают высокими удельными механическими характеристиками, что позволяет применять их для замены металлических конструкций. Дальнейшая замена металлических конструкций на изделия из ПКМ ограничивается предельной температурой эксплуатации полимерной матрицы. Среди терморезистивных связующих фталонитрильные смолы являются наиболее термостойким классом полимеров, обладающих при этом высокими механическими характеристиками (рис. 1).

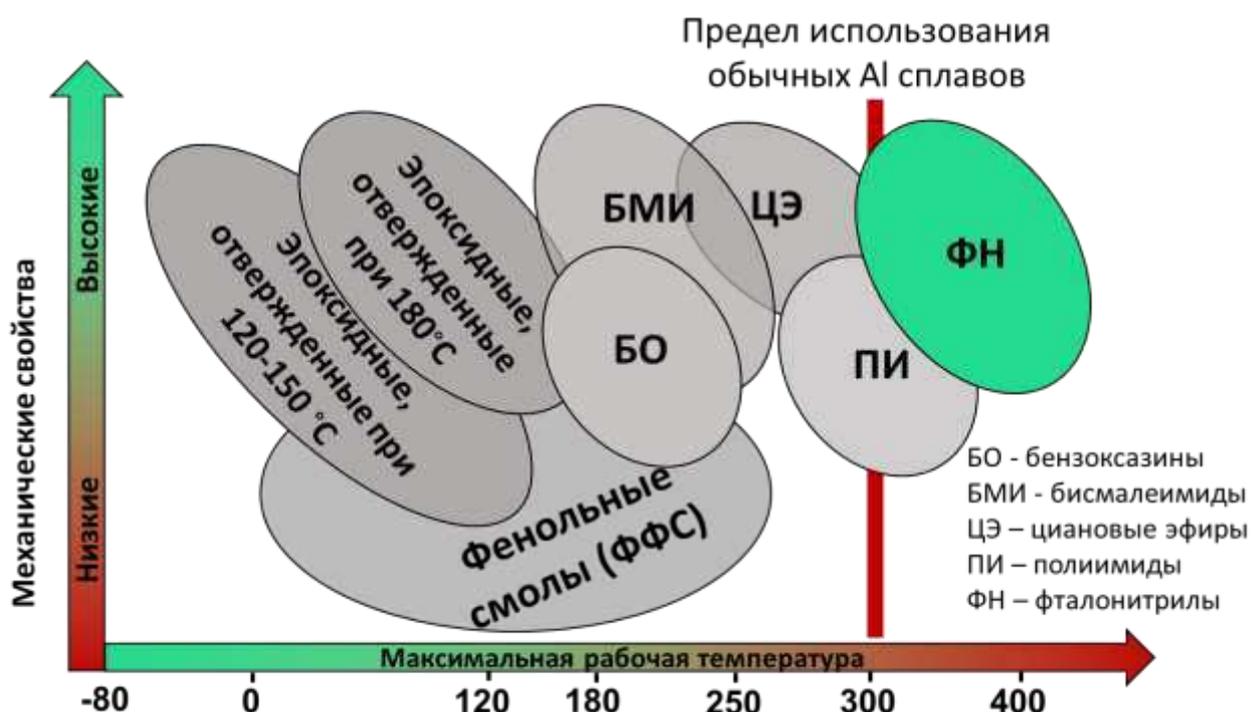


Рис. 1. Сравнение свойств фталонитрильных ПКМ с другими связующими

На протяжении десяти лет АО «ИНУМиТ» ведет активные разработки в области фталонитрильных материалов, таких как инфузионное связующее, препреги на углеродной и стеклянной тканях, абляционные материалы, клеевые составы и сотовые конструкции. К настоящему моменту осуществлено масштабирование синтеза мономеров, выпуск связующего и запущено серийное производство препрегов. Целью данной работы является разработка подходов к оценке термоокислительной стабильности, исследование горючести и термического старения фталонитрильных смол и ПКМ на их основе.

Поскольку при термической выдержке на воздухе в первую очередь окисляется полимерная матрица, вначале проводились исследования чистых полимеров без армирующего наполнителя. Исследовались смолы с различной природой отвердителя и разным содержанием активных разбавителей, постотвержденные при 330, 350 и 375 °С. Все мономеры были синтезированы в тридцатилитровом реакторе с выходом не менее 90%.

Структуру соединений подтверждали методом ЯМР на ядрах ^1H и ^{13}C , чистоту определяли методом ВЭЖХ, мономеры также характеризовали методом ДСК и определяли зольность. Связующие изготавливали в двухлитровом реакторе, дегазировали и выливали специальные металлические формы для отверждения, постотверждение полимеров проводили в свободном виде. В научной литературе традиционно предельную температуру эксплуатации полимеров оценивают по ТГА как температуру потери 5% массы, а также по температуре стеклования. Для оценки кинетики окисления полимеров методом ТГА были изготовлены порошки полимеров и просеяны через сита для обеспечения одинакового состава по размеру частиц. Испытания проводили разной скоростью нагрева – 2, 5, 10 и 20 °С/мин. Данный подход позволил рассчитать кажущиеся энергии активации начальной стадии окисления, однако решающую роль играет площадь поверхности, а не химическая природа полимера. Поэтому проводить сравнительное исследование данным методом признано нецелесообразным, и было решено проводить термическое старение более крупных образцов. Выдержка образцов в запаянных ампулах в разреженной среде аргона показала, что потеря массы не превосходит 3% при температуре 350 °С и выдержке 500 ч. Заметная же потеря массы на воздухе происходит уже спустя 100 ч при температуре 300 °С, причем ее значение сильно варьируется в зависимости как от температуры постотверждения, так и мономерного состава. Интересно, что образцы с температурой постотверждения 375 °С, обеспечивающей $T_{ст}$ выше 450 °С, оказались наименее стойкими к окислению, вероятно, из-за образования микротрещин и развитой поверхности полимера. В итоге лучший состав показал потерю массы в 2,5% после выдержки 500 ч при 300 °С. На его основе был изготовлен препрег и ПКМ методом автоклавного формования. Для демонстрации возможности эксплуатации при повышенных температурах были проведены механические испытания при 300 и 350 °С.

Таблица 1. Механические свойства ПКМ с фталонитрильной матрицей

Характеристика и условия испытаний	Значение
Предел прочности при растяжении в направлении оси армирования при 25 °С, МПа	794±31
Модуль упругости при растяжении в направлении оси армирования при 25 °С, ГПа	66,9±1,0
Предел прочности при сжатии в направлении оси армирования при 25 °С, МПа	745±29
Предел прочности при сжатии в направлении оси армирования при 300 °С, МПа	590±29
Предел прочности при сжатии в направлении оси армирования при 350°С, МПа	537±74
Модуль упругости при сжатии в направлении оси армирования при 25 °С, ГПа	62,5±1,5
Кажущийся предел прочности при межслоевом сдвиге при 25 °С, МПа	53,6±2,6
Кажущийся предел прочности при межслоевом сдвиге при 300 °С, МПа	44,0±5,4
Кажущийся предел прочности при межслоевом сдвиге при 350 °С, МПа	30,1±4,3
Предел прочности при сдвиге при 25 °С, МПа	108±9
Модуль упругости при сдвиге при 25 °С, ГПа	4,4±0,2

Для оценки термоокислительной стабильности данного ПКМ были вырезаны образцы на испытания кажушегося предела прочности при межслоевом сдвиге. Такие образцы имеют малый размер и, как следствие, большую площадь поверхности. Поэтому можно предполагать, что окисление изделий из ПКМ и образцов большего размера будет происходить не хуже. После выдержки при 300 °С в течение 500 ч образцы потеряли всего 3% массы, а кажущийся предел прочности при межслоевом сдвиге даже немного вырос и составил (55±2) МПа. Остальные механические свойства сохранились в пределах погрешности. Материал не горит на воздухе, при проведении испытания на определение кислородного индекса образец ПКМ не воспламенился в атмосфере 100% кислорода.

В итоге было показано, что материалы на основе фталонитрильных смол могут эксплуатироваться не менее 500 ч при 300 °С на воздухе без потери свойств и 350 °С в инертной атмосфере, например, с применением барьерных покрытий или в условия околоземной орбиты.

Термопластичный полимерный композиционный материал на основе полиэфирэфиркетона для термоформования деталей мотогондолы авиационного двигателя

М.С. Иванов, Н.Г. Павлюкович

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва, Россия

Email: ivanovms@viam.ru

Современные подходы к созданию авиационно-космической техники требуют внедрения новых перспективных материалов, к числу которых, относятся термопластичные полимерные композиционные материалы (ТПКМ), которые при нагревании размягчаются, а при охлаждении возвращаются в исходное твердое состояние.

ТПКМ на основе термопластичных суперконструкционных матриц – типа ПАЭК, ПФС, ПСФ, ЖКП (Vestra) и др. – и непрерывного углеродного наполнителя обладают рядом преимуществ, главными из которых являются: высокая удельная прочность, отсутствие необходимости в особых условиях хранения препрега, быстрый и экологичный цикл формования, высокие температуры эксплуатации, хорошая устойчивость к повреждениям, возможность соединения сваркой, способность к переформовке и вторичной переработке. Детали из ТПКМ на основе ПЭЭК применяют для изготовления первичных и вторичных конструкций современных самолетов, например, нервюра передней кромки крыла, кронштейны фюзеляжа.

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) является одним из наиболее применяемых суперконструкционных термопластов для изготовления ТПКМ, обладает частично кристаллической морфологией, характеризуется высоким модулем упругости (~ 3,2 ГПа) при температуре ниже температуры стеклования (~ 143 °С) и может сохранять эксплуатационные характеристики вплоть до температур, близких к началу плавления полимерной матрицы (HDT ~ 300 °С).

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны препрег и листовой углепластик (УП) марки ВКУ-65 на основе отечественных компонентов: ПЭЭК и углеродной ткани саржевого плетения на волокне UMT 42S-3K-EP.

Технология изготовления листов УП марки ВКУ-65 заключается в нанесении на тканый углеродный наполнитель электростатическим методом порошкообразного ПЭЭК связующего и его оплавлении для изготовления препрега с последующей сборкой необходимого количества слоев и консолидацией по технологиям прямого прессования или автоклавного формования при температуре ~ 380 °С, при которой достигается наибольшая текучесть связующего, но не происходит его активной термодеструкции.

Листовой УП марки ВКУ-65 перерабатывают методом контактного термоформования в прессе, при котором нагретая выше температуры плавления термопластичной матрицы плоская заготовка детали помещается между поверхностями формовочной оснастки – формой и контрформой нагретых до определенной температуры, – обеспечивающей наиболее короткий (рентабельный) цикл выдержки под давлением и охлаждения, для достижения требуемых свойств материала в детали: степень кристалличности матрицы не менее 35%, объемная доля пор не более 2%. Температуру формы определяют по минимальному времени достижения 50% от требуемой кристалличности (half time crystallization) или эмпирически, вычисляя среднее значение температур стеклования и плавления, что для ПЭЭК составляет ~ 243 °С.

По результатам общей квалификации листовой УП марки ВКУ-65, благодаря термопластичной ПЭЭК матрице, обладает высокими: степенью кристалличности связующего (43 %), термо-, хим- и атмосферостойкостью; низкими: пористостью (не более 0,2%), влаго- и водопоглощением (0,153 и 0,157% за 90 сут., соответственно), горючестью и дымовыделением; не уступает по свойствам импортным аналогам компаний Toray, Toho Tenax

(табл. 1), и предназначен для изготовления элементов и агрегатов мотогондолы перспективных авиационных двигателей с рабочей температурой до 120 °С, кратковременно до 150 °С, в том числе кронштейнов реверсивного устройства, секторов спрямляющего аппарата, панелей внутренних и т.п. (рис. 1).

Применение ТПКМ разработки НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ позволит снизить массу деталей мотогондолы не менее чем на 50% по сравнению со сплавом ОТ-4.

Таблица 1. Характеристики листового УП марки ВКУ-65 (со структурой армирования [0/90]₁₀, направление вырезки образцов для определения физико-механических характеристик 0°) в сравнении с импортными аналогами

Наименование показателя	Требования ТУ 1-595-9-1944-2021 на ВКУ-65	Результаты общей квалификации	Характеристики импортных аналогов УП марки ВКУ-65	
			*Toray Cetex TC1200 _{PEEK}	**Tenax-E TPCL PEEK-HTA40
Плотность, г/см ³	1,52±0,05	1,51	1,53	–
Массовая доля вязующего, %	42±5	39	42	42
Температура стеклования полимерной матрицы, °С	138±10	140	143	143
Предел прочности при изгибе при (23±3) °С, МПа	не менее 850	930	–	1166
Предел прочности при межслойном сдвиге при (23±3) °С, МПа	не менее 35	66,5	–	–
Предел прочности при сжатии при (23±3) °С, МПа	не менее 600	675	585	725
* – Datasheet Toray-Cetex-TC1200, www.toraytac.com				
** – Datasheet Tenax®-E TPCL PEEK-HTA40, www.teijinCarbon.com				



Рис. 1. Детали мотогондолы авиационного двигателя из УП на основе ПЭЭК

Технологии получения термопластичных полимерных композиционных материалов на основе углеродного волокна и их применение

Е.Е. Беспалова

АО «Препрег-СКМ», г. Москва, Россия

E-mail: e.bespalova@umatex.ru

Предприятие АО «Препрег-СКМ» специализируется на разработке и серийном выпуске материалов и полуфабрикатов на основе углеродных наполнителей. Перспективным и стремительно развивающимся направлением в настоящее время являются материалы на основе инженерных и суперконструкционных термопластов.

Переход к использованию термопластичных полимеров связан с современными требованиями и технологическими решениями в промышленности, в первую очередь это:

- автоматизация производства,
- возможность свариваемости композитов, уход от клеевых и болтовых соединений,
- экологическая составляющая (возможность вторичной переработки),
- высокие показатели ударной вязкости,
- сокращения времени производства и снижения трудоемкости,
- сокращение издержек производства, сокращение брака.

В настоящее время разработками препрегов на основе суперконструкционных термопластов занимаются ведущие мировые производители, такие как Toho Tenax (Teijin), Toya (ранее TenCate) и др. Мировые производители авиационной и автомобильной техники уже применяют углепластиковые конструкции на основе суперконструкционных термопластов.

Углепластиковые композиты на основе инженерных и суперконструкционных термопластов также находят применение при производстве транспорта, электроники, спорттоваров и других изделий.

В настоящее время ведущие производители авиационной и космической техники заинтересованы в переходе на технологии AFP (Automated Fiber Placement) и ATP (Automated Tape Placement). Данные технологии представляют собой автоматическую выкладку термопластичных тоупрегов разной ширины при помощи роботов со специально оборудованными выкладочными устройствами. Для создания конструкционных углепластиков на подобных роботизированных комплексах необходимы специализированные полуфабрикаты на основе высокоэффективных термопластов. АО «Препрег-СКМ» проводит работы по созданию линейки продуктов для автоматической выкладки на основе высокопрочных углеродных волокон, в том числе аппретированных специальным составом для обеспечения совместимости с высокотемпературными термопластами, в том числе, полиэфирэфиркетонном.

Композиционные полуфабрикаты (препреги) с однонаправленным армированием производятся на лабораторной производственной линии, созданной для осуществления пропитки волокнистых материалов термопластичными полимерами из водной суспензии по процессу, разработанному Санкт-Петербургским Политехническим Университетом имени Петра Великого.

Согласно схеме (рис. 1), углеродное волокно разматывается в узле размотки с контролируемым преднатяжением (А), проходит через узел контроля натяжения (Б), погружается в ванну с водной суспензией полимера (В), на выходе из которой подвергается оптическому контролю для определения ширины ленты (Г), затем проходит через узел сушки (Д) и охлаждения (Е), после чего наматывается в рулоны (Ж).

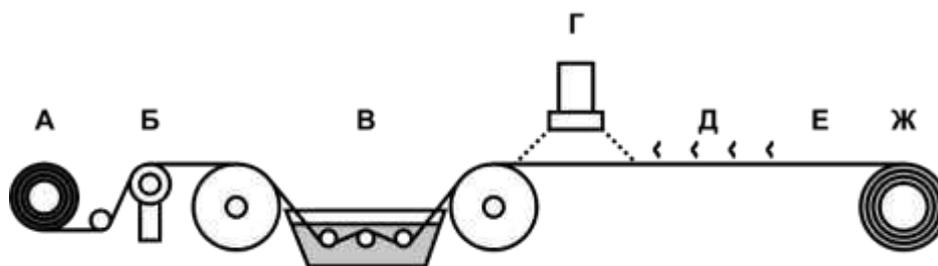


Рис. 1. Схема получения препрегов по суспензионной технологии

Похожей технологией формования тоупрегов обладает компания Teijin, поэтому можно сравнить уровни свойств армирующих волокон, прочностные характеристики полученных в ходе настоящей работы материалов с паспортными характеристиками промышленного безуткового препрега Tenax®-E TPUD PEEK HTS45 (табл. 1):

Таблица 1. Результаты физико-механических испытаний ТПКМ на основе полученных препрегов (опытный препрег на основе UMT49-12К, аппретированный специальным аппретом ТР и стандартным, эпоксисовместимым ЕР) и сравнение с зарубежным аналогом (Tenax®-E TPUD PEEK HTS45)

Свойства	Укладка	Материал		
		Опытный препрег на основе UMT49-12К		Промышленный препрег Tenax®-E TPUD PEEK-HTS45
		ТР	ЕР	
Предел прочности при растяжении, МПа	(0°)*	2455±24	1220±99	2450
	(90°)	67,9±13,3	53,5±4,8	88
Предел прочности при сжатии, МПа	(0°)*	1002±34	891±79	1545
Предел прочности при изгибе, МПа	(0°)*	1765±134	1383±70	1760
	(90°)	114,7±4,4	84,8±17,4	103
ILSS, МПа (межслоевой сдвиг)	(0°)	100,4±3,2	92,5±3,0	100

* Значения, нормализованные на объемную долю волокна в 60%

Уровень прочностных свойств ТПКМ на основе углеродных волокон марки UMT49-12К-ТР со специальным аппретом сопоставим с уровнем соответствующих характеристик коммерческого аналога и превышает уровень прочностных свойств ТПКМ на основе углеродных волокон, покрытых стандартным аппретом, рассчитанным на совместимость с термореактивными эпоксидными смолами.

Также интерес производителей авиационной и космической техники, с точки зрения высокой автоматизации процессов, направлен в сторону развития аддитивного производства – 3D-печати из филаментов на основе непрерывно армированного углеродного волокна.

В АО «Препрег-СКМ» реализована технология изготовления филаментов для 3D-печати на основе непрерывного УВ марок АСМ РЕЕК-3К и АСМ РА-3К.

Регрессионное и нейросетевое моделирование предела прочности термopластичных однонаправленных стержней «углеродное волокно – полисульфон»

А.А. Степашкин, Н.Ю. Никитин
НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия
E-mail: nikitin5@yandex.ru

Механическое поведение композиционных материалов с термopластичными матрицами широко изучается в настоящий момент, так как благодаря способности матрицы к пластическим деформациям можно повысить ударную вязкость, вязкость разрушения и другие характеристики. При этом наряду с самими свойствами крайне важно знать характер и статистические закономерности их распределения, которое может отличаться от распределения, наблюдаемого у композиционных материалов с хрупкими терморективными матрицами. В представленной работе рассмотрен комплексный подход к статистическому анализу и построению регрессионных моделей, описывающих распределение свойств и прогнозирующих предел прочности композиционных материалов на основе термopластичного полимера – полисульфона и углеродных нитей.

В качестве объектов исследования рассмотрены результаты испытаний на растяжение образцов микропластиков на основе углеродного волокна (Toray T700 и UMT400-12K-EP), пропитанного термopластичным полимером полисульфоном (Ultrason S 2010). Испытаны образцы с различной степенью наполнения, при различных скоростях деформирования материала микропластика.

Проведение статистического анализа результатов испытаний на растяжение показало наличие статистически значимых различий между механическими свойствами углеродных волокон различных марок и различного типа (высокопрочного и высокомодульного). Для анализа данных были построены регрессионные и нейросетевые модели. Для обучения и тестирования использовались результаты испытаний 817 единичных образцов, результаты были разделены в пропорции: 75% на обучение модели и 25% на тестирование модели. На рисунке 1 представлена архитектура сверточной нейронной сети, давшая наилучшие характеристики точности при валидации.

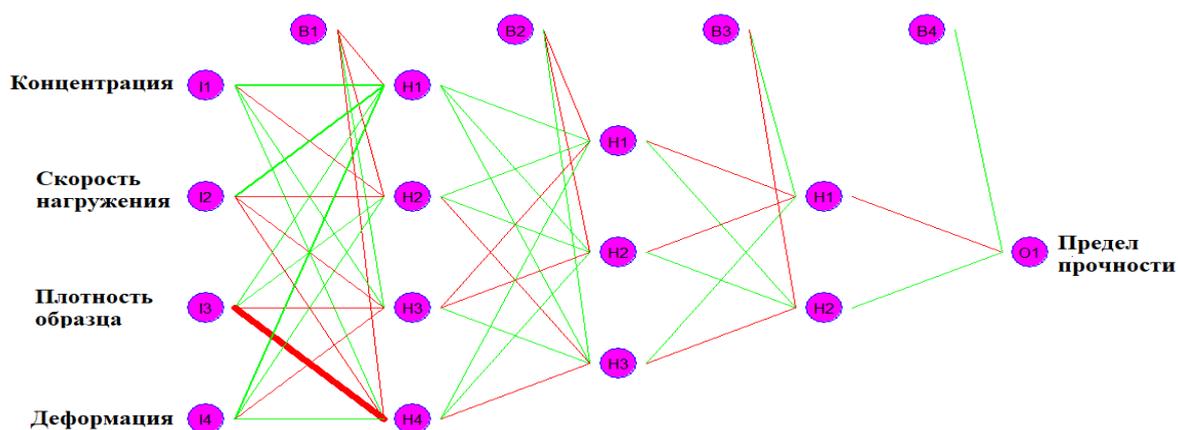
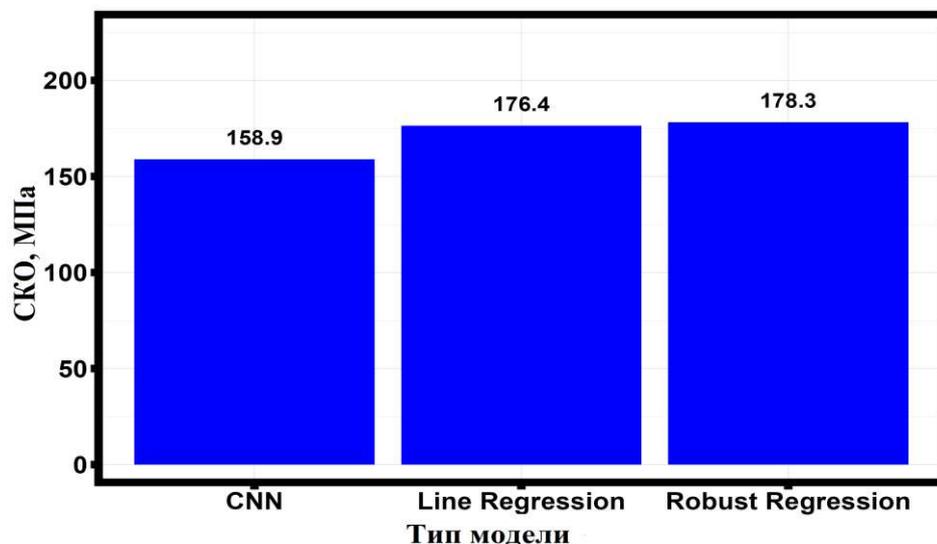


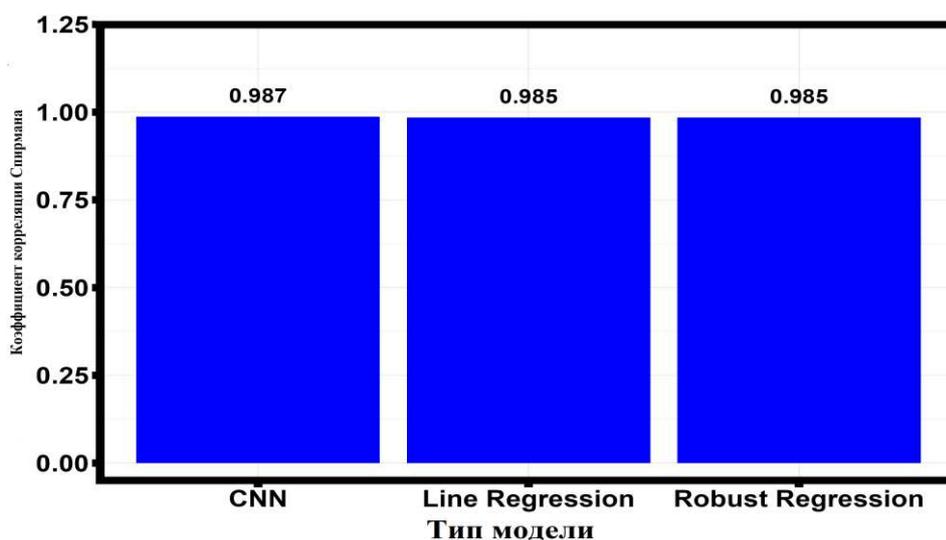
Рис. 1. Архитектура сверточной нейронной сети, обученной на экспериментальных данных и прогнозирующей предел прочности однонаправленных стержней «углеродное волокно – полисульфон»

В качестве функции активации нейрона использовался гиперболический тангенс. Валидация регрессионных моделей и модели на основе сверточных нейронных сетей проводилась методом Монте-Карло. Из 817 результатов произвольным образом выбиралось 25% значений и сравнивалось с прогнозом регрессионных моделей и модели сверточной

нейронной сети. На рисунке 2 представлены метрики качества при валидации трех лучших моделей: модели сверточной нейронной сети, модели линейной регрессии и модели робастной регрессии.



а)



б)

Рис. 2. Основные метрики качества моделей – линейной, робастной регрессии и сверточной нейронной сети: а) среднеквадратичное отклонение; б) коэффициент корреляции Спирмана

Анализ метрик качества моделей после валидации показывает высокую точность прогноза, приближающуюся к систематической ошибке измерения предела прочности стержней «углеродное волокно – полисульфон».

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант 22-43-02081.

Исследование возможности создания композитных конструкций с программируемым трикотажным армированием

Е.А. Рогожина¹, А.В. Чернов^{1,2}

¹ КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия, ²ООО «Специальный трикотаж», г. Чебоксары, Россия

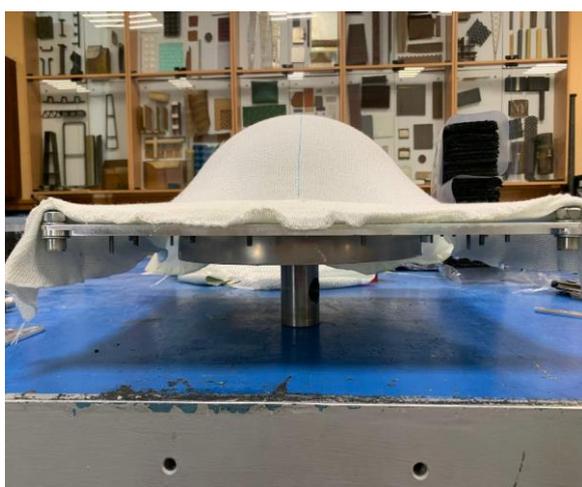
E-mail: fastweb@mail.ru

В настоящее время при проектировании летательных аппаратов в их конструкцию закладываются детали сложной формы – трубы, патрубки, обтекатели и т.п. Данные элементы изготавливаются в основном из металлических материалов или армирующих тканей полотняного переплетения. Однако большая трудоемкость их изготовления, энергозатратный процесс, необходимость снижения массы самолета заставляют разработчиков современной авиационной техники искать материалы более технологичные с низкой весовой отдачей, которые обеспечивают необходимые эксплуатационные требования к конструкции.

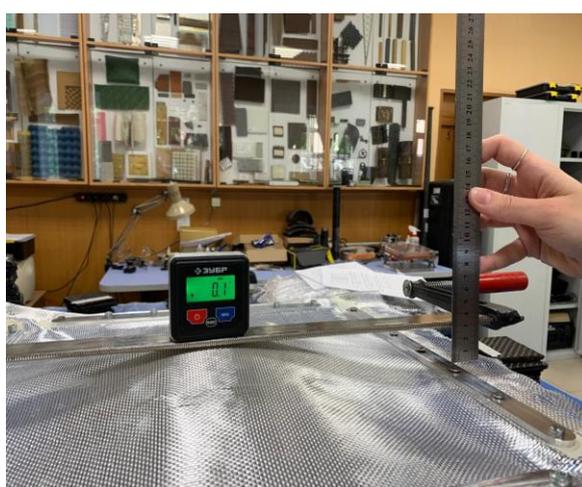
Программируемые трикотажные армирующие материалы, ввиду особенностей разработки и технологии изготовления ПКМ из них, теоретически должны расширить возможности и позволить сократить трудоемкость при разработке ПКМ с программируемыми свойствами, а также сократить затраты энергоресурсов и материалов при изготовлении конечных изделий. Кроме того, меньшая плотность ПКМ, армированных программируемыми трикотажными материалами, по сравнению с ПКМ, армированными материалами полотняного переплетения или металлами, должна позволить увеличить весовую эффективность конструкций.

С целью исследования возможностей разработки ПКМ на основе программируемых трикотажных армирующих полотен в КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева на кафедре ПЛА совместно с ООО «Специальный трикотаж» был организован и оснащён специальным оборудованием участок по разработке и изготовлению программируемых трикотажных армирующих материалов. Была проведена работа по исследованию возможности создания композитных конструкций с программируемым трикотажным армированием на примере проектирования конструкции и технологии изготовления носового обтекателя с трикотажным армированием.

Исследована функция формообтекания тканей трикотажного и полотняного переплетения (рис. 1):



а



б

Рис. 1. Формообтекаемость текстильных материалов:
а - трикотажа; *б* – полотняной ткани

Исследована возможность программирования свойств трикотажных материалов носового обтекателя из трикотажной ленты и из вязанного по форме изделия.

Входные параметры носового обтекателя для написания программы следующие: диаметр оправки носового обтекателя 160 мм, высота 252 мм.

Чтобы изготовить трикотажную ленту необходимо написать программу для вязальной машины в системе SDS-ONE KnitPaint. Лента должна изготавливаться с запасом по размерам для натяжения на оправку согласно размерам обтекателя.

Чтобы изготовить изделие, вязанное по форме, нужно написать программу формирования трикотажной оболочки с технологическими припусками в системе SDS-ONE KnitPaint по размерам оправки носового обтекателя, соответствующей размерам требуемого изделия. Данный способ позволяет создать цельновязанную преформу из стекловолокна за одну технологическую операцию.

Исследованы способы укладки и пропитки связующим трикотажных материалов в преформу.

В настоящее время существует множество технологических процессов создания изделий из ПКМ различных размеров, конфигурации и назначения. Из литературы известно, что каждый такой процесс имеет свои особенности, преимущества и недостатки, и обусловлен предельными технологическими возможностями формообразования изделий, параметрами процесса (давление, температура, скорость формования и т.п.), геометрии, формы, степенью автоматизации и пр.

В данной работе для формования носового обтекателя был выбран метод контактного формования с использованием эластичной раздуваемой мембраны.

Технология изготовления данным методом требует использования специальной оснастки, состоящей из следующих основных частей: матрицы, оправки и эластичной мембраны.

Исследована возможность изготовления носового обтекателя из трикотажной ленты и из вязанного по форме изделия (рис. 2).

Для изготовления носового обтекателя контактным методом с использованием эластичной раздуваемой мембраны были связаны лента и преформа из стеклонити и изготовлена оснастка.



а



б

Рис. 2. Закрепление преформ: *а* – из вязанной формы; *б* – из вязанной ленты

Результатом исследований является опытная технология, позволяющая разрабатывать и изготавливать головные обтекатели более эффективно по сравнению с технологиями, применяемыми в существующем производстве.

Химическая обработка поверхности стеклянных волокон для оптимизации межфазного взаимодействия в стеклопластике

Н.М. Демина¹, А.Н. Трофимов¹, К.Э. Разумеев²

¹АО «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова», РП Андреевка, Московская обл., Россия;

²РГУ имени А.Н. Косыгина, г. Москва, Россия

E-mail: nat-demina@mail.ru

При промышленном производстве стеклянных волокон используют формование из расплавов специальных стекол. Основным волокнообразующим компонентом является диоксид кремния. Оксиды бора и металлов в высших степенях окисления в составах стекол обеспечивают различные потребительские свойства стекловолоконистых материалов. До 90 % всех стеклянных волокон, выпускаемых сегодня в мире, относятся к алюмоборосиликатному стекловолокну марки Е низкой электрической проводимости. Остальные 10% – это волокна специального назначения для композиционных материалов, области применения которых требуют повышенной прочности, жесткости или химической стойкости. Объем мирового производства в 2023 году превысил 6,8 миллионов тонн, с ежегодным приростом 7-8% в год. Основные производители стекловолоконистых материалов работают в Китае, США и странах Европы.

Объем производства стекловолокна в России в 2023 году составил порядка 120 тысяч тонн. Основные производители стекловолоконной продукции – АО «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова», АО «Русатом Стекловолокно», ООО «П-Д Татнефть-Алабуга Стекловолокно», ПАО «Астраханское стекловолокно», АО «Стеклонит» – так же эффективно работают в 2024 г.

Модификация поверхности непрерывных стеклянных волокон производится для придания специальных свойств армирующим стекловолоконистым материалам. При промышленном производстве используются химические композиции-замасливатели, как правило представляющие собой водные эмульсии прямого типа «масло в воде». Замасливатель наносится на поверхность волокон сразу после вытягивания из массы расплава стекла перед сбором в комплексную нить. После высыхания на внешней поверхности непрерывных стеклянных волокон формируется слой органического покрытия, способного обеспечить технологию текстильной переработки в армирующий материал, а также формование и потребительские свойства стеклопластика.

Для выпуска стекловолоконистых материалов, применимых в качестве армирующих материалов для стеклопластиков, используют так называемые «силановые» замасливатели. Важнейшую роль для формирования межфазного взаимодействия в композите выполняют кремнийорганические компоненты, которые вводятся в составы таких замасливателей. Они хемосорбируются на поверхность стеклянных волокон и модифицируют ее, образуя новые органофункциональные группы на обработанной поверхности стеклянных волокон.

Основным компонентом по массовому содержанию в силановых замасливателях являются пленкообразователи, которые в значительной степени определяют качество стекловолоконистого материала и свойства стеклопластиков, армированных ими.

Широкое распространение в мировой практике получили водорастворимые эпоксидные смолы и эмульсии эпоксидных смол в качестве пленкообразователей в составах для обработки стеклянного волокна, предназначенного для изготовления эпоксидных стеклопластиков.

В отечественной промышленности были внедрены водорастворимые эпоксисоединения в составах замасливателей № 78, 80, 270, 752. Несмотря на высокие физико-механические свойства композиционных материалов на основе стекловолоконистых материалов, выработанных на этих замасливателях, зафиксирована повышенная токсичность их использования в производстве.

В нашей фирме была разработана «зеленая» водная эпоксидная дисперсия на основе смолы ЭД-20 торговой марки ЭДСВ-95, налажен выпуск объемом 100 тонн в год, а также разработан и внедрен замасливатель 4с на ее основе. В настоящий момент отсутствует производство эмульгаторов для выпуска этой торговой марки водной дисперсии.

Мировой лидер Aliancys Quality Resins, работающий в области композиционных материалов, выпускает водные эпоксидные дисперсии, которые по литературно-патентным данным, применяются для обработки стекловолоконистых материалов.

Были выполнены исследования по возможности замены дисперсии ЭДСВ-95 в составе 4с на торговые марки вышеуказанного производителя. Проведено ИК-спектроскопическое исследование эпоксидных дисперсий. Для сравнительной идентификации полос поглощения дисперсий были получены ИК-спектры эпоксидных смол торговых марок ЭД-20 и Epicote 828, на основе которых получены исследуемые водные дисперсии. ИК-спектр дисперсии ЭДСВ-95 представлен на рисунке 1.

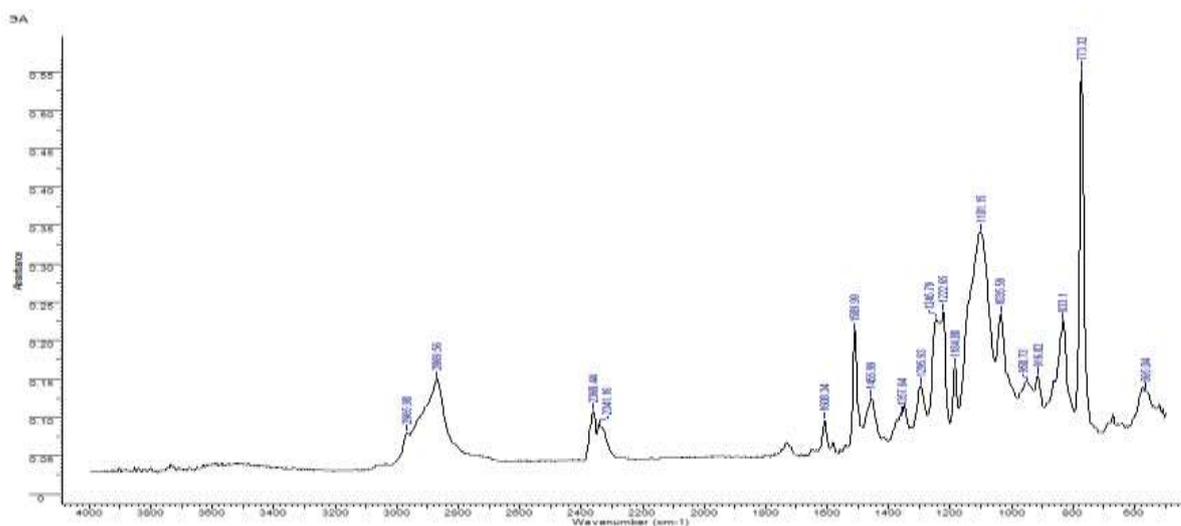


Рис. 1. ИК-спектр эпоксидной дисперсии торговой марки ЭДСВ-95

В ИК-спектрах водных эпоксидных дисперсий деформационные колебания при волновых числах от 1185 см^{-1} до 3000 см^{-1} практически совпадают с полосами поглощения эпоксидных смол, из которых эти дисперсии изготовлены. Идентичные полосы поглощения, связанные с молекулами эмульгирующей системы, находятся в области от 773 см^{-1} до 1184 см^{-1} . В спектрах импортных дисперсий фиксируются деформационные колебания в области $3400\text{--}3500\text{ см}^{-1}$. Этот отличительный факт можно предположительно толковать как присутствие в импортной дисперсии системы соэмульгаторов, возможно использование оксиэтилированных алкилфенолов.

Выполненные физико-химические исследования убеждают в том, что исследуемые импортные дисперсии не могут равноценно заменить отечественную марку. В случае применения их для обработки стекловолокон необходимо разрабатывать новые рецептуры замасливателей.

Сферопластики пониженной плотности для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов

В.С. Аншин, А.А. Политико, А.В. Пузанов
АО «Композит», г. Королев, Россия
E-mail: thiazole@bk.ru

Легковесные наполнители играют важную роль при создании элементов конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Широкое распространение получили пенопласты и сотовые наполнители. Их типичная плотность колеблется в диапазоне от 30 до 200 кг/м³. Однако данные виды наполнителей имеют ряд недостатков. Альтернативой рассмотренным видам легковесных наполнителей могли бы стать сферопластики. Однако высокая плотность доступных на данный момент сферопластиков – от 400 до 700 кг/м³ – значительно ограничивает возможности их применения. В связи с этим были проведены работы и получены сферопластики с пониженной плотностью. Плотность полученных материалов колебалась в диапазоне от 180 до 300 кг/м³. В качестве наполнителя использовались полые стеклянные микросферы с истинной плотностью 240 кг/м³. Были опробованы несколько видов полимерных связующих – эпоксидные, цианатэфирные, полиимидные, фенолтриазиновые, – отличающиеся теплостойкостью. Наиболее термостойкие связующие позволяют получать материалы с температурами долговременной эксплуатации от 250 до 300 °С и выдерживают технологические процессы переработки до 400 °С. Исследованы диэлектрические, механические, теплофизические свойства сферопластиков с пониженной плотностью. Установлено, что оптимальное соотношение между плотностью и механическими характеристиками наблюдается при плотности материала 230 кг/м³. Свойства материала приведены в таблице 1. При дальнейшем уменьшении плотности физико-механические характеристики значительно снижаются, что затрудняет применение материала.

Таблица 1. Свойства сферопластика на эпоксидном связующем с плотностью 230 кг/м³

Показатель	Значение
Прочность при сжатии, МПа	4,5 (20 °С)
Прочность при растяжении, МПа	3,0 (20 °С)
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	6,0 (20 °С)
Теплопроводность, Вт/м×К	0,07
Действительная часть диэлектрической проницаемости	1,34
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,003

Характерной областью применения разработанных сферопластиков является их использование в качестве легковесных наполнителей для многослойных конструкций из ПКМ. Исследованные сферопластики имеют высокую теплостойкость и низкую горючесть, что позволяет использовать их в интерьере транспортных средств (самолетов, вагонов железнодорожного транспорта, кораблей), горячих зонах авиационной техники и пр. Другим направлением использования являются конструкции радиотехнического назначения. Низкая диэлектрическая проницаемость сферопластика позволила изготовить радиопрозрачную стенку с коэффициентами прохождения электромагнитных волн не более минус 0,3 дБ в широком диапазоне частот. Поверхностная плотность стенки составила 3,7 кг/м². Низкая теплопроводность материала также позволяет использовать его в изделиях теплозащитного и теплоизоляционного назначений.

Оценка эффективной теплопроводности ворсовых теплозащитных материалов на основе углеродных волокон

П.И. Богомолов, П.А. Коренев

АО «ЦНИИМ», г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: pavel.lab115@mail.ru

Актуальной задачей при разработке перспективной ракетно-космической техники является обеспечение эффективной тепловой защиты поверхностей конструкций, работающих в условиях высоких тепловых потоков. При этом к материалам тепловой защиты предъявляется комплекс требований, основные из которых высокая тепло- и эрозионная стойкость в сочетании с низкой плотностью. Перспективным направлением в этой области является применение в качестве теплозащитных покрытий (ТЗП) ворсовых материалов непропитанной структуры (ВМНС) на основе высокотемпературных волокон, например, углеродных или кварцевых.

К ВМНС относятся волокнистые ворсовые материалы, в которых все или большая часть волокон ворса по толщине слоя, за исключением основы, не связаны между собой связующими или прошивкой и ориентированы относительно основы в заданном направлении. Схематичное изображение структуры и фотография фрагмента ВМНС представлены на рисунке 1.

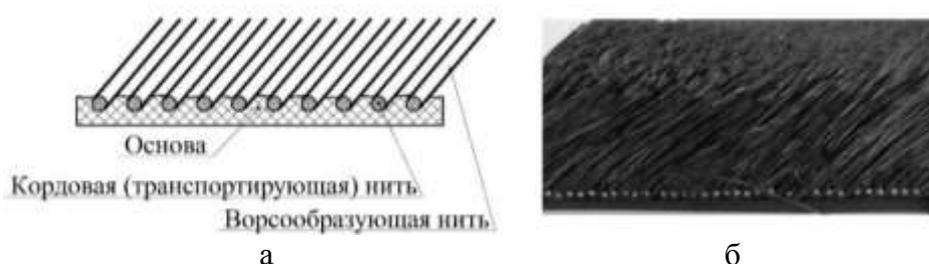


Рис. 1. Структура ВМНС:

а) структура материала; б) фотография фрагмента образца

Ориентируясь на требования, предъявляемые к специальным теплозащитным и теплоизоляционным материалам, в АО «ЦНИИМ» была разработана технология получения данных материалов, а также технологическое оборудование для производства изделий и покрытий на их основе. При этом отличительными особенностями ВМНС и технологии их изготовления являются: высокая теплозащитная эффективность в сочетании с низкой плотностью; стойкость к термоудару; возможность изготовления бесшовных оболочек в форме тел вращения; возможность применения в качестве гибкой теплозащиты; сохранение герметичности основы в процессе нанесения ворсового покрытия.

На этапе проектирования для расчета температурного поля деталей и узлов, работающих в условиях высоких температур, необходимо знать теплофизические характеристики материалов, применяемых в качестве их тепловой защиты, в достаточно широком диапазоне. В некоторых конструкциях максимальная температура эксплуатации может достигать более 3000 °С.

В настоящей работе приводится разработанный авторами подход к расчету эффективной теплопроводности ворсовых материалов, применяемых в качестве ТЗП, результаты расчетов теплового состояния и результаты экспериментальных исследований образцов ВМНС из углеродных волокон. В частности, рассматриваются ворсовые теплозащитные покрытия, работающие в инертной среде, при уровне удельных тепловых потоков до 15 кВт/м².

Изучение особенностей распространения объемных ультразвуковых волн в слоистых углепластиках с использованием моделирования методом конечных элементов

Н.С. Татаринцев, К.К. Ибришев
МАИ (НИУ) г. Москва, Россия
E-mail: tatarintsev.nick@gmail.com

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) давно используются в конструкции воздушных судов (ВС) и все шире применяются для изготовления особо ответственных силовых элементов. В связи с этим появляются новые задачи по неразрушающему контролю (НК) изделий из таких материалов.

Основным методом НК, применяемым для силовых толстостенных элементов из углепластика, является ультразвуковой эхо-импульсный метод. С его помощью успешно выявляются дефекты, эквивалентные плоскодонному отражателю диаметром от 5 мм (в ряде случаев – и менее) во всем диапазоне толщин, применяемых в конструкции современных ВС.

Тем не менее, данный метод при контроле изделий из ПКМ имеет значительные ограничения, обусловленные высокой степенью анизотропии механических свойств этой группы материалов. Одним из таких ограничений является невозможность применения схемы прозвучивания наклонным переотраженным лучом, широко используемой при контроле металлов.

Для системного изучения особенностей распространения ультразвуковых волн в толстостенных изделиях (более 5 мм) из слоистого углепластика были изготовлены образцы и проведен ряд экспериментов, выводы из которых позволили лучше понять возможности и ограничения традиционных методик ультразвукового контроля.

В ходе экспериментов было установлено, что значительная часть акустической энергии, излученной в пластину из многослойного ПКМ под прямым углом, переносится в направлении укладки волокна. На рисунке 1 показано схематичное представление распространения продольной ультразвуковой волны в толстой многослойной пластине. Толщина стрелок характеризует амплитуду наблюдаемого сигнала при установке приемника в различных точках на поверхности пластины. Изображение стрелок под прямым углом является упрощением и не учитывает эффект преломления на границе сред. С увеличением расстояния от излучателя, переотражения от поверхностей начинают быстро затухать.

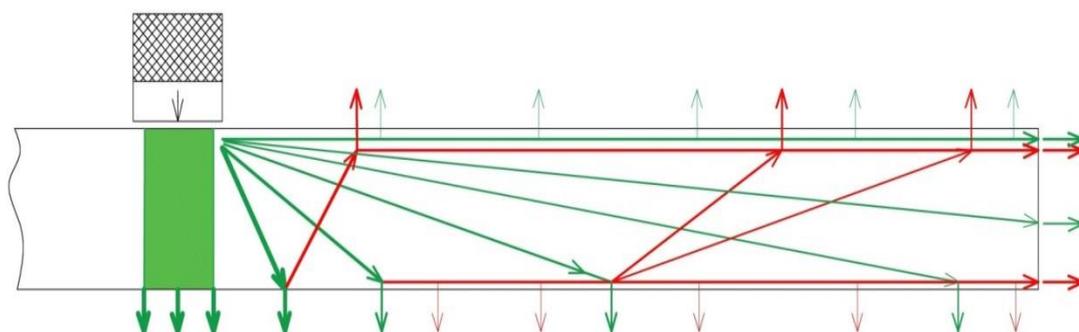


Рис. 1. Распространение продольной волны в толстой пластине из многослойного углепластика после излучения преобразователем (зеленый цвет) и после первого отражения от донной поверхности пластины (красный цвет)

По результатам экспериментов сделан вывод, что получаемый сигнал многократно переотраженной в объеме образца волны имеет структурированную форму и зависит от

толщины пластины, расположения преобразователей относительно границ образца, укладки слоев и других параметров. Для работы с данной информацией требуется создание специализированного программно-аппаратного комплекса, позволяющего излучать и принимать ультразвуковые волны в объекте контроля, а также обрабатывать и представлять полученный сигнал в подходящей для интерпретации форме.

Начальным этапом данной работы является моделирование процесса, позволяющее оценить влияние схемы выкладки, геометрических особенностей и наличия дефектов на характер распространения ультразвуковых волн в объеме объекта контроля. На сегодняшний день для оценки характеристик изделий из ПКМ широко применяются программные комплексы, реализующие в расчетах метод конечных элементов. Моделирование распространения ультразвуковых волн также может эффективно выполняться с использованием данного метода, но требует несколько иного подхода. В ходе отработки были определены принципы моделирования, позволяющие получать достоверные результаты, подтверждаемые исследованиями на образцах.

На рисунке 2 показано моделирование процесса распространения продольной волны в многослойном углепластике с направлениями укладки слоев $0, \pm 45, 90$ на примере визуализации расчета поля перемещений в направлении оси Z. Для возбуждения колебаний использован идеальный поршневой излучатель, имитирующий прямой преобразователь с частотой 2,5 МГц. Отчетливо видно влияние направления укладки слоев на распространение фронта волны относительно осей координат.

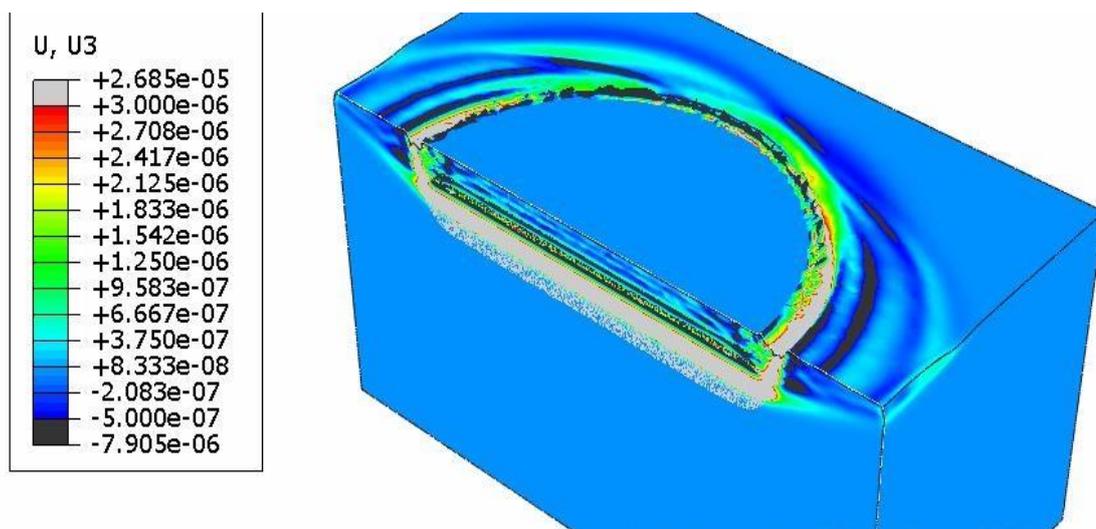


Рис. 2. Визуализация распространения ультразвуковой волны вдоль поверхности образца

Предложенные параметры моделирования позволяют избежать излишнего расхода вычислительных ресурсов, а полученные результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными. Работы в данном направлении будут продолжены с целью получения универсальной модели многослойного углепластикового изделия, позволяющей имитировать влияние несплошностей в материале объекта на характер распространения ультразвуковых волн.

Разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области полимерных синтактных заполнителей-сферопластиков для местного упрочнения участков сотовых конструкций

М.А. Капустянская, А.В. Коваленко, Н.К. Сидельников
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва, Россия
E-mail: MKapust@rambler.ru

Вместе со стремительным развитием отечественного авиастроения увеличивается количество разрабатываемых полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые активно используются в производстве летательных аппаратов. В настоящее время широко применяемым направлением снижения массы является замена традиционных конструкций сотовыми. Однако при этом возникает необходимость упрочнения сотовых конструкций. Наиболее распространенным решением задачи по заполнению полостей и торцов сотовых конструкций, крепления закладных элементов (втулок, фитингов и др.) является использование полимерных заполнителей-сферопластиков

Полимерные заполнители-сферопластики представляют собой легкие полимерные системы, состоящие из полимерной матрицы и дисперсных наполнителей. Одним из основных наполнителей, за счет которого материал и получил свое название, являются полые микросферы. В качестве целевых добавок также используют высокодисперсные порошкообразные наполнители, пигменты, антипирены, благодаря которым система приобретает требуемые физико-механические характеристики и требуемый уровень свойств по пожаробезопасности.

Свойства сферопластиков также зависят от области их применения. Полимерные заполнители, применяемые в зонах установки крепежа, должны иметь высокую прочность при сжатии, отрыве, так как в области крепления возникают значительные эксплуатационные нагрузки. При использовании компаунда для заполнения вертикальных участков необходимо, чтобы он имел определенную вязкость, тем самым предотвращая вытекание заполнителя. Для интерьерных элементов, используемых в пассажирских самолетах, характерно соответствие требованиям по пожарной безопасности.

В отечественном авиастроении НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ является одним из лидеров в области создания сферопластиков. За годы работы было создано более 30 различных видов полимерных заполнителей. Применяются сферопластики на основе эпоксидных (ВПЗ-5, ВПЗ-7, ВПЗ-7М, ВПЗ-21, ВПЗ-25), фенольных (ВПЗ-10, ВПЗ-16М) и цианатэфирных (ВПЗ-17, ВПЗ-24) связующих. Полимерные заполнители, отверждающиеся при нормальной температуре, чаще используются для заполнения участков сотовых конструкций. Они не требуют специального оборудования для создания необходимой температуры и давления, в процессе их отверждения не выделяются летучие газы. С помощью сферопластиков горячего отверждения можно формовать трехслойные панели за единый технологический цикл. Данный вид полимерных заполнителей обладает высокой жизнеспособностью, что позволяет использовать их для механизированного заполнения ячеек.

Особое внимание стоит уделить последним разработкам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области полимерных заполнителей-сферопластиков. Сферопластики марок ВПЗ-7М, ВПЗ-21 и ВПЗ-25 обладают улучшенными физико-механическими характеристиками, поставляются в виде двухупаковочной системы, что позволяет снизить время приготовления заполнителя на производстве и заменить применяемые в авиационной промышленности импортные заполнители, поставляемые в виде двухкомпонентного состава.

Разработка технологии изготовления облегченного стеклопластикового сотового наполнителя для панелей шумоглушения двигателя Д-18Т

С.А. Чугунов, А.Н. Корнейчук, Н.В. Рыбакова, Е.В. Романова
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: chugunovsa@technologiya.ru

В нашей стране со времен СССР эксплуатируются тяжелые транспортные самолеты Ан-124 производства КБ «Антонова». Для Ан-124 в 70-х годах прошлого века был разработан передовой турбовентиляторный двигатель Д-18Т с высокой степенью двухконтурности. В настоящее время часть самолетов стоит на хранении из-за того, что ресурс двигателей подходит к концу, а все запчасти импортного производства. Чтобы поддержать двигатели в работоспособном состоянии производство компонентов для них осваивают предприятия Российской Федерации.

В процессе освоения производства компонентов двигателя была выявлена необходимость изготовления панели шумоглушения, представляющей собой трехслойную клееную конструкцию с сотовым наполнителем марки ПСП-1С (ОСТ 1 00851-77) на основе полимерной бумаги «Фенилон» (ТУ 13-04-598-81). В связи с невозможностью приобретения сотов ПСП-1С и бумаги «Фенилон» перед нами была поставлена задача разработки стеклосотопласта на основе отечественных материалов, удовлетворяющего следующим требованиям:

- шестигранная форма ячеек с размером граней 8–10 мм;
- температура эксплуатации от минус 60 °С до плюс 120 °С;
- плотность не более 50 кг/м³;
- предел прочности при сжатии при 20 °С не менее 0,8 МПа.

На основании анализа заданных требований было принято решение о разработке облегченного стеклосотопласта с размером граней ячеек 10 мм. В результате поиска отечественных стеклотканей, клеевых материалов и связующих были выбраны: стеклоткань марки Э1/1-100П, клей марки БФ-2, связующее – бакелитовый лак ЛБС-1.

Поскольку изготовление стеклосотопласта является многостадийным процессом, были исследованы все технологические этапы производства. Исследованы факторы, влияющие на качество нанесения клеевых полос. Установлен технологический режим нанесения клеевых полос и выбраны показатели клея БФ-2, которые обеспечили качественную сборку сотопакетов с отсутствием сквозного проникновения клея на обратную сторону стеклоткани Э1/1-100 и слипания ткани при сматывании ее в рулон. Установлен такой режим прессования сотопакетов с нанесенными клеевыми полосами, который гарантировал бездефектное растяжение сотопакетов с образованием правильных шестигранных ячеек.

Проведенные исследования и выбор технологических параметров процесса двукратной пропитки сотоблоков позволили получить сотоблоки со стабильными физико-механическими характеристиками по всему объему сотоблока. Были получены сотоблоки облегченного стеклосотопласта со следующими характеристиками: плотность от 45-49 кг/м³, прочность при сжатии от 1,6-1,8 МПа. Полученные результаты полностью удовлетворяют заданным требованиям.

Был разработан комплект технической документации (технические условия, технологическая инструкция), проведены предварительные и приемочные испытания, по результатам которых технологической документации была присвоена литера «О₁».

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана технология изготовления облегченного стеклосотопласта марки ССП-1-10Э, который успешно прошел испытания в составе панелей шумоглушения двигателя Д-18Т в АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг».

Разработка легковесного заполнителя для подводной техники с глубинами эксплуатации до 3 км

П.В. Серый, С.Н. Трошкин, В.Л. Лебедев, В.Ю. Косильников, А.А. Ломзакова
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: npk11@crism.ru

Проблема создания и использования легковесных материалов, не теряющих своих свойств в условиях большого гидростатического давления и воздействия морской воды, остро встала в середине XX века в связи с резким увеличением объемов исследований мирового океана и началом создания глубоководных технических средств.

В настоящее время в глубоководных аппаратах для создания дополнительной плавучести наибольшее применение нашли синтактные пены (сферопластики), представляющие собой композиционнонаполненные материалы, получаемые на основе модифицированных эпоксидных полимеров, микрочаеистая структура которых создается за счет полых стеклянных микросфер и газовых включений.

Наиболее актуальными для подводного судостроения являются задачи модификации существующих газонаполненных сферопластиков в направлении достижения минимальной плотности при требуемой прочности, использование сферопластиков пониженной плотности позволит значительно снизить материалоемкость новых заказов и обеспечит улучшенные тактико-технические характеристики для существующих.

Целью настоящей работы является разработка легковесного сферопластика с плотностью $\rho = (0,49-0,51) \text{ г/см}^3$ для подводной техники, включая обитаемые подводные аппараты и автономные роботизированные комплексы с глубинами эксплуатации до 3 км.

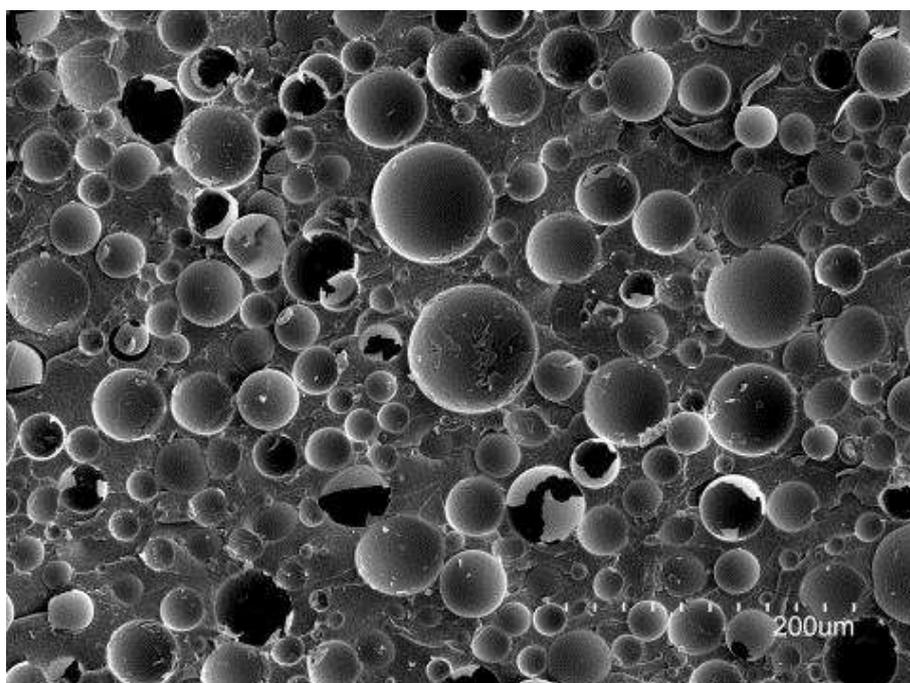


Рис. 1. Структура сферопластика

В результате проделанной работы было изучено влияние объемного модуля на прочность сферопластика, оптимизирован состав полых стеклянных микросфер, рассчитаны по кинетическим данным и отработаны режимы приготовления сферопластика, предложена технология получения сферопластика методом экструзии, разработана методика определения гидростатической прочности и водопоглощения сферопластиков.

Исследование влияния углеродных наночастиц на радиотехнические свойства стеклопластиковых сотовых наполнителей

Е.В. Романова, Н.В. Рыбакова, А.П. Шадрин, А.Н. Корнейчук
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Задача придания полимерным композиционным материалам (ПКМ) радиопоглощающих и физико-механических свойств с помощью наполнителей, в том числе наноразмерных, при сохранении эксплуатационных характеристик матрицы является крайне актуальной. Технологические основы получения таких материалов предполагают введение и равномерное распределение в диэлектрической полимерной матрице электропроводящих наполнителей. Наполненные наночастицами ПКМ являются перспективным материалом для применения в изделиях радиотехнического назначения с целью снижения взаимных помех, возникающих при работе приемной и передающей радиоэлектронной аппаратуры.

В последние годы растет интерес к использованию новых технологий для создания инновационных легких радиопоглощающих материалов с многофункциональными свойствами. К таким материалам можно отнести сотовые наполнители (СЗ) на основе стеклотканей благодаря уникальным сочетанием свойств, таких как малый вес, высокие значения удельной прочности и жесткости. В связи с тем, что стеклосотопласты радиопрозрачны, возможность модификации матрицы электропроводящими наночастицами для получения радиопоглощающего материала с регулируемыми свойствами представляется перспективным направлением. Электромагнитные волны, попавшие в соты, задерживаются из-за внутреннего отражения и последующего поглощения, которое оценивается по коэффициенту отражения. Коэффициент отражения зависит от различных факторов, таких как высота и прочность СЗ, тип наполнителя и размер сотовой ячейки.

В данной работе исследовалось влияние содержания углеродных наночастиц на радиотехнические и физико-механические свойства стеклопластиковых сотовых наполнителей на основе фенолоформальдегидного связующего.

Исследования проводили на образцах стеклопластикового сотового наполнителя (ССП) с размером граней ячеек 2,5 и 3,5 мм. Образцы ССП были изготовлены методом растяжения пакета с последующей пропиткой модифицированным бакелитовым лаком ЛБС-1 с массовым содержанием модификатора 0,2 и 0,5%. В качестве модифицирующей добавки использовались одностенные углеродные нанотрубки диаметром $(1,6 \pm 0,4)$ нм и длиной более 5 нм, а также наноразмерные графеновые частицы диаметром 0,5-1 мкм и толщиной 3-10 нм. Дисперсию модификатора в этаноле обрабатывали ультразвуком при различных режимах для исключения седиментации и агломерации композиции. Затем модифицирующую добавку вводили в связующее и повторно обрабатывали ультразвуком. Дальнейшее смешивание проводили с помощью высокоскоростной мешалки с частотой вращения ротора 1500–2000 об/мин.

Проведено исследование микроструктуры полученных композиций методом оптической микроскопии. Было выявлено, что при массовом содержании наполнителя 0,2 и 0,5% седиментация и агломерация наполнителя в матрице отсутствует. Также был проведен ДСК анализ для определения влияния модифицирующих добавок на кинетику отверждения связующего.

Для оценки влияния модифицирующих добавок на радиотехнические характеристики образцов ССП проводили измерения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. В результате приведенных исследований установлены зависимости показателя коэффициента отражения от вида наполнителя, его концентрации и размера граней ячеек ССП. Также дана сравнительная оценка зависимости физико-механических характеристик от степени наполнения модифицирующей добавкой ССП.

Модификация полимерного наполнителя ПЗ-2 с целью увеличения весовой эффективности летательных аппаратов

В.А. Жуков, А.С. Магрицкий, Г.М. Разина

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: ceh94@technologiya.ru

В последнее время массовой эффективности агрегатов авиационной и космической техники уделяется все большее внимание. К материалам и конструктивно-технологическим решениям предъявляются жесткие требования с целью создания легких и прочных конструкций летательных аппаратов. Одним из ключевых направлений в этой области является применение многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов, отличающихся повышенными удельными характеристиками по жесткости и прочности. В зависимости от конструктивных особенностей изделий массовая доля полимерного наполнителя может составлять до 30% общей массы конструкции.

Полимерный наполнитель представляет собой композитный материал, состоящий из полимерной матрицы и стеклянных микросфер, выступающих в роли основного наполнителя. Изменения плотности полимерного наполнителя можно добиться варьированием доли микросфер в стандартном составе. Увеличение содержания микросфер приводит к уменьшению доли смолы в составе сферопластика, как следствие снижается прочность полимерного наполнителя на сжатие. Для сохранения этого показателя на требуемом уровне – согласно техническим условиям – было предложено использование мелкодисперсных добавок. В качестве модифицирующих добавок применялись фуллерен (C_{60}), оксид титана (TiO_2) и электрокорунд (Al_2O_3).

В ходе исследований изучены зависимости предела прочности при сжатии, температуры начала отверждения композиции, а также плотности в зависимости от содержания добавок.

Определение характеристической температуры проводилось методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Анализ проводили в сканирующем режиме при скорости нагрева $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Согласно результатам испытаний, представленным в таблице 1, при добавлении модифицирующей добавки температура начала отверждения сдвигается в область более низких температур. Такое значение позволит сохранить уже имеющийся режим отверждения полимерного наполнителя. Можно отметить, что наиболее резкое снижение температуры начала отверждения наблюдается для электрокорунда.

Таблица 1. Зависимость температуры начала отверждения от содержания модифицирующей добавки

Масс. доля добавки, %	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
T (C_{60}), $^\circ\text{C}$	96,5±0,5	95,3±0,5	94,1±0,5	84,7±0,5	83,0±0,5
T (TiO_2), $^\circ\text{C}$	92,6±0,5	92,0±0,5	91,8±0,5	91,6±0,5	88,0±0,5
T (Al_2O_3), $^\circ\text{C}$	108,0±0,5	102,0±0,5	95,2±0,5	92,5±0,5	84,0±0,5

Плотность сферопластика, содержащего модифицирующие добавки, определялась на отвержденных образцах размером (10×10×15) мм методом обмера и взвешивания. По результатам анализа установлено, что плотность образца увеличивается с повышением содержания добавки, но с учетом повышенного содержания микросфер остается ниже, чем при использовании стандартного состава.

Испытанию на сжатие подвергались образцы (10×10×15) мм при скорости нагружения 1 мм/мин. Результаты испытаний показывают, что увеличение содержания модифицирующей добавки повышает предел прочности при сжатии.

Сводные данные по модифицированию полимерного заполнителя ПЗ-2 и результаты испытаний на определение прочности при сжатии и плотности представлены в таблицах 2-4.

Таблица 2. Результаты испытаний сферопластика с различными концентрациями C_{60}

Массовая доля C_{60} , %	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
Прочность при сжатии, МПа	18,7 ± 0,8	19,8 ± 0,4	21,4 ± 0,5	22,5 ± 0,8	23,6 ± 0,6
Плотность, кг/м ³	426,3 ± 7,5	429,2 ± 3,9	430,8 ± 4,0	431,7 ± 5,5	432,9 ± 6,7

Таблица 3. Результаты испытаний сферопластика с различными концентрациями TiO_2

Массовая доля TiO_2 , %	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
Сжатие, МПа	18,1 ± 0,8	19,4 ± 0,7	20,2 ± 1,6	20,7 ± 1,1	21,5 ± 1,2
Плотность, кг/м ³	409,8 ± 5,1	423,3 ± 7,8	432,1 ± 3,4	437,0 ± 5,8	445,9 ± 7,4

Таблица 4. Результаты испытаний сферопластика с различными концентрациями Al_2O_3

Массовая доля Al_2O_3 , %	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
Сжатие, МПа	18,5 ± 1,0	18,5 ± 1,0	19,8 ± 0,8	21,5 ± 1,1	22,2 ± 1,3
Плотность, кг/м ³	414,8 ± 2,8	422,0 ± 2,9	432,0 ± 1,5	436,9 ± 1,7	438,1 ± 1,0

При проведении испытаний полимерного заполнителя ПЗ-2, содержащего 29% микросфер в соответствии с техническими условиями, а также состава, содержащего 35% микросфер без введения модифицирующей добавки, были получены результаты, представленные в таблице 5.

Таблица 5. Результаты испытаний полимерного заполнителя ПЗ-2 без добавок

Сферопластик	ПЗ-2 (29 % микросфер)	ПЗ-2 (35 % микросфер)
Прочность при сжатии, МПа	15,0	11,0
Плотность, кг/м ³	450	390

Во всех композициях было отмечено увеличение прочностных свойств и плотности при повышении содержания модифицирующей добавки. Это указывает на эффективность использования модифицирующих добавок для улучшения характеристик материалов. При этом состав, содержащий 0,5% диоксида титана, обладает минимальной плотностью и прочностью при сжатии, которая соответствует требованиям технических условий. Использование такого состава позволит снизить плотность полимерного заполнителя на 9%, а массу комплекта обечаек головного обтекателя – на 3%.

Технологические особенности механической обработки сотового заполнителя и исследование их влияния на качество сотовой структуры

А.Е. Кованов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Среди множества деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) следует выделить получившие широкое распространение трехслойные конструкции, состоящие из двух несущих слоев и расположенного между ними легкого заполнителя, наиболее ярким представителем которого является сотовый. За счет разнесения жестких несущих слоев (воспринимающих растяжение, сжатие и сдвиг в плоскости листа) на расстояние, определяющееся толщиной сотового заполнителя, достигается большее отношение жесткости трехслойной конструкции к ее массе. Если сравнивать с монолитной конструкцией из ПКМ, то весовая эффективность трехслойной в три и более раз выше. Сотовый заполнитель – самый перспективный на сегодняшний день материал для изготовления сверхлегких и прочных конструкций различного назначения.

В данной работе в качестве заполнителя для трехслойных конструкций из ПКМ используется сотовый заполнитель из алюминиевой фольги с шестигранной ячейкой, изготавливаемый склеиванием листов фольги и последующей растяжкой в сотовую структуру.

Рассматриваются следующие темы:

1. Способы фиксации заготовки сотового заполнителя для механической обработки.
 - 1.1 Фиксация с помощью вакуумного приспособления.
 - 1.2 Фиксация с использованием фиксаторов с низкой температурой плавления.
 - 1.3 Фиксация с помощью замораживания воды в ячейках сотовой структуры.
 - 1.4 Фиксация с помощью замораживания воды в нижней части сотовой структуры.

На основании анализа способов фиксации сотовой структуры для механической обработки сотового заполнителя переменной строительной высоты были выявлены преимущества и недостатки данных способов, позволяющие выбрать подходящий способ фиксации для конкретной структуры сотового заполнителя.

2. Исследование влияния режимов механической обработки на качество сотовой структуры. Исследования показали, что для увеличения производительности механической обработки следует использовать специальные фрезы роутерного типа вместо ножевых фрез и стандартного режущего инструмента по алюминию. В данном случае съём материала можно производится сразу на всю необходимую глубину, ограничиваясь только длиной режущей части фрезы, тогда как ножевой фрезой возможно снимать послойно не более 4-6 мм в глубину за проход, а в некоторых случаях (при обработке замкнутых карманов) не более 1-2 мм за проход. Также дополнительные ограничения накладываются и на режимы обработки данными фрезами для получения необходимого качества обрабатываемых поверхностей.

Были проанализированы следующие стратегии механической обработки:

а – попутная фрезеровка вдоль направления жесткости;

б – встречная фрезеровка вдоль направления жесткости;

в – попутная фрезеровка перпендикулярно направлению жесткости;

г – встречная фрезеровка перпендикулярно направлению жесткости.

При анализе качества получаемой при механической обработке поверхности сотового заполнителя учитывались дефекты различных видов. Были выявлены зависимости количества дефектов от особенностей режима механической обработки (скорости вращения шпинделя и направления прохода инструмента), позволяющие минимизировать количество дефектов при обработке сотового заполнителя.

Способ оценки ударных деформаций сотовых панелей авиационного назначения с помощью оптической измерительной системы

С.В. Кузнецов, А.В. Мамонов, Д.Ю. Русаков, В.А. Чернушин
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

В процессе эксплуатации сотовые конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ), применяемые, в частности, для звукопоглощения шумов при работе авиационных двигателей, испытывают значительные нагрузки различного характера, наиболее разрушительными из которых являются ударные.

Перед каждым полётом производится визуальный осмотр панелей звукопоглощающего контура с целью выявления ударных повреждений. Данная операция не может выявить вмятин незначительной глубины, которые приводят к снижению несущей способности панелей звукопоглощающего контура. В работе исследовалась возможность обнаружения вмятин малой глубины посредством оптической измерительной системы. Её применение позволяет осуществлять контроль конструкции без непосредственного контакта с поверхностью, а также обеспечивает высокую производительность контроля.

Для оценки состояния сотовых конструкций после ударных повреждений был изготовлен контрольный образец, который представляет собой трёхслойную панель звукопоглощающего контура с алюминиевым сотовым наполнителем. На образец были нанесены восемь искусственных вмятин глубиной от 0,2 до 1,6 мм с шагом в 0,2 мм. Образец с опорной пластиной устанавливался на неподвижную зафиксированную плиту. В качестве нагружающего элемента использовался сферический наконечник (индентор), установленный на подвижной траверсе испытательной машины. Схема нагружения образца представлена на рисунке 1.

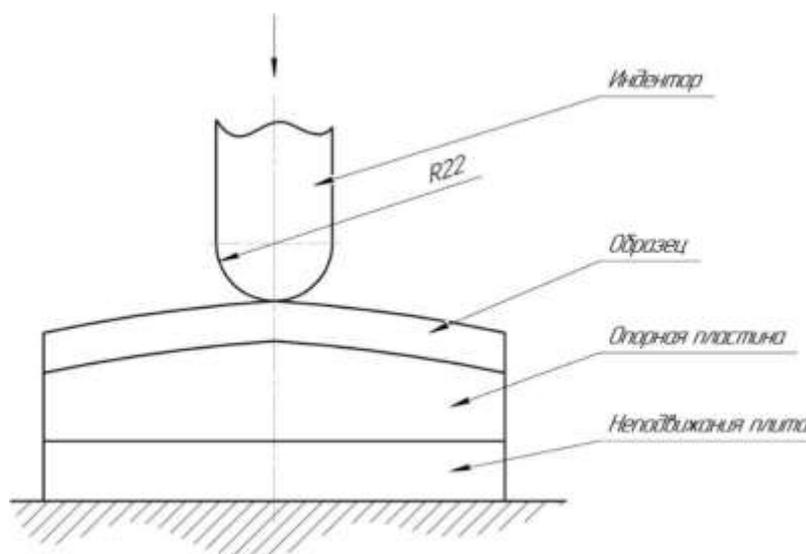


Рис. 1. Схема нагружения образца

Контроль поверхности образца при помощи оптической измерительной системы проводился путем измерения величин отклонений от номинального (теоретического) контура поверхности, деформированной вследствие механического воздействия. По результатам проведенных измерений был создан цифровой двойник образца, представляющий собой пространственную полигональную сетку исследуемой поверхности. На рисунке 2 показаны диаграммы отклонений, а также границы зон деформации образца.

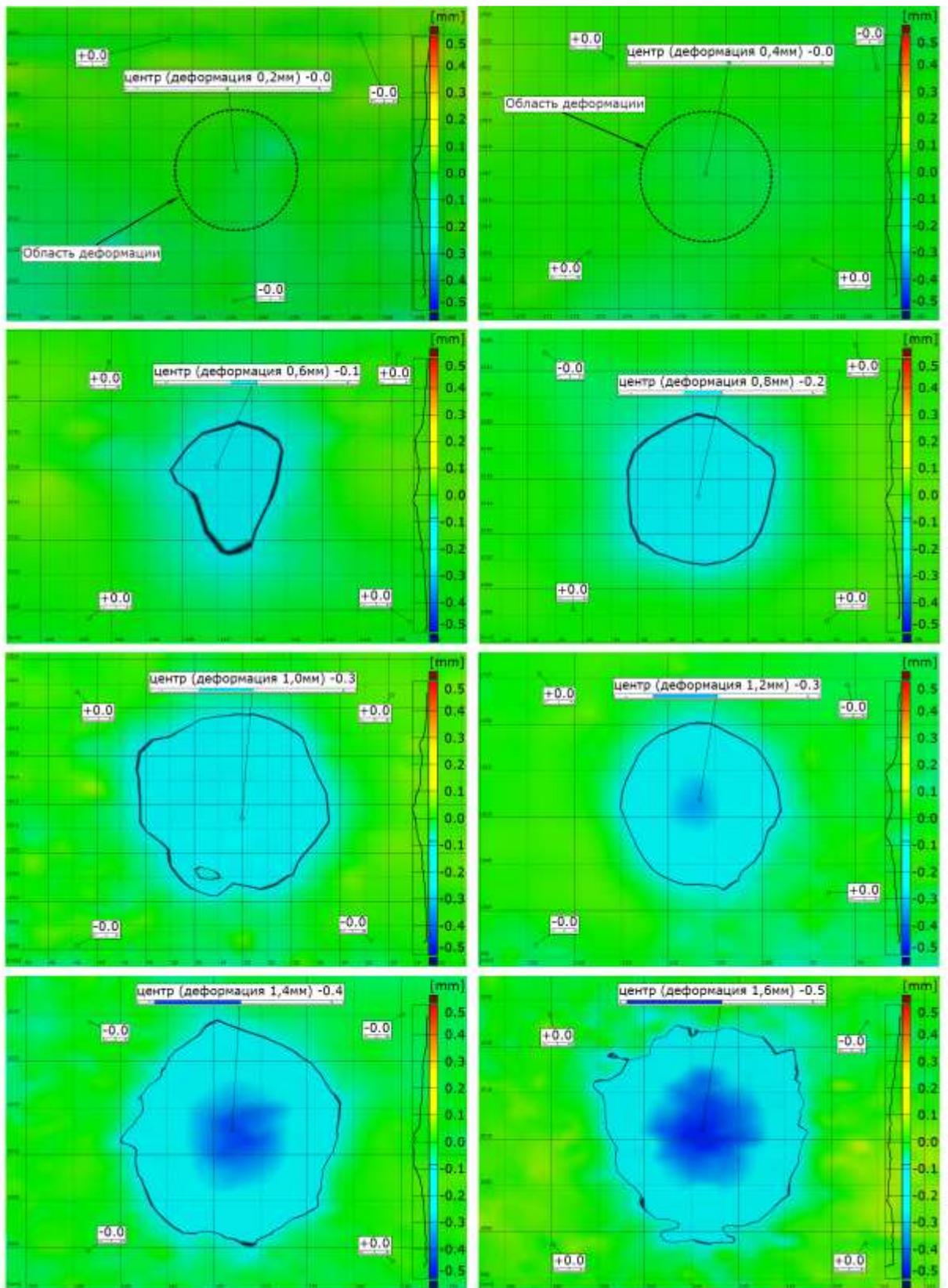


Рис.2. Диаграмма отклонений деформированных зон поверхности образца от номинального (теоретического) контура

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность применения визуального способа оценки целостности конструкции с помощью оптических измерительных систем в качестве экспресс-метода контроля сотовых конструкций из ПКМ.

Композиционный материал на основе алюмоборфосфатного связующего для изделий радиотехнического назначения

И.Г. Атрощенко, П.А. Степанов, В.В. Антонов, М.Н. Кордо, И.И. Ключева, К.В. Печенкин, Л.А. Плясункова, П.Ю. Якушкин
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Современные тенденции космического, авиа- и ракетостроительного производств диктуют определённые требования к материалам, используемым в конструкциях элементов перспективных летательных аппаратов (ЛА). Это влечет за собой постоянное увеличение требований, предъявляемых к радиопрозрачным элементам конструкции, прежде всего, к головным элементам ЛА.

Потребность в материалах, работающих при более высоких температурах определила необходимость разработки композиционных материалов (КМ) на основе неорганических (фосфатных) связующих. Одной из особенностей фосфатных связующих является способность образовывать достаточно прочные структуры при относительно невысоких температурах и сохранять прочностные характеристики при нагревании до высоких температур.

Широкое применение для изготовления термостойких КМ нашло алюмохромфосфатное связующее (АХФС). Особенностью КМ на основе алюмохромфосфатного связующего (связующее ФОСКОН-351) является резкое увеличение геометрических размеров материала перпендикулярно армирующим слоям при нагреве свыше 400 °С, и, как следствие, уменьшение прочностных характеристик. Для смещения температуры начала изменения геометрических размеров в область более высоких температур, материал дополнительно термообработывают с выдержкой при температуре 450-500 °С. Данный факт увеличивает технологический цикл изготовления изделий, требует наличия высокотемпературных печей.

Применение алюмоборфосфатного связующего (АБФС) для изготовления термостойких КМ радиотехнического назначения ограничено в связи с резким уменьшением прочностных и увеличением диэлектрических характеристик материала при нагреве свыше 500 °С, что связано с более узким интервалом наличия аморфных фаз в АБФС и, соответственно, с изменениями в структуре связующего и КМ.

В АО ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» по результатам определения термических свойств, микроструктурного и рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофазового анализа был подобран состав на основе АБФС и порошковых наполнителей, температурные режимы формования и термообработки для стабилизации свойств связующего.

Разработан термостойкий радиопрозрачный КМ на основе алюмоборфосфатного связующего и кварцевой ткани, температура эксплуатации которого составляет 800 °С длительно, до 1200 °С кратковременно.

По результатам комплексного исследования физико-технических свойств термостойкий КМ характеризуется высокими значениями прочностных характеристик, стабильными диэлектрическими характеристиками во всем температурном диапазоне эксплуатации. Отсутствие изменения геометрических размеров перпендикулярно армирующим слоям при нагреве до температуры 1000 °С исключает необходимость проведения дополнительных термообработок и расширяет область применения данного материала.

К вопросу разработки стеклопластиковых радиопрозрачных укрытий мобильных радиолокационных станций

А.А. Баранов, Г.С. Шуль, А.А. Ширко, А.П. Шадрин, Р.М. Гуськов
АО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия
E-mail: baranovaa@technologiya.ru

Защита антенных устройств радиолокационной станции (РЛС) от внешних воздействий окружающей среды определяет ее эффективность, поэтому особое внимание при разработке комплекса РЛС уделяется радиопрозрачным укрытиям (РПУ). Одними из наиболее распространенных полимерных композиционных материалов (ПКМ), используемых в создании РПУ, являются стеклопластики, в которых оптимально сочетаются высокий уровень прочностных и эксплуатационных свойств с низкими значениями плотности (весовые параметры) и диэлектрических характеристик (радиопрозрачность). Также можно отметить невысокую стоимость данной продукции.

В настоящей работе рассмотрены некоторые аспекты разработки и изготовления стеклопластиковых бескаркасных РПУ, защищающих оборудование мобильных наземных и корабельных РЛС от воздействия внешних силовых и климатических факторов.

При выборе конструкции, применяемой технологии изготовления и материалов РПУ наряду с механическими характеристиками не менее важным является выполнение радиотехнических требований к изделию – обеспечение заданных значений коэффициента прохождения радиоволны (КПР) в установленном диапазоне частот и углов сканирования антенной системы. Для габаритных радиопрозрачных укрытий, используемых в РЛС с многоэлементными антенными системами, наиболее оптимальны многослойные стенки в виде сэндвич-конструкций, позволяющих получать достаточно легкие, прочные и жесткие изделия, и технологические процессы, обеспечивающие наиболее точное соблюдение толщин конструктивных элементов, что обеспечивает требуемые радиотехнические характеристики (РТХ) изделия.

Физико-механические, диэлектрические и эксплуатационные характеристики получаемого стеклопластика в значительной степени определяются свойствами образующих его исходных компонентов. Наиболее часто в производстве радиопрозрачных изделий на нашем предприятии используется стеклопластик на основе эпоксифенольного связующего ЭНФБ и конструкционной стеклоткани Т-10-14. С учетом температурного диапазона эксплуатации РПУ (от минус 70 °С до плюс 65 °С) выбранное связующее полностью обеспечивает заданные требования по температуре стеклования формуемого материала и ресурсу эксплуатации изделий. В изделиях с многослойной конструкцией радиопрозрачной стенки в качестве материалов среднего слоя в большинстве случаев используются облегченные стеклопластиковые сотовые наполнители тканой (ТССП-Ф-10П) или клееной (ССП-1-4,2) структуры.

При изготовлении крупногабаритных изделий и изделий сложной геометрии с повышенными требованиями к радиотехническим параметрам активно используется метод препрегового вакуумного формования, позволяющего обеспечить однородность и стабильность физико-механических и диэлектрических характеристик получаемых материалов.

Одним из основных элементов, определяющих качество формуемого композитного изделия, является формообразующая оснастка. Ее разработка и изготовление часто становится важнейшим этапом подготовки производства. Искажения формы изделий в значительной степени обусловлены взаимодействием формуемого изделия с оснасткой в процессе отверждения, а получаемые величины отклонений отличаются для различных материалов оснасток. Значительное влияние на качество формуемых конструкций также оказывают элементы технологического пакета, включающего разделительные, впитывающие, дренажные слои, цулаги, вакуумный мешок и др. Так, жертвенные слои не

только определяют шероховатость поверхности после их удаления, но и влияют на количество связующего, поглощаемого используемой тканью при формовании композитов. Соответственно, отличия в соотношении компонентов определяют различие в физико-механических свойствах.

При оценке устойчивости РПУ к внешним эксплуатационным факторам мы проводим моделирование конструкций в SolidWorks Simulation для выполнения статического анализа при воздействии механических нагрузок. На рисунке 1 представлены результаты моделирования воздействия ветровой нагрузки для одного из радиопрозрачных изделий с трехслойной сотовой конструкцией радиопрозрачной стенки и монолитным посадочным контуром. В SolidWorks Simulation был выбран составной оболочечный элемент, специально созданный для расчета композитных материалов, где каждый слой задается в явном виде со своими характеристиками материала.

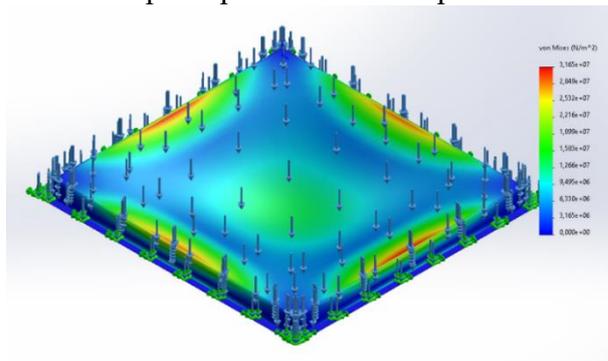


Рис. 1. Эпюра напряжений РПУ при ветровой нагрузке

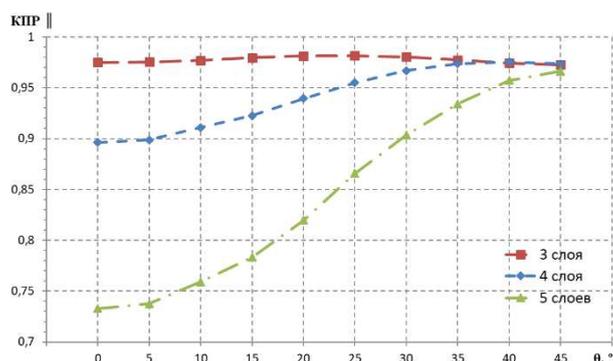


Рис. 2. Расчетные зависимости КПР от угла падения для различных толщин стеклопластиковых обшивок в трехслойной сотовой конструкции для одной частотной точки ($\lambda = 2$ см)

Из рисунка 1 видно, что расчетные максимальные напряжения будут приходиться на угловые части укрытия в зонах перехода вертикальной монолитной стеклопластиковой стенки в обшивки трехслойной сотовой конструкции.

Достаточно часто применяемым на практике решением для такого типа композитных конструкций является выполнение усиления угловых фрагментов за счет перехода ряда слоев монолитной части на тонкие обшивки трехслойной (многослойной) сотовой части. Такие усилительные элементы одновременно могут влиять на конечные радиотехнические параметры формируемых изделий. Примером необходимости соблюдения толщин обшивок радиопрозрачной стенки для получения необходимых требований по РТХ могут служить расчетные зависимости КПР, приведенные на рисунке 2.

Другим фактором, приводящим к изменению РТХ, является изменение расстояния между обшивками в сотовой части конструкции, обусловленное, например, избыточными допусками на порезку стеклосотопласта, прогибом слоев внутренней обшивки в его ячейки под воздействием давления формования. Однако данный фактор в значительно меньшей степени влияет на РТХ системы «антенна–укрытие» за счет существенно меньших значений диэлектрических характеристик.

Из вышеуказанного следует, что измерение РТХ изготавливаемых изделий – как контроль в рамках выполнения заданных требований по РТХ, так и комплексный контроль технологического процесса – необходимо для строгого выполнения требований ТЗ.

Накопленный нашим предприятием многолетний опыт по разработке технологии изготовления конструкций из ПКМ, комплексный учет материаловедческих, конструкторских и технологических факторов позволяет создавать радиопрозрачные изделия с высоким уровнем физико-механических и радиотехнических свойств, способствующих безотказному функционированию РЛС в течение всего срока эксплуатации.

Влияние лакокрасочного покрытия на радиотехнические характеристики полимерно-композиционных радиопрозрачных изделий различного направления

П.А. Степанов, В.П. Крылов, К.В. Печенкин, Р.А. Чирков, А.П. Шадрин, П.А. Андреева
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Окружающая среда, в которой эксплуатируется радиопрозрачное изделие из полимерного композиционного материала (ПКМ), обуславливает воздействие на них температурных, ветровых нагрузок, пыли, солнечной радиации, повышенной влажности. Это говорит о необходимости применения защитных мер для изделий из ПКМ от атмосферных явлений, в данном случае – применение лакокрасочного покрытия (ЛКП).

В конечные значения радиотехнических характеристик изделия свой вклад вносят собственные диэлектрические характеристики (ϵ и $\text{tg}\delta$) лакокрасочных материалов (ЛКМ), которые входят в состав наносимой системы. Для оценки влияния каждого из компонентов на диэлектрические характеристики в рамках температурного режима эксплуатации необходимо определить диэлектрические характеристики компонентов при нагреве. Исходя из общих результатов, определить, какой компонент оказывает большее влияние.

Для подтверждения необходимости учета количества слоев в системе ЛКП было проведено исследование диэлектрических характеристик путем измерения коэффициента прохождения (КП) на плоских образцах, имитируя технологический процесс изготовления изделия (радиопрозрачного укрытия из ПКМ), то есть проведение измерений КП системы «антенна–укрытие» после каждого этапа производства, начиная с изготовления заготовки и заканчивая нанесением финишного слоя ЛКП.

В качестве исходных материалов были использованы эпоксидные лакокрасочные материалы различного назначения: шпатлевка марки ЭП-0026; грунтовка марки ЭП-0104 зеленого цвета; эмаль марки ЭП-140 серого цвета. Лакокрасочные материалы на основе эпоксидных смол обладают рядом преимуществ: повышенная стойкость к химическим реагентам, высокая гибкость, хорошая адгезия, улучшенная стойкость к разрушению от солнечных лучей.

Для определения диэлектрической проницаемости компонентов системы были проведены измерения ϵ и $\text{tg}\delta$ компонентов при нагреве. Для измерения использовался метод объемного цилиндрического резонатора при фиксированной частоте при нагреве. Компоненты системы наносились на заготовку из кварцевого стекла. На рисунках 1, 2 представлена графическая зависимость упомянутых диэлектрических параметров от температуры для трех видов лакокрасочных материалов.

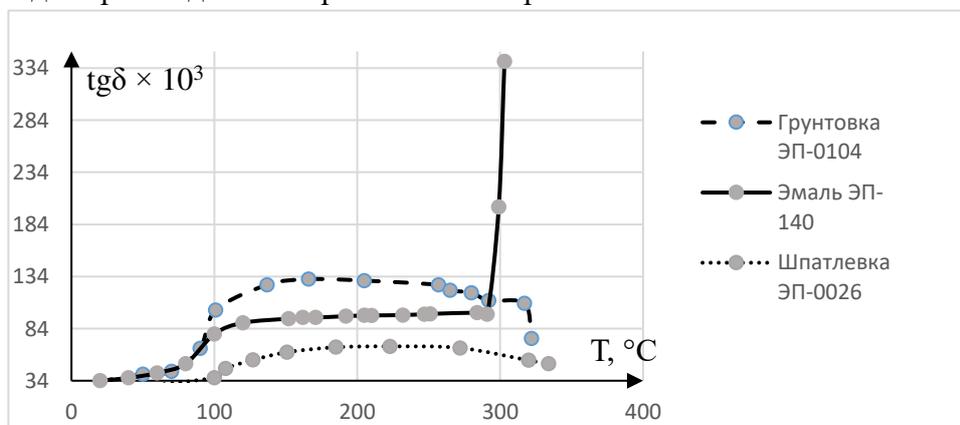


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для лакокрасочных материалов

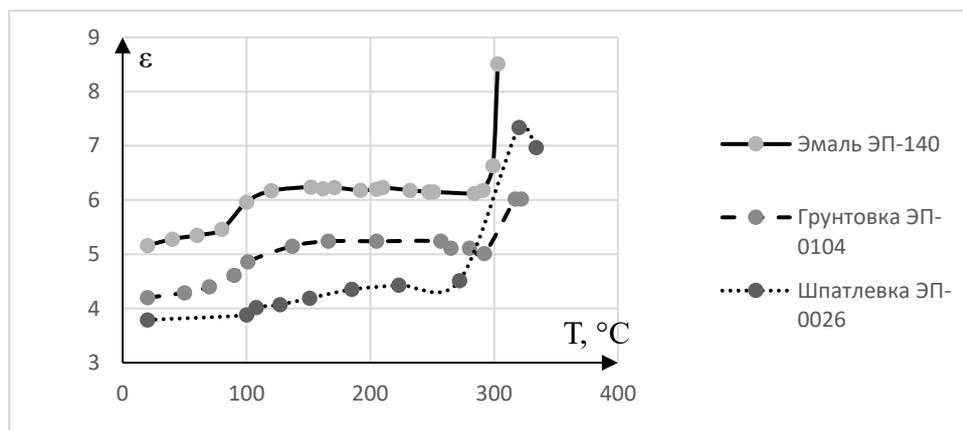


Рис. 2. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для лакокрасочных материалов

Для подтверждения результатов, полученных из анализа отдельных компонентов, был проведен анализ образцов, повторяющих стенку изделия и состоящих из системы: ПКМ на основе кварцевой ткани и эпоксидного связующего, эпоксидная шпатлевка и эпоксидная эмаль. Анализ проводился для ПКМ и каждого слоя отдельно.

Измерения проводились на лабораторной установке методом «свободного пространства» в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. В этом диапазоне частот толщины представленных образцов являются электрически тонкими. Измерения проводились при нормальном падении волны на поверхность образца.

Из приведенных данных на рисунке 3 видно, что слой шпатлевки оказывает максимальное влияние на радиотехнические параметры.

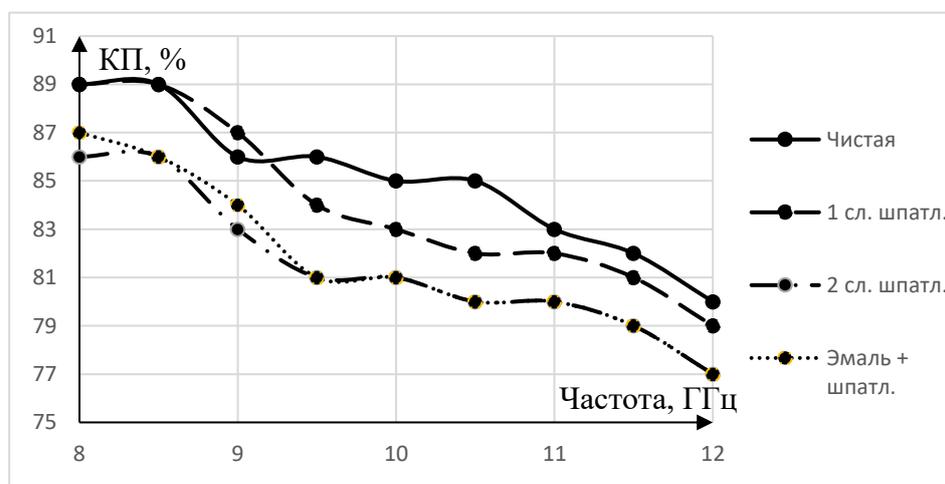


Рис. 3. Зависимость КП от частоты для образца из ПКМ

В итоге можно сделать вывод, что именно шпатлевка оказывает максимальное влияние на радиотехнические параметры. Причем падение КП после нанесения шпатлевки более существенное, чем после нанесения эмали. Это объясняется двумя факторами – физической толщиной слоя и собственными диэлектрическими характеристиками ЛКМ. Также установлено, что с увеличением частоты влияние ЛКП увеличивается. Это объясняется тем, что при увеличении частоты, значение физической толщины стенки с диэлектрическими параметрами, сравнимыми с диэлектрическими параметрами самой стенки, оказывает большее влияние на радиотехнические параметры.

Исследования по разработке методики активного тепловизионного контроля расслоений в стеклопластиковых элементах конструкций летательных аппаратов

А.В. Терехин, С.И. Минин, Д.И. Чулков, А.А. Филатов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

При производстве стеклопластиковых элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА) высока вероятность образования дефектов в виде расслоений, снижающих прочностные характеристики конструкций и способных послужить причиной выхода ЛА из строя в процессе эксплуатации. В связи с этим неразрушающий контроль (НК) стеклопластиковых элементов конструкций ЛА на отсутствие расслоений является обязательным этапом их производства.

В настоящее время контроль расслоений в стеклопластиковых элементах конструкций ЛА проводится, преимущественно, импедансным и теневым ультразвуковыми методом. Основным недостатком данных методов является малая производительность и высокая трудоемкость контроля, проводимого, как правило, в ручном режиме, а также необходимость контакта акустических преобразователей с поверхностью контролируемого элемента.

В условиях серийного производства и роста объема выпуска стеклопластиковых элементов конструкций ЛА с целью повышения оперативности контроля на наличие расслоений перспективным является применения активного тепловизионного метода контроля (АТВК), обеспечивающего высокую оперативность, чувствительность и информативность НК, отсутствие механического контакта с объектом контроля, отсутствие расходных дефектоскопических материалов.

В ходе проведенных работ установлена оптимальная схема АТВК для контроля расслоений в элементах конструкций ЛА, выполненных из стеклопластика на основе фенолформальдегидного связующего (ФН), армированного кварцевой тканью ТС 8/3-К-ТО (рис. 1).

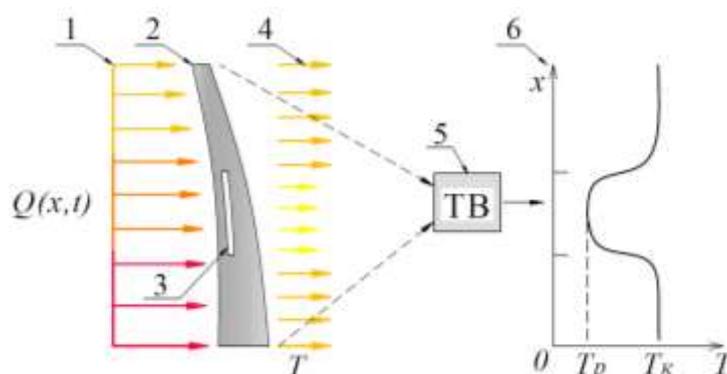


Рис. 1. Схема проведения АТВК элементов конструкций ЛА из стеклопластика на основе ФН, армированного кварцевой тканью ТС 8/3-К-ТО:

- 1 – тепловой поток Q от источника нагрева; 2 – контролируемый элемент конструкции ЛА;
- 3 – расслоение; 4 – температурное поле поверхности контролируемого элемента T ;
- 5 – тепловизор; 6 – распределение температуры на поверхности контролируемого элемента;
- T_r – температура в области расслоения; T_k – температура в бездефектной области

Подобраны тип, мощность и время воздействия источника теплового излучения. Экспериментально установлено, что независимо от вида нагрева (оптического или конвективного) температура поверхности стеклопластикового элемента конструкций ЛА со стороны источника теплового излучения при проведении АТВК составляет не более $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ниже температуры деструкции материала), а разница температур между бездефектной

областью и областью с расслоением составляет более 2 °С, что в разы выше температурной чувствительности (0,05 °С) применяемого тепловизора BALTECH TR-0170N и позволяет однозначно идентифицировать расслоения и определять их границы. При этом, согласно термограмме контрольного образца (рис. 2), выполненного из фрагмента стеклопластикового элемента конструкций ЛА и имеющего имитатор расслоения в виде «глухого» цилиндрического отверстия диаметром 12 мм, метод обладает требуемой чувствительностью для неразрушающего контроля расслоений в рассматриваемой конструкции.

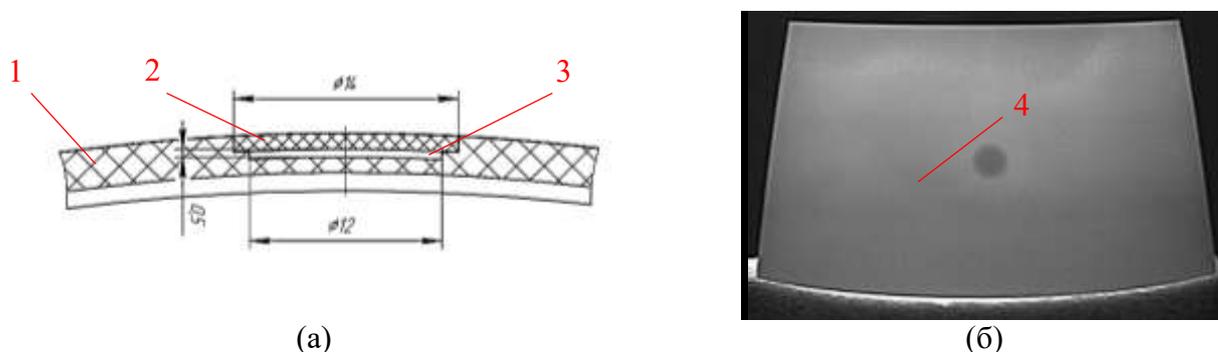


Рис. 2. Эскиз (а) и термограмма (б) контрольного образца с имитатором расслоения: 1 – стенка контролируемого элемента; 2 – заглушка из материала контролируемого элемента; 3 – имитатор расслоения; 4 – температурная аномалия над имитатором расслоения

Проведена экспериментальная отработка разрабатываемой методики АТВК на серийных стеклопластиковых элементах конструкций ЛА, забракованных по наличию расслоений, по результатам которой все расслоения, выявленные ультразвуковыми методами, были однозначно идентифицированы по температурным аномалиям на термограммах (рис. 3).

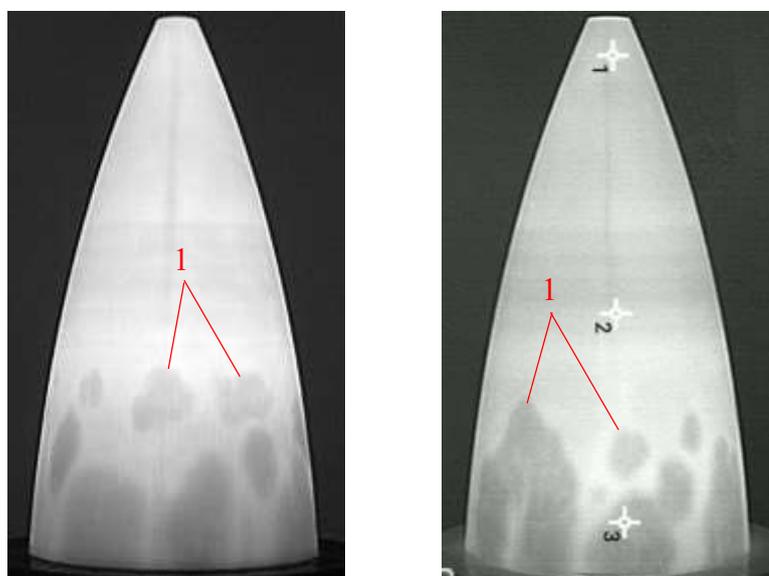


Рис. 3. Термограммы стеклопластиковых элементов конструкций ЛА с расслоениями: 1 – температурные аномалии над расслоениями

Результаты исследования показывают, что АТВК может быть использован в качестве самостоятельного метода для определения расслоений в стеклопластиковых элементах конструкций ЛА, а внедрение методики его выполнения в процесс серийного производства позволит более чем в три раза сократить трудоёмкость НК.

Определение и прогнозирование механических и теплофизических характеристик композиционного материала на основе фенолформальдегидного связующего после начала деструкции

П.Ю. Якушкин¹, Р.А. Миронов¹, М.О. Забежайлов¹, К.В. Клемазов²

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Наличие термодеструкции в композиционных материалах на основе органических связующих усложняет расчет физических процессов в конечных изделиях, так как физические свойства (теплопроводность, модуль упругости, плотность) начинают зависеть не только от температуры в данный момент времени, но и от степени разложения органических компонент материала (степени превращения).

При оценке свойств в диапазоне рабочих температур, в том числе при температурах выше температуры начала деструкции представляется необходимым изучение влияния кинетических процессов деструкции на измеряемые свойства материала. Для этого при проведении испытаний необходимо варьировать не только температуру, но и время выдержки при данной температуре.

В работе показано, что теплофизические и механические свойства композиционного материала на основе кварцевой ткани и фенолформальдегидного связующего (ФНкв) начинают меняться при нагреве выше 300 °С в связи с деструкцией связующего (табл. 1-3). Данные изменения тем больше, чем больше длительность и/или температура нагрева.

Таблица 1. Максимальное изменение структурных и теплофизических свойств материала ФНкв при деструкции в результате нагрева выше 250 °С в процентах от исходного значения (до начала деструкции)

Свойство	Режим нагрева	
	быстрый (нагрев до 300 °С со скоростью 50 °С/с, длительность 6 с)	медленный (нагрев до ~600 °С, длительность ~850 с)
Плотность	-4%	-25%
Теплопроводность	-13%	~ -60%
ТКЛР	-(25-30)%	-(80-90)%

Примечание – Для теплопроводности и ТКЛР исходные значения при температуре 250 °С.

Таблица 2. Максимальное изменение прочностных свойств материала ФНкв при деструкции в результате нагрева выше 300 °С в процентах от исходного значения (до начала деструкции)

Свойство	Режим нагрева	
	быстрый (нагрев до 400 °С со скоростью ~1,3 °С/с, длительность 5 минут)	медленный (нагрев до 450 °С со скоростью ~1,4 °С/с, длительность нагрева 5 минут плюс выдержка 30 минут)
Прочность при сжатии	~ -10%	~ -70%
Прочность при изгибе	~ -30%	~ -80%

Примечание – Для механических свойств исходные значения при температуре 300 °С.

Таблица 3. Максимальное изменение упругих свойств материала ФНкв при деструкции в результате нагрева выше 300 °С в процентах от исходного значения (до начала деструкции)

Свойство	Режим нагрева	
	быстрый (нагрев до 400 °С со скоростью ~1,3 °С/с, длительность 5 минут)	медленный (нагрев до 450 °С со скоростью ~1,4 °С/с, длительность нагрева 5 минут, плюс выдержка 30 минут)
Модуль упругости при сжатии	-13 %	-11 %
Модуль упругости при изгибе	-0,5 %	~-60 %

Предполагается, что при длительной изотермической выдержке преобладает механизм термоокислительной деструкции, который, в свою очередь, приводит к значительному выгоранию связующего и, следовательно, к более выраженной деградации свойств материала ФНкв. Установлена минимальная температура, выше которой некоторые свойства материала ФНкв (теплопроводность, ТКЛР) начинают деградировать. Она совпала с максимальной температурой термообработки материала и составила 250 °С. При этом она ниже температуры начала потери массы, определяемой на основе данных ТГА, которая составила ~300 °С. Механические свойства материала ФНкв начинают меняться только при нагреве выше 300 °С в связи с термоокислительной деструкцией связующего. Так же, как и в случае теплофизических свойств, эти изменения тем больше, чем больше длительность и/или температура нагрева. Это может указывать на то, что связующее, несмотря на начало деструкции, еще некоторое время продолжает выполнять свою функцию передачи напряжений на армирующие волокна, прочность которых и определяет прочность композита.

Из полученных результатов следует, что прочностные свойства и модуль упругости при изгибе сильно зависят от режима нагрева, как и в случае теплофизических свойств, и для надежного проектирования изделий из материала ФНкв важно знание кинетики изменений этих свойств во время всего режима.

Для определения кинетики изменения теплофизических, механических свойств и плотности был использован подход, основанный на представлении композиционного материала в виде смеси двух компонент: деструктирующей (связующее) и не деструктирующей (основа). Для построения кинетической модели процесса термоокислительной деструкции связующего был проведен его термогравиметрический анализ при нагреве с различными скоростями. По полученным данным была выбрана кинетическая модель процесса и определены ее параметры. Затем кинетическая модель была использована для прогнозирования степени деструкции связующего при его нагреве по режимам, близким к условиям получения экспериментальных данных, и был проведен расчет механических и теплофизических свойств композиционного материала ФН при помощи соответствующих моделей смесей. В качестве прогнозируемых свойств выступали плотность, модуль упругости при изгибе, а также теплопроводность. Было показано, что с помощью такого простого подхода удается адекватно спрогнозировать поведение таких свойств, как плотность и модуль упругости. Однако для прогнозирования теплопроводности и коэффициента термического расширения при нестационарном нагреве требуется развитие более сложных моделей или экспериментальных подходов.

Полимерные фотолюминесцентные плёнки для светодиодов

А.В. Бакланов¹, П.Н. Гордеев¹, С.В. Лисовский², В.Н. Личманова¹, А.Г. Налогин¹,
С.В. Сальников¹, Н.А. Шарапов¹

¹АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», г. Фрязино, Россия;

²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

E-mail: enpromptex@mail.ru

Разработаны и исследованы полимерные фотолюминесцентные плёнки (ФЛП) на основе выпускаемых светодиодных фотолуминофоров (ФЛ), которые имеют структуру алюминий-галлиевых гранатов редкоземельных элементов, активированных церием: $\text{Ln}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}\text{Ce}^{3+}$ (Ln-Y, Gd, Lu). Технология формирования ФЛП основана на методе полива суспензии, состоящей из спиртового раствора полимера и мелкодисперсного порошка ФЛ. Суспензия через щель движущейся с постоянной скоростью специальной конусообразной фильеры ровным слоем выливается на лавсановую подложку, находящуюся под срезом фильеры, высушивается и снимается в виде плёнки. В качестве полимера был выбран поливинилбутираль (ПВБ), обладающий свойствами поверхностно-активного вещества и являющийся термопластичным вблизи 100°C . Для отлива плёнки приготавливалась суспензия из порошка фотолуминофора, ПВБ, пластификатора олигоэфирокрилата (ТГМ) и изопропилового спирта. Полив осуществлялся из движущейся с постоянной скоростью фильеры на лавсановую плёнку в несколько слоев, количество которых зависит от типа люминофора и необходимой коррелированной цветовой температуры (КЦТ). Толщина плёнки подбиралась таким образом, чтобы цветные координаты лежали вблизи кривой Планка при возбуждении ФЛ синим светодиодом с максимумом свечения при длине волны 465 нм. Характеристики фотолюминесцентных плёнок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики фотолюминесцентных плёнок

№	Показатель	ФЛП-2700	ФЛП-3000	ФЛП-3500	ФЛП-4000
		Норма композитных ФЛП			
1	Внешний вид	Пленка желто-оранжевого цвета, не содержащая посторонних включений, пузырей, разрывов			
2	КЦТ, К				
	КЦТ _{мин}	3000	3700	4800	7000
	КЦТ _{макс}	3400	4100	6100	8700
3	Цветовые координаты				
	(x,y) _{КЦТмин}	(0,445, 0,422)	(0,400, 0,372)	(0,352, 0,372)	(0,303, 0,330)
	(x,y) _{КЦТмакс}	(0,405, 0,377)	(0,372, 0,360)	(0,322, 0,324)	(0,290, 0,295)
4	Размеры ФЛП:				
	ширина, мм	90			
	длина, мм	100			

На рисунке 1 изображены цветные координаты плёнок на основе фотолуминофоров ФЛП-2700, ФЛП-3000, ФЛП-3500, ФЛП-4000 различной толщины. Данные ФЛП могут применяться в качестве удаленного конвертера с ФЛ в белых светодиодах с различными КЦТ.

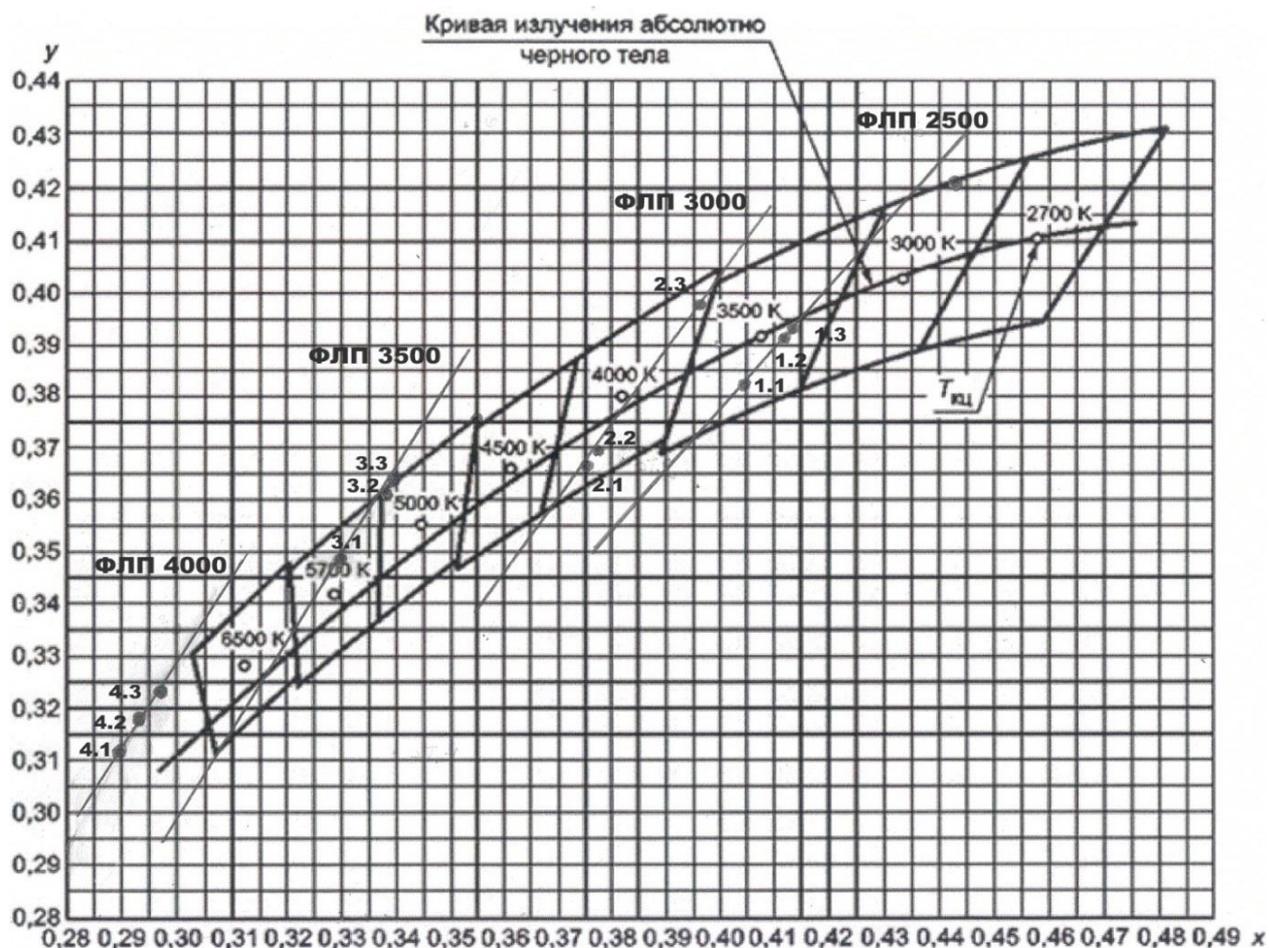


Рис. 1. Цветовые координаты образцов ФЛП и границы белого света согласно ГОСТ 54350-2011

Полученные ФЛП могут применяться в качестве удаленного конвертера с ФЛ в белых светодиодах с различными КЦТ.

Разработанная технология может быть использована в серийном производстве люминесцентных пленок на основе редкоземельных люминофоров, необходимых для детектирования мягкого, среднего и жесткого рентгеновского и изотопного гамма-излучения в устройствах рентгенографии и томографии, а также для визуализации и фиксации усредненных, сверхбыстрых, промежуточных, медленных и тепловых нейтронных потоков.

Разработка и оптимизация технологии выкладки обшивок из ПКМ обечайки ракетносителя «Ангара»

Н.В. Степанов, А.Ю. Синицын, Е.Ю. Куприкова, В.И. Смирнова, В.В. Мазур
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: sinitsynayu@technologiya.ru

С использованием современных программных средств разработана и оптимизирована технология выкладки обшивок из полимерных композиционных материалов (ПКМ) обечайки головного обтекателя ракетносителя «Ангара». Рассмотрены три варианта выкладки слоев препрега конической обечайки с заданной схемой армирования:

- сплошная с обеспечением углов армирования по образующей, проходящей через плоскость симметрии обечайки;
- сегментно-веерная с обеспечением углов армирования по образующим, проходящим через плоскость симметрии сектора;
- оптимизированная (разработанная в среде программного обеспечения (ПО)).

Моделирование и анализ операций выкладки проводились в ПО FiberSim. В ходе оптимизации учитывались изменения углов армирования относительно образующих на конической поверхности сектора, удаленных от плоскости симметрии, ширины используемого препрега и количества секторов (рис. 1).

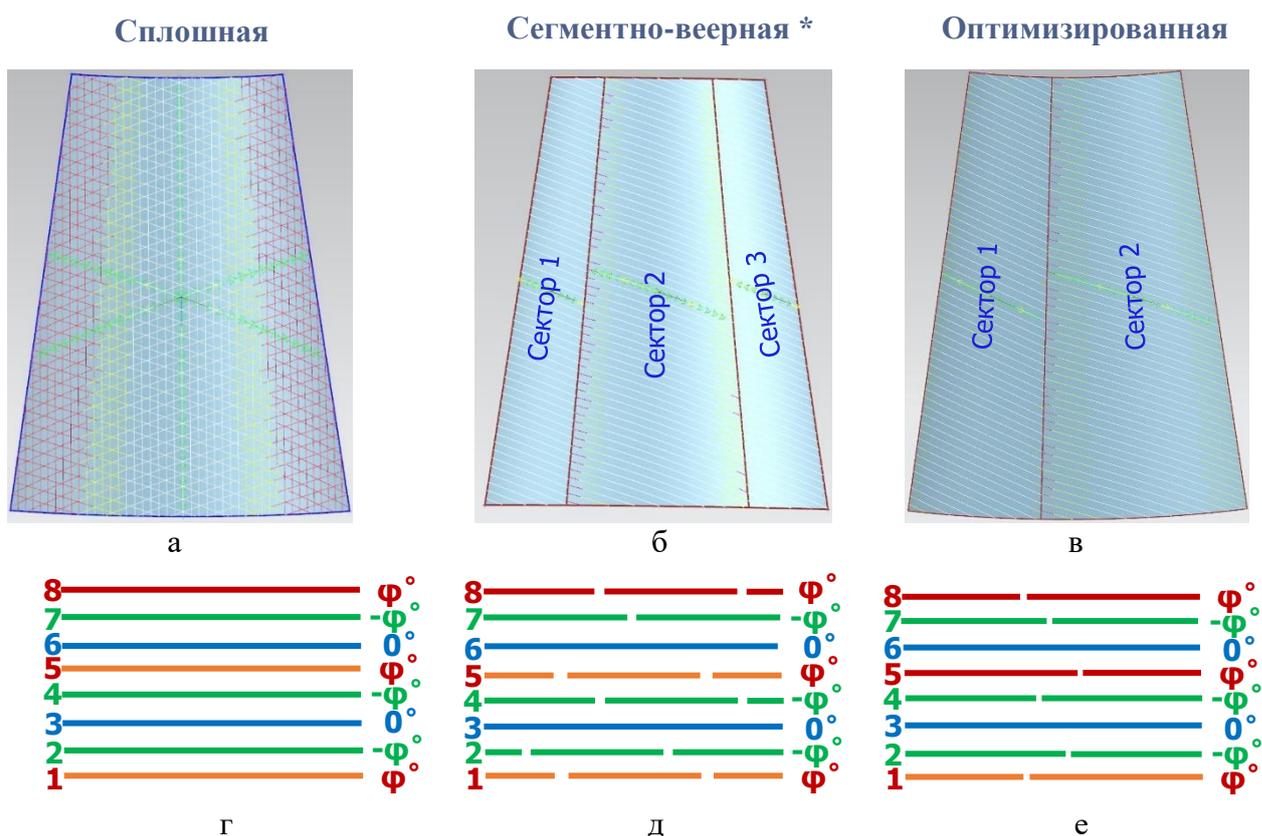


Рис. 1. Результаты моделирования выкладки типичных отдельных слоев под углами $\pm\varphi$:
а, б, в – модели обшивки конических обечайек;
г, д, е – расположение технологических стыков по слоям;

*Технология применяется при изготовлении обшивок конических обечайек ракетносителей

Кроме того, для каждого варианта проводился анализ схем армирования в контрольных точках с определением фактического значения углов армирования слоев относительно образующей конической поверхности, проходящей через контрольную точку. Расположение

контрольных точек на изделии представлено на рисунке 2. При этом учитывались особенности раскроя материалов, количество стыков и время выкладки, определяющие трудоемкость и материалоемкость изготовления обшивок.

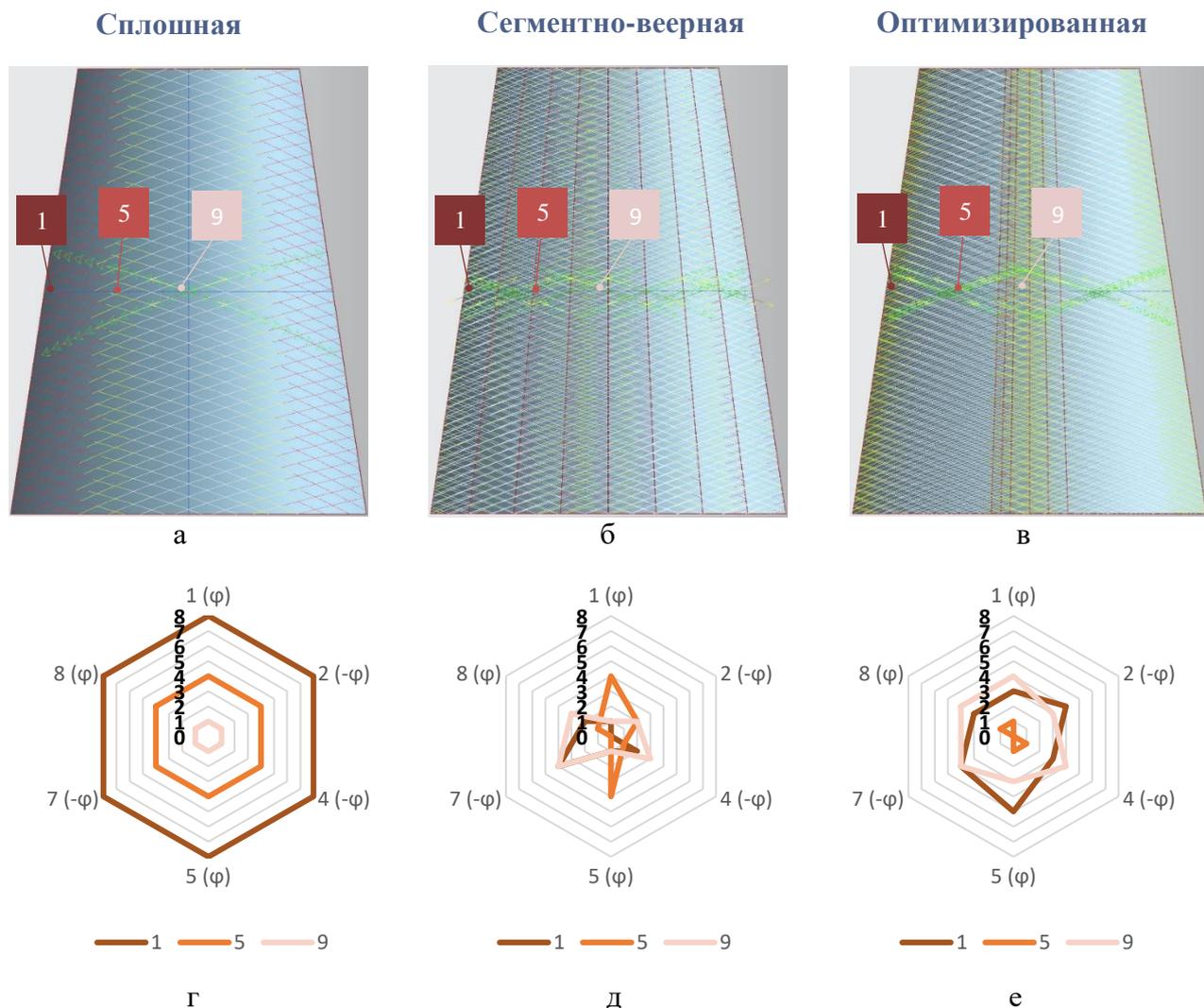


Рис. 2. Данные анализа вариантов армирования в контрольных точках:
 а, б, в – результаты моделирования выкладки всех слоев препрега с обозначением контрольных точек;
 г, д, е – лепестковые диаграммы с обозначением предельных отклонений направления слоев от расчетной схемы армирования в контрольных точках

Результаты анализа в контрольных точках показали, что расхождения фактических схем армирования с расчетными значениями при выкладке по оптимизированной технологии не превышают допустимых отклонений углов армирования 5° . При этом практически в два раза уменьшается количество технологических стыков и повышается однородность свойств обшивки в сравнении с сегментно-веревной выкладкой.

По экономическим показателям оптимизированная технология выкладки также имеет очевидные преимущества. Трудоемкость производственных процессов в сравнении с сегментно-веревной выкладкой меньше на 25%, а коэффициент используемых материалов (КИМ) выше на 23%. Улучшение экономических показателей обусловлено уменьшением количества заготовок препрега, необходимых при выкладке слоя, и упрощением их геометрических форм.

Обеспечение технологической надежности изделий из ПКМ, изготавливаемых методом ППД

В.А. Проценко, А.А. Степаненко, В.В. Кирюшина, П.А. Степанов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Для оценки состояния технологического процесса (ТП) производства изделий требуемого качества введено понятие технологической надежности. Данный термин не имеет единого количественного показателя, а может быть охарактеризован совокупностью количественных и качественных факторов, таких как:

- точность и стабильность технологических параметров, свойств исходного сырья, выходных параметров материала и изделия;
- нахождение ТП в статистически управляемом состоянии, отсутствие особых причин нарушения качества;
- высокий уровень индексов пригодности и воспроизводимости;
- отсутствие сбоев в производстве, низкий уровень коэффициентов запуска;
- отсутствие сбоев при контроле качества партии изделий (квалификационные, периодические испытания).

Обеспечение высокого уровня технологической надежности возможно за счет сбора и анализа информации о ТП и последующего проведения мероприятий, направленных на минимизацию производства некондиционной продукции.

Данная стратегия управления качеством и обеспечения технологической надежности внедрена в производство изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), изготавливаемых методом пропитки под давлением (ППД).

Сбор данных в рамках текущего производства осуществляется в электронных базах данных MS Excel, ORACLE, 1С:ПАУК, ЛИС, Statistica. Анализ статистической информации проводится ежедневно и заключается в контроле соответствия выбранных параметров ТП и материалов требованиям рабочей конструкторской и технологической документации, нормативно-технической документации на исходное сырье. Так, анализ свойств связующего, измеряемых при входном контроле, показал стабильность их значений, приемлемый уровень вариаций и отсутствие выхода за установленные контрольные границы.

Оценка состояния ТП с точки зрения стабильности и управляемости проводится один раз в год в рамках выполнения мероприятий программ обеспечения надежности на стадии серийного производства (ГОСТ РВ 0027-102-2019). Особое внимание уделяется динамике структурных свойств ПКМ, внешнему виду изделий после операции формования (гофры, оттеночность), отсутствию критически значимых дефектов по результатам неразрушающего контроля, точности и стабильности геометрических параметров (толщины стенки, высоты, внешнего диаметра). Стабильность ТП подтверждается с помощью контрольных карт Шухарта.

Работы над повышением уровня технологической надежности изделий из ПКМ позволили выявить важные параметры качества, до сих пор не входившие в перечень контролируемых параметров. К ним относятся термомеханические свойства связующего (термодеструкция) и деформационно-прочностные свойства ПКМ при одновременном воздействии нагрузки и температуры (теплостойкость). Уровень данных свойств, определяемый на сегодняшний день факультативно каждый раз при смене партии связующего, является индикатором качества изготовленного изделия и дает технологам дополнительную информацию о возможных рисках ТП. По данным за 2023 год отмечается значимое возрастание теплостойкости материала ФНкв. (Тн.д. = (285 ± 4) °С) по сравнению с 2018–2019 гг.

Разработка метода обеспечения высокого качества поверхности крупногабаритных деталей авиационного назначения из ПКМ, формуемых при повышенной температуре

М.А. Кольцов, И.В. Панпурина

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: Koltsovma@technologiya.ru

Повышение весовой эффективности летательного аппарата достигается во многом благодаря увеличению доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) при производстве деталей фюзеляжа. К поверхностям самолета, обтекаемым воздушным потоком, предъявляются высокие требования не только по гладкости, но и точности изготовления. Допуски на внешние обводы в ряде случаев составляют десятые доли миллиметра. Еще одно важнейшее эксплуатационное свойство – теплостойкость, способность изделия сохранять жесткость при повышении температуры и одновременном воздействии нагрузки. И если для изготовления деталей из ПКМ с высокой теплостойкостью достаточно применить препреги на основе углеродного волокна и теплостойкого связующего с температурой переработки более 120 °С, то для обеспечения высокого качества поверхности нужно провести тщательную технологическую проработку.

Основной задачей данной работы являлось изготовление крупногабаритных панелей фюзеляжа летательного аппарата из препрегов марок КМКУ, КМКС и алюминиевого сотового заполнителя с обеспечением заданным конструкторской документацией (КД) качеством поверхности. Размер панелей – до 12×5 м. В соответствии с КД на поверхности деталей допускаются местные неровности до 0,25 мм, в зоне скоса сотового заполнителя – до 1 мм. Температура формования панелей достигает 185 °С, давление 0,22 МПа.

Во многом на качество деталей влияет процесс подготовки к режиму формования, а именно, формирование технологического пакета: укладка жертвенных и разделительных слоев, установка формообразующих цулаг, укладка дренажного материала и вакуумной пленки. Неправильно подобранный пакет приводит к возникновению ряда дефектов, таких как складки, неровности на поверхности детали, расслоения и непроклеи, отклонение от заложенной в КД толщины, повышенная пористость и др. Учитывая наличие зон переменной жесткости и двойной кривизны панелей, их значительные габариты и высокие требования к качеству отформованной поверхности, выбору цулаг было уделено повышенное внимание.

Наибольшее распространение при формовании деталей из ПКМ получили алюминиевые и стеклопластиковые цулаги. Но у данных материалов есть существенный недостаток – высокий коэффициент линейного термического расширения (КЛТР). КЛТР алюминия составляет $(23,8 \times 10^{-6})$ 1/К, стеклопластика – приблизительно (9×10^{-6}) 1/К. Так, на длине 12 м удлинение стеклопластиковой цулаги при температуре формования 185 °С составит порядка 17 мм. При таком значительном изменении длины цулаги на поверхности ПКМ неизбежно возникают дефекты – местные неровности, складки. Для изделий больших размеров необходима цулага с КЛТР, близким к коэффициенту линейного термического расширения формуемого изделия. В связи с этим было принято решение об изготовлении комбинированных цулаг из препрегов на основе углеволокна и стеклянной ткани. Выбрана следующая схема сборки цулаги: внутренние слои углеродной ленты, облицованные слоями стеклоткани. Слои углепластика в комбинированной цулаге позволяют добиться низкого значения КЛТР и за счет высокой жесткости обеспечить более равномерную передачу давления формуемой заготовке, а поверхностные слои из препрега на основе стеклоткани придают эластичность, снижают хрупкость, повышают эксплуатационные характеристики. Кроме того, поверхностные слои на основе стеклянных волокон снижают стоимость цулаг и служат защитным слоем, предотвращающим механические повреждения кожных покровов при работе с цулагой.

Разработка и применение комбинированных цулаг позволили изготовить крупногабаритные панели фюзеляжа, соответствующие высоким требованиям конструкторской документации.

Применение аддитивных технологий при изготовлении оснастки для сетчатых конструкций

С.В. Никонов, В.В. Батраков
КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия
E-mail: stanislav.nikonov@mail.ru

Последние годы характеризуются повышенным вниманием ученых и специалистов к возможности максимально повысить весовую эффективность летательных аппаратов. Традиционно используемые в авиации алюминиевые, магниевые и титановые сплавы уже не позволяют решать поставленные задачи. В этих условиях композиты на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон становятся основным материалом для конструкций с высокой весовой эффективностью, так как по своим удельным характеристикам они в настоящее время не имеют себе равных. Организация Центральным научно-исследовательским институтом специального машиностроения серийного производства сетчатых корпусов ракет-носителей позволила приступить к исследованию возможности применения сетчатых конструкций в авиастроении. Сетчатые конструкции, состоящие из взаимно пересекающихся спиральных и кольцевых ребер, отличаются максимальным коэффициентом использования материала ввиду укладки однонаправленного композиционного материала по линиям действия главных напряжений. Однако стандартная оснастка для изготовления конструкций является дорогостоящей, что подтолкнуло к исследованию возможности создания менее дорогой оснастки.

На сегодняшний день у ведущих предприятий, занятых намоткой сетчатых конструкций, имеется тенденция изготовления сборной металлической оправки с установленным на ней силиконовым ковриком. Изготовление такой оснастки требует большого количества технологических операций и характеризуется высокой трудоемкостью. Более того, изготовление опытных образцов для различного рода испытаний целесообразнее с применением одноразовой оснастки с низкими материалоемкостью и конечной стоимостью. Стремление удовлетворить описанные выше требования к оснастке и исключить недостатки имеющихся решений стимулирует поиск нетрадиционных подходов к разработке новых технологий их изготовления. На фоне активного внедрения аддитивных технологий в различные отрасли машиностроения была реализована идея по созданию одноразовой разрушаемой пластмассовой оснастки для изготовления сетчатых конструкций.

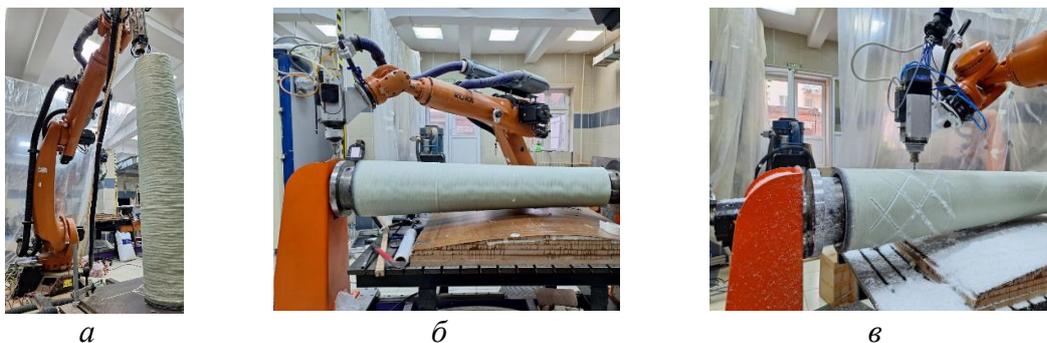
Технология изготовления сетчатых конструкций с использованием одноразовой разрушаемой пластмассовой оснастки заключается в следующих операциях:

1. изготовление оснастки;
2. выкладка армирующего материала;
3. пропитка и формование изделия;
4. извлечение изделия за счет разрушения оснастки под действием нагрева в печи и приложения небольшого усилия.

Благодаря составу оборудования универсального роботизированного комплекса удалось осуществить 3D-печать экструзионной головкой заготовки оснастки с последующей ее механической обработкой шпиндельной головкой, а также выкладкой армирующего материала выкладочной головкой одним роботом-манипулятором. Явным преимуществом от принятого решения стала минимизация перемещений оснастки и изделия.

Последовательность изготовления оснастки следующая (рис. 1):

1. 3D-печать роботом манипулятором заготовки оснастки;
2. механическая обработка этим же роботом-манипулятором внешней поверхности оснастки;
3. нарезание пазов для укладки армирующего материала.



а – 3D-печать заготовки оснастки; *б* – механическая обработка этим же роботом-манипулятором внешней поверхности оснастки; *в* – нарезание пазов

Рис. 1. Последовательность изготовления оснастки

Использование аддитивных технологий открыло возможность создания оснасток с максимальным коэффициентом использования материала за счет подбора формы оснастки, наиболее приближенной к форме изделия, при сокращении износа режущего инструмента.

Готовое изделие, представленное на рис. 2, было извлечено путем разрушения оснастки по завершении процесса формования расплавлением в печи. Качество изделия, а также его удовлетворение требованиям конструкторской документации говорит о возможности применения технологии для изготовления сетчатых конструкций авиакосмического назначения.



Рис. 2. Извлеченное из оснастки изделие

Резюмируя описанное в работе, стоит отметить, что разработанная технология позволила:

- сократить расходы на материалы благодаря максимальной приближенности заготовки к требуемой форме оснастки;
- организовать безотходное изготовление оснастки за счет перерабатываемости материала и возможности его вторичного использования;
- снизить трудоемкость изготовления;
- снизить риски, связанные с человеческим фактором;
- автоматизировать производство.

Комплекс технологической оснастки и программно-аппаратных средств для создания и уточнения валидационного базиса технологических процессов изготовления изделий из композиционных материалов

Е.А. Пузырецкий, Л.П. Шабалин, Д.В. Савинов, **Н.Ф. Салихов**
КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия
E-mail: ea.puzyretskiy@mail.ru

При производстве изделий из композиционных материалов распространены такие проблемы как остаточные сухие зоны, высокая пористость, неконтролируемая экзотермическая реакция связующего и искривление геометрии изделия.

Одним из наиболее привлекательных способов решения данных проблем является технологическое проектирование, которое включает в себя в том числе разработку цифровых двойников (ЦД) изделий на этапах технологических процессов. Основные компоненты цифрового двойника – это натурные данные, полученные с реального объекта, и математическая модель, которая способна эти данные обрабатывать и прогнозировать, интересующие инженера целевые параметры. В качестве натурных данных могут выступать показания датчиков, результаты обработки изображений и т.д. Математическая модель при этом должна уметь обрабатывать входные данные и с достаточной точностью прогнозировать целевые параметры. Зачастую в качестве математической модели используется конечно-элементная модель (КЭМ) объекта.

Важной компонентой математических моделей является модель поведения материала. Параметры модели поведения в наибольшей степени влияют на целевые параметры, в связи с этим данному вопросу уделяется наибольшее внимание при разработке ЦД. Зачастую в случае несоответствия результатов математического моделирования натурным экспериментам уточнению подвергаются именно параметры модели материала.

В рамках данного исследования предлагается современный подход к разработке и уточнению параметров модели композиционного материала взамен устоявшегося. Устоявшийся подход предполагает испытание опытных образцов либо макетов изделий для уточнения параметров используемых расчётных моделей. Данный метод является крайне затратным для отрасли, так как требует для каждого нового изделия изготовления полноразмерного образца. Для формирования валидационного базиса технологических процессов новый подход подразумевает разработку современной методологической и экспериментальной базы, включающей универсальные образцы, соответствующие оснастки и программно-аппаратные комплексы для фиксации ключевых технологических параметров (рис. 1). Предполагается, что такой подход является существенно более дешёвым и точным, нежели существующий. Также такой подход предполагает формирование в дальнейшем стандартного валидационного базиса, возможность пополнения которого будет у каждого заинтересованного инженера, учёного либо научной группы.

В рамках данной работы был проведён анализ технологических проблем изготовления изделий из ПКМ. Выдвинута идея формирования универсального комплекса образцов для калибровки расчётных моделей, применяемых в рамках технологического моделирования. Проведён анализ основных этапов технологического процесса изготовления. На каждом из этапов определены ключевые технологические параметры и свойства материалов, которые могут оказывать наибольшее влияние на качество изделий. Выдвинуты требования к образцам для калибровки основных параметров материалов. Разработаны технологические оснастки для изготовления данных образцов и фиксации ключевых технологических параметров.

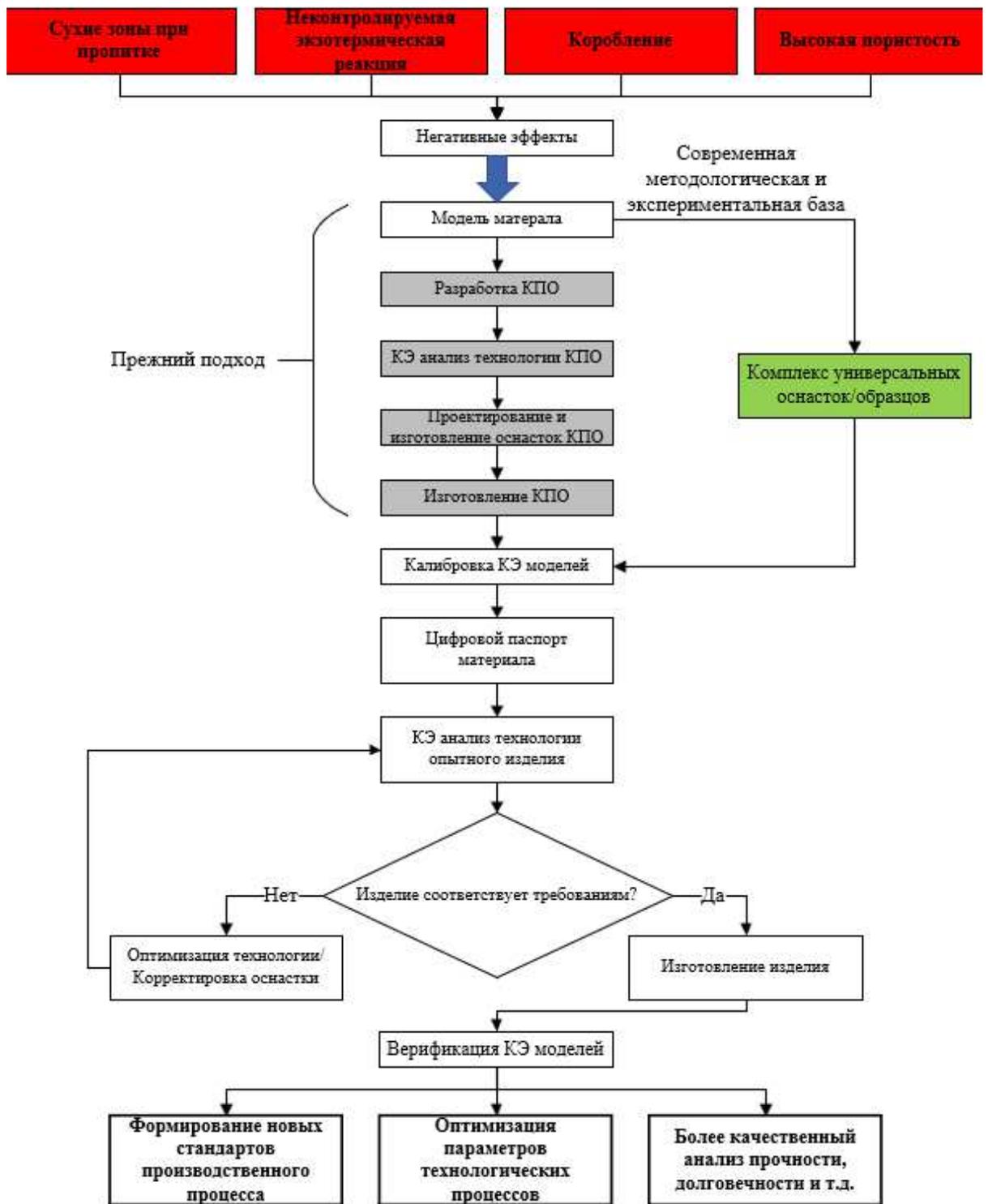


Рис. 1. Интеграция разрабатываемого подхода в современный технологический процесс

Разработка комбинированной многоразовой цулаги переменной жесткости для формирования деталей сложной конфигурации из ПКМ

В.В. Фоменко, М.А. Кольцов, А.В. Серебряков, Е.А. Лизунова
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: koltsovma@technologiya.ru

Цель работы – обеспечение высокого качества поверхности деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ), уменьшение длительности производственного цикла, снижение трудоемкости изготовления деталей сложной конфигурации и большой кривизны.

При формировании деталей из ПКМ часто используют цулаги из стеклопластика, металла и других материалов. Их использование при изготовлении деталей сложной конфигурации и двойной кривизны включает в себя нанесение разметки, установку множества фрагментов с заданным зазором, их фиксацию и укладку эластичных элементов. При повторном использовании цулаг требуется трудоёмкая подготовка её элементов. С целью оптимизации производства в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» была разработана комбинированная цулага.

Комбинированная цулага изготавливается из препрега, резины и нетканого материала. На оснастку укладываются слои препрега (зоны укладки, количество слоев и схема армирования выбираются в зависимости от конфигурации детали), затем по всей поверхности укладывается невулканизованная резина, нетканый материал. Полученная заготовка спекается в единую цулагу по режиму, соответствующему режиму отверждения препрега. Одновременно происходит вулканизация резины. Формующие элементы из препрега приобретают высокую жесткость, обеспечивая равномерное распределение давления на изделие в особо ответственных местах. Резина служит основой конструкции, обеспечивая прочное соединение всех элементов после спекания в автоклаве/печи, а также позволяет цулаге принимать форму изделия и обеспечивает передачу давления на поверхность формируемого изделия в зонах отсутствия жестких элементов. Нетканый материал, в свою очередь, играет роль дополнительного армирующего слоя, который способствует равномерному распределению давления по всей поверхности изделия, снижает текучесть резины и повышает ресурс цулаги.

За счет эластичного формирующего элемента цулаги (рис. 1) может быть отформована на плоской оснастке и установлена на изделие сложной конфигурации (рис. 2). Комбинированная цулага является единой конструкцией, что упрощает и ускоряет процесс ее позиционирования на изделии.

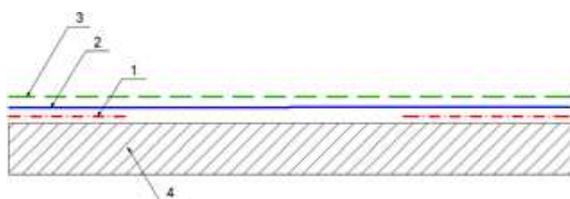


Рис. 1. Схема укладки слоев цулаги:
1 – стеклопластик, 2 – невулканизованная резина, 3 – нетканый материал, 4 – оснастка для выкладки детали

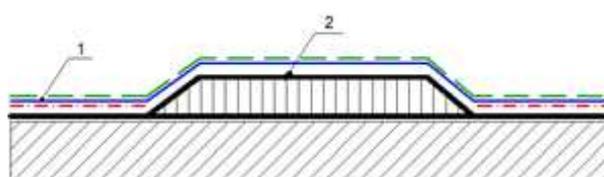


Рис. 2. Схема установки цулаги на изделие:
5 – готовая комбинированная цулага, 6 – формируемое изделие

В результате данной работы:

- оформлен патент на изобретение. Результаты интеллектуальной деятельности внедрены в производство и внесли существенный экономический эффект;
- обеспечено стабильное высокое качество поверхности формируемых деталей, снижено влияние человеческого фактора, увеличен ресурс цулаг, снижена трудоёмкость изготовления деталей и длительность производственного цикла.

Исследование применения модельного пластика и описание особенностей его использования в процессе изготовления мастер-модели

Н.В. Корейво, В.А. Стриканов, Е.Д. Филин

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

На сегодняшний день наиболее актуальными отраслями для исследований в области применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), а именно угле- и стеклопластиков, являются ракетно-космическая и авиационная промышленности. Ввиду постоянного увеличения доли угле- и стеклопластиковых изделий в летательных аппаратах и роста требований к этим изделиям, прямо пропорционально растут и требования к формообразующим оснасткам.

При изготовлении изделий из ПКМ, а в особенности крупногабаритных изделий, применение обычных металлических форм становится нерациональным вследствие большой разности в коэффициентах линейного термического расширения между формуемым изделием и самой формообразующей оснасткой, высокой металлоемкости и трудоемкости изготовления, энергоемкости формования изделия.

Для решения вышеупомянутых проблем широко применяют оснастку из ПКМ, изготовленную методом вакуумной инфузии. Неотъемлемой частью производственного процесса изготовления инфузионной формообразующей оснастки является мастер-модель. В связи с этим для получения конечного изделия с заданными параметрами и характеристиками должное внимание необходимо уделять не только технологическому процессу изготовления формообразующей оснастки из ПКМ, но и технологическому процессу изготовления мастер-модели.

Мастер-модель в основном изготавливается из таких материалов, как дерево, МДФ, пенополиуретан, гипс и т.д. Однако, ввиду роста требований к качеству формообразующих оснасток из ПКМ в настоящее время наблюдается тенденция выполнения мастер-моделей из модельного пластика, так как этот материал легко клеится, ремонтируется и обрабатывается, имеет однородную структуру, стойкость к влажности и перепадам температуры. Традиционные материалы, такие как МДФ, данными свойствами не обладают. По соотношению «цена–качество» и набору необходимых характеристик высоким спросом пользуется модельный пластик средней плотности, изготовленный из пенополиуретана (ППУ). Из-за особенности технологического процесса изготовления модельного пластика данного типа есть ряд нюансов в подготовке поверхности мастер-модели, изготовленной из него.

Вследствие того, что материал имеет замкнутые поры, равномерно распределенные по всему объему с выходом открытых пор на поверхность, следует уделить особое внимание перекрытию этих пор, так как они напрямую влияют на качество поверхности формообразующей из ПКМ, адгезию и на процесс её съема.

В рамках данной работы были проведены ряд исследований, определяющих влияние качества подготовки поверхности мастер-модели на формообразующую оснастку из ПКМ, а именно:

- исследование применения модельного пластика и описание особенностей его использования в процессе изготовления мастер-модели;
- исследование влияния присущих модельному пластику средней плотности пор на качество поверхности формообразующей оснастки;
- определение корректной подготовки мастер-модели из модельного пластика, позволяющий получить формообразующую оснастку с заданными требованиями по качеству поверхности.

Метрологическое сопровождение при проектировании, изготовлении и эксплуатации формообразующей оснастки с применением различных высокоточных систем и методов измерения

А.Д. Ахмадишин

ООО «Нева Технолоджи», г. Казань, Россия

E-mail: aad@nevatec.ru

На современном этапе развития авиационной индустрии эффективные технологические процессы производства невозможны без использования электронного моделирования и программного управления производством. В условиях цифровых методов производства требуется автоматический контроль геометрических параметров и контроль отклонения поверхностей на всех этапах производства, а также контроль качества изделия на всех этапах: от проектирования до изготовления сборочной единицы и стапельной сборки.

С увеличением темпов производства увеличивается уровень технологичности процессов изготовления в авиационной промышленности. Требуется внедрение новых методов контроля качества и точности. В связи с развитием применения композиционных материалов в авиастроении потребность в мониторинге и контроле возросла в силу сложности производства конструкций из неметаллических материалов.

Для решения поставленных задач внедряются различные системы для метрологического обеспечения, отвечающие самым современным требованиям производителя, создаются новые методы контроля качества продукции. Однако после разработки данных методов необходима проработка и анализ конструкции изделия, включающие проектирование технологических припусков и иных специальных меток, технологического процесса для интеграции данных разработок в само производство, как опытное, так и серийное.

Промышленные измерительные системы представляют собой комплекс средств, применяемых на всех стадиях создания летательного аппарата (ЛА), начиная от проектирования, изготовления продувочных моделей, производства, и заканчивая контролем и мониторингом геометрии обводов ЛА при их окончательной сборке, ремонте и эксплуатации, а также при проведении комплексных испытаний.

Опыт эксплуатации технических измерительных систем в современном авиационном производстве, в основе которого лежит электронное моделирование геометрических параметров и конструкции ЛА, определил ряд требований к проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации нестандартной технологической оснастки, в том числе, сборочных приспособлений.

Для решения подобных задач требуется аналитический подход с последующей проработкой этапов применения средств и методов контроля с целью обеспечения качества на серийной линии производства. Еще на самых ранних этапах производства изделий из композиционных материалов осуществляется контроль теоретического контура формообразующей оснастки и расположения точек привязки перед началом выкладки композиционных материалов (армирующих тканей, готовых препрегов и др). Также необходимо закладывать на этапе проектирования специальные отметки – «точки привязки» для корректной и эффективной работы проекторов для точного соответствия реального объекта электронной модели. После формования необходимо осуществить контроль готового изделия на наличие дефектов в толще материала, а также провести контроль геометрических параметров на их соответствие электронной модели. Далее на всех последующих этапах производства требуется проводить контроль изделия на качество и точность, вплоть до сборки узлов и агрегатов, стыковки крупных сборочных единиц.

В целях реализации данной концепции необходимо обеспечивать метрологическую поддержку на критических этапах технологического процесса производства не только деталей, но также и формообразующих оснасток от проектирования до процесса формования,

что применимо для любого технологического процесса производства изделий из композиционных материалов.

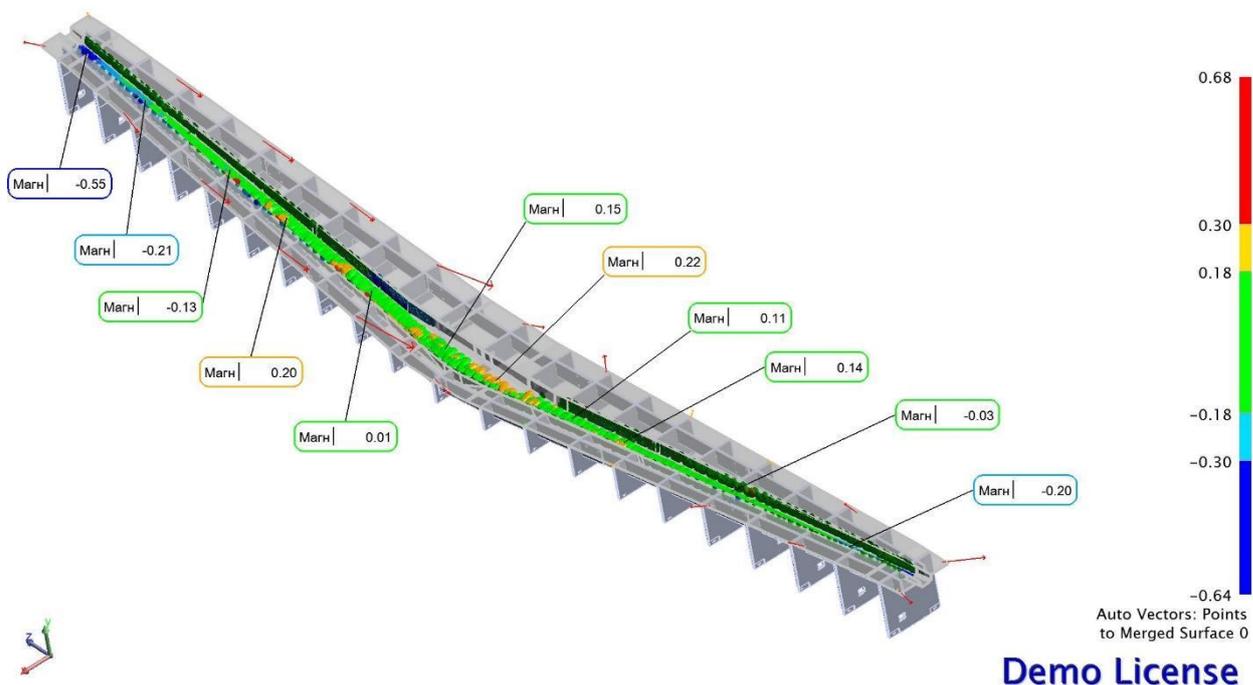


Рис. 1. Результаты контроля геометрических параметров поверхности формообразующей оснастки перед выкладкой

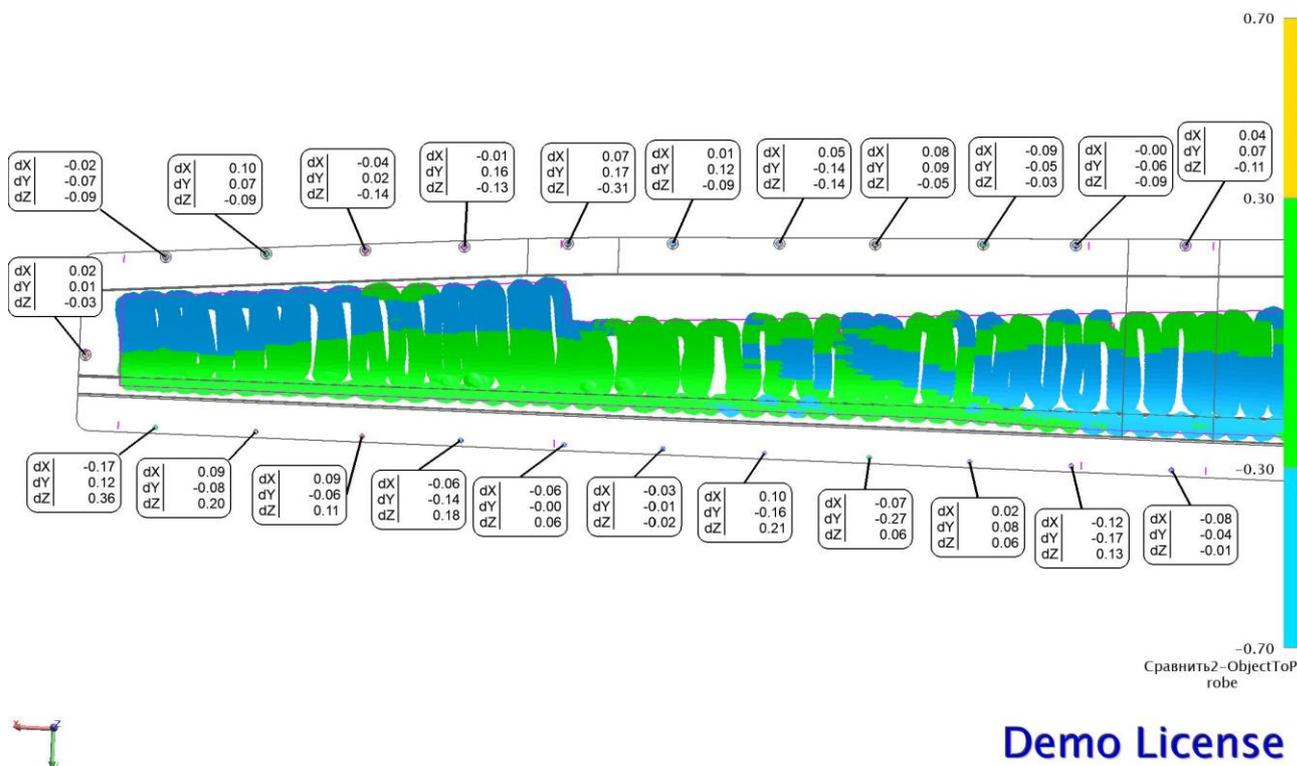


Рис. 2. Результаты контроля базовых отверстий для привязки лазерного проектора

Сравнительный анализ диаграмм деформирования при сдвиге в плоскости листа однонаправленных и ортогонально-армированных полимерных композиционных материалов

А.О. Половый, Н.В. Матюшевский, Н.Г. Лисаченко
 АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия,
 E-mail: info@technologiya.ru

Особенностью полимерных композиционных материалов (ПКМ) является проявление нелинейности деформирования при сдвиге в плоскости листа. В настоящей работе проведен сравнительный анализ диаграмм деформирования различных однонаправленных и ортогонально-армированных ПКМ. Для сопоставления материалов друг с другом исходные экспериментальные диаграммы были перестроены в координатах приведенных (безразмерных) характеристик: приведенной деформации сдвига $\bar{\gamma}$ (1) и приведенного напряжения сдвига $\bar{\tau}$ (2). В этом случае диаграммы принимают обобщенный (приведенный) вид, представленный на рисунке 1.

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma}{\gamma_B} \quad (1)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_B} \quad (2)$$

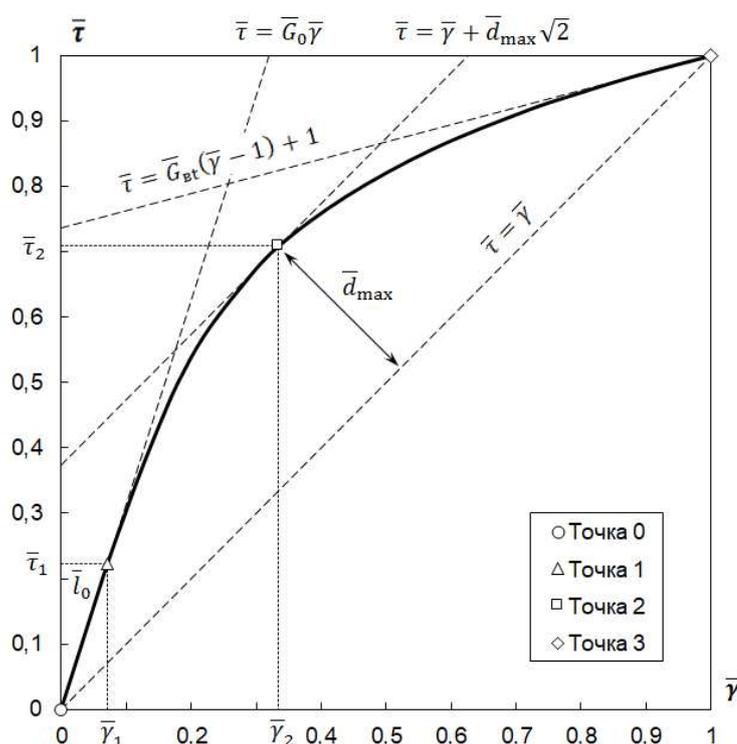


Рис. 1. Типовая приведенная диаграмма деформирования при сдвиге в плоскости листа ПКМ

Согласно проведенному анализу большинство рассмотренных в работе материалов имеют сходный друг с другом характер деформирования: в начале нагружения имеется линейный участок, соответствующий приведенному начальному модулю сдвига \bar{G}_0 (3), затем при дальнейшем нагружении наклон диаграммы уменьшается, достигая минимума в точке разрушения 3.

$$\bar{G}_0 = G_0 \frac{\gamma_B}{\tau_B} \quad (3)$$

Помимо параметра \bar{G}_0 , приведенная диаграмма деформирования ПКМ при сдвиге в плоскости листа характеризуется деформацией $\bar{\gamma}_1$ в точке 1 окончания линейного участка, максимальным приведенным отклонением \bar{d}_{\max} в точке 2, а также приведенным касательным модулем сдвига $\bar{G}_{\text{вт}}$ в точке 3 разрушения ПКМ.

Для указанных параметров на основе экспериментальных данных получены аппроксимирующие зависимости от величины \bar{G}_0 :

$$\bar{\gamma}_1 = \frac{0,45}{(\bar{G}_0)^{1,36}}; (R^2 = 0,60) \quad (4)$$

$$\bar{d}_{\max} = 0,01 + 0,23 \ln(\bar{G}_0); (R^2 = 0,88) \quad (5)$$

$$\bar{G}_{\text{вт}} = \frac{0,77}{(\bar{G}_0)^{1,13}}; (R^2 = 0,74) \quad (6)$$

Степень нелинейности деформирования ПКМ хорошо согласуется с величиной приведенного начального модуля сдвига \bar{G}_0 : чем больше \bar{G}_0 превышает 1 (что соответствует линейному деформированию), тем сильнее проявляется нелинейность и увеличивается параметр \bar{d}_{\max} (5).

Приведенный касательный модуль сдвига в точке разрушения $\bar{G}_{\text{вт}}$ (6) уменьшается с ростом величины \bar{G}_0 . Также следует отметить, что диаграммы деформирования материалов с близкими значениями \bar{G}_0 и $\bar{\gamma}_1$ практически совпадают друг с другом (отклонения не более 3%).

В характерных точках 0–3 приведенной диаграммы деформирования определены граничные условия, которые можно использовать при расчете параметров функций, аппроксимирующих кривую деформирования (табл. 1).

Таблица 1. Граничные условия для аппроксимирующей функции и ее производной в характерных точках приведенной диаграммы деформирования

Характерная точка	Условие для функции	Условие для производной
0	$f(0) = 0$	$f'(0) = \bar{G}_0$
1	$f(\bar{\gamma}_1) = \bar{\tau}_1 = \bar{G}_0 \bar{\gamma}_1$	$f'(\bar{\gamma}_1) = \bar{G}_0$
2	$f(\bar{\gamma}_2) = \bar{\tau}_2$	$f'(\bar{\gamma}_2) = 1$
3	$f(1) = 1$	$f'(1) = \bar{G}_{\text{вт}}$

Результаты работы рекомендуется использовать для разработки универсальных аппроксимирующих функций, учитывающих характерные свойства экспериментальных кривых деформирования ПКМ при сдвиге в плоскости листа и использующих для определения своих параметров минимально необходимый набор экспериментальных данных.

Аппроксимация кривых деформирования при сдвиге в плоскости листа однонаправленных и ортогонально-армированных полимерных композиционных материалов

А.О. Половый, Н.Г. Лисаченко

АО «ОНИИ «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

В настоящее время является актуальным создание универсальных относительно простых по структуре функций, аппроксимирующих нелинейные кривые деформирования полимерных композиционных материалов (ПКМ) при сдвиге в плоскости листа. Указанные функции позволяют проводить расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойных ПКМ с более высокой точностью, чем при использовании линейных моделей.

Исследования показали, что аппроксимация одной функцией всей экспериментальной кривой диаграммы деформирования приводит к существенным отклонениям между расчетными и экспериментальными значениями. В связи с этим в рамках представленной работы проведена аппроксимация с использованием кусочно-заданных функций для двух случаев разбиения кривой деформирования на отдельные участки:

а) два участка:

$$\begin{cases} \bar{\tau} = f_{01}(\bar{\gamma}), \text{ при } \bar{\gamma} \leq \bar{\gamma}_1; \\ \bar{\tau} = f_{13}(\bar{\gamma}), \text{ при } \bar{\gamma} > \bar{\gamma}_1; \end{cases} \quad (1)$$

б) три участка:

$$\begin{cases} \bar{\tau} = f_{01}(\bar{\gamma}), \text{ при } \bar{\gamma} \leq \bar{\gamma}_1 \\ \bar{\tau} = f_{12}(\bar{\gamma}), \text{ при } \bar{\gamma}_1 < \bar{\gamma} \leq \bar{\gamma}_2. \\ \bar{\tau} = f_{23}(\bar{\gamma}), \text{ при } \bar{\gamma} > \bar{\gamma}_2 \end{cases} \quad (2)$$

Первый участок является линейным и соответствует закону Гука. Второй и третий участки являются нелинейными, для их описания были разработаны несколько относительно простых по структуре функций. К аппроксимирующим функциям предъявлены следующие требования:

– аппроксимацию целесообразно проводить для приведенных диаграмм деформирования;

– характер аппроксимирующей функции должен быть близок к экспериментальной кривой деформирования;

– функция должна учитывать наличие начального линейного участка деформирования;

– функция должна быть относительно простой по структуре, иметь 3-4 независимых параметра (коэффициента), которые определяются через граничные условия в характерных точках диаграммы;

– функция и ее производная должны быть непрерывными на всей диаграмме деформирования материала.

Для рассмотренных в работе материалов определены наилучшие функции, имеющие наименьшую погрешность аппроксимации:

а) по двум участкам:

$$\begin{cases} f_{01}(\bar{\gamma}) = \bar{G}_0 \bar{\gamma} \\ f_{13}(\bar{\gamma}) = A - \frac{1}{B(\bar{\gamma} - \bar{\gamma}_1) + C}; \end{cases} \quad (3)$$

б) по трем участкам:

$$\begin{cases} f_{01}(\bar{\gamma}) = \bar{G}_0 \bar{\gamma} \\ f_{12}(\bar{\gamma}) = \frac{A \bar{\gamma}}{B (\bar{\gamma} - \bar{\gamma}_1)^C + 1} \\ f_{23}(\bar{\gamma}) = A - \frac{1}{B (\bar{\gamma} - \bar{\gamma}_2) + C} \end{cases} \quad (4)$$

Оценка погрешности аппроксимирующих функций проводилась по критериям, основанным на отклонениях между расчетными и экспериментальными значениями напряжения сдвига. При этом использовалась формула средней взвешенной арифметической, которая позволяет учитывать разное количество взятых экспериментальных точек и неравные интервалы между ними.

Пример аппроксимации экспериментальной кривой деформирования при сдвиге в плоскости листа стеклопластика E-glass/MY750 представлен на рисунке 1.

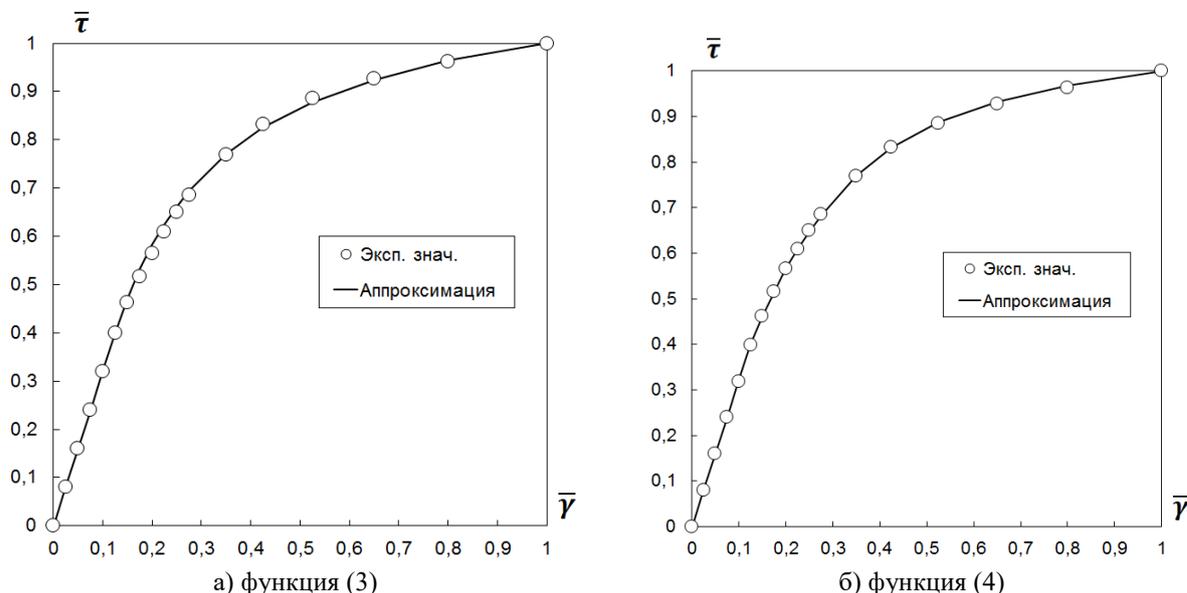


Рис. 1. Аппроксимация приведенной диаграммы деформирования при сдвиге в плоскости листа стеклопластика E-glass/MY750

Расчеты показали, что в среднем аппроксимация по трем участкам (4) имеет погрешность в 2,5 раза ниже, чем аппроксимация по двум участкам (3). Однако, следует отметить, что аппроксимация по двум участкам использует минимально необходимое количество экспериментальных характеристик материала: начальный приведенный модуль сдвига \bar{G}_0^3 , а также приведенные деформацию и напряжение сдвига в точке 1 ($\bar{\gamma}_1^3; \bar{\tau}_1^3$). При отсутствии экспериментальных значений $\bar{\gamma}_1^3$ и $\bar{\tau}_1^3$ их можно вычислить по приближенным формулам от величины \bar{G}_0^3 .

Приближенный расчет значений $\bar{\gamma}_2^3$ и $\bar{\tau}_2^3$ не имеет смысла, так как в этом случае погрешность аппроксимации с разбиением диаграммы деформирования на три участка становится сопоставимой с погрешностью аппроксимации по двум участкам.

Полученные в работе аппроксимирующие функции рекомендуются для использования при моделировании НДС слоистых полимерных композиционных материалов с учетом нелинейности деформирования материалов при сдвиге в плоскости листа на основе минимально необходимого количества экспериментальных характеристик.

Систематическое применение метода Цифровой корреляции Изображений (ЦКИ) в разработке и сертификации авиационных материалов и конструкций

Е.А. Номеровский

НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия

E-mail: nomersum@gmail.com

На данный момент в авиастроении начинается активное применение полимерных композитных материалов (ПКМ) при создании новых образцов авиационной техники. Однако с внедрением новых материалов возникают и новые проблемы. Так, для использования всех возможностей ПКМ в конструкции гражданской авиационной техники (АТ) необходимо изменение общих подходов к проектированию, которое неизбежно приведет отрасль к необходимости внедрения новых форматов испытаний и разработке соответствующих процедур проведения сертификации. Одним из методов доказательства соответствия конструкций требованиям Авиационных правил станет использование машинно-обучаемого цифрового моделирования на основе испытаний образцов с применением метода цифровой корреляции изображений (ЦКИ). Объем работ в этом направлении на данный момент недостаточен и требует углубленных исследований как с точки зрения применения расчетно-экспериментальной корреляции, так и со стороны внедрения и согласования этого метода с авиационными властями.

Целью исследования является разработка методологии применения ЦКИ в рамках работы с конструкциями из ПКМ. Методология должна включать в себя:

- программные продукты для обработки результатов,
- перечень оборудования для получения результатов,
- методы проведения испытаний с использованием ЦКИ.

Основными тезисами исследования являются:

- применение метода ЦКИ при проведении прочностных испытаний образцов из ПКМ даст достаточную информацию для улучшения качества машинно-обучаемого цифрового моделирования полноразмерных частей АТ;

- проведение испытаний с использованием метода ЦКИ даст достаточное количество информации для доказательства соответствия конструкции из ПКМ требованиям Авиационных правил в части прочности;

- разработка простых программных продуктов и перечня общедоступного оборудования расширит применение метода ЦКИ в конструкторских бюро разного размера.

Внедрение метода ЦКИ позволит собирать и накапливать большой и детализированный объем информации о поведении и характеристиках полимерных композитных материалов. Этот объем данных в будущем может быть использован на всех этапах жизненного цикла конструкций из новых полимерных материалов. В перспективе это приведет к удешевлению опытно-конструкторских работ, улучшению качества первичного проектирования компонентов АТ, возможности прогнозирования поведения конструкций после длительного воздействия факторов окружающей среды.

Наследственное определяющее соотношение для однонаправленных углепластиков при малом числе циклов нагружения

Е.И. Фомина

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), г. Москва, Россия

E-mail: 89150682218@mail.ru

В авиационной и ракетно–космической технике широко используются элементы конструкций из термопластичных полимерных композиционных материалов (КМ), армированных волокнами, что обусловлено их высоким сопротивлением трещинообразованию и ударным нагрузкам. По сравнению с термореактивными связующими термопластичные имеют лучшую химическую стойкость, ударопрочность, а также возможность вторичной переработки.

Квазистатические испытания не дают полной информации о свойствах материала, так же как и усталость о длительном воздействии, поэтому важное место занимают испытания на небольшое число циклов нагружения, с помощью которых можно выявить особенности поведения материалов при кратковременных нагрузках переменного типа.

Основопологающим для проектирования элементов конструкций являются свойства однонаправленного слоя, так как при деформировании слоя проявляются не только упругие, но и вязкопластические свойства, а также эффекты упрочнения. Очевидно, что соотношения анизотропной теории упругости явно недостаточно для описания поведения КМ при кратковременных и переменных нагружениях. В более сложных случаях нагружения необходимо использовать обобщение наследственных соотношений для нелинейного поведения.

Испытания на несколько циклов нагружения позволяют отразить особенности нелинейного поведения образцов из термопластичных полимеров, армированных углеродными волокнами. Были выбраны результаты экспериментов однонаправленных образцов AS4/ПЕЕК, нагружаемых под разными углами к направлению армирования, при четырех циклах растяжения с разгрузкой. Нагружение проводилось с увеличивающимся пиковым уровнем напряжения до разрушения при постоянной скорости деформирования (рис. 1).

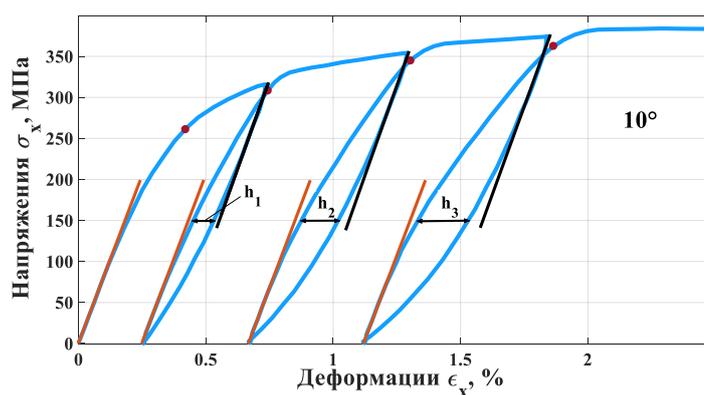


Рис. 1. Кривые нагружения AS4/ПЕЕК

Как видно из графика, с увеличением числа циклов происходит деградация касательного модуля упругости, вызванная появлением остаточных деформаций. Накопление вязкопластических деформаций отражается в увеличении ширины петель гистерезиса.

Не так много теорий, которые на феноменологическом уровне способны описывать эти закономерности. Наиболее общими закономерностями при описании механического

поведения являются определяющие соотношения (ОС), основанные на наследственных представлениях.

Общность подходов при построении ОС в теории вязкоупругости, наследственной упругости и ОС, использующих дробные производные, как правило, формулируются в виде функционала напряжений в одной части уравнения и функционала деформаций в другой. Задавая режим изменения деформаций или напряжений в зависимости от времени, встает задача описания реакции материала на воздействие.

На рисунке 2 представлены зависимости напряжений и деформаций от времени. Начальные участки активного нагружения линейны, но с увеличением растягивающего напряжения в каждом цикле область линейности увеличивается, что свидетельствует об упрочнении материала.

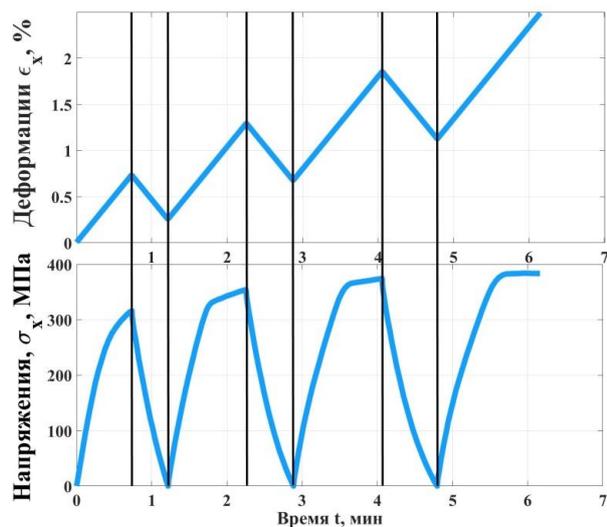


Рис. 2. Кривые деформаций и напряжений от времени нагружения для угла 10°

Рассматривалось наследственное соотношение в виде полинома, предложенное Ю.Н. Работновым, с помощью которого описаны закономерности поведения материала при нескольких циклах нагружения:

$$\varepsilon(t) = a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + \dots,$$

где a_1, a_2, \dots, a_k – коэффициенты интегрального разложения; $s = (1 + I_\alpha^*)\sigma$, в качестве ядра оператора I_α^* можно использовать ядро Абеля.

В работе рассмотрена возможность использования нелинейных определяющих соотношений наследственного типа и отмечены особенности анизотропии механического поведения однонаправленных углепластиков при малом числе циклов растяжения.

Показаны области возникновения вязкопластических деформаций, эффекты упрочнения. Описана схема построения нелинейного определяющего соотношения наследственного типа, представляющее собой процесс обращения кривой мгновенного деформирования с использованием алгебры резольвентных операторов. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

Анализ и выбор методов определения деформаций при проведении механических испытаний стандартных образцов из ПКМ

Н.В. Матюшевский, Д.И. Савельев, А.Г. Попов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: matyushevskijNV@technologiya.ru

В процессе проведения механических испытаний (растяжение, сжатие, сдвиг и др.) для определения механических характеристик современных углепластиков возникают существенные проблемы. Это, в первую очередь, связано с трудностями в реализации однородного распределения напряжений, возникающих в рабочей части образцов, особенно при определении прочностных характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе высокомодульных или высокопрочных разнонаправленных углеродных волокон, где свойства материала зависят не только от матрицы, но и от свойств волокон.

Можно отметить, что к проведению испытаний образцов из высокомодульных армированных углепластиков, имеющих высокую степень анизотропии свойств, подверженных влиянию межслойных напряжений и повышенной чувствительности к концентраторам напряжений, предъявляются особенно высокие требования. Поэтому для отработки методики и выбора метода экспериментального определения прочностных и упругих характеристик необходим анализ распределения деформаций, возникающих в процессе нагружения образцов.

В работе на первоначальном этапе для определения корректности метода испытаний проводился расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов с использованием программного комплекса FEMAP NX Nastran (рис. 1). Для этого был использован метод конечных элементов (МКЭ) в среде NX/Nastran. Исследовалось влияние геометрических размеров рабочей зоны образца, наличия защитных накладок, их материала, толщины и жесткости на равномерность распределения деформаций и наличия зон концентрации напряжений.

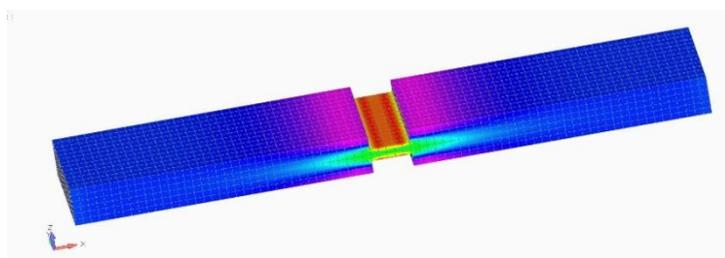
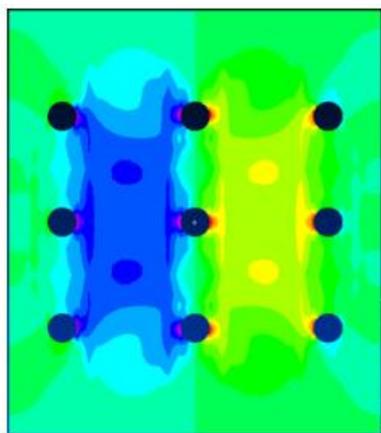


Рис. 1. Распределения НДС образцов, полученные методом конечных элементов

На втором этапе выполнялся экспериментальный анализ деформаций с использованием метода тензометрирования и оптического метода (рис. 2). Исследовалось распределение деформаций в образцах, наличие зон концентраций напряжений и характер деформирования материала в рабочей зоне образца.

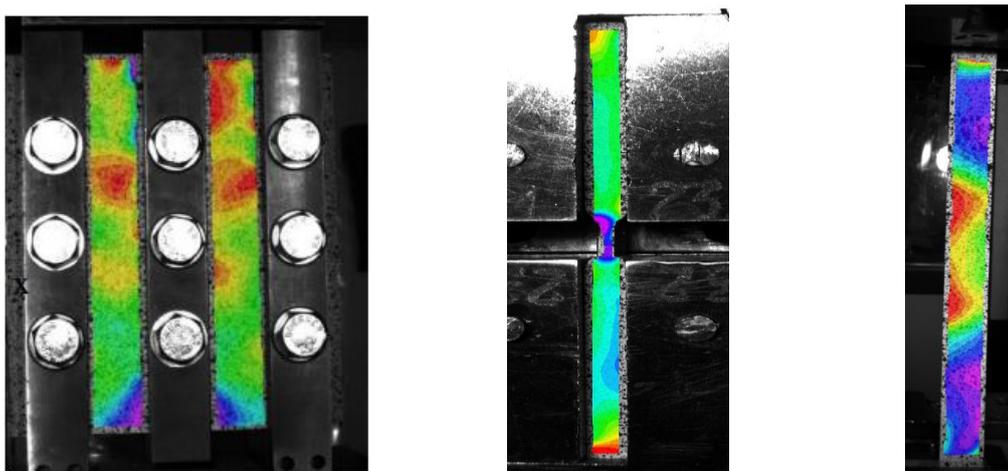


Рис. 2. Распределения НДС образцов, полученные оптическим методом

В работе проведен анализ расчетных и экспериментальных данных при растяжении, сжатии, сдвиге в плоскости листа и др., получены распределения напряжений и деформаций в рабочей части образцов и в местах перехода рабочей части образцов в захватную (защитные накладки, захваты испытательного приспособления). Показано влияние различных факторов, возникающих в процессе испытаний образцов. Разработаны методики расчета и методики определения деформационных характеристик образцов из ПКМ для выбора рациональных методов испытаний. Разработана методология по выбору метода испытаний для определения достоверных механических характеристик при испытании материалов из ПКМ.

Оборудование автоматизации трансферных технологий в композитной отрасли (производство ПКМ) для процессов инъекции (RTM), вакуумной инфузии, пропитки, намотки, пултрузии

И.В. Гуцко, С.А. Тимошенко
ООО «АСД-техника», г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: igor.gutsko@asdteh.com

Оборудование подготовки, дозирования связующего на основе однокомпонентных и мультикомпонентных полиэфирных, полиуретановых, эпоксидных составов:

- полиэфирные составы (соотношение 100:0,75-5,00) с высокоактивными отвердителями и иные составы в широком диапазоне, соотношение от 100:0,75 до 100:100 и более, с добавлением функциональных добавок и наполнителей;
- термореактивные однокомпонентные связующие;
- двухкомпонентные связующие на полиуретановой основе;
- двух- и мультикомпонентные связующие на эпоксидной основе.

Станции приготовления связующего («компактный завод»), мобильные и стационарные дозаторы, дозирующие машины, установки, инъекционно-инфузионные модули, станции приготовления связующего для намоточных линий и линий производства арматуры с обслуживанием до 5 линий одновременно, с полным контролем технологических параметров (соотношение, температура, давление/вакуум, расход), контроль давления подачи связующего с автоматической адаптацией параметров подачи («online»-регулировка соотношения и производительности) по обратной связи – специализированное программное обеспечение «ASD SmartDosing».

Автоматизированные станции, роботизированные ячейки, координатные манипуляторы по приготовлению сферонаполненных составов/сферопластиков и заполнению сотовых ячеек сплошным и адресным методом при изготовлении сотовых пластов.



Рис. 1. Инъекционная машина «КОМПОЗИТ» 2СПК



Рис. 2. Инъекционно-инфузионная машина «КОМПОЗИТ» 3СПК



Рис. 3. Инжекционная машина «КОМПОЗИТ» 2СПК(М) для полиэфирных смол



Рис. 4. Инфузионный модуль «РЕАКТОР» ПР



Рис. 5. Инжекционная машина с порошковым отвердителем «РЕАКТОР» 2СПК(М)



Рис. 6. Станция приготовления и непрерывной подачи сфероластика «СФЕРОПЛАСТ»



Рис. 7. Инфузионный модуль «КОМПОЗИТ» 1СПК4 для работы с термоинфузионными центрами и комплексами

Патент как оружие в конкурентной борьбе

С.Ю. Тузова, А.А. Полякова, Е.О. Клочкова

Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС), г. Москва, Россия

E-mail: svetlana.tuzova@rupto.ru

Уникальный высокотехнологичный продукт всегда вызывает повышенный интерес со стороны коллег, работающих в той же или смежных областях, а также участников рыночного процесса, заинтересованных в удержании рыночных ниш собственными продуктами. Инновационные разработки привлекают к себе повышенное внимание, поскольку они могут представлять собой новые возможности, способные революционизировать отрасль или установить новые стандарты качества. Такие продукты могут изменить устоявшуюся рыночную динамику, заставить участников рыночного процесса пересмотреть свои стратегии, способствовать созданию новых рыночных ниш, привлечь новых клиентов и инвесторов, что в конечном итоге ведет за собой получение повышенной прибыли от коммерциализации нового высокотехнологичного продукта. В связи с этим возникает необходимость охраны высокоперспективного продукта и наиболее целесообразной стратегией является его патентование. Патент не только играет ключевую роль в защите собственного продукта, но и является мощным инструментом в конкурентной борьбе. Патентообладатель получает эксклюзивное право на производство, использование и продажу конкретного продукта в течение определенного времени, что позволяет занимать целевые рыночные ниши и блокировать выход на них продуктам конкурентов. Патент обеспечивает инновационным компаниям преимущество на рынке и способствует развитию новых технологий. В свою очередь отсутствие свободного доступа на рынок новых участников не только снижает вероятность получения ими дохода от их продукта, но и может замедлить их инновационное развитие, что увеличивает конкурентные преимущества патентообладателя.

В то же время патентование – достаточно сложный процесс, требующий специфических знаний и умений. В связи с этим использование патента в качестве механизма по извлечению прибыли и борьбы с конкурентами основывается, прежде всего, на умении составлять формулу изобретения и выстраивании патентной стратегии, позволяющей занимать рыночные ниши.

Например, в области полимерной химии продукты, как правило, являются не индивидуальными объектами, а имеют композиционный состав, что обуславливает необходимость комплексного решения для построения надежной патентной охраны. Так, легко выявляемые составы материалов (как основного продукта, так и аддитивов) предпочтительно охранять с помощью нескольких взаимосвязанных патентов. В то же время патентование трудно выявляемых технологических режимов получения полимера или материала на его основе возможно дополнять охраной в виде секрета производства.

В докладе поясняются и систематизируются основные ошибки формулы изобретения, допускаемые разработчиками в области полимерных материалов при их патентовании. Подобные ошибки приводят к получению патента не привлекательного как для инвесторов, так и для производителей продукта, что в свою очередь либо приводит к невостребованности запатентованного продукта либо к легкому обходу патента конкурентами.

Другим важным аспектом является выявление и охрана всех разработанных объектов (веществ/материалов/компонентов/частей/фрагментов), входящих как в ключевые, так и периферийные продукты, и построение комплексной охраны продукта.

Построение стратегии продвижения продукта на рынок на основе эффективной стратегии патентования продукта позволяет защитить инновационный продукт, сформировать успешное будущее новой инновационной технологии и повысить привлекательность продукта для инвесторов, а также успешно использовать патенты для монопольного занятия целевых рыночных ниш и формировать выгодные рыночные условия для достижения максимального финансового успеха.

Определение достоверности алгоритма безэталонной настройки акустического дефектоскопа ИД–92МН v.2

Г.А. Галанов¹, Д.Ю. Русаков²

¹ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия; ²АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Полимерные композиционные материалы находят широкое применение в авиационной и ракетно-космической промышленности. Для контроля таких изделий применяются различные методы неразрушающего контроля, наиболее распространёнными из которых являются: ультразвуковой эхо-импульсный и теневой методы, а основным по-прежнему остаётся импедансный метод.

Наличие функции безэталонной настройки в акустическом импедансном дефектоскопе ИД-92МН v.2 позволяет производить его настройку непосредственно на контролируемом изделии без использования настроечного образца с искусственными имитаторами дефектов.

В ходе работы был проведен эксперимент по установлению истинного уровня достоверности работы алгоритма безэталонной настройки. Экспериментальные данные были получены на десяти образцах различной конфигурации с имитацией дефектов. Цель проведения эксперимента – выявление факторов, влияющих на корректность работы алгоритма. В ходе эксперимента были собраны значения амплитуд нижнего и верхнего порогов срабатывания АСД (автоматическая сигнализация дефекта), бездефектной области и областей залегания глубинных и поверхностных дефектов.

Результаты измерений, полученные в процессе проведения безэталонной настройки, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения амплитуд нижнего и верхнего порогов срабатывания АСД, бездефектной области, областей залегания глубинных и поверхностных дефектов

Образец	Толщина обшивки, мм	Нижний порог	Верхний порог	Бездеф. область	Зона поверх. дефекта	Зона глубин. дефекта	Разница дефект. и бездеф. областей
1	1	178,67	353,33	263,33	155,67	430	150
8	1	107,33	195	176,67	102,67	412,67	60
5	1	123,33	256,33	208,33	178	414,67	90,33
2	2	188	351,33	251,33	180	412	126
4	2	97	193,67	140	–	217,67	77,33
6	2,3	239,67	533	380	222,33	575,33	198
7	2,5	95	169,67	132,33	–	381	58,33
9	3	61	111	85,33	59,33	440	42
3	3	258,67	564,33	400,33	144,67	596,67	196,33
10	4	233	860,67	593	541,33	902	198

По данным таблицы 1 были построены графики зависимости разницы амплитуд сигналов от значений амплитуд нижнего и верхнего порогов срабатывания АСД,

бездефектной области, областей залегания глубинных и поверхностных дефектов и разницы дефектной и бездефектной областей (рис. 1).

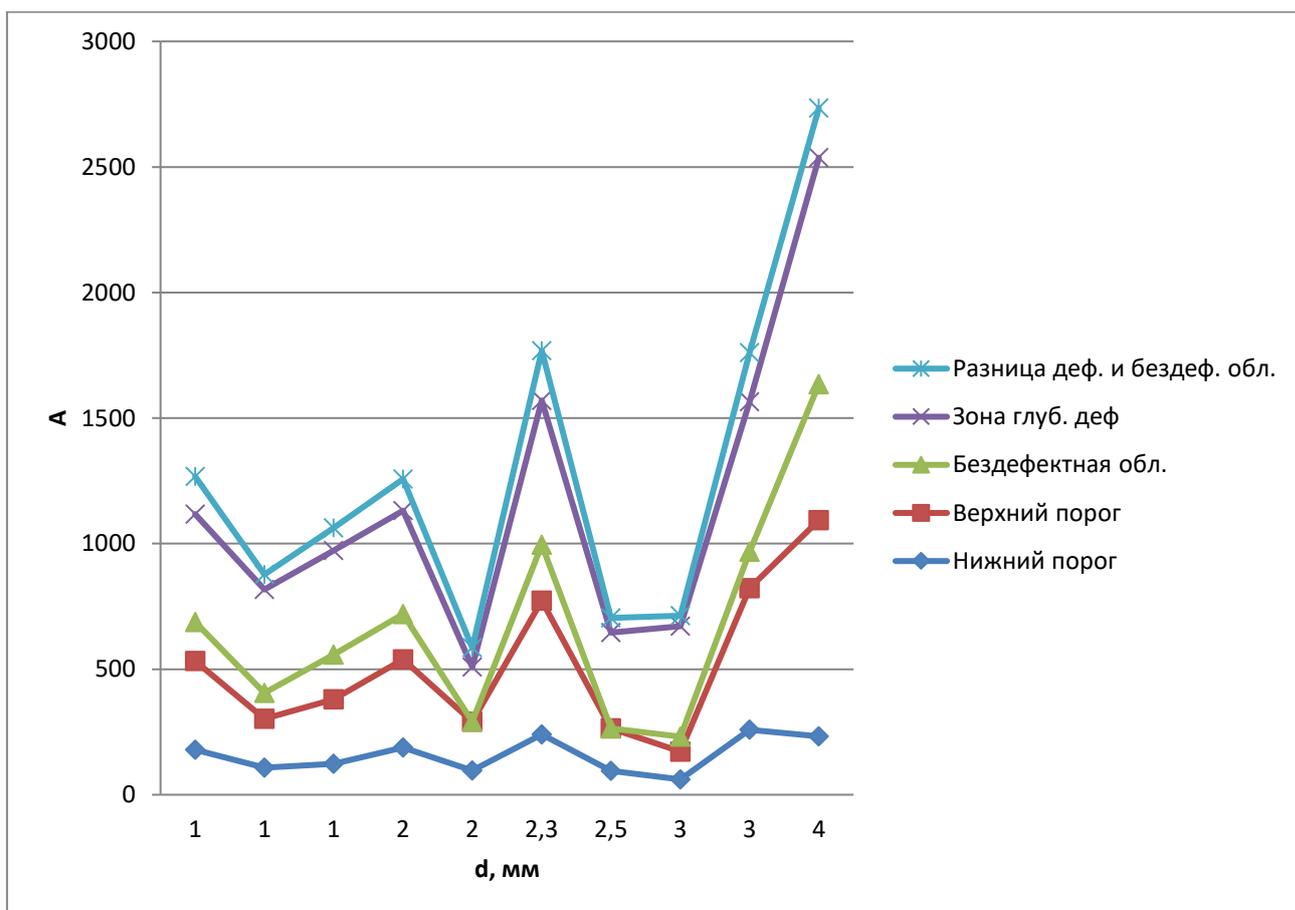


Рис. 1. График зависимости разницы амплитуд сигналов от значений амплитуд нижнего и верхнего порогов срабатывания АСД, бездефектной области, областей залегания глубинных и поверхностных дефектов и разницы дефектной и бездефектной областей

По результатам произведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Толщина обшивки не оказывает влияния на выявление поверхностных дефектов.
2. С увеличением толщины прибор переходит в режим повышенного усиления сигнала с целью регистрации колебаний малой амплитуды.
3. Вследствие высокой резонансной частоты (порядка 15 КГц) РСП преобразователя чувствительность прибора на малых глубинах (менее 1 мм) ниже, чем на больших глубинах.
4. При увеличении толщины обшивки до 4 мм чувствительность контроля возрастает.
5. При увеличении толщины обшивки выявление поверхностных и глубинных дефектов происходит с большей чувствительностью.
6. На исследованных толщинах прибор показывает сопоставимую чувствительность на больших и малых глубинах.
7. Чувствительность контроля с применением алгоритма безэталонной настройки превосходит чувствительность контроля при ручной настройке.

Расчетно-экспериментальное обоснование оптимальной конфигурации стандартного образца на растяжение для аттестации обшивок

Д.И. Савельев, А.Г. Попов, М.С. Гурьева

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, г. Обнинск, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Реализация потенциальных прочностных и упругих свойств слоистых композиционных материалов зависит от многих факторов, начиная от технологии изготовления препрега и заканчивая механической обработкой материала. Каждый этап, который проходит материал до начала испытаний, требует квалифицированного подхода и наличия современных технологий. Основным требованием при проведении механических испытаний является создание однородного напряженного состояния в рабочей части образца, которое зависит, главным образом, от степени анизотропии материала, реализации граничных условий при испытании, а также геометрической формы и размеров.

В работе на образцах различной конфигурации исследуется влияние отклонения угла армирования волокна от «нулевого» направления на физико-механические характеристики армированного углепластика. Как известно, в армированных углепластиках слои, уложенные в одном направлении, соседствуют со слоями, уложенными в другом направлении, что создает сложное напряженное состояние и влияет на однородность распределения напряжений в рабочей части. Увеличение угла армирования и неоднородность укладки слоев снижает потенциальные возможности материала.

Испытаниям подвергались плоские образцы постоянного поперечного сечения с закрепленными на концах накладками, изготовленные в соответствии с требованиями отечественного стандарта ГОСТ 25.601 и зарубежного – ASTM D3039. Оба стандарта содержат разные рекомендации к выбору геометрических размеров рабочей и захватной частей образца. Традиционно образец по ГОСТ 25.601 имеет захватную часть длиной от 90 до 100 мм и рабочую часть 50 мм. По ASTM D3039 длина рабочей части образцов – 138 мм, захватной части – 56 мм. На рисунке 1 представлены результаты испытаний образцов различной конфигурации.

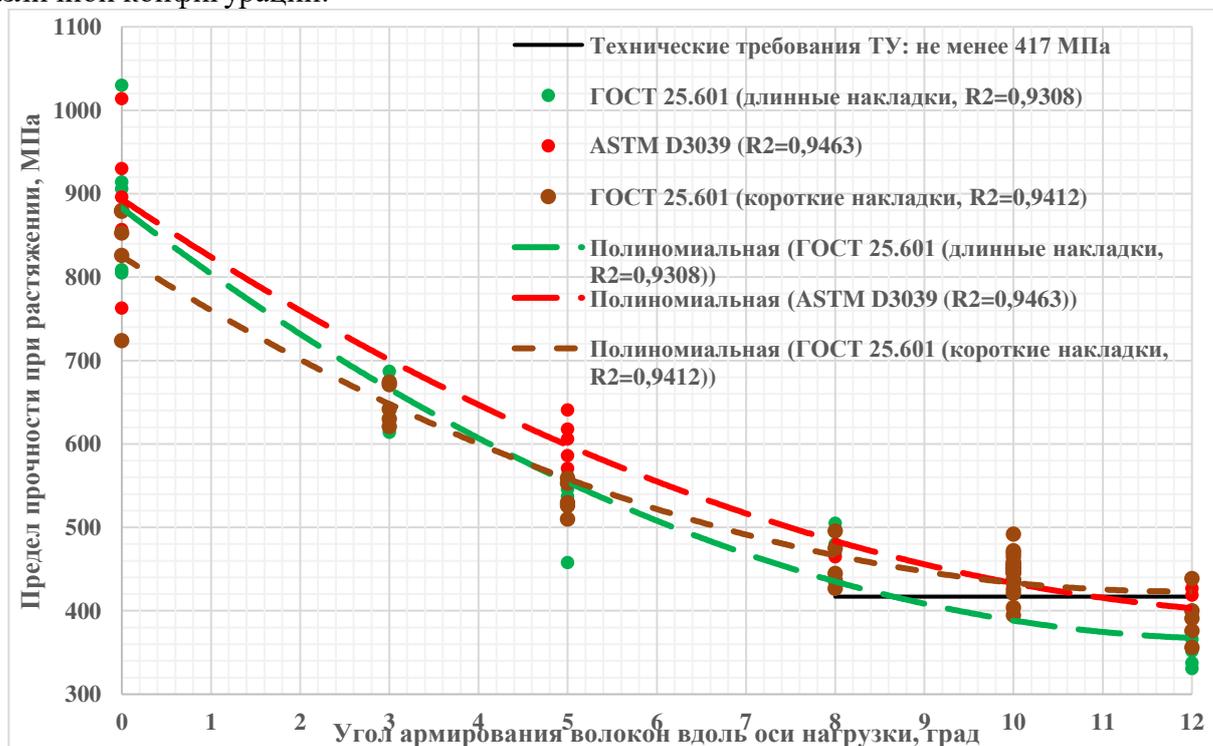


Рис.1. Результаты испытаний образцов различной конфигурации

Преимущества использования ультразвуковой резки на станках ЧПУ

А.Д. Байрамгельдыев, Н.В. Шишканов, Е.Д. Филин, А.И. Ирошников
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Постоянное совершенствование конструкций авиационной техники и, соответственно, рост требований к точности изготовления их составляющих ставит серьезные задачи перед технологией их производства. Наиболее характерными направлениями развития конструкции самолета на современном этапе являются усложнение конструктивных форм, увеличение габаритных размеров и взлетной массы. Увеличение максимальных скоростей полета требует повышения жесткости планера и точности его внешних обводов. Удовлетворение этим требованиям осуществляется путем значительного увеличения размеров обводообразующих деталей планера, изыскания и использования для их изготовления новых, более совершенных материалов обводов.

Одним из прогрессивных направлений внедрения ПКМ с целью повышения эффективности агрегатов летательных аппаратов считается создание трехслойных сотовых конструкций. Обладая целым рядом достоинств, трёхслойные конструкции с сотовым наполнителем прочно вошли в состав многих узлов и агрегатов современных изделий ряда отраслей промышленности. Продолжая быстро развиваться и совершенствоваться, сотовые конструкции завоёвывают себе все новые области применения, нуждаясь в разработке методов оптимизации всех конструктивных элементов для достижения оптимума в целом.

Ввиду распространения применения сотовых сэндвич-панелей и роста требований по точности авиационных конструкций, большую роль играет качество обработки самого сотового наполнителя.

В работе описаны методы механической обработки на станке с ЧПУ с применением ультразвуковой резки. Режущим наконечником (лезвием) совершаются ультразвуковые вибрации, передающиеся с преобразователя. Лезвие ножа играет роль выхода энергии ультразвука и позиционирования пропила. При таком методе резки режущие силы уменьшаются, при этом производительность процесса значительно выше, чем при традиционных методах обработки.

Исследован комплексный метод механической обработки сотонаполнителя с применением ультразвуковой резки.

Представлен метод механической обработки на станке с ЧПУ с применением ультразвуковой резки, обеспечивающий заданную точность и качество обработанной поверхности.

Помимо решения описанных в работе проблем, данный метод в процессе апробации показал сокращение цикла изготовления изделия за счет сокращения общего машинного времени, используемого для обработки сотонаполнителя, так как данный метод не требует полного промораживания заготовок сотового наполнителя, а лишь частичной его подморозки для фиксации на столе станка с ЧПУ.

Поставлены задачи для дальнейших исследований в области механической обработки сотонаполнителя с целью минимизации расхода используемых материалов, инструмента и машинного времени механической обработки на станках с ЧПУ.

Получение гибридного сополимера и исследование его физико-химических характеристик

И.Н. Вихарева

ЮУрГУ (НИУ) НОЦ «Нанотехнологии», г. Челябинск, Россия

E-mail: vikharevain@susu.ru

Наиболее широкое распространение для изготовления полимерных композиционных материалов получили полиэфирные и эпоксидные связующие. Гибридные покрытия на их основе позволяют сочетать достоинства данных форполимеров, что приводит к получению сополимеров с превосходными характеристиками: повышенной адгезией, антикоррозионной защитой, высокими прочностными характеристиками изделий, отсутствием объемной усадки, сопротивлением к образованию микротрещин, высокой износостойкостью и биологической безопасностью. Варьирование соотношения форполимеров определяет возможность регулирования времени отверждения. К тому же использование насыщенных полиэфирных смол приводит к снижению стоимости конечных изделий. Ассортимент насыщенных полиэфирных смол способствует получению широкого спектра материалов. Мономеры для сложных полиэфиров могут быть получены на основе возобновляемого сырья, что является перспективным с точки зрения экологии.

Промышленный полиэфир 24К (ГОСТ 22234-76) – продукт взаимодействия себациновой кислоты с этиленгликолем и глицерином был использован для получения полимерных пленок (рис. 1). Полиэфир представляет собой парафиноподобную массу светло-серого цвета. Основные характеристики полиэфира: кислотное число (мг КОН на 1 г полиэфира) – 10, массовая доля гидроксильных групп (%) – 5,8.

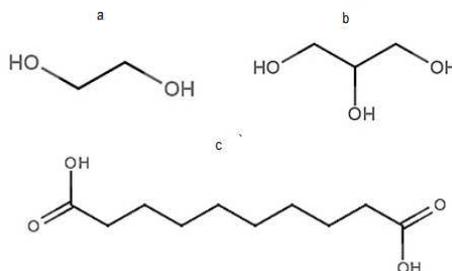


Рис. 1. Исходные компоненты для получения полиэфира 24К

Для разработки рецептуры полимерного покрытия составлена композиция на основе полиэфирной (ПЭ) и эпоксиаминной (ЭА) смол (рис. 2). В качестве отвердителя был испытан полиамид Л-18 – промышленный продукт взаимодействия полимеризованных жирных кислот растительных масел и полиэтиленполиаминов (рис. 3).

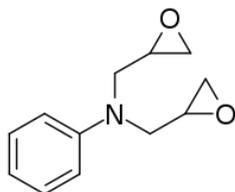


Рис. 2. Смола ЭА

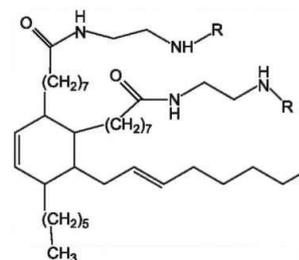


Рис. 3. Отвердитель Л-18

Предварительными опытами установлено оптимальное соотношение компонентов в рецептуре ПЭ:ЭА:Л-18 = 2:3:4. Преполимеры и отвердитель были смешаны и через 24 часа был получен сополимер в виде пластичной глянцевой пленки. Для подтверждения образования сополимера был получен ИК-спектр продукта (рис. 4).

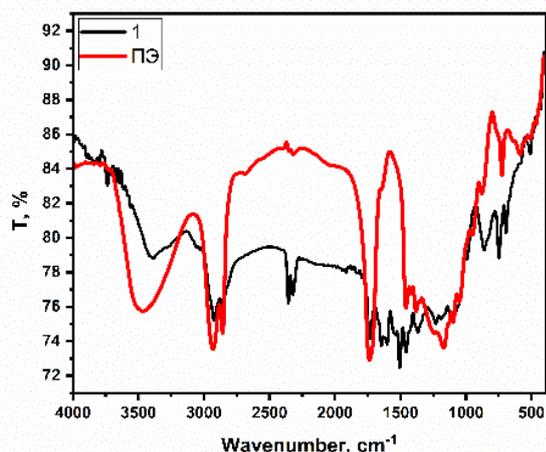


Рис. 4. ИК-спектр продукта (1 – образец)

Проведен анализ степени отверждения сшитой структуры сополимера: количество гель фракции – 85%. Исследована термостабильность полученного сополимера при нагревании до 600 °С в атмосфере воздуха (рис. 5).

В антикоррозионной защите адгезия материала к поверхности – наиболее важный параметр, влияющий на долговечность покрытия. С этой целью был измерен краевой угол смачивания водой, который составил 79° (рис. 6). Вычисленный коэффициент растекания составил минус 135,14 мДж/м², что говорит о плохом смачивании поверхности сополимера водой. Эксперимент с бензолом не позволил определить угол смачивания, наблюдалось полное растекание капли.

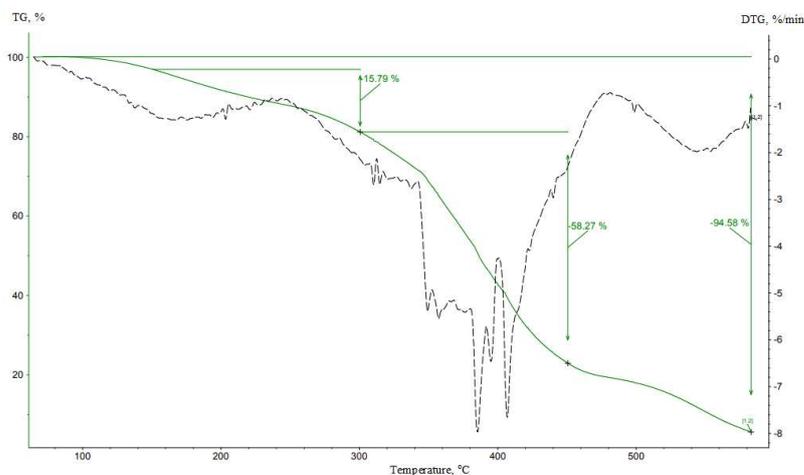


Рис. 5. Термограмма сополимера



Рис. 6. Краевой угол смачивания водой

Определены характеристики пленки сополимера при растяжении: $E = 2,56$ МПа, $\sigma = 0,43$ МПа, деформация – 38%, удлинение при максимальной нагрузке 6,9 Н – 21,77 мм.

Тест на адгезию к металлической подложке: 10 МПа при толщине покрытия 2,2 мм. Диэлектрическая сплошность покрытия до и после испытаний на удар: дефектов не обнаружено. Ударная прочность при максимальной высоте 500 мм – без дефектов.

Термограмма образца показывает постепенное плавное уменьшение массы, что, вероятно, связано с дальнейшими процессами доотверждения сополимера при нагревании. Пониженное количество гель-фракции подтверждает этот факт. Поэтому для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик необходима доработка рецептуры покрытия и режима отверждения.

Определение химического состава стеклянных волокон для прогнозирования свойств стекловолоконистого армирующего материала

А.Ф. Мустафина, Н.М. Демина

АО «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова», РП Андреевка, Московская обл., Россия

E-mail: albina.mustafina@list.ru

Стекловолоконистые материалы являются наиболее массово производимыми и используемыми для армирования полимерных композитов. В зависимости от назначения конечного материала разработаны и промышленно выпускаются несколько типов волоконистых материалов из специальных стекол типа С (chemical) – высокой химической стойкости; AR (alkaliresistant) – высокой щелочестойкости, S (strength) – повышенной прочности; D (dielectric) – низкой диэлектрической проницаемости. Самыми коммерциализированными на сегодняшний день являются стеклянные волокна типа Е (electrical) – низкой электрической проводимости, более 90% по массе от мирового объема производства стекловолокон. Технологические и потребительские свойства стекловолоконистых армирующих материалов определяет их химический состав.

Стекловолокно типа Е производят согласно международному стандарту ASTM D578-98 из алюмоборосиликатных стекол, имеет химический состав, приведенный в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав стекол типа Е различных мировых производителей

	Массовая доля компонента, мас. %										
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	F ₂
ASTM D578-98	52–62	0–10	12–16	16–25	0–5	0–1,5	0,05–0,8	0–2			0–1
Образец 1	52,24	6,50	14,06	19,97	4,28	0,54	0,51	0,20	0,45	0,14	1,08
Образец 2	53,51	5,60	14,36	19,49	4,18	0,60	0,57	0,30	0,48	0,11	0,90

АО «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова», являясь головной организацией в области технологии и исследований неорганических, в первую очередь, стеклянных волокон, в течение длительного времени занимается разработкой и совершенствованием методик определения состава стекол и стеклянных волокон, полученных на их основе. Определение точного химического состава стекла является важной задачей, так как именно состав влияет на производственный процесс получения волоконистых материалов, их химическую стойкость, свойства поверхности армирующих волокон и, в конечном итоге, на свойства композиционного материала.

С 1960-х годов в нашей стране стекловолокна типа Е стабильно производят из стекла с содержанием оксида бора (8,5±1,5)%. На сегодняшний день стеклянные шарики такого состава производит ООО «Каспийский завод стекловолокна» (Дагестан). На мировом рынке предлагаются стеклошарики различных производителей. Выполненные нами исследования точного химического состава стеклошариков типа Е китайского производства показывают, что составы существенно отличаются от отечественного по содержанию оксида бора.

Массовая доля оксида бора в исследуемых стеклах менее 7 мас. %, видимо, это связано с проблемой мировых запасов и месторождений борной кислоты. Пониженное содержание оксида бора негативно сказывается на процессах волокнообразования и текстильной переработки стеклонити. Результаты анализа точного химического состава стекол являются определяющими при выборе поставщика основного сырья для производства стекловолоконистых армирующих материалов.

Оптимизация процесса толщинометрии крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов с применением цифровых алгоритмов обработки и регистрации результатов контроля

А.А. Курятин, Д.В. Ловков

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: kuryatinaa@technologiya.ru

Толщинометрия конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), применяемых в авиационно-космической отрасли, является одной из ключевых контрольных операций, предусмотренных технологическим процессом изготовления изделий. Результаты контроля толщины дают информацию не только о соответствии/несоответствии готового изделия требованиям конструкторской документации (КД), но и могут указывать на отклонения от технологического процесса изготовления изделия, режима формования или качества применяемых материалов. Данная информация также важна на этапах разработки технологии изготовления новых изделий, когда отрабатываются режимы формования, упаковки и технологические подходы при выкладке изделия, что особенно значимо для крупногабаритных конструкций, имеющих высокую стоимость, длительный цикл и высокую трудоемкость изготовления.

Основными этапами процесса толщинометрии являются: разметка изделия (нанесение точек контроля на объект контроля) в соответствии со схемой разметки, настройка и калибровка средств измерений, проведение измерений и регистрация измеренных значений, обработка результатов измерений (определение максимальных и минимальных значений, средних значений, отклонений от номинальных значений и т.д.), оформление итоговой схемы контроля толщины и протокола контроля.

Особенностью процесса толщинометрии крупногабаритных конструкций из ПКМ является наличие большого количества измерений, число которых может достигать нескольких сотен, при этом сами точки контроля находятся в зонах с разной номинальной толщиной и разными допусками, а количество зон контроля на некоторых изделиях может достигать более десяти. Способ контроля толщины таких конструкций, реализуемый в «ручном» варианте, характеризуется высокой трудоемкостью, обусловленной необходимостью параллельного выполнения операций измерения толщины и регистрации результатов (занесения измеренных значений на схему контроля) с последующим анализом и расчетом необходимых характеристик по каждой зоне контроля вручную, а также формированием схемы контроля посредством ручного ввода результатов в итоговую схему и протокол. Помимо высокой трудоемкости, этот способ проведения контроля обладает существенным недостатком, связанным с влиянием человеческого фактора при обработке результатов измерений и возможным появлением ошибок в расчетах.

В данной работе рассматриваются пути оптимизации процесса толщинометрии, направленные на снижение трудоемкости и повышения качества контроля. Предложенные решения указанных задач основаны на внедрении цифровых алгоритмов в процессы регистрации результатов при проведении измерений, обработки и расчета результатов контроля, формирования итоговых документов (схем контроля и протоколов).

Основные технические решения, объединенные в систему обработки результатов измерений и обеспечивающие снижение трудоемкости и повышение качества контроля толщины, заключаются в следующем:

1. Регистрация измерений проводится посредством внесения измеренных значений толщины (в момент замера) в таблицу регистрации измерений (электронная таблица MS Excel), которая содержит в себе порядковый номер точки контроля, номер зоны контроля, измеренные значения толщины изделия и дополнительную информацию по объекту контроля. Для информирования о наличии измерения, выходящего за пределы допуска, и

исключения ошибок при вводе данных в таблице реализована функция выделения цветом значений, выходящих за пределы допуска (в соответствии с КД). Электронная регистрация измерений параллельно с проведением измерений позволяет в режиме реального времени анализировать соответствие изделия требованиям КД и формировать массив данных для последующей автоматической обработки и расчета результатов контроля, а также формирования итоговых документов с результатами контроля.

2. Обработка результатов измерений, включающая в себя определение максимальных и минимальных значений по каждой зоне контроля, средних значений, отклонений от номинальных значений, расчет результатов без учета жертвенных слоев, осуществляется в таблице обработки результатов измерений и таблице результатов контроля (электронные таблицы MS Excel). Исходные данные с измеренными значениями толщины и информацией по контролю конкретного изделия (производственный номер, толщина жертвенных слоев, дата контроля, исполнители и т.д.) в эти таблицы переносятся из таблицы регистрации измерений. На основе обработанных данных из этих таблиц автоматически формируется итоговый протокол контроля, шаблон которого также является электронной таблицей MS Excel и содержит в себе поля, связанные с соответствующими ячейками таблицы результатов контроля.

3. Процесс формирования итоговой схемы контроля толщины, который является наиболее трудоемким этапом обработки результатов (в случае его проведения в ручном варианте), выполняется автоматически в шаблонах AutoCAD (или аналог) или MS Excel.

CAD-шаблон включает в себя:

- дубликаты таблицы обработки результатов измерений и таблицы результатов контроля, обновляемые по настроенной связи с этими же таблицами в MS Excel (посредством функционала «Диспетчер связи с данными» в AutoCAD);

- схему контроля толщины изделия с обновляемыми полями значений, связанных с соответствующими ячейками из таблицы обработки результатов измерений; каждое поле значений размещается на схеме контроля рядом с конкретной точкой в соответствии с нумерацией измеренных значений из таблицы; также на схеме контроля присутствуют аналогичные обновляемые поля с результатами и информацией по контролю конкретного изделия, связанные с соответствующими ячейками из таблицы результатов контроля.

Excel-шаблон используется для изделий, имеющих простую форму, небольшое количество точек и зон контроля. Принцип формирования схемы в этом случае аналогичен описанному выше, но схема с обновляемыми полями формируется непосредственно в MS Excel (посредством вставки схемы и наложения на нее в необходимые места надписей со ссылками на соответствующие ячейки таблиц).

Таким образом, внедрение системы обработки результатов измерений в технологический процесс изготовления изделий из ПКМ позволяет снизить трудоемкость процесса контроля толщины крупногабаритных изделий на 40-45% за счет существенного сокращения времени на проведение расчетов, обработки данных и оформление итоговых документов, а также повысить качество контроля за счет снижения влияния человеческого фактора при обработке и регистрации измерений при проведении контроля.

«Умные» композиты на основе аморфных ферромагнитных микропроводов

А.А. Алпатов, В.В. Молоканов, А.В. Крутилин, **П.П. Умнов**, Т.Р. Чуева, Н.Д. Бахтеева, Н.В. Гамурар, Е.В. Тодорова

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия

E-mail: pumnov@imet.ac.ru

В настоящее время композиционные материалы находят все большее применение в различных отраслях народного хозяйства. Полимерные композиты, где в качестве матрицы выступают различные полимерные материалы, вследствие малого веса, высокой прочности и низкой теплопроводности широко используются в строительстве, авиационно-космической и оборонной промышленности. Ярким примером их применения служит «черное крыло» - композитное крыло из углепластика для самолетов МС-21.

Композиционные материалы постоянно совершенствуются и улучшаются. Одним из новых направлений их развития является создание «умных» композитов, выполняющих не только роль конструкционного материала, но и ряд дополнительных функций (измерение нагрузок, температуры, идентификация и др.).

Для измерений нагрузок различных конструкций широко применяют тензорезисторы, в основе работы которых лежит тензоэффект – способность некоторых материалов менять электрическое сопротивление при деформировании. Тензорезисторы должны обладать высокой прочностью и чувствительностью к деформации, иметь линейный тензорезистивный эффект, низкий гистерезис и деформацию ползучести. Измерение нагрузок контролируемых объектов в режиме on-line требует постоянного присутствия и работы внешних тензодатчиков на объекте, что часто бывает просто невыполнимым условием при эксплуатации объектов. При этом самостоятельной проблемой является вопрос качественного крепления тензорезисторов и вывода сигналов с них. Поэтому создание композитов со встроенной системой мониторинга нагрузок является актуальной научно-технической задачей.

В ИМЕТ РАН предложена концепция получения «умных» композитов на основе ферромагнитных аморфных микропроводов (АМП), которые внедряются в полимерные композиты при их изготовлении. АМП представляют собой тонкую проволоку из Co-Fe-Ni сплава и обладают свойствами, превосходящими свойства кристаллических аналогов.

Технология получения АМП по методу Улитовского-Тейлора заключается в совместной вытяжке металла и стекла, которое затем удаляется по специальной технологии. Получены АМП с диаметром 50–140 мкм, обладающие стабильными геометрическими параметрами, механическими и электромагнитными свойствами. АМП из сплавов системы Co-Fe-Ni являются коррозионностойкими, имеют предел прочности 2500–3500 МПа при упругом удлинении до 3%. Кривые растяжения АМП являются линейными, у них отсутствует площадка текучести. Удельное электрическое сопротивление аморфного микропровода в зависимости от состава равно $(1-3) \times 10^{-6}$ Ом·м, что гораздо выше, чем у кристаллических проводов, при температурном коэффициенте электрического сопротивления всего $(10^{-4}-10^{-6})$ 1/К. Очень важно также, что сопротивление АМП при приложении нагрузки изменяется линейно (рис. 1а).

Получаемые в ИМЕТ РАН АМП являются магнитомягкими и обладают чувствительностью магнитных свойств к приложенным напряжениям. Универсальной характеристикой контроля магнитных свойств может служить величина амплитуды электродвижущей силы – электромагнитный сигнал (ЭМС), возникающий при перемагничивании АМП во внешнем приложенном переменном поле. Амплитуда ЭМС возрастает при увеличении диаметра АМП, при этом более интенсивный рост амплитуды наблюдается в интервале диаметров до 100 мкм. Экспериментальные данные, полученные

для АМП разных диаметров и представленные в виде зависимости (амплитуда ЭМС – приложенные растягивающие напряжения) хорошо ложатся на одну плавную кривую. Это свидетельствует об отсутствии различий в магнитной структуре АМП разных диаметров, обусловленных действием растягивающих напряжений, и стабильности их свойств (рис. 1б). АМП также чувствительны к сжимающим напряжениям и к торсионным нагрузкам.

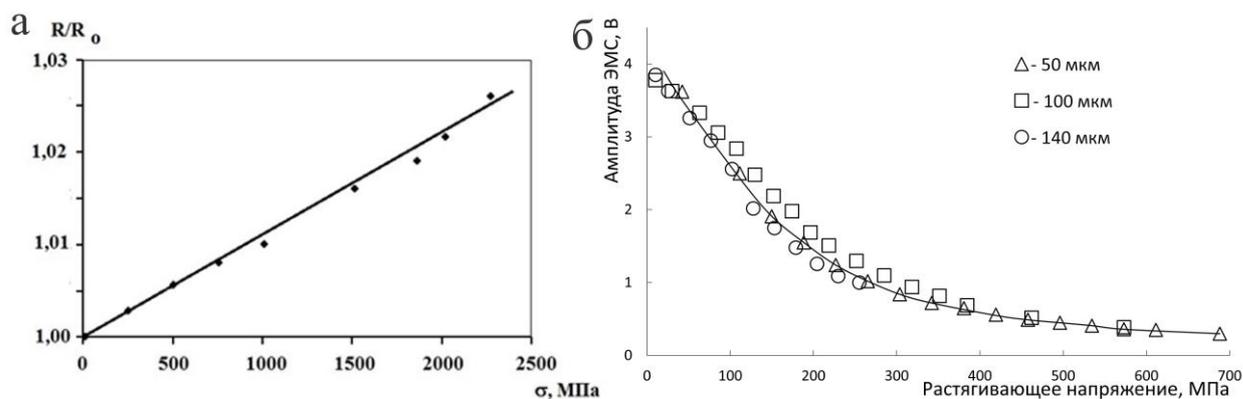


Рис. 1. График зависимости электросопротивления (а) и амплитуды ЭМС (б) аморфных микропроводов Со-сплава различных диаметров от приложенной нагрузки

Таким образом, показана возможность использования АМП в качестве сенсорных элементов как контактных, так и бесконтактных датчиков напряжений.

ИМЕТ РАН совместно с ООО «Карбонтекс» разработали технологию внедрения АМП (рис. 2а) в углепластики и стеклопластики методом 3D-ткачества. Данная технология позволяет получать объемные композиты большой толщины со встроенным АМП, который является сенсорным элементом датчиков нагрузок. Таким методом можно изготавливать композитные крылья, панели крыла, лонжероны, вертолетные лопасти, лопасти вентиляторов двигателей, ветровых установок, силовые конструкции, перекрытия и пр.

На основе разработанной технологии были изготовлены аморфные датчики нагрузок, которые представляют собой тонкие стеклопластиковые пластины с внедренным на этапе производства АМП (рис. 2б). Длина таких датчиков может составлять от 0,5 до 25 м, ширина – от 30 до 500 мм. Датчики могут соединяться последовательно, обеспечивая мониторинг контролируемых объектов по всей протяженности. Сигнал о нагрузках передается по проводам, WiFi или радиорелейным линиям в режиме on-line.

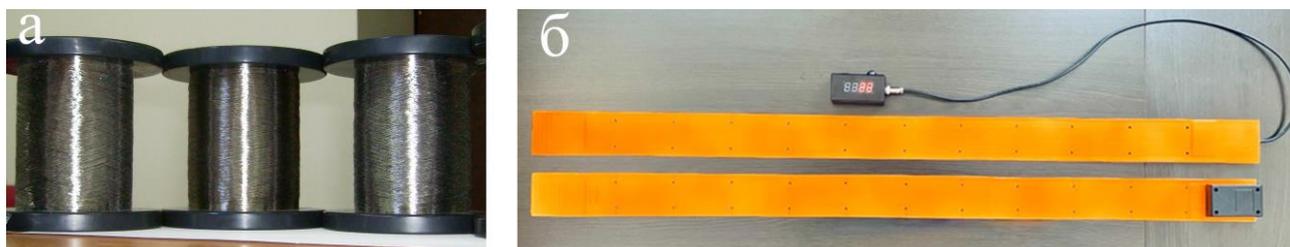


Рис. 2. Катушки с АМП (а); композиты из стекловолокна с внедренным АМП (б)

Создание таких датчиков подтверждает возможность изготовления различных «умных» композиционных конструкций с аморфным ферромагнитным микропроводом, способных осуществлять мониторинг собственных нагрузок в процессе эксплуатации.

Термостойкий композиционный материал на основе хромалюмофосфатного связующего для элементов летательных аппаратов

А.В. Денисов, Д.А. Стекольников, **О.Г. Лайкова**, Н.А. Люлина, В.А. Минеева
ООО «СКТБ «Пластик», г. Сызрань, Россия
E-mail: opriokr-prg@sktb-plastik.ru

На текущий момент одной из важнейших стратегических государственных задач является создание современных летательных аппаратов (ЛА), при этом традиционно ставится вопрос применения композиционных материалов. Тенденция к увеличению скоростей авиационной и ракетной техники влечёт за собой ужесточение требований к конструкциям ЛА и, как следствие, материалам, из которых они изготавливаются. Применение композитов в узлах летательных аппаратов приводит не только к уменьшению общего веса конструкций, но и существенно повышает удельные жесткостные и прочностные характеристики, а использование термостойких связующих и материалов на их основе является перспективным и востребованным.

Комплексное решение вопроса разработки композитных обтекателей ракет, работающих при воздействии температур аэродинамического нагрева 1300...1600 °С, базируется на выборе материала стенки с учётом условий эксплуатации и требований по прочности, стойкости к воздействию факторам, стабильности диэлектрических свойств и пр. Из всего многообразия конструкционных композиционных материалов необходимо выделить стеклопластики – композиционные материалы на основе различных наполнителей и связующих. Альтернативным вариантом выбора материала для высокотемпературных радиопрозрачных изделий могут быть керамические материалы, работающие при температурах, достигающих 1800 °С. Необходимо отметить, что технологический цикл изготовления изделий сложной формы из керамических материалов очень трудоёмкий, длительный и дорогостоящий.

Отечественными предприятиями традиционно изготавливаются радиопрозрачные обтекатели для головок самонаведения ракет различных классов, работающих в сантиметровых, миллиметровых диапазонах, а также в нескольких полосах частот одновременно. Для данных изделий используются стеклопластики радиотехнического назначения с применением технологии пропитки связующим под давлением пакета стеклонеполнителя, помещенного в калиброванный зазор жесткой металлической формы, а также технологии прямого прессования. На текущий момент стеклопластики не всегда могут быть использованы в элементах летательных аппаратов в связи с воздействием жестких температурных нагрузок аэродинамического нагрева.

В ООО «СКТБ «Пластик» накоплен опыт изготовления радиопрозрачных изделий как из традиционных стеклопластиков, так и из неорганических текстолитов на основе термостойких связующих, из всего спектра которых наиболее подходящими для применения в конструкциях летательных аппаратов радиотехнического назначения являются фосфатные связки. Лучшие технологические свойства имеет хромалюмофосфатное связующее (ХАФС), которое относится к классу неорганических полимеров с температурой эксплуатации выше 1500 °С. Композиционные материалы на основе кремнеземных или кварцевых тканей и связующего ХАФС имеют высокий уровень прочности, повышенную ударную вязкость, обладают стабильными теплофизическими характеристиками и сохраняют диэлектрические свойства в при высоких температурах. Применение данных материалов и их модификаций является наиболее перспективным в создании конструкции радиотехнического назначения, работающих в условиях повышенных температур.

При изготовлении изделий из композиционных материалов на основе хромалюмофосфатного связующего на предприятии ранее традиционно использовалось готовое связующее, собственного опыта производства не было. В связи с ограниченным

объёмом производства, риском неритмичных поставок и высокой стоимостью связующего ХАФС, заявленной изготовителями, были инициированы и проведены теоретико-экспериментальные работы и лабораторные исследования, которые позволили получить положительный результат по изготовлению данного связующего в условиях собственного производства.

В продолжение работ были изготовлены образцы композиционного материала на основе связующего ХАФС, при этом в качестве основного метода изготовления экспериментального материала выбрано автоклавное формование с целью апробации данного метода в условиях предприятия как альтернативного традиционно применяемому методу прессования. Необходимо отметить, что автоклавный метод формования по сравнению с прессовым методом является более эффективным с экономической точки зрения для изготовления изделий со сложной формой поверхности и позволяет в короткие сроки нарастить объёмы производства изделий.

Для изготовления образцов из композиционного материала на основе хромалюмофосфатного связующего специалистами предприятия разработана технологическая документация с учётом технических характеристик оборудования и опыта изготовления изделий из композиционных материалов.

По результатам изготовления образцов методами автоклавного формования и прессования сделан вывод о неточности формулы расчёта количества слоёв для получения необходимой толщины образца композиционного материала на основе связующего ХАФС, приведённой в нормативной документации, и проведено уточнение формулы. Уточнённая формула применена при изготовлении опытного образца, что позволило сформировать композиционный материал расчётной толщины.

Дополнительно проведены исследования свойств композиционного материала, изготовленного различными методами, которые показали, что применение автоклавного метода формования позволяет получить качественный композиционный материал с характеристиками на уровне аналогичных показателей для материала, изготовленного прессовым методом. При этом значения показателя «разрушающее напряжение при изгибе» (по основе) для материала, изготовленного автоклавным методом, соответствуют требованиям нормативной документации для материала, изготовленного прессовым методом, а значения показателя «разрушающее напряжение при сжатии» (по основе) ниже нормативного значения для прессового материала менее, чем на 1%. Плотность композиционного материала, изготовленного как автоклавным, так и прессовым методом соответствует требованиям нормативной документации для материала, изготовленного методом прессования.

С целью отработки технологии был изготовлен опытный образец (прототип) изделия с уменьшенными габаритами с применением метода автоклавного формования. Толщина изготовленного изделия соответствует расчётной, плотность материала находится в диапазоне значений, приведённых в нормативной документации.

Работы, проведённые в ООО «СКТБ «Пластик», позволили создать многослойный термостойкий композиционный материал на основе хромалюмофосфатного связующего и показали принципиальную возможность использования автоклавного метода при изготовлении конструкций из полученного материала. Полученные результаты имеют особую важность для отечественных предприятий композитной отрасли с точки зрения создания новых изделий, конструктивные особенности которых не позволяют использовать традиционные методы изготовления (в частности, метод прессования), а также с учётом политической ситуации в мире.

Разработка конструктивно-технологических решений по автоматизации процесса изготовления крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов авиационного назначения

Ю.В. Зорин, А.П. Богданов, Д.А. Волков, М.А. Кольцов, В.В. Семкин, В.В. Фоменко
АО «ОНИИ «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: ZorinYUV@technologiya.ru

Современная авиация немыслима без применения полимерных композиционных материалов (ПКМ). Объем применения ПКМ во многом определяет технический и эксплуатационный уровень современного самолета, а также его конкурентоспособность на мировом рынке, что наглядно демонстрирует ряд зарубежных аналогов как в военной, так и в гражданской областях. Наибольший эффект от применения ПКМ может быть реализован в высоконагруженных деталях и агрегатах планера самолета – элементах фюзеляжа, крыла и оперения. Благодаря преимуществам ПКМ не только снижается масса изделий, но и улучшаются их аэродинамические характеристики. Однако, использование ПКМ в агрегатах современной отечественной авиатехники, особенно в силовых конструкциях, до настоящего времени недостаточно эффективное и объемное из-за:

- использования в агрегатах из ПКМ конструктивных решений, не адаптированных к автоматизированным методам их изготовления;
- отсутствия высокопроизводительных, экономически эффективных технологий изготовления композитных агрегатов с использованием автоматизированных методов и оборудования.

Таким образом, для опытного производства изделий из ПКМ характерны высокие показатели расхода материала и трудоемкости изготовления, так как раскрой и выкладка препрегов производится вручную. В общей трудоемкости изготовления деталей из ПКМ методом ручной выкладки непосредственно трудоемкость операций раскроя и выкладки составляет примерно 45%. При этом доля операций раскроя и выкладки может быть и значительно большей, если производится выкладка крупногабаритных многослойных изделий. Из вышеуказанного следует, что вопросы снижения трудоемкости операций раскроя и выкладки являются весьма актуальными.

Цель работы заключалась в повышении экономической эффективности применения ПКМ в образцах авиационной техники за счет внедрения автоматизированных процессов производства. Объектом исследования являлись типовые элементы планера из ПКМ перспективных образцов авиационной техники.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- формирование перечня агрегатов из ПКМ, оптимизация конструкции и проработка вариантов технологических решений, реализуемых с использованием автоматизированных процессов производства;
- разработка технических требований к основным материалам, оснастке и оборудованию, обеспечивающие возможность автоматизированного производства;
- разработка предварительной номенклатуры оснастки и оборудования, обеспечивающих возможность автоматизированного производства крупногабаритных элементов конструкций из ПКМ;
- разработка управляющих программ для станков с ЧПУ и лазерных проекционных систем с учетом сформированных технических требований.

Результатом работы является внедрение автоматизированных способов изготовления крупногабаритных изделий из ПКМ для перспективных образцов военной авиационной техники.

Конструкция типового изделия из ПКМ представляет собой трехслойную панель с обшивками из углепластика и алюминиевым сотовым наполнителем, выполненным со

скосами; по местам соединения с силовыми элементами (лонжероны, шпангоуты и др.) панели имеют локальные усиления из слоев углепластика (рис. 1).

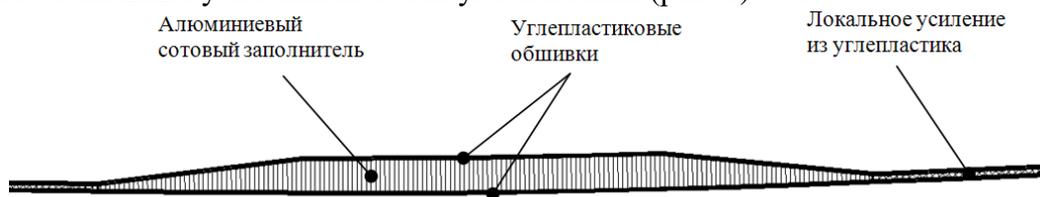


Рис. 1. Типовое поперечное сечение трехслойной панели из ПКМ

После анализа такой конструкции была предложена следующая технологическая схема изготовления: автоматизированная выкладка сплошных слоёв наружной обшивки; автоматизированный раскрой слоёв усиления и их выкладка с использованием лазерного проецирования; автоматизированная обработка сотового наполнителя и его установка; автоматизированная выкладка слоев внутренней обшивки; автоклавное формование, механическая обработка.

Для реализации такой схемы изготовления к конструкции из ПКМ предъявлялись следующие общие требования: она должна иметь максимально плоские формы с углом подъема не более 25° , высота и углы скосов сотового наполнителя должны быть минимальными, усиления должны выкладываться в одну границу без сбега слоев. Данные требования обусловлены возможностями оборудования, используемого на производственных участках, и в процессе работы по адаптации конструкции были полностью учтены.

На крупногабаритных авиационных конструкциях исследованы функциональные возможности программного обеспечения FiberSim и отработана технология изготовления деталей с помощью автоматизированного раскроя препрегов и лазерного проецирования. В FiberSim есть возможность выполнить симуляцию процесса выкладки материала на поверхность оснастки и уже на стадии проектирования определить проблемы, которые могут возникнуть в процессе производства: недостаточная ширина материала, наличие критической деформации материала и т.д. В программе FiberSim строятся линии реза материала, которые можно смещать с целью оптимизации формы заготовки слоя. Для сокращения трудоемкости проектирования допускается использование одних групп линий реза для нескольких слоев с одинаковым направлением выкладки.

При создании программ раскроя для плоттеров используются развертки слоев, поделенные на отдельные замкнутые элементы в соответствии с шириной раскраиваемого материала, полученные с помощью программы FiberSim. Каждый элемент ориентирован с учетом схемы армирования и имеет свой порядковый номер в слое. Для снижения времени работы станка требуется сокращение маркировки до обозначения номера слоя и элемента, направления выкладки. Таким образом, время работы станка, затрачиваемое на раскрой и маркировку элементов слоя, снижается еще на 15–20%. Для сокращения расхода материала, раскраиваемого на плоттере, при формировании управляющих программ рекомендуется задавать угол вращения элементов равный 180° .

Полученные в работе результаты подтверждают, что использование автоматизированных технологий при производстве типовых крупногабаритных панелей из ПКМ позволяет снизить расход основных материалов на 15%, а общее время изготовления на 28% по сравнению с существующим уровнем опытного производства. При этом доля автоматизированных операций достигает 40%. Использование автоматизированных технологий при изготовлении трехслойных панелей из ПКМ позволяет существенно снизить затраты на их изготовление, обеспечивая при этом требования, предъявляемые к геометрическим, массовым, физико-механическим и физико-химическим показателям изделия.

Антифрикционные углепластики для узлов трения насосно-компрессорной техники

В.И. Румянцев, С.В. Агафонов, О.Н. Булатов, М.А. Юрков, **А.А. Федоткова**,
Г.А. Пономаренко
ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: info@virial.ru

В качестве материалов подшипников скольжения для насосного оборудования используют полимерные композиционные материалы, в частности, углепластики, которые по своим триботехническим характеристикам превосходят антифрикционные металлические материалы и могут кратковременно работать при пуске и остановке насосного оборудования в условиях полужидкостной и граничной смазки без значительного износа.

При изготовлении углепластиков применяют различные термореактивные полимерные связующие. Полимерная матрица определяет температурный диапазон эксплуатации полимерных композиционных материалов.

Целью работы является разработка антифрикционного углепластика с теплостойкостью более 180 °С и определение максимальной предельной удельной нагрузки при определенных скоростях вращения для применения в подшипниках скольжения насосного оборудования и узлах трения изделий морской техники (например, гребного вала).

В ООО «Вириал» были проведены работы по совершенствованию и оптимизации состава связующего на основе эпоксидной смолы конструкционного назначения, аминного отвердителя и антифрикционной добавки, которые позволили разработать методом «мокрой» намотки антифрикционный углепластик марки ВУКМ 1 с температурой стеклования не менее 180 °С.

В результате трибологических испытаний в морской воде пар трения «углепластик ВУКМ 1 – сталь 40Х13» и «углепластик ВУКМ 1 – реакционно-спеченный карбид кремния (РКК)» по типу «кольцо – кольцо» на универсальной машине трения УМТ 2168 были определены предельные удельные нагрузки в зависимости от скорости вращения осевой опоры (рис. 1).



Рис. 1. Зависимость предельной удельной нагрузки от скорости вращения осевой опоры для следующих фрикционных систем:

- (●) углепластик ВУКМ 1 - сталь 40 X13 ($Ra 0,02$);
- (■) углепластик ВУКМ 1 – РКК ($Ra 0,02$);
- (▲) углепластик ВУКМ 1 – РКК ($Ra 0,16$)

Из рисунка 1 видно, что для фрикционной системы «углепластик ВУКМ 1 – сталь 40Х13» с увеличением скорости вращения кольца с 1 до 8 м/с значение предельной удельной нагрузки уменьшается приблизительно с 5 до 1 МПа, а для фрикционной системы

«углепластик ВУКМ 1 – РКК» с увеличением скорости от 6 до 8 м/с предельная удельная нагрузка снижается приблизительно с 7 до 6 МПа. При этом установлено, что предельная удельная нагрузка для системы «углепластик ВУКМ 1 – РКК» увеличивается приблизительно с 4 до 7 МПа с уменьшением значения параметра шероховатости поверхности кольца из РКК Ra от 0,16 до 0,02 при постоянной скорости, равной 6 м/с.

При создании узлов трения наилучшей работоспособностью будут обладать подшипники скольжения фрикционной системы на основе керамики РКК и углепластика ВУКМ 1, так как параметр pV (где p – давление в подшипнике, V – линейная скорость скольжения) для этой системы составляет порядка 50 МПа·м/с, что выше, чем для фрикционной системы с контртелом из стали 40Х13 (pV составляет порядка 13 МПа·м/с).

Также были определены следующие физико-механические характеристики для разработанного материала ВУКМ 1: плотность составляет 1,5 г/см³, прочность при сжатии – 130 МПа, модуль Юнга – 70 ГПа, объёмное изменение размеров при работе в воде – менее 0,1%, рабочая температура от -80 до 160 °С.

В настоящее время могут быть изготовлены изделия из углепластика ВУКМ 1 со следующими геометрическими размерами: внутренний диаметр от 10 до 250 мм, наружный диаметр от 12 до 400 мм, длина (высота) не более 1000 мм.

В ООО «Вириал» с использованием способа «мокрой» намотки из углепластика ВУКМ 1 изготавливают вкладыши подшипников скольжения (рис. 2а) для вертикальных полупогружных центробежных насосов типа «ХП» и «ХП-Е», кольца различных габаритов (рис. 2б) для клиновых задвижек запорной арматуры и вкладыши (рис. 3), выполняющие роль направляющих для запорной арматуры, получившие положительные результаты при параметрических испытаниях у заказчика.

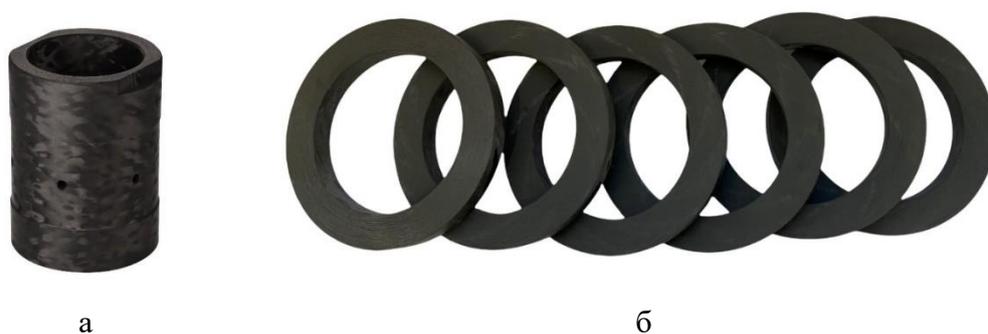


Рис. 2. Фотографии вкладыша подшипника скольжения (габаритные размеры вкладыша: внешний диаметр 80 мм, внутренний диаметр 60 мм, высота 108 мм) для вертикальных полупогружных центробежных насосов (а) и колец (габаритные размеры колец: внешний диаметр 64 мм, внутренний диаметр 45 мм, высота 6,5 мм) для запорной арматуры (б) из материала ВУКМ 1



Рис. 3. Фотография вкладышей (габаритные размеры вкладышей: внешний диаметр 34 мм, внутренний диаметр 28,1 мм, высота 22 мм) из материала ВУКМ 1 для запорной арматуры

В связи с тем, что углепластик ВУКМ 1 обладает достаточно высокими механическими характеристиками и плотностью не более 1,5 г/см³, то его возможно использовать при изготовлении трубчатых изделий для гражданских, промышленных и военных квадрокоптеров, спортивного инвентаря и спортивных инвалидных колясок.

Исследование прочностных и упругих характеристик алюминиевого сотового заполнителя различной плотности

О.Л. Петрова, Н.Г. Лисаченко, И.Е. Перова, А.Г. Попов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия,

E-mail: info@technologiya.ru

Особенностью сотовых заполнителей является увеличение значений прочностных и упругих характеристик с увеличением плотности заполнителя. В настоящей работе проведены исследования зависимости прочностных характеристик при сжатии и прочностных и упругих характеристик при сдвиге алюминиевых сотовых заполнителей с шестигранной ячейкой с номинальной плотностью 26, 32, 50, 55, 90, 129 и 192 кг/м³. Испытаниям подвергались сотовые заполнители следующих марок: АСП-5,5-2Н-30А-26, АСП-2,75-2Н-23П-32, АСП-2,75-2Н-30П-50, АСП-2,5-2Н-30П-55, АСП-2,5-2Н-50А-90, АСП-3,5-2Н-80А-90, АСП-1,8-2Н-60Н-129, АСП-1,8-2Н-80Н-192 с различной длиной и толщиной грани ячейек. Высота сотового заполнителя в образцах составляла 20 мм. Испытания при сжатии проводились в соответствии с ОСТ 1 01188-92 «Заполнители сотовые клееные. Методы испытаний», при сдвиге – по методике АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» ПМ 596.1868-2016 «Определение прочностных и упругих характеристик сотового заполнителя при сдвиге».

При построении диаграмм «плотность – предел прочности» и «плотность – модуль упругости» использовались фактические значения плотности сотового заполнителя.

Для аппроксимации полученных диаграмм были выбраны линейная и полиномиальная зависимости. Для каждой изучаемой закономерности была оценена достоверности аппроксимации (R^2), два примера представлены на рисунке 1.

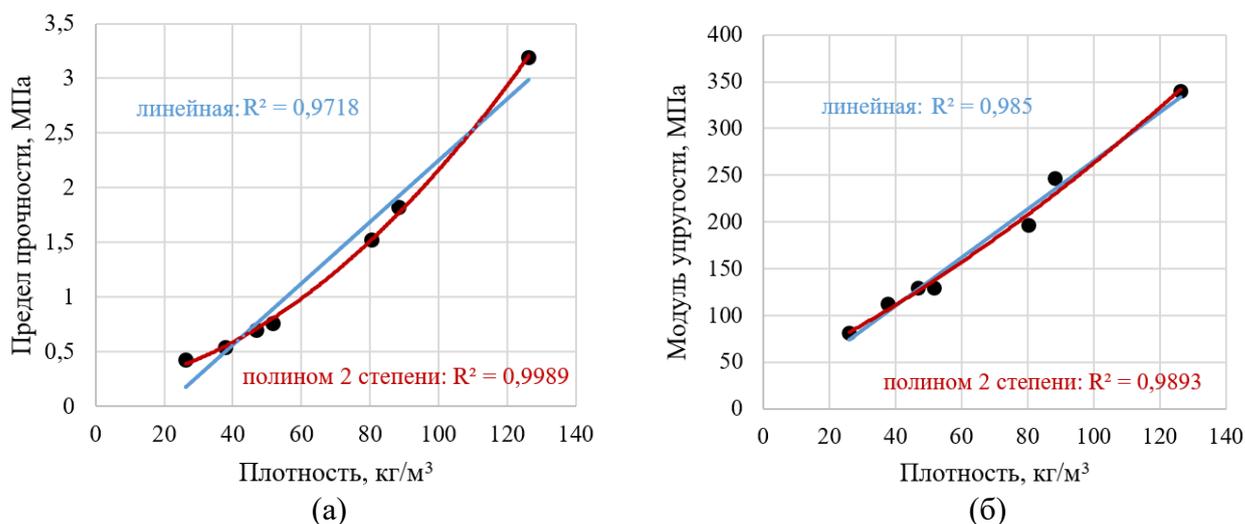


Рис. 1. Зависимость (а) предела прочности и (б) модуля упругости от фактической плотности сотового заполнителя при сдвиге в направлении перпендикулярном плоскости склеивания

Полученные зависимости рекомендуется использовать для выбора марки сотового заполнителя в соответствии с заданными требованиями.

Влияние клеевого соединения на радиотехнические характеристики антенных обтекателей

Н.Х. Гюльмагомедов, К.С. Харлампьев, Д.А. Евсеев
АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов, Россия
E-mail: d.a.evseev@vpk.npomash.ru

Эксплуатационные характеристики современных летательных аппаратов накладывают жесткие требования на антенные обтекатели, которые выполняют задачу не только механического носителя конструкции. Поэтому задача разработки обтекателя сводится не только к созданию конструкции, обладающей максимально возможной радиопрозрачностью, но и к технологичности установки его на летательный аппарат (ЛА). Опыт эксплуатации показал, что обтекатели, которые в свободном пространстве обладают требуемыми радиотехническими характеристиками, могут заметно их ухудшить при установке на ЛА. Одной из основных причин такого ухудшения радиотехнических характеристик обтекателя является использование металлического крепежа, который может привести к искажению электромагнитного поля перед антенной системой. Возможным вариантом исключения металлического крепежа при установке обтекателя на ЛА является использование клеевых соединений.

Технологические процессы склеивания металлических и неметаллических материалов клеями в авиационной и ракетно-космической технике регламентируется ОСТ 92-0949-2013. В соответствии с нормативной документацией в клеевых соединениях конструкционного назначения между склеиваемыми поверхностями не допускаются зазоры:

- при склеивании металлов с керамикой и другими жесткими неметаллическими материалами – более 0,5 мм;
- при склеивании жестких неметаллических материалов между собой – более 0,5 мм.

Учитывая, что на внутренней/внешней поверхности обтекателя для установки на ЛА необходимо нанесение, например, эпоксидного клея, радиотехнические характеристики антенного обтекателя могут ухудшиться.

Для определения влияния клеевого соединения на радиотехнические характеристики обтекателя проведены исследования диэлектрических характеристик образцов полимерного клея К300-61 с отвердителем ПО-300 на объемном перестраиваемом резонаторе ОБР № 02–2013. Образцы имели следующие размеры: диаметр – $(49,7 \pm 0,2)$ мм, толщина – 1,0; 1,5 и 2,0 мм. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений диэлектрических характеристик клея К-300-61

Номинальная толщина образца, мм	Диэлектрические характеристики	
	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$
1,0	4,24	0,021
1,5	4,51	0,027
2,0	4,33	0,042

На основе данных экспериментальных исследований, с целью определения влияния клеевого соединения на радиотехнические характеристики обтекателя проведен расчет радиотехнических характеристик стенки антенного обтекателя. Для исследования выбраны композиционные и керамические материалы, из которых изготавливают антенные обтекатели. В качестве композиционного материала взяты ХАФСкв-1 и ХАФСкв-2. Из керамических

материалов выбраны BAS (смесь оксидов кремния, алюминия и бария) и SAS (смесь оксидов кремния и алюминия). Для выбранных материалов проведен расчет оптимальной толщины стенки плоского обтекателя (по критерию максимального коэффициента прохождения) при нормальном падении электромагнитной волны (0°) на длине волны λ , равной 3 см (табл. 2).

Таблица 2. Оптимальные толщины половеолновой стенки радиопрозрачного обтекателя

Материал обтекателя	Диэлектрические параметры при нормальных условиях	Оптимальная толщина, мм ($\lambda=3$ см, 0°)
ХАФСкв-1	$\varepsilon= 3.50, \text{tg } \delta= 0,01$	8,0
ХАФСкв-2	$\varepsilon= 3.25, \text{tg } \delta= 0,008$	8,3
BAS	$\varepsilon= 6.5, \text{tg } \delta= 0,005$	6,5
SAS	$\varepsilon= 6.0, \text{tg } \delta= 0,005$	6,15

Для полученных оптимальных толщин проведен расчет радиотехнических характеристик половеолновой конструкции стенок плоского обтекателя без клея и с нанесенным клеем К-300-61 с отвердителем ПО-300 для толщины клеевого слоя 0,001; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 и 0,8 мм. Оцениваемой радиотехнической характеристикой являлся коэффициент прохождения в зависимости от частоты при нормальном падении электромагнитной волны. В табл. 3 сведены результаты расчета центральной частоты рабочей полосы стенки плоского обтекателя из выбранных материалов с учетом клея К-300-61 с отвердителем ПО-300 разной толщины.

Таблица 3. Результаты расчета центральной частоты рабочей полосы стенки плоского радиопрозрачного обтекателя

Материал обтекателя	Смещение центральной частоты, МГц									
	Без клея	С нанесенным клеем толщиной t , мм								
		0,001	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
ХАФСкв-1	9952	9952	9776	9616	9440	9296	9136	8992	8864	8736
ХАФСкв-2	9968	9952	9776	9600	9424	9264	9104	8944	8800	8672
BAS	10016	10016	9920	9808	9696	9600	9504	9392	9296	9216
SAS	9936	9936	9824	9712	9600	9488	9408	9280	9184	9088

Увеличение толщины слоя клея приводит к смещению центральной частоты рабочей полосы обтекателя в сторону низких частот. При нанесении клея толщиной до 0,5 мм рабочая полоса частот сместилась приблизительно на 900 МГц для композиционных и на 500 МГц для керамических материалов. Ширина рабочей полосы частот практически не меняется.

Для фиксированной длины волны ($\lambda=3$ см) при нормальном ее падении увеличение толщины слоя клея приводит к увеличению величины затухания электромагнитной волны при прохождении через конструкцию обтекателя: увеличение толщины клея на 0,1 мм приводит в среднем к увеличению величины уровня ослабления сигнала примерно на 0,1 дБ.

Смещение рабочей полосы частот и рост затухания электромагнитной волны объясняется увеличением электрической толщины стенки обтекателя при нанесении клеевого слоя. Следовательно, проектирование антенных обтекателей следует проводить с учетом возникновения на поверхности «дополнительного» диэлектрического слоя, образуемого клеевым соединением.

Радиопоглотители на основе полимерных композитных сотовых сэндвич-структур

А.Ф. Ильющенко¹, С.Г. Барай¹, А.И. Лецко¹, Ю.А. Реутенко¹, Н.В. Насонова²

¹ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа», г. Минск, Республика Беларусь; ²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: baraysg@yahoo.com

Для эффективной защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ) – за счет его поглощения и рассеивания посредством деструктивной интерференции – весьма перспективными являются радиопоглотители на основе многослойных сотовых сэндвич-структур с регулярными и периодически повторяющимися массивами ячеек различной формы и размеров, особенности которых заключаются в высокой прочности по отношению к весу, отличных характеристиках баллистической и вибрационной стойкости, хороших электрофизических, тепло- и звукоизоляционных свойствах.

Разрабатываемые радиопоглотители – это легкие многофункциональные композитные сборки, построенные путем встраивания композитной полимерной сотовой сердцевины с низкой плотностью между двумя тонкими облицовочными поверхностями, верхняя из которых является радиопрозрачным согласующим слоем, а нижняя – несущим экранирующим слоем. В работе в качестве радиопоглощающей сердцевины использовали сотовые структуры с двумя типами сотовой ячейки столбчатой и пирамидальной формы, полученные методом 3D-печати из промышленного термопластичного полиуретана (ТПУ) марки Т-0433-85, легированного поглощающими наполнителями с диэлектрическими и магнитными потерями в виде порошков карбонильного железа, полианилина, измельченного углеродного волокна, МАСВС Ni-Zn феррита. Согласующий радиопрозрачный слой изготавливали из полимерных композиционных материалов на основе двухкомпонентных полиуретанового и силиконового эластомеров с наполнителями TiO₂ и SiO₂. В качестве несущего экранирующего слоя применяли жаропрочный алюминиевый сплав Д16АТ.

Модели элементов радиопоглотителя гибкой конструкции представлены на рис. 1.

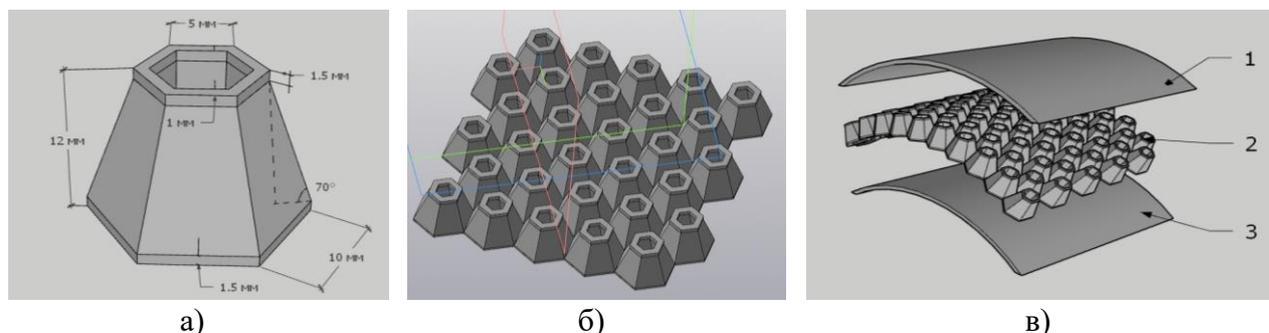


Рис. 1. Модели сотовой ячейки, гибкой сотовой структуры и радиопоглотителя:
а) пирамидальная сотовая ячейка; б) сотовая структура; в) композитный радиопоглотитель:
1 – радиопрозрачный слой, 2 – радиопоглощающий слой, 3 – экранирующий слой

По разработанным моделям изготовлены экспериментальные образцы радиопоглотителей размерами (50×50×16) мм с различными наполнителями радиопоглощающего слоя и с плотностью сотовой структуры не более 1,5 г/см³ (рис. 2а.)

Электрофизические свойства материалов сотовой структуры и экспериментальных образцов радиопоглотителей изучали с использованием векторного анализатора цепей VNAMS 4644В Anritsu (Япония) с волноводным измерительным трактом в диапазоне частот 8–12 ГГц. Значения диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей определяли путем измерения векторных характеристик коэффициентов передачи S_{21} и отражения S_{11} волноводного тракта с образцом, установленным в измерительной ячейке. Алгоритм

Николсона-Росса-Вейра использовался для извлечения электромагнитных параметров из коэффициентов отражения и передачи.

Исследования электромагнитных свойств радиопоглотителей с поглощающим слоем из различных композитов на основе ТПУ при оценке потерь на проводимость (тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_\epsilon$) и магнитных потерь (тангенс угла магнитных потерь $\text{tg}\delta_\mu$) показали, что наибольшее влияние на $\text{tg}\delta_\epsilon$ оказывает введение 10 мас.% полианилина. Максимальные диэлектрические потери $\text{tg}\delta_\epsilon = 0,25$ получены у композиции ТПУ с содержанием углеродного волокна 20 мас.% на частоте 12 ГГц (рис. 2б).

Добавки поглотителей в виде 50 мас.% Ni-Zn феррита и 50 мас.% карбонильного железа приводят к максимальному эффекту по магнитным потерям ($\text{tg}\delta_\mu = 0,15\text{--}0,40$) во всем исследованном диапазоне частот. Введение полианилина не оказывает заметного влияния на тангенс угла магнитных потерь, в то время как добавка 20 мас.% углеродного волокна увеличивает магнитные потери до $\text{tg}\delta_\mu = 0,45$ при частотах более 11,5 ГГц (рис. 2,в).

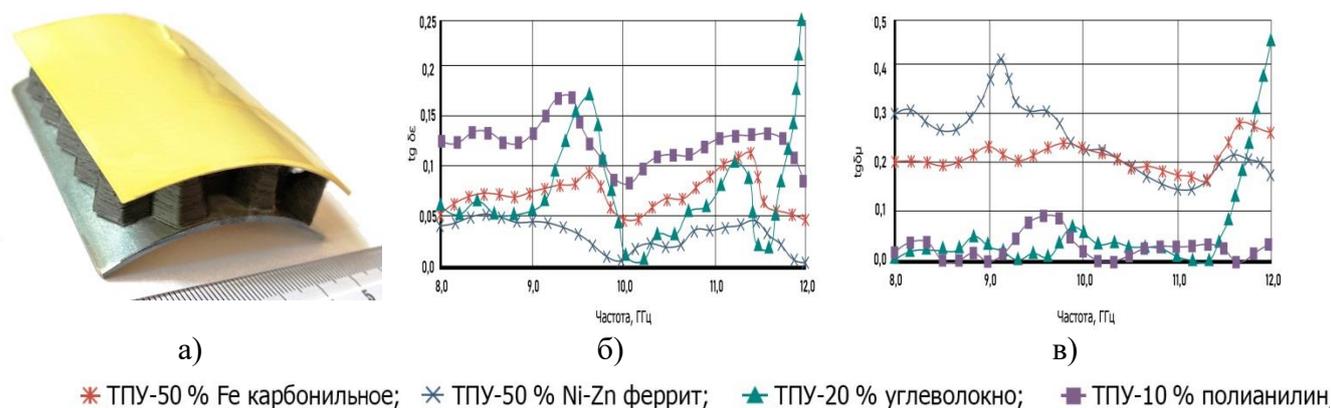


Рис. 2. Электромагнитные свойства радиопоглотителей гибкой конструкции на основе ТПУ с различными наполнителями в диапазоне частот 8–12 ГГц:

а) ЭО радиопоглотителя; б) тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_\epsilon$; в) тангенс угла магнитных потерь $\text{tg}\delta_\mu$

Установлено также, что характеристика отражения зависит от материала наполнителя радиопоглощающего слоя и формы сотовой ячейки. Пирамидальная форма ячейки приводит к рассеянию ЭМИ в пространстве и снижает коэффициент отражения S_{11} от минус 2 дБ до минус 5 дБ по сравнению с отражением от слоя металла. Наименьшие величины S_{11} в диапазоне частот 8–12 ГГц обеспечиваются образцом радиопоглотителя на основе углеродного волокна в полиуретановой матрице с концентрацией 30 мас. %. Характеристика неравномерная и составляет от минус 37 до минус 9 дБ. Резкие перепады отражения на частотах 8,25 и 11,8 ГГц объясняются дополнительными эффектами подавления излучения за счет частичного переотражения между радиопрозрачным и радиопоглощающим слоями. Образец радиопоглотителя с содержанием углеродного волокна 20 мас.% обладает более узкополосной характеристикой отражения с величиной S_{11} от минус 4 до минус 11 дБ. Это связано с меньшей величиной диэлектрических потерь материала радиопоглощающего слоя, недостаточной для эффективного подавления ЭМИ.

Установлено, что при падении электромагнитного излучения под углом малая доля энергии переотражается в приемную антенну. Для образца с углеродным волокном характеристика отражения ниже и составляет от минус 25 до минус 20 дБ. Минимальные значения коэффициента отражения минус 55 дБ достигнуты у такого радиопоглотителя на частотах 8,5 и 9,0 ГГц. На основе данных исследований разработаны материальные макеты радиопоглотителей с коэффициентом отражения менее 10 дБ и эффективной полосой поглощения до 3,0 ГГц.

Применение герметизирующих материалов Абрис А при производстве изделий из ПКМ

А.Е. Константинов

ООО «Завод герметизирующих материалов», г. Дзержинск, Россия

E-mail: online@zgm.ru

ООО «Завод герметизирующих материалов» является заводом-изготовителем и специализируется на разработке и производстве герметизирующих материалов серии Абрис®, которые состоят из российских компонентов либо компонентов, не попадающих в зону риска.

Одним из видов выпускаемой заводом продукции является герметизирующая лента (жгут) Абрис® А. Материал предназначен для герметизации и крепления вакуумных мешков в технологии вакуумного формования (печное и автоклавное формование, вакуумная инфузия, вакуумирование), применяемой при производстве композитных изделий, в том числе авиационно-космического назначения.

Лента Абрис А выпускается двух марок:

– лента Абрис А-ЛБпечн. для герметизации и крепления вакуумных мешков при печном формовании деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ), а также в процессах вакуумной инфузии. Максимальная температура применения 180 °С;

– лента Абрис А-ЛБавт. для герметизации и крепления вакуумных мешков при автоклавном формовании деталей из ПКМ. Максимальная температура применения 205 °С.

Основные свойства ленты Абрис А представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные свойства ленты Абрис А

Наименование	Прочность связи с металлом при отслаивании, Н/м, не менее	Максимальная температура формования детали, °С	Максимальное давление формования детали, МПа	Назначение
Лента Абрис А-ЛБпечн.	400	185	0,25	печное формование
Лента Абрис А-ЛБавт.	500	185*	0,8**	автоклавное формование

*Возможно кратковременное увеличение температуры до 205 °С при формовании до 6 часов.

**Подъем давления в автоклаве выше 0,25 МПа допускается после выдержки собранного узла при температуре (125–130) °С в течение (30–60) мин.

Герметик Абрис А (файл-пакет) предназначен для герметизации и крепления вакуумных мешков в технологии вакуумного формования (печное и автоклавное формование, вакуумная инфузия, вакуумирование).

Наносится с помощью пневматического оборудования и специальный насадки, профилируется в ленту нужного типоразмера. Применяется в качестве аналога ленты Абрис А-ЛБ. Внедрение данной технологии снизит себестоимость продукции, тем самым оказав влияние на ее конечную цену, и будет способствовать сокращению издержек производства за счет упрощения логистики, уменьшения отходов, а при комплексном подходе – повышению производительности труда.

Высокотеплопроводный полимерный композиционный материал на основе графита и его практическое применение

А.П. Белоглазов¹, М.А. Горшенин¹, В.Д. Ерошенко¹, Н.В. Меньшутина²

¹ООО «Ниагара», г. Москва, Россия; ²РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

E-mail: gorshenin94g5@yandex.ru

Приборы, размещенные на современных летательных аппаратах (ЛА), эксплуатируются в широком температурном диапазоне (± 60 °С), а также при высоких механических нагрузках. Для размещения приборов изготавливаются корпуса из традиционных металлических материалов. Использование неметаллических корпусов является перспективным по ряду причин: антикоррозионные свойства материала, меньшая удельная плотность, химическая стойкость и др. Перед нами была поставлена задача разработать корпус для размещения аппаратуры ЛА из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Первоочередной задачей при разработке корпуса для размещения приборов являлась создание высокотеплопроводного ПКМ. Анализ литературных данных показывает, что одни из самых высокотеплопроводных конструкционных ПКМ являются графитопласты, полученные, как правило, с помощью горячего прессования.

Опытным путём была разработана технология получения графитопласта с требуемой прочностью и коэффициентом теплопроводности. В результате был получен высокотеплопроводный ПКМ, коэффициент теплопроводности которого составляет около 100 Вт/мК, плотность не более 1,6 г/см³, коэффициент излучения примерно 0,83.

Разработанный материал применили в конструкции корпусов для размещения электронных блоков. Особенностью данной конструкции является использование высокотеплопроводного ПКМ, углепластиковых соединительных элементов и трубок переменного теплового сопротивления для обеспечения передачи тепла на стенки радиаторного типа. Испытания проводились при совокупной тепловой мощности электронных приборов 200 Вт.

Тепловые расчёты проводились в программном комплексе ANSYS. Были рассмотрены различные варианты геометрии поверхности панели для обеспечения оптимального сброса тепла: ребра прямоугольного, квадратного сечения, а также игольчатый тип. Данные расчёты показали, что радиатор квадратного сечения с равным шагом имеет ряд преимуществ в сравнении с игольчатым типом: простота изготовления, температура на поверхности стенки на 5 % меньше, жесткость конструкции повышается.

Разработанная конструкция успешно прошла механические и климатические испытания. Использование углепластика в качестве армирующего каркаса обеспечила требуемые механические характеристики, в том числе вибростойкость данной конструкции. Климатические испытания показали, что высокотеплопроводный ПКМ обеспечил требуемые физико-химические характеристики: при испытании данной конструкции в условиях низкой температуры окружающей среды (минус 60 °С) приборы, установленные внутри, вышли на рабочую температуру в несколько раз быстрее, чем в корпусе аналогичного назначения из металла. Также к преимуществам данной конструкции перед аналогичной конструкцией из металла можно отнести увеличенный срок службы, меньшая масса конечного изделия и снижение показателя радиозаметности.

Из описанного выше можно сделать вывод, что высокотеплопроводный ПКМ на основе графитопласта с применением углепластиковых соединительных элементов является перспективным решением для изготовления приборных блоков в различных сферах специального машиностроения.

Исследование возможности применения фталонитрильного связующего для получения термостойких стеклопластиковых сотовых наполнителей

Т.С. Гормакова¹, А.Н. Корнейчук¹, И.О. Бабкина¹, В.С. Волков¹, А.В. Бабкин²

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²АО «ИНУМИТ», г. Москва, Россия

E-mail: gormakovats@technologiya.ru

Многослойные конструкции со стеклопластиковыми сотовыми наполнителями (ССП), обладающие высокими удельными прочностными характеристиками, широко применяются в высоко- и средненагруженных радиопрозрачных конструкциях авиационно-космической и ракетной техники.

В связи с запросами новейших технологий в этих отраслях следует отметить возросший интерес к термостойким сотовым конструкциям, что приводит к ужесточению требований по температуре эксплуатации применяемых материалов, в том числе стеклосотопластов.

В настоящее время в производстве ССП в качестве высокотемпературных полимерных матриц используются полиимидные связующие. Предельная температура эксплуатации изделий на основе таких матриц не превышает 300-350 °С. Для обеспечения более высоких температур эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) актуально применение более термостойких полимерных связующих. Таким высоким требованиям могут удовлетворять полимерные матрицы на основе соединений из класса фталонитрилов, работоспособных до 400 °С.

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» сотовые наполнители производятся методом растяжения сотового пакета с пропиткой в растворе связующего. В основном, фталонитрильные связующие представляют смесь исходных термореактивных мономеров в виде порошка, которые неприменимы в существующей технологии производства ССП, поэтому для получения ССП было опробовано фталонитрильное связующее производства АО «ИНУМИТ», которое представляет собой раствор фталонитрильных мономеров в N,N-диметилацетамиде.

В данной работе в рамках научно-технического задания исследовали возможность применения 50% раствора связующего ФН01/Д/50% в технологии получения стеклопластиковых сотовых наполнителей.

Были исследованы реологические свойства неотверждённого связующего методом динамического механического анализа (ДМА), а также исследована кинетика его отверждения методом дифференциальной сканирующей калориметрией (ДСК).

Для выбора оптимального режима отверждения фталонитрильного связующего и ССП на его основе были изготовлены образцы стеклопластика и проведены их испытания на прочность методом трехточечного изгиба.

Образцы сотового наполнителя с размером граней ячеек 3,5 мм были изготовлены на основе стеклоткани Э1/1-100, клея ВК-26М и связующего ФН01/Д/50%. После проведения испытаний образцов ССП на определение прочности при сжатии было установлено, что полученные значения соответствуют значениям серийно-выпускаемых сотов типа ССП-1П. Также после термостарения исследуемого ССП при 400 °С в течение 1 часа было отмечено сохранение 90% прочности от исходных значений.

Таким образом, в результате проведенных поисковых исследований показана принципиальная возможность получения высокотемпературного стеклосотопласта на основе фталонитрильного связующего, работоспособного до 400 °С.

Разработка способа определения глубины дефектов типа «складка» в сложнопрофильных изделиях из стеклопластиков

Д.И. Чулков, А.В. Терехин, С.И. Минин, М.Ю. Русин, А.А. Филатов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

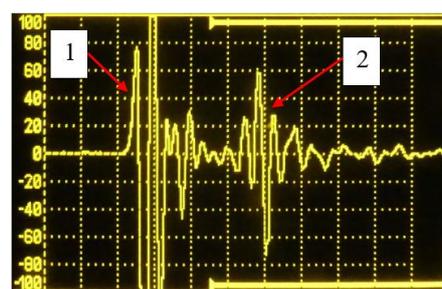
В процессе изготовления стеклопластиковых изделий сложной формы методом пропитки под давлением неизбежно образуются дефекты типа «складка» (гофры) – дефекты армированных пластиков в виде складок упрочняющего наполнителя (ГОСТ Р 56975-2016 Национальный стандарт Российской Федерации. Композиты полимерные. Показатели внешнего вида изделий из многослойных стеклокомпозитов. М.: Стандартинформ, 2016). Складки повышают неоднородность материала и являются концентраторами механических напряжений, от их размера – в частности, глубины – зависят прочностные свойства стеклопластика и эксплуатационные характеристики всего изделия. В связи с этим, с целью обеспечения высокого качества и требуемой надежности ответственных изделий из стеклопластика, возникает необходимость определения глубины складок методами неразрушающего контроля (НК). В условиях серийного производства наиболее перспективными методами НК с точки зрения оперативности и чувствительности являются акустические методы.

Разработаны два способа определения глубины дефектов типа «складка» в сложнопрофильных изделиях с переменной толщиной стенки из слоистого стеклопластика: с применением продольных ультразвуковых волн (УЗВ) для определения глубины складок с шириной раскрытия более 1 мм (патент РФ № 2814126) и с помощью поверхностных и подповерхностных УЗВ (патент РФ № 2788337).

Способ с применением продольных ультразвуковых волн и высокочастотного (20 МГц и более) пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) реализуется следующим образом: полость складки заполняют жидкостью (например, спиртом), устанавливают на нее прямой высокочастотный ПЭП, излучают продольные УЗВ с последующей регистрацией эхо-импульса от границы раздела сред «жидкость–стеклопластик», измеряют время его распространения и определяют половину пути, пройденного продольной УЗВ, который равен глубине складки (рис. 1).



(а)

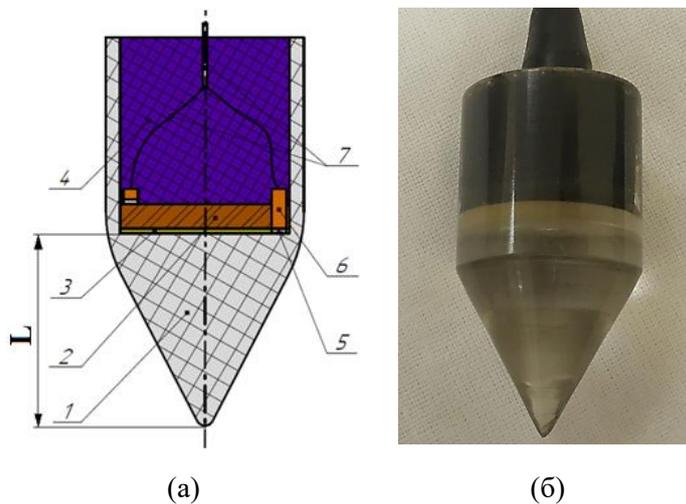


(б)

Рис. 1. Установка преобразователя на складку, заполненную водой (а) и осциллограмма с экрана ультразвукового дефектоскопа (б):

1 – эхо-импульс от границы раздела сред «линия задержки – жидкость», 2 – эхо импульс от границы «жидкость – стеклопластик»

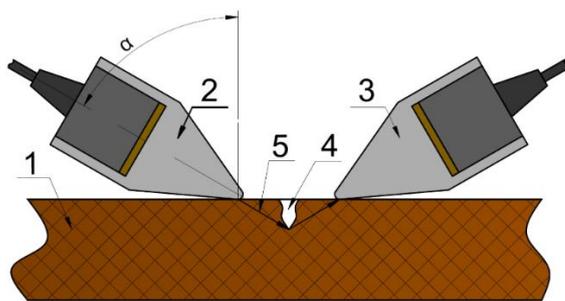
Для реализации способа определения глубины складок с применением поверхностных и подповерхностных УЗВ были разработаны, изготовлены и экспериментально апробированы пьезоэлектрические преобразователи с коническими волноводами (рис. 2).



1 – волновод из органического стекла, выполняющий функцию корпуса ПЭП, 2 – пьезопластина ЦТС-19 (цирконат-титанат свинца), 3 – клеевой слой на основе эпоксидной смолы; 4 – дэмпфер, состоящий из композиции эпоксидной смолы и порошка вольфрама, 5 – низкотемпературный припой (сплав Розе); 6 – соединительные контакты; 7 – радиочастотный кабель

Рис. 2. Схематическая конструкция (а) и фотография (б) ПЭП с коническим волноводом

Способ основан на увеличении времени распространения поверхностных и подповерхностных УЗВ Δt , перпендикулярно проходящих через складку (рис. 3), по отношению к времени распространения УЗВ в бездефектной области при установке ПЭП на том же расстоянии.



1 – стенка изделия, 2 и 3 – источник и приемник ультразвуковых волн, 4 – дефект типа «складка», 5 – ультразвуковые волны, α – угол ввода для возбуждения поверхностных и подповерхностных УЗВ

Рис. 3. Схема распространения УЗВ при прохождении через складку

Определение глубины складок осуществляется по предварительно построенной регрессионной зависимости (рис. 4).

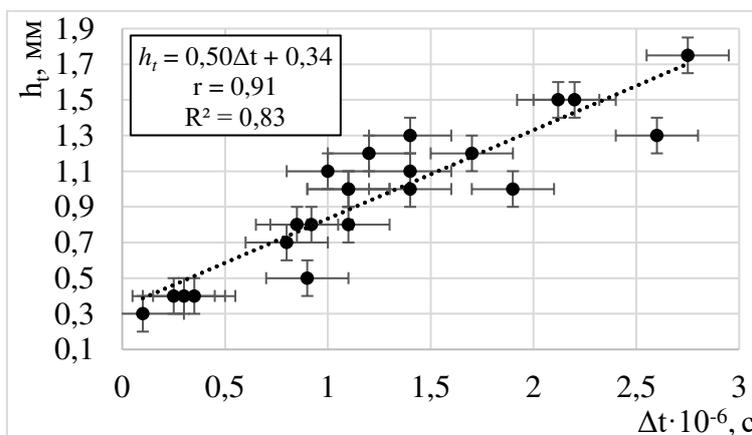


Рис. 4. Зависимость между увеличением времени распространения ультразвуковых волн Δt на складках и их глубиной h_f

Оперативность, высокая точность определения глубины складки (около 0,3 мм) и отсутствие вредных факторов для человека являются преимуществами разработанного способа.

Конструкция антенного обтекателя с интегрированным креплением антенной аппаратуры

М.В. Васюков, С.Б. Воробьев, **А.Н. Гурьев**, Т.А. Духова, С.И. Латыш
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: vasyukovmv@technologiya.ru

В силу специфики производства головные части высокоскоростных летательных аппаратов имеют модульную систему, где антенный обтекатель является самостоятельным отсеком, а антенная аппаратура внутри обтекателя крепится в соседнем с обтекателем корпусе отсека. Во время эксплуатации антенная аппаратура испытывает вибрационные нагрузки, при этом в неблагоприятном случае возможен удар зеркала антенны о внутреннюю поверхность обтекателя и, как следствие, выход из строя антенной аппаратуры, а также повреждение обтекателя.

Предлагается решение описанной проблемы созданием конструкции обтекателя, при котором крепление антенной аппаратуры внутри летательного аппарата осуществляется непосредственно к оболочке обтекателя. Следует отметить, что такое решение может быть реализовано только для конструкции обтекателя с оболочкой из полимерного композиционного материала.

Указанный технический результат достигается тем, что антенный обтекатель, включающий радиопрозрачную оболочку из полимерного композиционного материала и металлический переходник, соединенные между собой клеемеханическим способом с использованием крепежных элементов в виде заклепок, расположенных в два ряда в шахматном порядке, а во внутреннюю полость обтекателя соосно с оболочкой установлены два опорных кольца из легкого металлического сплава, при этом кольца разнесены от носка обтекателя на расстояния, определяемые габаритами и расположением антенной аппаратуры, и соединены с оболочкой при помощи винтов, вкрученных через отверстия в оболочке, крепление антенной аппаратуры к обтекателю осуществляется через опорные кольца при помощи винтов, вкрученных через отверстия в оболочке, расположенных в одной плоскости и равномерно чередующихся с винтами, соединяющими кольца с оболочкой, под равным углом, при этом внешние отверстия в оболочке для винтов заполнены термостойким герметизирующим материалом.

На рисунке 1 представлено изображение антенного обтекателя с креплением корпуса антенной аппаратуры 6 к оболочке 1 обтекателя согласно настоящему изобретению.

Радиопрозрачная оболочка обтекателя изготовлена из полимерного композиционного материала, переходник 2 изготовлен из алюминиевого или титанового сплава и конструктивно приспособлен, например, для клинового соединения с ответным отсеком летательного аппарата.

Оболочка и металлический переходник 2 соединены между собой клеемеханическим способом с использованием крепежных элементов в виде заклепок 3. На сопрягаемых поверхностях оболочки и переходника нанесен слой термостойкого клея-герметика, обеспечивающий герметизацию в указанном стыке. Механическое соединение оболочки и переходника производится при помощи заклепок, расположенных в два ряда в шахматном порядке.

Во внутренней полости обтекателя соосно с оболочкой расположены два кольца 4, изготовленные из легкого металлического сплава (алюминиевого или титанового). Кольца расположены на заданных расстояниях от носка оболочки обтекателя, что обеспечивает надежное крепление с корпусом антенной аппаратуры в двух сечениях. Расстояния от носка оболочки обтекателя до колец определяются габаритами и расположением антенны.

Кольца соединены с оболочкой винтами 5. Отверстия под винты в оболочке заполнены после установки винтов слоем термостойкого герметизирующего материала (клея-герметика или эпоксидной смолы) заподлицо с поверхностью оболочки. Количество винтов в каждой плоскости зависит от размера обтекателя.

В оболочке и кольцах предусмотрены отверстия под винты 7, которые устанавливаются при сборке обтекателя с антенной аппаратурой и обеспечивают их точное позиционирование друг относительно друга. При помощи указанных винтов производится регулировка отклонения оси антенного устройства и обтекателя для обеспечения оптимального прохождения радиосигнала.

Винты 7 находятся в одной плоскости с винтами 5, соединяющими кольца 4 с оболочкой 1. Чем больше габариты обтекателя, тем чаще установлены винты и, соответственно, тем меньше между ними угол.

Внешние отверстия в оболочке для винтов заполнены термостойким герметизирующим материалом, таким как эпоксидная смола или клей-герметик, которые хорошо заполняют отверстия и обеспечивают надежную герметизацию отверстий.

Конструкция позволяет воспринимать значительные изгибающие нагрузки за счет применения заклепочного и клеевого соединения в стыке металлического переходника и оболочки, а также обеспечивает возможность крепления антенной аппаратуры к оболочке обтекателя, а жесткое крепление антенны через два опорных металлических кольца к оболочке обтекателя исключает возможность контакта зеркала антенны с внутренней поверхностью оболочки обтекателя и обеспечивает требуемое отклонение по соосности между антенной аппаратурой и обтекателем, что может снизить ошибки при передаче радиосигнала.

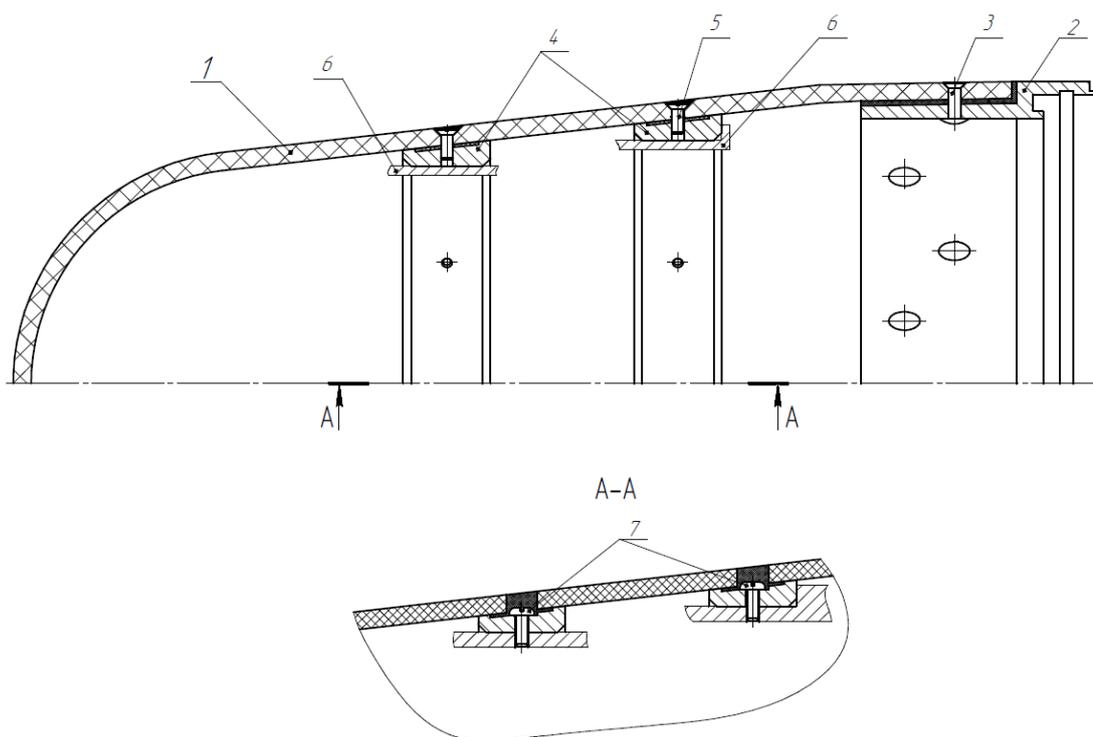


Рис. 1. Схема предлагаемой конструкции обтекателя с креплением антенной аппаратуры:
 1 – оболочка обтекателя из полимер-композиционного материала; 2 – металлический переходник; 3 – заклепки; 4 – опорные кольца; 5 – винты; 6 – корпус антенной аппаратуры; 7 – винты крепления обтекателя и корпуса антенной аппаратуры

Влияние технологических дефектов в радиусной зоне на прочность композитного лонжерона

Л.А. Климакова, Д.А. Волков

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: klimakova@technologiya.ru

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в ответственных элементах агрегатов авиационно-космической техники накладывает на них весьма жесткие требования по эксплуатационной живучести. Так как эксплуатационные свойства изделия из ПКМ связаны с качеством его структуры, представляется необходимым анализ степени влияния типовых технологических дефектов на несущую способность конструкции при эксплуатации с последующей разработкой способов устранения этих дефектов или снижения их влияния до безопасного уровня. Ввиду недостаточного развития теоретической базы, на сегодняшний день расчет прочности композита с технологическими несовершенствами, особенно для условий циклического нагружения, не обеспечивает требуемую достоверность, в связи с чем экспериментальные исследования в этой области имеют приоритетное значение.

Характерными технологическими дефектами для конструкций, содержащих места перегибов (например, радиусный переход стенки лонжерона или нервюры в пояс), являются складки и подмятия, возникающие из-за недостаточного или неравномерно распределенного давления в этих зонах при формовании. Дефекты такого рода сопровождаются местным искривлением волокон в плоскости одного или нескольких слоев, изменением состава материала в сечении дефекта вследствие наличия пор и мест скопления связующего, а также искажением геометрии самого сечения, что в совокупности может привести к снижению локальной прочности и несущей способности изделия в целом.

В рамках настоящей работы выполнена экспериментальная оценка влияния технологических несовершенств «складка» и «подмятие» в радиусной зоне на прочность углепластикового лонжерона двух конструктивных исполнений на основе сравнительного анализа межслойной прочности образцов номинальной толщиной 4,6 и 6,4 мм соответственно, вырезанных из дефектных и бездефектных радиусных зон исследуемых лонжеронов, при испытаниях по ГОСТ 57041 «Метод определения характеристик при изгибе изогнутой балки» (ASTM D 6415). Так как межслойная прочность, измеренная данным методом, зависит от объема армирующего материала и содержания пустот, результаты эксперимента отражают не только свойства, но и качество структуры слоистого пластика в конструкции.

В ходе испытаний дефектных и бездефектных образцов определялись статическая (исходная) и усталостная (остаточная после нагружения 500 000 циклами знакопостоянной изгибающей нагрузкой) межслойная прочность лонжерона в радиусной зоне. На рисунке 1 представлены структура материала лонжерона в дефектной области и типовой характер его разрушения при испытании образцов.

По данным испытаний установлено, что наличие технологических дефектов «складка» или «подмятие» в радиусной зоне лонжерона может привести к снижению межслойной прочности в дефектной зоне на 20%, при этом снижение остаточной прочности в условиях циклического нагружения может достигать 50%.

Исследование технологических возможностей улучшения качества материала в радиусных зонах лонжерона при формовании его от наружного контура не подтвердили эффективность применения специальных цулаг: результаты испытания образцов по методу изгиба изогнутой балки показали равноценность способов изготовления с цулагой и без нее (рис. 2).

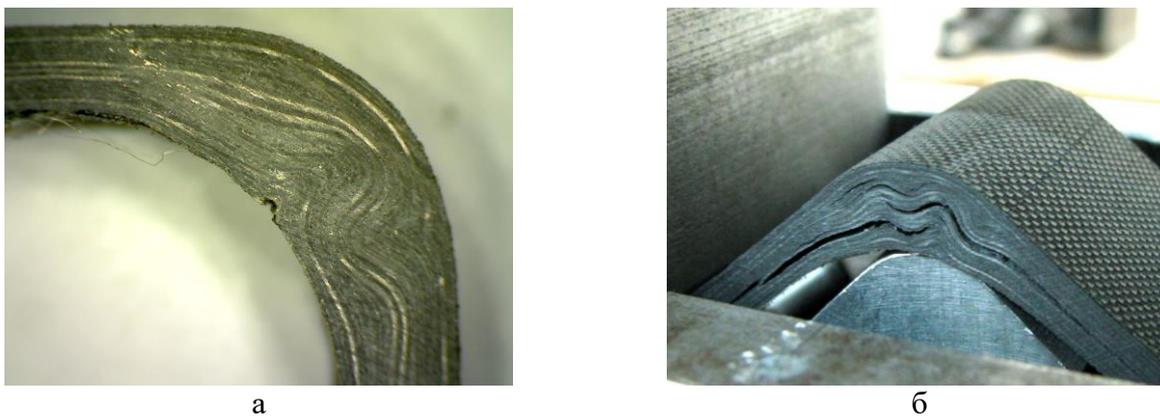


Рис. 1. Структура материала лонжерона в дефектной области (а) и типовой характер его разрушения при испытании образцов (б)

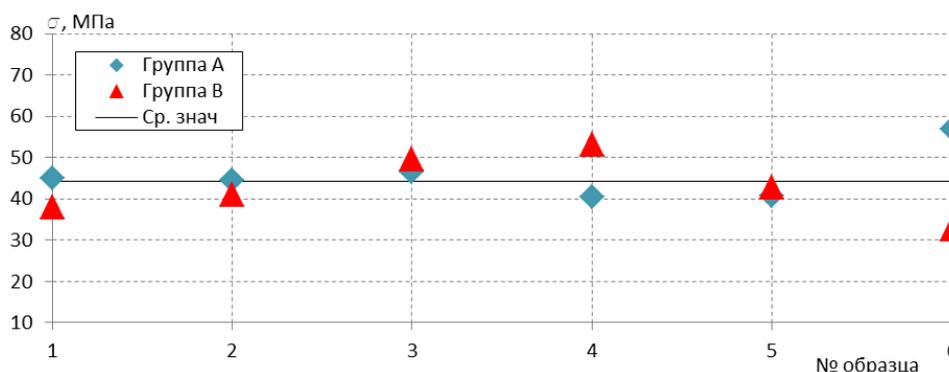


Рис. 2. Межслойная прочность образцов лонжерона, изготовленного без применения (группа А) и с применением специальных цулаг (группа В)

Анализ структуры материала лонжеронов, выполненный средствами неразрушающего контроля и с помощью оптического микроскопа, дал основание выдвинуть гипотезу о том, что слои с углом укладки 90° в радиусных зонах могут выступать как элементы жесткости, не позволяющие обеспечить монолитность композита из-за низкой драпируемости в поперечном направлении, инициируя при этом образование пор, локальное скопление которых может проявляться и фиксироваться как расслоение.

Для оценки влияния пор на эксплуатационную работоспособность конструкции в условиях циклического нагружения проведены исследования образцов углепластикового лонжерона, которые в радиусной зоне содержали торцевые («глухие»), выполненные соосно, отверстия диаметром 1,2 мм и глубиной 3 мм, имитирующие дефекты. Испытания по методу изгиба изогнутой балки в соответствии с ГОСТ 57041 (ASTM D 6415) включали определение начальной и остаточной (после циклического нагружения) межслойной прочности образцов. Параметры циклического нагружения: нагрузка: $P = 0,6 P_{max}$, где P_{max} – начальная разрушающая нагрузка; количество циклов – 400 000; частота – 10 Гц. Результаты эксперимента позволяют сделать вывод об отсутствии влияния пор на эксплуатационные характеристики изделия. Ультразвуковая диагностика образцов также не выявила роста (распространения) имевшихся или появления новых дефектов.

В качестве мер, направленных на снижение влияния технологических дефектов в радиусных зонах конструкций из ПКМ, следует рассматривать применение составных 90° -слоев с укладкой их встык или с нахлестом, а также использование методов выкладки и формования от внутреннего контура. С технологической точки зрения при этом остается актуальной задача оптимизации режимов формования в части приложения избыточного давления в момент минимальной жесткости еще не отвержденной системы «смола – волокно».

Синтез пигмента для терморегулирующих покрытий

А.М. Икаев, Д.А. Лавров, О.С. Баврина
«ЦНИИХМ им. Д.И. Менделеева», г. Москва, Россия
E-mail: fiagdon24@mail.ru

В качестве пассивных систем терморегулирования для поддержания заданного теплового режима используются терморегулирующие покрытия (ТРП). Соединения на основе лантан-стронций манганита имеют переменный коэффициент излучения ϵ . Изменение коэффициента излучения связано с фазовым переходом «металл – диэлектрик» в диапазоне температур от 250 до 350 К. Литературный обзор показывает перспективность применения таких соединений в составе ТРП.

В настоящее время научный интерес и практическую значимость представляют ТРП в виде лакокрасочных материалов (ЛКМ), а точнее – силикатные краски с пигментом, обладающим переменным коэффициентом излучения. В качестве такого пигмента могут быть использованы манганиты редкоземельных элементов с общей формулой $\text{La}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$.

Методом высокотемпературного синтеза получали пигменты $\text{La}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. Нитраты соответствующих металлов предварительно пропитывали микрокристаллической целлюлозой, затем сушили и воздействовали на полученную смесь открытым пламенем. Полученный порошок прокаливали при 950 К (рис. 1).

Качественный и количественный анализ синтезированного порошка проводили с использованием энерго-дисперсионного анализатора BRUKER. Фазовый состав и структуру определяли при помощи дифрактометра Rigaku Ultima IV.

Полученные пигменты для ТСП имеют переменный коэффициент излучения до 0,3 в области температур 250-300 К.

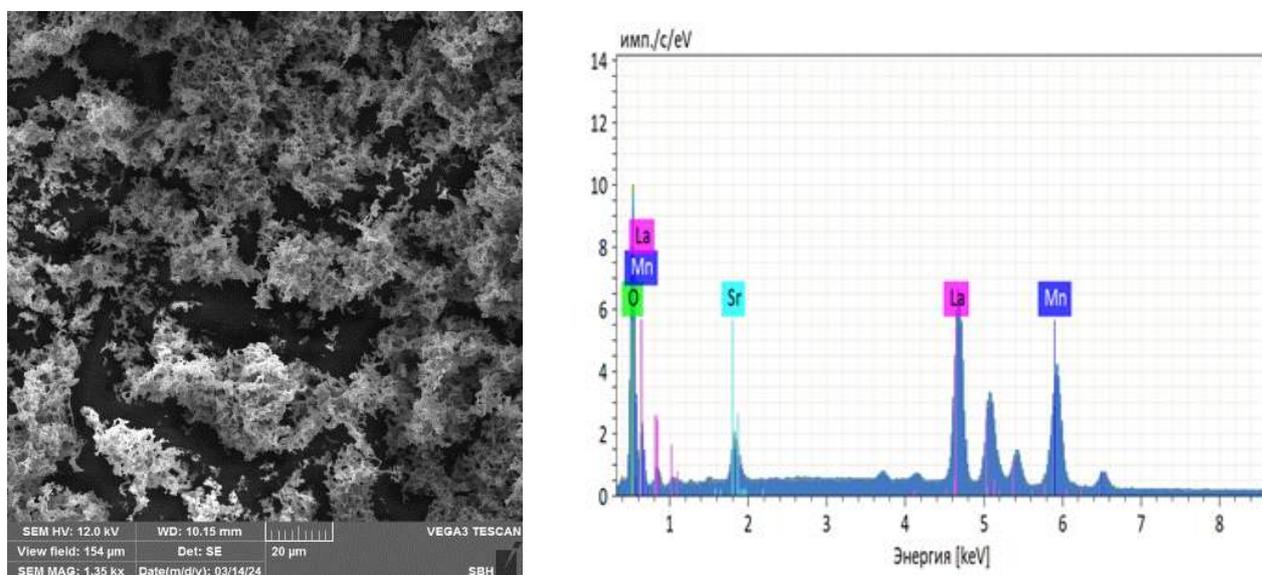


Рис. 1

Разработка, проектирование и изготовление оснастки из полимерных композиционных материалов для крупногабаритных стрингерных панелей

Е.Д. Филин, А.И. Ирошников, Е.А. Троценко, Н.В. Шишканов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

В настоящее время в авиационной промышленности взамен традиционных (сталь, титан, алюминий и т.п.) широко применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ). ПКМ используют для изготовления высоконагруженных элементов самолета – таких как панели крыла и фюзеляжа, шпангоуты и лонжероны, нервюры, элементы хвостового оперения, включая внутренний набор и панели аэродинамического контура. В элементах авиационной техники используются монолитные детали, трехслойные конструкции и изделия с силовым подкреплением. Стрингерные панели из ПКМ за счет конструктивных особенностей, позволяющих повысить массовую эффективность хвостового оперения, привлекают повышенное внимание разработчиков летательных аппаратов.

Снижение массы конструкции, как инструмент повышения экономической эффективности летательных аппаратов, является одной из приоритетных задач развития современной авиационной техники. В связи с постоянным увеличением доли углепластиковых деталей в авиационных конструкциях всё большее внимание уделяется конструкции и технологии изготовления соответствующей формообразующей оснастки, ведь именно оснастка задает требуемую форму будущей детали и обеспечивает её качество.

Металлическая оснастка имеет высокую стоимость, материалоемкость и не обеспечивает передачу размеров изделиям с необходимой точностью (разница КЛТР между материалами оснастки и формуемого изделия), особенно при изготовлении крупногабаритных стрингерных панелей.

К стрингерным панелям, которые являются составными элементами сложных, высокоточных агрегатов, таких как крыло, киль, стабилизатор, предъявляются повышенные требования:

- высокие характеристики прочности и жесткости;
- точность геометрического расположения стрингеров;
- жесткий допуск на толщину стрингеров и обшивки;
- низкая пористость материала.

В обеспечение вышеперечисленных требований для производства стрингерных панелей из ПКМ, как правило, используются автоклавные методы формования при температурах порядка 180 °С и специализированная высокоточная термостойкая оснастка.

Основным требованием к оснастке является форморазмеростабильность, в том числе при многократных нагрузках автоклавного формования. Для этого коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) материала оснастки в продольном и поперечном направлениях должен быть максимально близок соответствующим КЛТР формуемого изделия.

В связи с вышеперечисленным все большее распространение получает полимерная оснастка, формообразующая поверхность которой изготавливается из стекло- или углепластика. Основными преимуществами полимерной оснастки являются:

- близкий КЛТР формуемой детали и оснастки;
- возможность получения оснастки сложной кривизны больших габаритов;
- меньшая масса по сравнению с металлической оснасткой;
- быстрый и равномерный нагрев при термообработке;
- геометрические размеры стабильны в процессе ее эксплуатации;– минимальные эксплуатационные затраты (трудоемкость обслуживания, ремонта оснастки, энергозатраты в процессе выполнения формования).

В рамках работы по созданию высокоточной форморазмеростабильной оснастки была разработана и реализована программа по изготовлению конструктивно-подобных образцов (КПО) стрингерных панелей кия. Основными задачами при разработке, проектировании и изготовлении экспериментальной оснастки являлись:

- разработка конструкции оснастки, исключающей недопустимые деформации при многоцикловом использовании;
- разработка схемы установки вспомогательных элементов оснастки, обеспечивающей допуск по толщине и точность позиционирования стрингеров;
- изучение влияния оттока связующего на толщину получаемого стрингера в процессе формования КПО;
- изучение КЛТР образцов полученных из КПО и оснастки.

По результатам выполнения данной программы разработана концепция новой конструкции оснастки:

- обладающая повышенной жесткостью;
- в меньшей степени подверженной технологическим поводкам (благодаря изменению формы конструкции в виде отбортовки за зоной технологического припуска);
- обеспечивающей более высокие требования по точности позиционирования стрингеров панели кия (за счёт упреждения, в котором учтен фактический КЛТР материал оснастки, толщины вспомогательных материалов и влияние толщины не отформованного материала элемента стрингера).

Работоспособность концепции проверена успешным изготовлением стрингерных панелей кия с применением данной оснастки из ПКМ (рис. 1).



Рис. 1. Оснастка с отформованной стрингерной панелью

Локальная межслоевая прочность при отрыве 3D-армированных прошивкой углекомпонитных материалов

А.Ю. Синицын¹, А.В. Гайворонский¹, А.А. Ширко¹, П.Г. Бабаевский², В.В. Мазур¹
¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²МАИ (НИУ), г. Москва, Россия

E-mail: sinitsynayu@technologiya.ru

В настоящее время в самолетостроении наиболее перспективными и эффективными материалами являются слоистые углекомпонитные материалы (УКМ) на основе углеродных лент или тканей и эпоксидных связующих. Это обусловлено их высокой удельной прочностью и жесткостью в плоскости армирования, коррозионной и усталостной стойкостью. Однако в сравнении с прочностью в плоскости армирования, УКМ и получаемые из них элементы конструкций обладают значительно более низкой межслоевой прочностью и стойкостью к расслоению.

Одним из основных подходов повышения устойчивости слоистых УКМ к межслоевым повреждениям является армирование заготовок по толщине различными методами, такими как: скрепление, иглопробивание, объемное или трехмерное (3D) ткачество, тафтинг и трансверсальная прошивка слоев. Такие методы преобразуют УКМ из двумерно-армированных в трехмерно армированные (3D) материалы с заданной ориентацией наполнителя в плоскости слоев и с дискретно распределенными (локализованными) трансверсальными элементами заданного типа, с различным расстоянием между ними. Такой характер армирования и вариабельность его параметров обуславливает сложность оценки свойств 3D-армированных УКМ по сравнению с непрошитыми материалами и не позволяет определять межслоевую прочность УКМ стандартизированными методами.

В данной работе с целью оценки межслоевой прочности 3D-армированных прошивкой двойным челночным стежком УКМ, изготовленных методом вакуумной инфузии, предложена оригинальная методика испытания на определение прочности отдельных элементов прошивки при межслоевом отрыве. Испытания проводили с использованием образцов трех типов с выделенной зоной контакта слоев: в образцах первого типа контактная зона не содержала прошивок, а в двух других в зоне межслоевого контакта находились один и два узла переплетения прошивочных нитей в стежке соответственно. Прошивку проводили двумя типами нитей: стеклянной и арамидной. Формирование локальной зоны межслоевого контакта обеспечивали в процессе изготовления образцов.

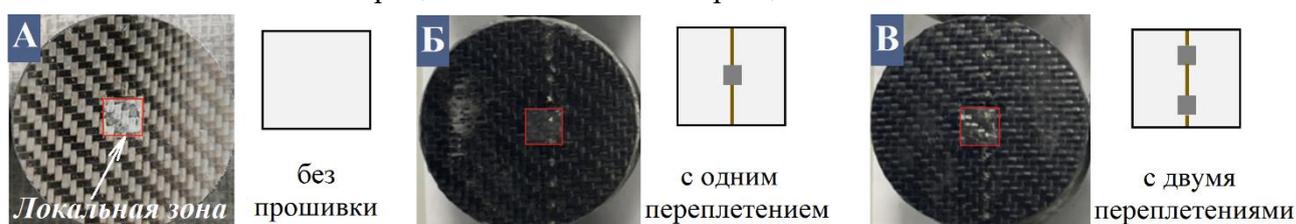


Рис. 1. Межслоевая поверхность образцов после испытаний: (а) – с зоной контакта без прошивки; (б, в) – с одной и двумя прошивками

Результаты исследований показали, что межслоевая прочность образцов с прошивкой стеклянной и арамидной нитями с одним переплетением прошивочных нитей больше в 1,65 и 1,71 раза соответственно, а с двумя переплетениями – в 1,83 и 2,63 раза в сравнении с прочностью непрошитых образцов. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о резко выраженной локальности межслоевой прочности прошитых УКМ относительно трансверсально ориентированных элементов армирования, обуславливая трудности ее определения стандартизированными методами (ГОСТ Р 57864-2017). По результатам проведенных исследований в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» разработана методика «*Определение предела локальной межслоевой прочности при отрыве слоев полимерных композиционных материалов с трансверсальным армированием прошивкой*».

Исследования по разработке электроизоляционного кремнийорганического компаунда

Е.И. Маслова, Л.И. Бойко, О.В. Томчани

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: lab.em@technologiya.ru

Технический уровень современных электрических машин и аппаратов, их мощность, надежность, габариты, вес и пр. во многом определяются свойствами применяемых при их изготовлении электротехнических материалов. Электроизоляционные материалы наряду с высокими диэлектрическими и механическими характеристиками должны обладать высокой термической стабильностью, чтобы без изменения своих характеристик длительно работать при номинальном токе и напряжении, выдерживая большие электрические нагрузки и колебания температур. Среди применяемых в электротехнике материалов значительную долю составляют электроизоляционные компаунды, назначением которых является заливка или пропитка электропроводящих схем и деталей с целью их электроизоляции и герметизации.

В их ряду особое место занимают кремнийорганические компаунды полиаддиционного отверждения, преимуществом которых является отверждение без образования коррозионно-активных побочных продуктов, незначительная усадка, возможность использования для заливки закрытых объемов без доступа воздуха, больших толщин.

Для разработки нового электроизоляционного компаунда с рабочей температурой от минус 80 °С в качестве полимерной основы использовали композицию СИЭЛ 159-306 ТУ 6-02-1-631-89 на основе кремнийорганического каучука полиаддиционного отверждения, содержащего метилфенильные звенья. Именно наличие этих звеньев в полимерной основе обеспечивает низкую температуру стеклования всех исследованных композиций, которая по данным дифференциально-сканирующей калориметрии составила около минус 100 °С. Как видно из табл. 1, наилучшие характеристики у композиции, наполненной пирогенным диоксидом кремния: высокая прочность при большом удлинении, хорошие значения диэлектрических показателей. Другие виды диоксида кремния, как кристаллического, так и аморфного (кварцевая пыль, плавленый кварц), не позволяют достичь такого уровня характеристик. Это ожидаемо, так как AEROSIL R 8200 – специально разработанная марка пирогенного диоксида кремния для упрочнения кремнийорганических материалов. Введение в композицию оксида цинка позволяет получить достаточно высокие механические показатели, но диэлектрические свойства при этом существенно ухудшаются. Комбинирование наполнителей с пирогенным диоксидом кремния приводит к улучшению механических показателей, но практически не влияет на диэлектрические свойства.

Таблица 1. Зависимость диэлектрических и механических свойств композиций от природы наполнителя

Номер композиции	Наполнитель				Условная прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	На частоте 10 ⁶ Гц	
	AEROSIL R 8200	Кварцевая пыль	Плавленый кварц	ZnO			ε	tg δ
1	+				2,2	279	2,48	0,0019
11			+		0,6	49	2,57	0,0039
10	+		+		1,0	79	2,71	0,0036
6		+			0,9	67	2,70	0,0031
8	+	+			1,0	88	2,48	0,0039
3				+	1,7	106	3,33	0,0474
5	+			+	2,4	164	2,95	0,0342

Секция III
СТЕКЛО И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

Кварцевые концентраты на основе высокочистых кварцитов Восточного Саяна

А.И. Непомнящих, И.А. Елисеев, А.П. Жабоедов, А.М. Федоров, В.С. Романов
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия
E-mail: ainep@igc.irk.ru

Особо-чистый природный кварц имеет широкое промышленное применение. Он является исходным материалом для получения кварцевых концентратов высокой и ультравысокой степени чистоты. На основе кварцевых концентратов производится оптическое кварцевое стекло для видимой и ближней инфракрасной областей спектра, а также термостойкая кварцевая керамика самого широкого применения, включая радиопрозрачные обтекатели ракет. Традиционно для получения кварцевых концентратов высокой и ультравысокой чистоты используются горный хрусталь и жильные разновидности кварца различных геолого-промышленных типов. В связи с возрастающей потребностью в высококачественном кварцевом сырье и истощением запасов традиционных кварцевых месторождений возникает острая потребность в поисках и оценке новых источников особо чистого кварцевого сырья. Примером такого принципиально нового источника высококачественного кварцевого сырья являются кварциты Восточного Саяна.

Приводимые в докладе результаты основываются на детальном изучении трех блоков Гарганского кварценозного района. Гарганский кварценозный район находится в юго-восточной части Восточного Саяна, в северном секторе Тувино-Монгольского массива (Гарганская глыба). Фундамент глыбы перекрыт осадочным чехлом, основание которого сложено рифейскими (возраст 1,25 млрд. лет) кремнисто-карбонатными отложениями иркутской свиты, являющимися продуктивными для высокочистых кварцитов. Отложения осадочного чехла прорываются гранитоидными интрузиями сумсунурского комплекса плагиогранитов (790 млн. лет). На северо-востоке расположен Ока-Урикский блок. На юго-западе Урда-Гарганский и Уренгенурский блоки (рис.1). В пределах гарганской провинции нами выделено 7 продуктивных разновидностей кварцевого материала.

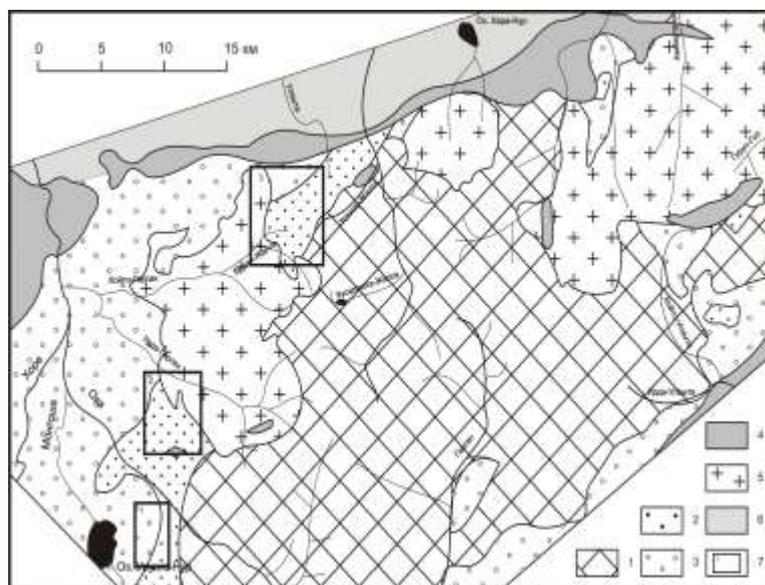


Рис.1. Схема геологического строения северной части Тувино-Монгольского массива:

1 – фундамент Гарганской глыбы; 2, 3 – чехол Гарганской глыбы: 2 – поля распространения осветленных кварцитов иркутской свиты, 3 – сланцы уртагольской свиты; 4 – офиолитовый комплекс; 5 – гранитоиды сумсунурского комплекса; 6 – чехол Тувино-Монгольского массива; 7 – изученные участки: 1 – уренге-нурский, 2 – урдагарганский, 3 – буралсардыкский.

Кроме того, отобрана представительная проба гранулированного кварца Анахчи-Чипикетского жильного поля Патомского нагорья (жила 2821).

Нами выделены 5 продуктивных разновидностей кварцитов, перспективных для получения кварцевых концентратов для изготовления термостойкой кварцевой керамики (рис. 2).

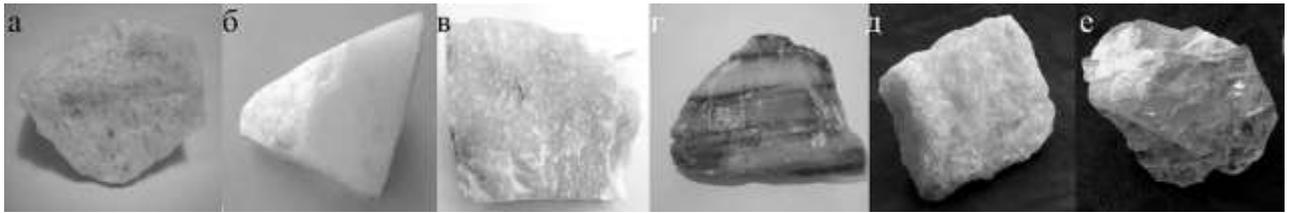


Рис.2. Образцы кварцевого материала: а – суперкварциты, б – мелкозернистый кварцит, в – сливной, г – гранулированный кварц Чипикет, д – кварциты участка Уренгенур, е – Бразильский горный хрусталь

Высокочистые разновидности кварцитов месторождения Бурал-Сардык, названные ранее «суперкварциты» (рис. 1а), характеризуются мономинеральным кварцевым составом (99,9% породы); на фоне мелко- (<0,2 мм) и среднезернистых (0,2-2 мм) кварцевых агрегатов наблюдаются крупные (>2 мм) зёрна субпараллельной ориентировки. Мелкозернистые кварциты (рис.1б) отличаются от суперкварцитов относительной однородностью агрегатов по форме и размерам, они сложены микро- и тонкозернистым кварцем (<0,1 мм). «Сливные» кварциты (рис. 1в) отличаются от других типов кварцитов размерностью и соотношением зерен. Кварциты Уренгенурского участка (рис. 1д) являются слабоизмененными исходными породами гарганской кварцитоносной провинции. Они представляют собой мелкозернистые (<0,01 мм) породы слоистой, реже сланцеватой структуры, с примесью карбоната и серицита (до 10%). Гранулированный кварцит Чипекета (рис. 1г) сложен агрегатами гиганто-, крупно-, средне- и мелкозернистой размерности в соотношении 5/10/70/20% породы. В качестве примесей встречаются серицит, рутил и окислы железа. Кристаллы бразильского горного хрусталя (рис. 1е) обладают гигантозернистой размерностью, в них наблюдаются незакономерно расположенные трещины и равномерно распределённые по всей площади округлые включения слюды размером до 50 мкм, а также отдельные единичные лентовидные чешуйки и нитевидные агрегаты слюды размером до 1,5-2 мм.

Изучена устойчивость к кристаллизации стекол, полученных на основе кварцевых концентратов из суперкварцитов Восточного Саяна и концентратов из кварца Кыштымского месторождения RQ-2. Наибольшей устойчивостью к кристаллизации обладает стекло, полученное на основе высокочистых кварцитов Восточного Саяна по сравнению со стеклом, полученным на основе гранулированного кварца Кыштымского месторождения (Урал) (рис.3).

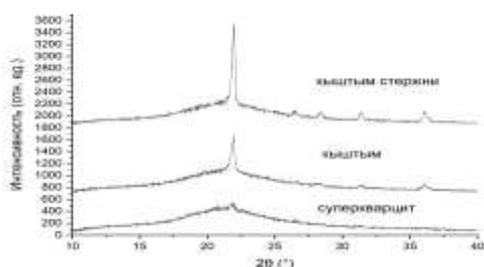


Рис.3. Рентгенограммы кристаллизации кварцевых стёкол в кристобалит при 1350 °С

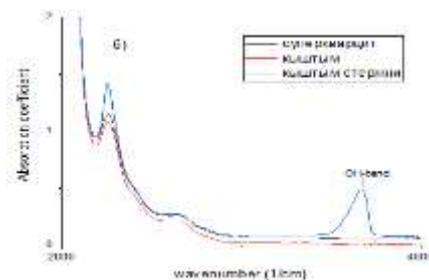


Рис. 4. Спектры поглощения кварцевых стёкол в инфракрасной области

Этот факт показывает существенное преимущество кварцитов Восточного Саяна по сравнению с гранулированным кварцем для получения термостойкой кварцевой керамики.

Наибольшая кристаллизационная активность характерна для стержней кварцевого стекла, полученного в ООО «НПФ «Кварцевое стекло». Это связано, по-видимому, с наличием гидроксила в стекле (рис.4).

Формирование оптических заготовок из объемно-однородного кварцевого стекла

А.К. Лесников^{1,2}, П.А. Лесников^{1,2}, З.Г. Тюрнина¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), г. Санкт-Петербург, Россия; ²ООО «НПФ Кварцевое стекло», г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sio2@bk.ru

К кварцевому стеклу и кварцевой продукции, идущей на изготовление колб ламп накачки мощных лазеров, полупроводниковых приборов, применяемых в силовой электронике, фотонике, оптике, волоконных световодах, тиглей для выращивания монокристаллов, оснастки и емкостей для производства особо чистых веществ и других изделий, необходимых в производстве ВВСТ, предъявляются требования по чистоте кварцевого стекла на уровне одна молекула примеси на миллиард молекул кварца. Кроме того, для него важны высокая устойчивость форм по длине и диаметру при температурах выше 1000 °С, высокая оптическая однородность оптических заготовок лазерного применения, высокая однородность кварцевого стекла для дисков записи информации.

Высокочистые кварцевые материалы – трубы, стержни и другие продукты, полученные из синтетического сырья должны содержать оксид кремния в количестве не менее 99,99999% (7N), а в ряде случаев и 99,999999999% (11N). Существующие в нашей стране технологии производства не могут обеспечить в полной мере получение высокочистого кварцевого стекла с требуемыми характеристиками по химической чистоте, оптической однородности, отсутствию включений и габаритам. В настоящее время в РФ полностью отсутствует производство кварцевого стекла марок КИ, КС-4В и КУВИ, как ввиду отсутствия синтетического сырья, так и отсутствия кристобалита высокой чистоты.

Потребность предприятий ОПК в высокочистом кварцевом стекле с каждым годом растет и до недавнего времени она удовлетворялась исключительно за счет импортных поставок. Поставки в РФ изделий из кварцевого стекла подлежали лицензированию в странах-экспортерах (США, Япония, Германия). В настоящее время исключены прямые поставки высокочистых кварцевых труб для предприятий, производящих продукцию в области фотоники для нужд ОПК. В связи с действующими санкциями наблюдаются отказы в поставках высокочистых веществ из большинства стран – членов НАТО и переориентация на новых поставщиков, в основном из Китая, что сопровождается увеличением сроков поставок и необходимостью проведения переаттестации веществ, материалов и технологий.

ГОСНИИКС до своего закрытия в 90-х годах был ведущим отраслевым институтом в области получения отечественных оптических материалов на основе уникального по своим свойствам кварцевого стекла, создания специального оборудования и технологий, активно сотрудничал с Институтом химии силикатов им. И.В. Гребенщикова и другими научными и образовательными организациями, с производственными предприятиями. В настоящий момент исследования в области технологии кварцевого стекла и изделий из него носят не комплексный и разрозненный характер.

ООО НПФ «Кварцевое стекло» (в каком-то смысле правопреемник ГОСНИИКС) обладает квалифицированными специалистами, конструкторской документацией, технологией и оборудованием для производства различных по назначению изделий из кварцевого стекла, в том числе, технологией получения оптических заготовок объемно-однородного кварцевого стекла широкого размерного ряда по золь-гель технологии.

Астроситалл и карбид кремния в производстве астрономической и космической оптики

А.П. Семенов, А.Д. Тамбовский, М.А. Абдулкадыров, В.Е. Патрикеев, В.Н. Кудиков, Е.В. Куракина, А.В. Маркин, Д.А. Бригаднов
АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (ЛЗОС), г. Лыткарино, Россия
E-mail: apsemenov@yandex.ru

В настоящее время для астрономических и космических зеркал используются стеклокристаллические или стеклокерамические материалы, обладающие низким коэффициентом теплового расширения: Астроситалл, Zerodur, ULE (многочисленные наземные телескопы с зеркалами до 11 м и космические с зеркалом до 2,4 м), бериллий – легкий и очень прочный материал (например, составное зеркало телескопа James Webb Space Telescope орбитальной инфракрасной обсерватории с зеркалом диаметром 6,5 м), различные металлические сплавы, модификации карбида кремния (телескоп «Гершель», Herschel Space Observatory, с зеркалом диаметром 3,5 м и телескоп Gaia – Global Astrometric Interferometer for Astrophysics с зеркалами до 1,5 м). В конечном итоге выбор материала зависит от целей и задач, которые будут решаться данным наземным или космическим телескопом, в каком оптическом диапазоне будет работать телескоп, каковы требования к массогабаритным и деформационным характеристикам оптического прибора, каковы температурный режим, радиационное воздействие, динамические характеристики и т.д.

В АО ЛЗОС уже много лет ведутся работы по изготовлению облегченных и тонких зеркал различной конфигурации диаметром до 6000 мм, в том числе и из Астроситалла диаметром до 3 м. Астроситалл обладает высокими прочностными характеристиками и малым коэффициентом теплового линейного расширения (КТЛР), на порядок ниже, чем у других оптических стекол, в чем его основное достоинство. Для Астроситалла СО-115М коэффициент теплового линейного расширения $\alpha=0\pm 1,5\times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, предел прочности 78 МПа, модуль упругости 92 ГПа. На полированной поверхности данного материала можно достичь шероховатость <1 нм (среднеквадратичное отклонение). Благодаря таким уникальным характеристикам он много лет с успехом используется для изготовления наземных и космических зеркал.

Астроситалл имеет высокую размерную стабильность, т.е. сохранение с заданной точностью рабочей формы поверхности с течением времени в процессе эксплуатации в различных климатических условиях, которая проверена в течение нескольких десятилетий изготовления и эксплуатации оптических приборов.

Современные требования по КТЛР, например, для заготовок сверхбольших телескопов TMT (Thirty Meter Telescope) и E-ELT (European Extremely Large Telescope) с составными зеркалами диаметром 30 и 39 м, устанавливают абсолютное значение КТЛР всех заготовок по всем измеренным образцам $\leq 100\times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$, а среднее значение КТЛР заготовок при эксплуатационной температуре (от -10 °С до 20 °С) должно быть порядка $0\pm 50\times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$.

Для проведения исследований изменения КТЛР с течением времени ускоренным испытаниям подвергались 20 образцов для измерения КТЛР (40 циклов, соответствующие 40 годам), а для определения изменений формы поверхности в процессе эксплуатации использовались заготовки диаметром 500 и 450 мм и толщиной, соответственно, 70 и 55 мм с полированной поверхностью (RMS<20 нм), для них определялась форма отраженного волнового фронта и механические параметры. По результатам данных испытаний были получены следующие данные:

- КТЛР меняется в пределах $\pm 1\times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$, погрешность измерений $5\times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$, видна общая тенденция сохранения КТЛР,
- форма оптической поверхности не изменяется в пределах погрешности измерений RMS<6 нм.

С целью проверки упругих свойств материала Астроситалл СО-115М проводились испытания при деформациях с натяжениями в диапазоне от -10 МПа до 10 МПа и при воздействии температуры в диапазоне от -40 °С до 105 °С.

Результаты проведенных испытаний показали, что материал Астроситалл СО-115М при деформациях с натяжениями в диапазоне от -10 МПа до 10 МПа и при воздействии температуры в диапазоне от -40 °С до 105 °С остается упругим и форма поверхности изменяется в пределах 10 нм RMS поверхности.

Большая серия зеркал из Астроситалла наземного и космического назначения успешно функционирует в различных оптико-электронных системах (рис. 1-3).

Новые технологии в крупногабаритной оптике – обработка и контроль зеркал из карбида кремния и различной модификации карбидокремниевых компонентов, которые широко используются в настоящее время. Это один из наиболее перспективных композитных материалов для изготовления не только оптических элементов, но и конструктивных элементов базирования и разгрузки зеркал в оптико-механических и оптико-электронных системах. Он обладает высокой удельной жесткостью, прочностью и теплопроводностью. В АО ЛЗОС создано оборудование и разработаны методы формообразования таких зеркал. Полирование карбидокремниевых зеркал отличается от таких же процессов на стекле и стеклокерамике и требует разработки специальных полирующих инструментов и суспензий. Изготовление одного из таких зеркал диаметром 660 мм приведено на рисунках 4, 5. Этот материал имеет перспективное будущее в применении при создании современных оптико-электронных комплексов, особенно космического назначения. Таким образом, технология изготовления облегченных зеркал развивается как для зеркал из Астроситалла, так и для зеркал из карбида кремния.



Рис. 1. Облегченные зеркала из Астроситалла и карбида кремния

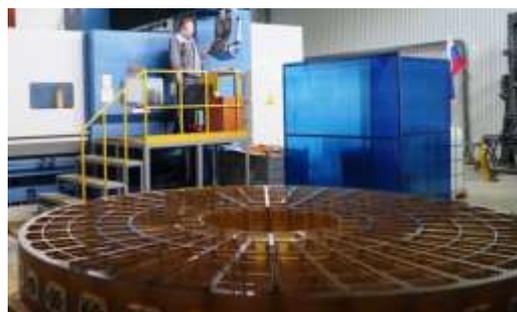


Рис. 2. Облегченное зеркало диаметром 2,4 м



Рис. 3. Доводка матрицы размером 1,6 м с асферичностью до 20 мм из астроситалла для проекта космического телескопа «Миллиметрон» с зеркалом 10 м из углепластика

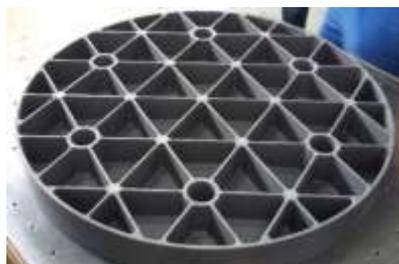


Рис. 4. Зеркало из карбида кремния диаметром 660 мм



Рис. 5. Доводка зеркала из карбида кремния на станке с программным управлением

Препарирование слитков кварцевого стекла и изготовление оптических образцов

Д. Н. Бондалетов, Р. Ш. Насыров

АО «Гусевский стекольный завод имени Ф. Э. Дзержинского», г. Гусь-Хрустальный, Россия

E-mail: bondalet@mail.ru

АО «Гусевский стекольный завод имени Ф. Э. Дзержинского» (Стекольный Завод им. Ф. Э. Дзержинского – СЗД), сегодня основной производитель и поставщик потребителям особо чистого кварцевого стекла (ОЧКС). Это обстоятельство вынуждает СЗД заниматься проблемами обработки слитков кварцевого стекла для изготовления товарной продукции, применяя механическую, физико-химическую, термическую обработку, используя знания об особенностях ОЧКС и опыт их обработки.

Изготовление современных приборов сопряжено с необходимостью сохранения уровня чистоты и структурного совершенства ОЧКС, что достигается обработкой стекла и изделий из него на современных станках современными методами обработки. Для механической обработки используется проволочно-вырезной станок с ЧПУ МК 200, абразивно-дисковый отрезной станок МЕТАКАТ, шлифовально-полировальный станок FORCIPOL 102. Станки оснащены алмазными рабочими органами. Полировка производится алмазными порошками и пастами. В отдельных случаях используются пасты ГОИ, пасты и порошки из оксидов железа и церия.

Для крепления малоразмерных образцов и изделий из стекла иногда применяется гипс, который легко удаляется растворами кислот, не создавая проблем очистки поверхностей и не внося упругих напряжений в стекло.

Минимизация упругих напряжений в стекле достигается асимптотической, многопроходной шлифовкой изделия с незначительной подачей шлифовальной головки с незатупленными алмазными зёрнами.

Шлифовка стекла приводит к возникновению на поверхности рыхлого рельефного и трещиноватого слоя и подслоя с нарушенной структурой кремнекислородной сетки стекла. Объём стекла и его поверхность отличаются друг от друга механическими и физико-химическими свойствами. Поверхность стекла подобна покрытию объёма слитка слоем из низших оксидов кремния и их соединений с аб- и адсорбированными, хемосорбированными атомами и молекулами окружающей среды толщиной от нескольких атомных слоев до долей миллиметра. Она имеет высокую химическую активность, другую температуру плавления и коэффициенты термического расширения, другие оптические свойства, упругость и прочие свойства. Композиция слитков и его поверхность имеет повышенную межфазную энергию связи с неизбежным стремлением системы снизить эту энергию релаксацией с образованием трещин. Локальные контактные перегревы обрабатываемой поверхности от шлифовального инструмента также формируют трещиноватость поверхности, так как перегретый участок шлифованной поверхности, имея рыхлую структуру и высокий ТКР, будет расширяться. Но прочные связи с объёмом обрабатываемого слитка будут препятствовать этому процессу, формируя локальное повышение поверхностной энергии, рассеиваемое образованием трещин, в конечном итоге, по всей шлифованной поверхности.

Локальный контактный перегрев создаёт термо-, пьезо- и трибоэлектрические потенциалы, ускоряющие эндокрипционное вхождение примесных элементов от СОЖ и шлифовального инструмента в рыхлую структуру поверхностного слоя и монолит слитка стекла.

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) изготовлены на основе воды, чрезвычайно поверхностно-активного вещества. На поверхности стекла интенсивно работает эффект Ребиндера, формируя мельчайшие трещины, структурные и дислокационные каналы, расширяя и углубляя их и вовлекая в них всевозможные примеси и включения, эндокрипционно загрязняющие стекло резонатора.

В то же время трещины повышают эффективность шлифовки, а щелочные элементы и фосфорные соединения СОЖ способствуют локальному растворению стекла в пятне нагрева стекла шлифовальным инструментом, способствуя эффективности шлифовки.

Даже асимптотическая шлифовка и полировка кварцевого изделия с последовательным снижением величины алмазного зерна шлифовального диска от 2000 до 40 мкм (зернистость по ГОСТ 3647-80 от 160 до 4) создаёт упругие напряжения в стекле обрабатываемого изделия. Для релаксации напряжений производят отжиг деталей. Но эта операция приводит к увеличению количества и глубины трещин на обработанных поверхностях, так как поверхностный слой, имея повышенный ТКР, при температурах отжига образует «корочку», которая прочно связана со стеклом. Поверхность испытывает значительные упругие напряжения, релаксирующие развитием трещин Гриффитса в объёме поверхностного слоя и, частично, тела стекла. Степень развития трещин зависит от способа выплавки слитка стекла. Стёкла марки КУ и их аналоги, содержащие повышенную концентрацию ОН-групп, более склонны к образованию трещин, в частности, вследствие дегидроксилирования поверхностного слоя стекла в процессе отжига.

Развитию трещин может препятствовать притупление (закругление) вершин трещин. Для этого необходимо перед отжигом провести обработку изделия из кварцевого стекла в растворе смеси серной и плавиковой кислот. Трещины растроятся, их вершины закруглятся, значительно снижая возможности образования и развития трещин.

Операция механической полировки изделия из кварца – это фактически создание на поверхностях его деталей глубоко аморфизированного, бесструктурного (с хаотичной кремнекислородной сеткой) стеклообразного слоя, демпфирующего колебательные процессы в кварцевом изделии. Для установления истинных характеристик слитка стекла, этот слой должен быть удалён химической полировкой.

Химическая полировка может производиться в водном растворе 5%-й серной кислоты + 5%-й плавиковой кислоты в пропорции 3:2. Температура раствора 60 ± 5 °С. Полировка производится в стеклографитовом тигле в ультразвуковой ванне. Длительность полировки в зависимости от марки стекла подбирается экспериментально.

Особенности разработки изделий авиационного остекления на основе полимерных материалов

Н.Ю. Цымбалюк, Д.Н. Петрачков, Н.В. Шаталин, А.М. Розман, О.Ф. Просовский,
А.Н. Исамов, И.Н. Лёвкин

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: tsymbalyuknyu@technologiya.ru

Остекление кабин современных летательных аппаратов (ЛА) является важной составной частью фюзеляжа авиационной техники. Эффективность функционирования и летно-технические характеристики современных самолетов и вертолетов во многом зависят от уровня технических характеристик применяемого для них остекления.

Применение при разработке авиационного остекления полимерных материалов, таких как полиметилметакрилат и поликарбонат (ПК), с нанесением оптических и защитных покрытий позволяет разработать остекление соответствующее требованиям, предъявляемым к современной авиационной технике, за счет сочетания основных функциональных характеристик, а именно высокой конструкционной прочности в широком диапазоне температур, способности выдерживать большие эксплуатационные напряжения, создаваемые деформациями при аэродинамических нагрузках, низкого удельного веса, устойчивости к воздействию ультрафиолетового и электромагнитного излучений при сохранении светопропускания, защиты от проникновения тепловой составляющей солнечной радиации и радиолокационной незаметности.

В качестве основного конструкционного материала при создании высокопрочного с минимальными весовыми характеристиками остекления применяется термопластичный полимер оптически прозрачный монолитный листовой ПК. Положение ПК в группе термопластичных материалов между полностью кристаллическими и полностью аморфными термопластами определяет уникальное сочетание его свойств: высокой прочности и модуля упругости, ударной прочности и стабильности размеров, а также оптической прозрачности. Наряду с высокой прочностью при меньшей массе и легкостью в механической обработке по сравнению с неорганическим стеклом, основными недостатками ПК является низкая абразивостойкость его поверхности и неустойчивость к воздействию ультрафиолетового излучения солнечной радиации. С целью нивелирования недостатков ПК в зависимости от предъявляемых к остеклению требований в различных композициях остекления применяются тонкопленочные многофункциональные покрытия и жидкие кремнийорганические составы, а в многослойных композициях также в качестве поверхностного слоя применяется полиметилметакрилат.

Технология изготовления остекления с применением листового оптического ПК с нанесением специальных защитных покрытий включает проведение нескольких этапов термообработки. Процессы нагрева ПК являются важнейшими в технологическом цикле, так как режимы термообработки ПК влияют на качество изготавливаемых из него изделий. В таблице 1 приведены режимы термообработки ПК, используемые на этапах изготовления остекления на его основе.

Таблица 1. Режимы термообработки ПК

№ режима	Наименование режима	Температура воздействия, °С	Время воздействия, мин
1	Термообработка при формовании остекления	140±10 155±5	30±10 40±10
2	Термообработка при нанесении защитных покрытий на остекление (этап 1)	115±5 115±5	не менее 180 не менее 180
3	Термообработка при нанесении защитных покрытий на остекление (этап 2)	75±5	не менее 360

Результаты исследований по определению влияния данных режимов на физико-механические и оптические свойства ПК показывают, что предел прочности при растяжении образцов из ПК, прошедших этапы термообработки относительно исходных образцов ПК вырос в среднем на 4% (рис. 1), а показатель значений твердости вырос в среднем в 2,5 раза (рис. 2).

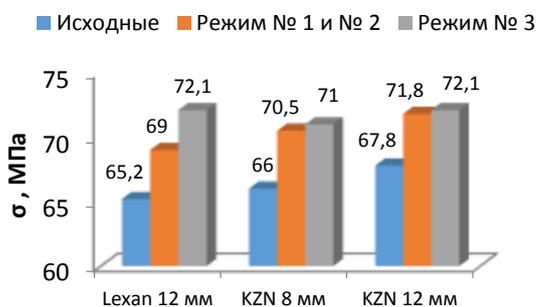


Рис. 1. Предел прочности при растяжении

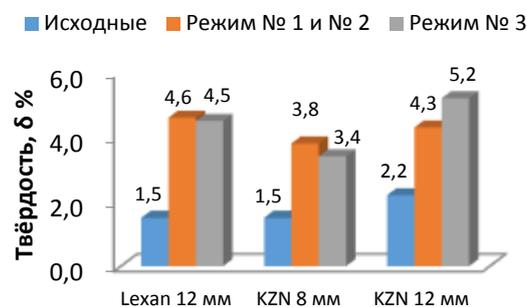


Рис. 2. Твердость по Виккерсу

В части изменений оптических свойств термообработанных образцов из ПК отмечено, что коэффициенты светопропускания в диапазоне длин волн 0,4-0,74 мкм и поглощения солнечного излучения в диапазоне длин волн 0,9-2,5 мкм не изменились (рис. 3, 4), а коэффициент отражения в диапазоне длин волн 0,4-0,74 мкм снизился в среднем на 2% (рис. 5).

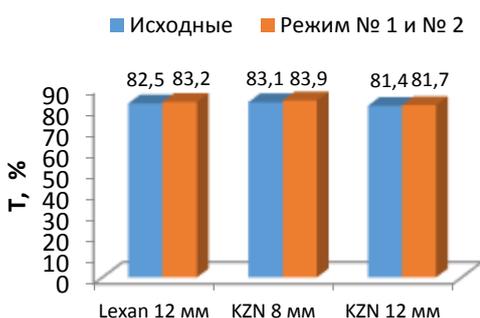


Рис. 3. Коэффициент светопропускания в диапазоне длин волн 0,4-0,74 мкм

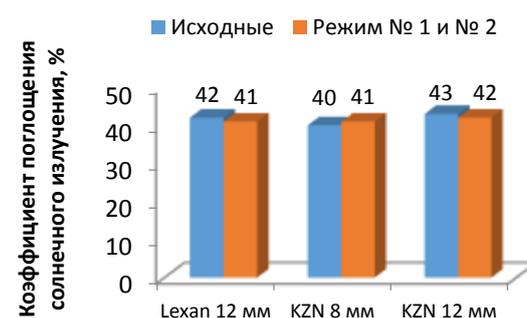


Рис. 4. Коэффициент поглощения солнечного излучения в диапазоне длин волн 0,9-2,5 мкм

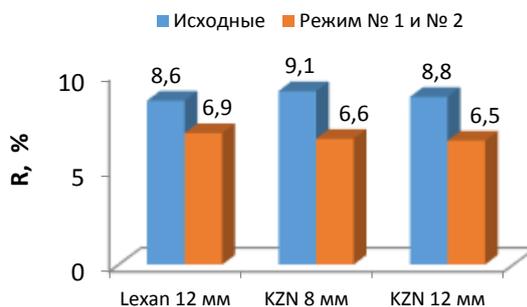


Рис. 5. Коэффициент отражения в диапазоне длин волн 0,4-0,74 мкм

Результат проведенных исследований подтверждает, что тепловое воздействие практически не ухудшает свойств листового оптического ПК, тем самым определяя возможность его применения при изготовлении авиационного остекления по данной технологии с проведением нескольких этапов термообработки.

Перспективные направления разработки теплостойкого и термостабильного органического стекла для изделий конструкционной оптики

И.А. Шалагинова, П.В. Корниенко
АО «НИИ полимеров», г. Дзержинск, Россия
E-mail: orp2@nicp.ru

В настоящее время для остекления дозвуковых и сверхзвуковых самолетов, выполняющих кратковременные полеты в режимах с $M_{\max} \leq 2,2$, применяются полимерные органические стекла марок СО-120 и АО-120, которые достаточно надежны, а их свойства и особенности упругопластического поведения в условиях нагружения самолетного остекления известны и предсказуемы. Так, при температуре размягчения (T_p) 120 °С эти материалы допускают возможность кратковременного нагрева наружной поверхности на 30-40 °С выше T_p .

Прекращение производства оргстекло марок Э-2 и СО-200 создало затруднения в выборе материала для остекления фонарей, рассчитанных на полеты с $M_{\max} \geq 2,3$ или с повышенной длительностью полетов на $M_{\max} \geq 2,2$. В последнее время для остекления фонарей применяются тяжелые силикатные триплексы или поликарбонат, который имеет ряд существенных недостатков: необходимость нанесения антикоррозионного покрытия, возможность кратковременного нагрева поверхности не более, чем на 15 °С выше T_p , более узкий диапазон перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние, неспособность к переформованию и др.

С начала 2000-х годов в «НИИ полимеров» проводились работы по получению теплостойких сополимеров метилметакрилата с метакриловой кислотой, (мет)акрилатами с объемными эфирными группами, алкил- и арилмалеимидами, бифункциональными (мет)акрилатами, аллил(мет)акрилатами и др. В настоящий момент разработаны и внедрены в производство органические стекла с теплостойкостью 160-165 °С, обладающие необходимым для конструкционного материала набором физико-механических (прочность при разрыве – 80 МПа, ударная вязкость по Шарпи – 17 кДж/м²) и оптических свойств (коэффициент светопропускания (τ) – 90%), позволяющим обеспечить несущую способность и функционал остекления.

Однако оргстекло, как конструкционный материал авиационного назначения, должно обладать не только повышенной теплостойкостью, но и рядом комплексных эксплуатационных характеристик: высокая оптическая прозрачность материала (в исходном состоянии и при заданных рабочих температурах); повышенные физико-механические параметры (прочность, удлинение, модуль упругости, ударная вязкость) в широком температурном интервале от -60 °С до рабочих температур; высокий ресурс работы (определяется стойкостью материала ко всем видам старения (ультрафиолетового, водяного, теплового)); высокая термостабильность (предел рабочих температур материала).

Установлено, что возможно получение оптических сополимеров метилметакрилата, метакриловой кислоты и малеимидов со значениями $T_p = 165-175$ °С, однако при этом снижаются значения ударной вязкости (до 7-8 кгс/см²). Соплимеры на основе (мет)акриловых эфиров, (мет)акриловой кислоты, стирола и (мет)акрилатов алкилгликолей показывают значения T_p в интервале 180-185 °С, обладают отличными оптическими свойствами ($\tau \geq 90$ %), низким уровнем водопоглощения (0,9-1,2%) и высокими прочностью и ударной вязкостью при низких значениях относительного удлинения, а сополимеры на основе производных α -оксиакриловой кислоты обладают теплостойкостью и термостабильностью свыше 200 °С при высоком уровне гидрофильности.

В работе показано, что разработанные варианты экспериментальных теплостойких сополимеров являются перспективной полимерной основой для создания принципиально новых функциональных марок органического стекла для изделий конструкционной оптики.

Влияние способа формования поликарбонатного листа на оптические характеристики изделий авиационного остекления

П.Н. Чижов, Д.Н. Петрачков, Н.Ю. Цымбалюк, Д.Е. Чечин, Н.В. Шаталин, М.Ю. Чумбаров
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: tsymbalyuknyu@technologiya.ru

Данная работа посвящена одной из важнейших проблем в современной авиационной технике – разработке технологий и созданию сложнопрофильных элементов авиационного остекления летательных аппаратов с хорошими оптическими характеристиками, именуемыми изделиями конструкционной оптики.

Особое внимание уделено изучению возможности оптимизации технологии изготовления изделий остекления и комплексному анализу достигнутых оптических свойств.

Предложен метод формования изделия из монолитного поликарбоната в пакете с подкладным листом из аналогичного материала. В ходе проведения исследования изготовлена деталь авиационного остекления с использованием разработанной оптимизированной технологии. Выполнен расчет и сравнительный анализ оптических характеристик – деформации, искажения и нерезкости изображения изделий авиационного остекления, сформованных обычным способом и с применением оптимизированного метода.

Результаты максимального значения волнообразной деформации, искажения (увеличение) квадрата и нерезкости изображения, полученные при формовании оптической детали авиационного остекления из монолитного листа поликарбоната с применением листа подложки из того же материала представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Максимальное значение волнообразной деформации, искажения (увеличение) квадрата и нерезкости изображения

Значения показателей волнообразной деформации и нерезкости изображения на изделиях авиационного остекления, сформованных оптимизированным способом и обычным методом представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения показателей волнообразной деформации и нерезкости изображения на изделиях авиационного остекления, сформованных оптимизированным способом и обычным методом

Тип оптического искажения	Значения в зоне визирования								
	Слева			Справа			Верх		
	45°	90°	135°	45°	90°	135°	45°	90°	135°
Максимальное искажение квадрата (волнообразная деформация) угл. мин.: Изделие сформовано по улучшенной технологии	1,3	-	1,08	0,85	-	1,52	-	-	-
Максимальное искажение квадрата (волнообразная деформация) угл. мин.: Изделие сформовано обычным способом	4	3	6	6	3	9	8	14	3
Нерезкость, угл. мин. Изделие сформовано по улучшенной технологии	3,42	1,86	1,86	4,08	1,80	4,68	0,78	0,9	3,42
Нерезкость, угл. мин. Изделие сформовано обычным способом	6	3	8	6	3	14	7	10	3

Разница максимальных значений волнообразной деформации на изделиях, сформованных различными способами, равна 12,48' (14'–1,52'). Средняя волновая деформация по всем секторам визирования в изделиях составила 0,61' и 6,89'.

Разница в максимальных значениях нерезкости изображения равна 9,32' (14'– 4,68'). Среднее значение нерезкости изображения по всем секторам визирования в изделиях составило 2,53' и 6,67'.

Высокие оптические характеристики изделия остекления, изготовленного по оптимизированной технологии, указывают на перспективность применения поликарбонатного остекления для создания новых образцов авиационной техники.

Исследование влияния качества формообразующей поверхности на величину оптических искажений при изготовлении изделий авиационного остекления из монолитного поликарбоната

Д.Е. Чечин¹, М.П. Данилаев², М.Ю. Чумбаров¹, Д.Н. Петрачков¹

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия

E-mail: ChechinDE@technologiya.ru

Повышение эксплуатационных и технических характеристик современной авиации неразрывно связано с улучшением свойств материалов и технологий, используемых при изготовлении составных частей самолетов и вертолетов. Так, с ростом скорости полета у пилота уменьшается время на оценку форм, размеров и местоположения наблюдаемых объектов. Это накладывает ограничения на допустимые величины оптических искажений, вносимых остеклением кабины и требует повышения качества изготовления элементов остекления, следовательно, возрастают требования к технологиям производства и оборудованию. Большинство сложнопрофильных изделий авиационного остекления изготавливаются из листового полиметилметакрилата (ПММА) или монолитного поликарбоната (ПК). При изготовлении наибольшее влияние на величину оптических искажений в остеклении оказывает качество формообразующей поверхности матрицы, с которой соприкасается размягченный лист ПММА или монолитного ПК в процессе формования изделия остекления. Все дефекты, имеющиеся на поверхности матрицы, неизбежно оставляют отпечатки на поверхности формируемого материала, которые приводят к появлению оптических искажений.

Для определения размеров оптических искажений, вызванных наличием постороннего предмета или дефекта поверхности матрицы было сформовано 10 образцов размером 180×180 мм из монолитного ПК толщиной 3 и 12 мм. В качестве типовых посторонних предметов, которые наиболее часто попадают между формой и монолитным ПК при формовании изделия остекления, использованы песчинка диаметром 0,45 мм, а также куски медной проволоки диаметром 0,08 мм длиной 50 и 2 мм. Для имитации отслоений материала поверхности формы, в качестве посторонних предметов, использовались стальные полосы шириной 12 мм и толщиной 0,03 мм, 0,08 мм. Для имитации растрескивания материала поверхности формы использовалась алюминиевая полоса шириной 50 мм и толщиной 0,07 мм.

Оптические искажения изготовленных образцов определены согласно ОСТ 1 02634-87 «Показатели качества изделий конструкционной оптики» следующими параметрами: угловое отклонение оптического луча, проходящего через остекление, нерезкость и деформация изображения, прошедшего через элемент конструкции остекления.

Полученные результаты показывают наличие зависимости величины оптических искажений от размеров дефектов на поверхности матрицы и от толщины остекления, а также то, что с увеличением толщины изделий остекления требуется обеспечить более качественную поверхность формообразующей матрицы.

В работе определены допустимые дефекты на формообразующей поверхности матрицы, при которых оптические искажения в изделии авиационного остекления из монолитного поликарбоната еще остаются приемлемыми.

Огабариченное формование ориентированных органических стекол авиационного назначения

Ю.Р. Шевцова, С.В. Степанов, Д.Н. Петрачков, Е.В. Кузьмина, Ф.И. Паршин
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: ShevtsovaYuR@technologiya.ru

В настоящее время для остекления кабин самолетов применяются изделия как из силикатных, так и из органических стекол. Для изготовления изделий из органических стекол широко применяется ориентированное органическое стекло марки АО -120.

Стандартно при изготовлении авиационных изделий типа «триплекс» из ориентированного органического стекла марки АО-120 выполняются следующие основные операции: раскрой листа стекла на плоские заготовки с технологическим припуском; формование и отжиг заготовок с технологическим припуском; обработка сложнопрофильной заготовки (фрезерование – обработка торца и фальца); отжиг для снятия напряжений после обработки; склейка и обрамление стеклоблока.

Описанный традиционный способ изготовления позволяет обеспечить качество изделия, но является затратным по времени на операции обработки (фрезерования) и приводит к большим потерям материала, расходуемого на технологические припуски.

На сегодняшний день производство отечественных летательных аппаратов увеличивается. В связи с этим требуется обеспечить выпуск большего количества комплектующих, а значит необходимо увеличить мощности предприятия (расширить производство) или значительно сократить время на изготовление комплектующих.

Задача была решена применением огабариченного формования. Данный способ позволяет сократить время изготовления изделий благодаря исключению трудоёмкой операции фрезерования сложнопрофильной заготовки с технологическим припуском. При применении огабариченного формования выполняются следующие основные операции: раскрой и обработка (фрезерование) плоского стекла; формование и отжиг обработанного стекла (без технологического припуска); склейка и обрамление стеклоблока. Размеры плоских стекол для огабариченного формования определяются при помощи системы автоматизированного проектирования с учетом свойств ориентированного органического стекла.

Для оценки и сравнения физико-механических свойств стекол, созданных разными способами, были изготовлены образцы с надрезом толщиной 10 мм и определена ударная вязкость по Шарпи. Часть образцов была изготовлена одним способом: раскрой – выдержка при режиме формования и отжига – обработка – отжиг, часть – другим: раскрой и обработка, выдержка при режиме формования и отжига.

В ходе эксперимента были получены одинаковые значения ударной вязкости образцов.

Также была проведена оценка внешних качественных показателей и оптических свойств изделий, полученных разными способами. Результат – соответствие заданным требованиям.

Таким образом, применение огабариченного формования позволило значительно сократить время изготовления изделий из ориентированного органического стекла и снизить количество технологических потерь с сохранением высокого уровня качества изделий.

Формирование равномерного температурного поля в изделиях остекления

С.Э. Логвинов, Д.Н. Петрачков, Е.В. Кузьмина, С.Д. Николаев
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: Logvinovseh@technologiya.ru

В настоящее время одним из обязательных требований при эксплуатации авиационной и железнодорожной техники, а также морских или речных судов является наличие электрообогрева в конструкции остекления кабины.

Электрообогрев обеспечивается за счет подачи питания на пленочное токопроводящее покрытие, нанесенное на поверхность одного или нескольких стекол многослойного изделия остекления. Наличие электрообогрева в изделиях исключает их обледенение или запотевание в любых метеорологических условиях.

Наиболее эффективным считается электрообогрев, когда по всей смотровой зоне изделия остекления температурное поле распределяется равномерно без перепадов температур.

Диапазон рабочих напряжений токопроводящего покрытия (ТПП) изделий остекления варьируется от 50 до 220 В, при этом удельная мощность ТПП может быть в диапазоне от 0,05 до 0,8 Вт/см².

При производстве электрообогреваемого остекления ключевую роль в эффективности электрообогрева играют технологии изготовления стекла с ТПП, в частности нанесение ТПП на поверхность стекла с последующим созданием контура токополя при помощи «отсечек» и нанесением токопроводящих шинок.

На сегодняшний момент применяются различные способы и материалы, а также их комбинации при формировании ТПП:

1. Применяют K-glass или Tec-glass с уже нанесенным ТПП. Чаще всего удельное сопротивление таких стекол составляет 11-13 Ом/см². Для данных стекол остается только взять из технического задания рабочее напряжение, удельную мощность и учитывая вышеуказанные параметры рассчитать габаритные размеры электрообогреваемого поля. Данный способ в большей степени применим к токополю простой формы – прямоугольник, квадрат, т.к. равномерный нагрев зависит от сопротивления, а также он не перекрывает весь диапазон требуемых мощностей из-за ограничений удельного сопротивления в стадии поставки.

2. Применяют стекло М1, на его поверхность наносят пленочные токопроводящие покрытия на основе SnO₂ методом пиролиза раствора тетраоксида олова в аэрозольной камере. Сформированное равномерное токопроводящее покрытие с необходимым удельным сопротивлением, с одной стороны упрощает процесс подбора оптимальных параметров электрообогреваемого поля, но с другой стороны добавляет дополнительную трудоемкую операцию (нанесение покрытия) при изготовлении изделия с электрообогревом. На токополе сложной формы, где расстояние между шинками меняется по площади обогреваемой поверхности, при равномерном удельном поверхностном сопротивлении покрытия, сопротивление нагревательного элемента будет также меняться обратно пропорционально расстоянию между шинками, в этом случае температурное поле будет неравномерным (рис. 1).

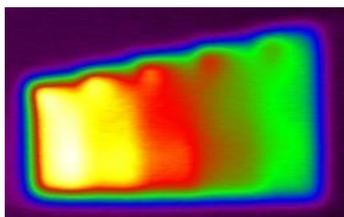


Рис. 1. Пример неравномерного температурного поля при сложной форме токополя

Следовательно, на стекло М1 нужно наносить градиентное ТПП, т.к. равномерный обогрев поверхности сложнопрофильных элементов остекления зависит от эффективной толщины и электросопротивления покрытия. Данный вариант применяется при сложных формах токопроводящего поля и дает возможность получить более равномерное температурное поле (рис. 2). При нанесении покрытия на более коротких участках наносят более тонкий слой покрытия. Соответственно для более длинных участков более толстый слой покрытия. У данного способа также есть ограничения по получению на выходе удельного сопротивления. Оптимальные значения удельного сопротивления находятся в диапазоне от 10 до 300 Ом/см².

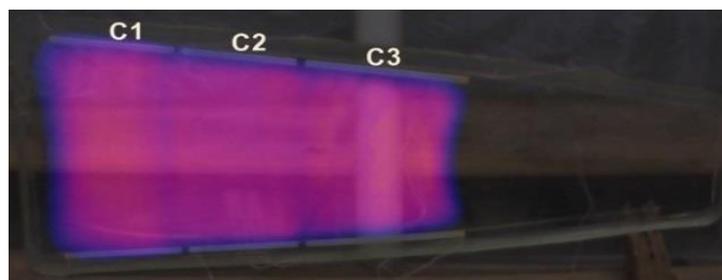


Рис. 2. Пример равномерного температурного поля при нанесении градиентного ТПП:
зона С3 – зона с более тонким слоем покрытия;
зоны С1, С2 – зоны с более толстым слоем покрытия

3. При необходимости изготовления стекла с низким удельным сопротивлением от 4 до 10 Ом/см² применяют К-glass (Тес-glass) и на него уже наносят пленочное токопроводящее покрытие на основе SnO₂.

Все перечисленные способы при сложных геометрических формах токополя изделий остекления не могут обеспечить равномерность температурного поля без дополнительного его рассеяния - применения «схемы отсечек» (рис. 3) для выравнивания его высоты. В некоторых случаях равномерного нагрева можно достичь только применяя одновременно несколько способов – разнотолщинное напыление + «схема отсечки».

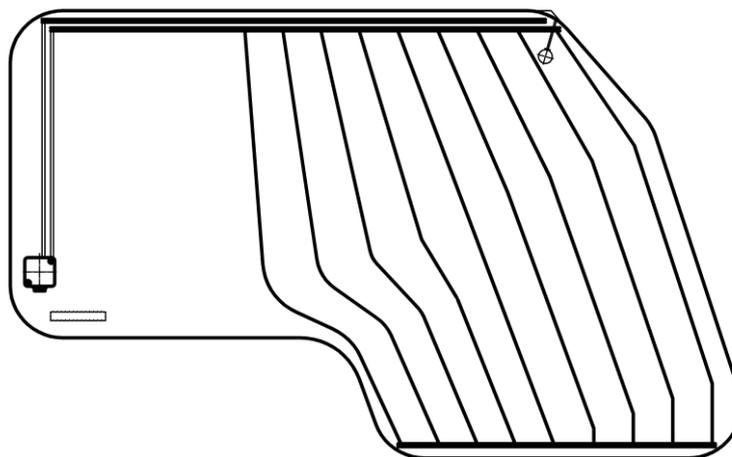


Рис. 3. Схема отсечки

Таким образом, применяя различные способы создания ТПП можно изготовить изделия с электрообогревом различной геометрической формы и равномерным температурным полем, удовлетворяющие требованиям заказчика, в том числе, в части электропараметров.

Практические аспекты испытаний остекления летательных аппаратов на прочность при соударении с птицей

С.Б. Галелюк, Д.Н. Петрачков, А.А. Красильников, М.Ю. Чумбаров, Н.Ю. Цымбалюк
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: galeluksb@technologiya.ru

Проблема столкновения летательных аппаратов (ЛА) с птицами во время выполнения полетов известна с тех пор, как появилась и сама авиация. В приземном воздушном пространстве попадание птицы в различные элементы конструкции ЛА чревато их серьезным повреждением. Еще в 1949 г в США были опубликованы статистические данные Гражданского управления по авиации, согласно которым столкновения самолетов с птицами отмечались в среднем чаще одного раза в день. Причем каждое четвертое столкновение оканчивалось серьезными последствиями. Как следствие, конструкторы постоянно работают над повышением прочности конструкций ЛА с целью минимизации последствий столкновения с летящими птицами. Соответственно, возникла необходимость в создании соответствующего испытательного оборудования (ИО) для проверки отдельных элементов ЛА на прочность при соударении с птицей (птицестойкости). Проблема усугубилась тем, что повышение скоростей ЛА, вызванное внедрением реактивной тяги, стало приводить к более серьезным повреждениям при таких столкновениях.

Уже с начала 1940-х годов в разных странах начали проектировать и изготавливать ИО для проверки птицестойкости конструкций ЛА. Принцип действия и конструкция подобного ИО у разных разработчиков была идентичной: ствол (длина 6-20 м, диаметр 120-200 мм) соединялся с аккумулятором давления или баллоном со сжатым воздухом (до 25 кгс/см²) через быстрооткрывающийся воздушный клапан. При его срабатывании сжатый воздух выталкивал заранее уложенную в ствол тушку птицы, которая разгоняясь производила удар по неподвижно закрепленному изделию. В дальнейшем такой метод испытания на птицестойкость стали называть «обращенным».

В 1968-1969 гг. в СССР предприятие п/я Р-7727 (ныне АО «Научный институт технического стекла им. В.Ф. Солинова») разработало техническое задание на проектирование оборудования для испытания на птицестойкость именно изделий остекления ЛА. В 1970-1971 гг. были проведены изготовление, отладка и комплексные испытания новой пневматической установки ПУ-132 (далее – установка) с максимальной скоростью разгона тушки птицы 350 м/с (1260 км/ч), которая эксплуатируется до настоящего времени в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид испытательного полигона и установки ПУ-132

Основной проблемой проведения испытаний на птицестойкость стала необходимость как можно более точного соблюдения параметра скорости при соударении птицы с объектом испытания, поскольку кинетическая энергия удара движущегося тела ($mv^2/2$) в гораздо большей степени зависит от его скорости, чем от массы. Проблема усугубилась тем, что в начале 2000-х годов была принята новая нормативная база для проведения испытаний

на птицестойкость, в соответствии с которой погрешность измерения скорости соударения тушки птицы не должна превышать 4% вместо 8%, принятых ранее. Для повышения точности получаемой скорости соударения в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина» на новом испытательном полигоне был проведен капитальный ремонт установки, включая реконструкцию расходного устройства и затвора, установлен электронный преобразователь давления с классом точности 0,03 параллельно существующему манометру с классом точности 0,6, а также разработана и внедрена новая 4-х канальная система измерения скорости отстреливаемой тушки птицы в соответствии с новыми требованиями к проведению испытаний. При подготовке к испытаниям предусмотрена обязательная серия предварительных выстрелов (без установки испытуемого изделия) с обязательным соблюдением параметров массы тушки птицы (муляжа) для определения оптимального давления сжатого воздуха в баллонах установки, обеспечивающего минимальный разброс значения скорости относительно требуемого в программе испытаний.

Еще одним важным и перспективным направлением повышения повторяемости получаемых скоростей, а также увеличения скоростного диапазона испытаний является разработка конструкции пенопластового пыжа, с которым производится разгон тушки птицы в стволе установки. Практика показала, что наиболее оптимальной формой пыжа является тонкостенный пенопластовый стакан с толщиной стенки не менее 10 мм, внутрь которого укладывается подготовленная тушка птицы (рис. 2).



Рис. 2. Пенопластовый пыж с подготовленной к выстрелу тушкой птицы

Такая конструкция пыжа исключает деформацию тушки птицы при ее скольжении по каналу ствола установки. Кроме того, благодаря использованию специальной насадки на дульном срезе ствола, пыж при вылете из установки рассекается на мелкую крошку, что исключает соударение летящего следом за тушкой птицы пыжа с испытуемым изделием.

По результатам проведенных мероприятий в 2020 г. установка прошла первичную аттестацию на соответствие требованиям ГОСТ Р 8.568-2017 «Аттестация испытательного оборудования» и ГОСТ РВ 0008-002-2013 «Аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции». В дальнейшем Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация) провело аккредитацию всей испытательной станции АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» в качестве технически компетентной испытательной лаборатории объектов гражданской авиации (аттестат аккредитации от 29.08.2022 № ИЛ-064).

Благодаря принятым решениям установка с внедренной системой измерения скорости пригодна для проведения натуральных испытаний динамического воздействия птицы («обращенным» методом) изделий остекления современных ЛА, с подтверждением предъявляемых к ним требований по птицестойкости. Скоростная видеосъемка позволяет детально анализировать процессы, происходящие в изделии остекления при соударении с ним тушки птицы, что особенно важно при получении отрицательных результатов испытаний для определения причин и проведения последующих необходимых изменений конструкции изделия остекления или метода крепления остекления к каркасу фонаря ЛА.

Влияние способов крепления авиационного остекления из поликарбоната в каркасы на результат натуральных испытаний по оценке динамической прочности

Н.Ю. Цымбалюк, Д.Н. Петрачков, М.Ю. Чумбаров, Н.В. Шаталин, Д.А. Остролуцкий, П.Н. Чижов

АО «ОНИИ «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: tymbalyuknyu@technologiya.ru

Для обеспечения эффективности и безопасности полета авиационное остекление, особенно лобовое, должно прежде всего выдерживать кратковременно и длительно действующие статические и динамические нагрузки и обеспечивать защиту от встречи с птицей. Несмотря на принимаемые меры по отпугиванию птиц от аэродромов, вероятность ударного воздействия на выступающие в воздушный поток элементы ЛА остается высокой. В результате удара в элементы кабины экипажа, возникают деформации в зоне остекления и, как следствие, возможно его частичное разрушение.

Приданию необходимого запаса прочности изделиям остекления уделяется повышенное внимание как на этапах проектирования и создания, так и его подтверждения при испытаниях. При проектировании важно правильно выбрать тип композиции, материал, в каждом отдельном случае метод и режим формования, а также метод крепления остекления в металлический каркас.

В таблице 1 приведено обобщение, имеющегося практического опыта по способам и условиям монтажа различных типов моно- и многослойных композиций изделий авиационного остекления из поликарбоната в элемент каркаса кабины ЛА с указанием, предъявляемых к нему требований по птицестойкости и результатов натуральных испытаний динамического воздействия птицы («обращенным» методом).

Таблица 1. Влияние способов крепления авиационного остекления из поликарбоната в каркасы на результат натуральных испытаний по оценке динамической прочности

Тип композиции изделия остекления	Метод и условия крепления в каркас на момент проведения испытаний	Требования по птицестойкости			Результат испытаний	
		V соударения с птицей, км/ч	Вес птицы, кг	Угол соударения с птицей, °	V соударения с птицей, км/ч	Степень повреждения
1	2	3	4	5	6	7
Монолитная 3D-форма ПК 15 мм + прокладка из авиационной резины 2 мм по периметру заделки	Жесткий болтовой. Рассверловка отверстий в стекле по месту	Не менее 600	1,8	22±2	777	Безопасное птицестойкое
	Жесткий болтовой. Испытания в новом каркасе.	Не менее 600	1,8	22±2	622	Безопасное птицестойкое
	Жесткий болтовой. Испытания в поврежденном каркасе не соответствующий обводам остекления	Не менее 600	1,8	22±2	621	Опасное нептицестойкое

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Монолитная 2D-форма ПК 8 мм	Полужесткий с применением прижимной ленты	300±12	1,8	31±2	298	Опасное нептицестойкое
	Комбинированный метод с применением прижимной ленты и болтового крепления по передней и задней дугам	300±12	1,8	31±2	299	Безопасное птицестойкое
Многослойная 2D-форма СО-120 А 3 мм + ПУ плёнка + ПК 3 мм	Полужесткий с применением прижимной ленты	290±12	1,0	40±2	291	Безопасное птицестойкое. Внешнее и внутреннее стекла сохранили целостность
	Полужесткий с применением прижимной ленты. Испытания в поврежденном каркасе фонаря.	290±12	1,0	40±2	285	Безопасное птицестойкое. Внешнее стекло растрескалось Локальное разрушение проема фонаря кабины в области заделки изделия остекления

Отмечено, что при выборе метода крепления поликарбонатного лобового остекления к каркасу фонаря ЛА преимущество должно отдаваться комбинированному методу крепления. Такой метод крепления позволит избежать отрыва остекления от проема фонаря при соударении с птицей и обеспечит минимальный уровень внутренних и монтажных напряжений. Также сделан вывод, что для чистоты эксперимента при проведении испытаний по оценке динамической прочности остекления на основе поликарбоната необходимо с целью предотвращения возникновения монтажных напряжений в остеклении применение элементов каркаса кабины ЛА, соответствующих требованиям конструкторской документации.

Инновационно умное электрохромное устройство для авиации

К.С. Новикова, А.С. Купряков, Д. П. Княжев

АО «Октогласс», г. Москва, Россия

E-mail: k.novikova@octoglass.ru

АО «Октогласс» разработало инновационно умное электрохромное устройство как для авиации, так и для военной промышленности (рис. 1). Создание и исследование электрохромных устройств (ЭХУ) представляет значительный академический и практический интерес как в науке и народном хозяйстве, так и для использования в оборонном применении.

Электрохромные технологии востребованы, в том числе, и в авиации, но исполнение конечного изделия связано с определенными сложностями, накладываемыми требованиями, связанными с массой конечного изделия и применяемыми материалами. Имея большой опыт в области электрохромных технологий АО «Октогласс», может изготовить ЭХУ любой формы и сложности на основе гибридных тонкопленочных электрохромов или же органических полимерных электрохромов. Одной из основных проблем получения электрохромного иллюминатора является применение пластиков. Термическая стойкость таких пластиков достаточно низкая. Это приводит к тому, что существенно изменяются варианты полимеризации электрохромного состава внутри собранного пластикового иллюминатора. Аналогичная проблема присутствует при нанесении токопроводящих слоев (ТСО) для нормального функционирования устройства.

Специалисты АО «Октогласс» решили указанные проблемы в рамках одного из наших патентов. Для изготовления применяются стойкие пластики, низкотемпературные ламинационные пленки, высококачественные пленки с токопроводящими покрытиями, особые режимы ламинации и полимеризации. Работа заняла год, но теперь появилась возможность изготавливать как плоские, так и изогнутые ЭХУ.



Рис. 1. Умное ЭХУ: а) в неокрашенном состоянии и б) в окрашенном состоянии

Развитие направления тонкопленочных покрытий в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

О.Ф. Просовский, А.И. Опарин, Д.Н. Петрачков
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: lab37@technologiya.ru

История развития вакуумных технологий напыления в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» возвращает нас в 70-е годы прошлого столетия. На предприятии была создана лаборатория, одним из направлений деятельности которой была разработка технологии и производство изделий с покрытиями. Была создана уникальная напылительная установка УВН-2200, позволяющая напылять покрытия на крупногабаритные изделия. Одним из изделий с покрытием были забрала шлемов скафандра космонавтов. Также, вплоть до 1988 г., в лаборатории производились зеркала для скафандров космонавтов (рис. 1).



Рис 1. Забрало шлема с покрытием

Следующим этапом развития технологии оптических покрытий стало создание производства изделия «светоклин» – изделий с просветляющими покрытиями. Предприятие в 1982-1984 гг. закупило одни из лучших в мире на то время установки электронно-лучевого испарения ВАК-760. Наличие высококлассного технологического оборудования дало толчок и в научном плане. Были созданы устройства и методики, позволившие проводить исследования пористости тонких пленок, что представляет большой практический интерес для технологов при производстве многослойных интерференционных светофильтров.

В период 90-х – 2000-х годов был экономический спад, оборудование потеряло статус передового, началась текучка кадров. Благодаря энтузиазму сотрудников, сильной поддержке руководства была сохранена работоспособность того, что осталось.

Начиная с 2003 г. началось возрождение направления технологии оптических покрытий. Предприятию АО «ОНПП «Технология» была поставлена задача государственной важности – разработка технологии нанесения многофункциональных оптических покрытий на изделия авиационного остекления из полимерных материалов.

Выполнение поставленной задачи привело к созданию как экспериментального оборудования, так и проведению целого ряда научных исследований. Прежде всего была освоена новая для нашего предприятия плазменная технология магнетронного напыления, создана уникальная система широкополосного оптического контроля. В то время сотрудники АО «ОНПП «Технология» были одними из первопроходцев использования плазменных магнетронных технологий в области получения многослойных оптических покрытий. Был создан измерительно-аналитический комплекс, позволивший внедрить в производственный процесс пакет программ математического анализа и моделирования слоистых структур. Были исследованы оптические константы пленкообразующих материалов, синтезированы многофункциональные покрытия и получены образцы, полностью удовлетворяющие требованиям технического задания.

В 2006 г. было завершено создание промышленной крупногабаритной магнетронной установки и реализовано серийное производство изделий авиационного остекления с многофункциональными покрытиями.

На волне успеха решения задачи государственной важности был выполнен ряд федеральных целевых программ, который привел к параллельному развитию направления разработки покрытий прецизионной оптики и развитию плазменных технологий магнетронного распыления дуальным магнетронным способом.

В лаборатории оптических покрытий АО «ОНПП «Технология» путем глубокой модернизации имеющихся вакуумных камер созданы две установки электронно-лучевого испарения для прецизионной оптики, не уступающие по своим возможностям установкам флагмана мировой индустрии тонкопленочных технологий Leybold-Optics.

В лаборатории проведены исследования и разработана и реализована конструкция источника ионного ассистирования процесса электронно-лучевого испарения, позволившая получать практически беспористые пленки и, как следствие, интерференционные покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками.

Накопленный опыт и результаты научных исследований позволили создать уникальную крупногабаритную магнетронную установку вертикального типа. Освоена технология нанесения электрообогревных покрытий на изделия остекления кабин самолетов МС-21 и SJ-100.

Сформировавшаяся команда высококлассных специалистов, прочный технологический фундамент вселяет уверенность в завтрашнем дне лаборатории оптических покрытий.

Многослойные оксидные интерференционные оптические покрытия для высоко отражающих лазерных зеркал. Метрологические особенности их создания

В.В. Азарова

АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», г. Москва, Россия

E-mail: azarova_v_v@mail.ru

Требования, предъявляемые к параметрам прецизионных оптических поверхностей и лазерных зеркал, применяемых в интерферометрических приборах, в частности лазерной гироскопии, очень высокие. Так, коэффициенты отражения зеркал должны достигать значений 99,999% или, другими словами, потери на рассеяние излучения и на поглощение в слоях покрытия не должны превышать уровня 10 ppm. При применении таких зеркальных покрытий в лазерных гироскопах к ним предъявляется еще дополнительное требование минимального рассеяния назад «в моду резонатора» и определенные требования к фазовой анизотропии. Более того, такие покрытия не должны деградировать в условиях высокого вакуума и воздействия плазмы He-Ne разряда.

Для достижения такого уровня зеркальных покрытий требуется создание высококачественных оптических поверхностей подложек зеркал. В докладе приводятся результаты химико-механической финишной полировки оптических поверхностей и сравниваются с результатами обработки ионными пучками, в частности, кластерными ионными пучками. Проводится сравнение метрологических методов, с помощью которых можно оценивать поверхности такого качества. Анализируются результаты измерений методами интерферометрии «белого» света (WLI), атомно-силовой микроскопии (AFM) и методами светового рассеяния – интегрального (TIS) и дифференциального (ARS). Сравнение результатов измерений проводится с помощью функций спектральной плотности мощности (PSD-функций) и эффективных высот шероховатости в заданных диапазонах пространственных частот. Обработка оптических поверхностей кластерными ионными пучками приводит к улучшению поверхности в диапазоне пространственных частот микропрофиля. При этом рассеяние светового излучения на таких поверхностях практически не уменьшается. Однако, как показали эксперименты, при последующем нанесении многослойного отражающего покрытия на такие подложки величина PSD-функции поверхности с зеркальным покрытием уменьшается в диапазоне пространственных частот больших величины 1/мкм.

Изложенные требования к параметрам высоко отражающих лазерных зеркал достигаются путем нанесения интерференционных покрытий методом ионно-лучевого распыления (IBS). Этот метод характеризуется высокой адгезией благодаря высоким энергиям осаждения (от 10 до 20 эВ), высокой стабильностью параметров напыления благодаря высокой плотности упаковки атомов. При нанесении покрытий IBS-методом физические характеристики оксидных пленок не меняются со временем. Они устойчивы к атмосферным, механическим воздействиям и заданным перепадам температур. Покрытия характеризуются малой величиной рассеяния света благодаря аморфной структуре пленок.

Градиентные прозрачные электропроводящие покрытия для изделий конструкционной оптики

Е.А. Игнатов, Ю.И. Машир, Б.Б. Мешков
АО «НИТС им. В.Ф. Солинова» г. Москва, Россия
E-mail: ignatov@intgs.ru

Электропроводящие прозрачные покрытия на основе оксидов индия и олова (ИТО) нашли широкое применение в качестве обогревных, теплоотражающих и радиозащитных покрытий для остекления летательных аппаратов. В настоящей работе представлены результаты по разработке технологии нанесения таких покрытий с переменным поверхностным сопротивлением по рабочей поверхности лобового остекления летательных аппаратов, позволяющих реализовать равномерный обогрев изделий остекления.

Нанесение покрытий выполнялось методом магнетронного распыления, причём в качестве исходного материала применялась оксидная керамика состава 10% SnO₂ и 90% In₂O₃. В качестве подложки использовалось силикатное стекло. Получение равномерного распределения теплового поля на рабочих поверхностях изделий авиационного остекления осложнено как за счет увеличения габаритов остекления на современных летательных аппаратах, так и за счет сложной криволинейной формы, из-за требований аэродинамики. Разработанная технология базируется на использовании магнетронов, перемещающихся возвратно-поступательно относительно неподвижно расположенных изделий. Движение магнетронов контролировалось при помощи программируемых сервоприводов, управляющих их положением и скоростью перемещения. Один из вариантов разработанной технологии предполагает использование одного (основного) магнетрона для получения градиентного распределения толщины покрытия и, соответственно, сопротивления по одной координатной оси, в то время как второй (корректирующий) магнетрон в основном движется по второй оси, перпендикулярной первой. Таким образом, реализуется нанесение заданного градиента сопротивления проводящего покрытия, что в свою очередь позволяет реализовать равномерное распределение теплового поля на рабочей поверхности изделия.

Для оптимизации технологии изучены оптические свойства электропроводящих покрытий методами эллипсометрии и фотометрии. Показано, что оптимальные условия получения покрытий ИТО с минимальным уровнем поглощения в видимой области спектра достигаются при добавлении кислорода в состав рабочего газа аргона в количестве до 5%. Экспериментальные спектральные коэффициенты пропускания и отражения, измеренные при нормальном падении излучения на покрытие в диапазоне спектра от 380 до 1300 нм, показали хорошее ($\pm 0,5\%$) совпадение с расчётными при аппроксимации дисперсии оптических констант исследованных плёнок, функциями в виде кубических полиномов. Эти расчётные значения ИТО покрытий использовались для исследования возможности увеличения пропускания за счёт применения дополнительных диэлектрических слоёв к ИТО покрытию как в склеенной композиции остекления, так и в открытой, т.е. на воздухе.

В АО «НИТС им. В.Ф. Солинова» разработано уникальное оборудование, аналогов которому на территории СНГ нет. По разработанной технологии организовано серийное производство как токопроводящих покрытий с равномерным и градиентным распределением удельного поверхностного сопротивления, так и диэлектрических функциональных покрытий с высокой повторяемостью результатов на изделиях из силикатного стекла с предельными габаритами (2500×1500) мм. С 2020 г. организовано нанесение градиентных покрытий на элементы остекления гражданских самолетов SSSJ-NEW и MC-21.

Методы корректировки резистивных параметров токопроводящих оптических покрытий на базе ИТО с применением источника ионов с замкнутым дрейфом электронов

А.Ю. Буднев, Д.Н. Петрачков, О.Ф. Просовский, А.Н. Исамов, Ю.О. Просовский, В.А. Смольянинов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: lab37@technologiya.ru

В работе представлены исследования по прецизионному травлению и доокислению тонких оптически прозрачных пленок ИТО (оксида сплава индия-олова), используемых в качестве токопроводящего слоя для электрообогревного авиационного остекления. В случаях, когда необходимо повысить сопротивление полученной пленки или требуется изменить параметры отдельной зоны покрытия, допускается метод травления ионным источником в вакуумной камере, преимущественно с использованием в качестве носителя заряда инертного аргона (Ar). Также рассматривается метод повышения сопротивления бомбардировкой реактивным кислородом (O₂), позволяющей окислить поверхностный слой ИТО, снизив толщину токопроводящего слоя. Применяется ионный источник с замкнутым дрейфом как наиболее эффективный ввиду высокой энергии пучка. Описанные процессы актуальны для снижения коэффициента запуска продукции – учитывая высокую стоимость и трудоемкость изготовления авиационного остекления, экономическая эффективность метода высока. Процесс применялся на высокоомных ($\rho > 70 \text{ Ом}/\square$) и низкоомных (3-8 Ом/ \square) пленках ИТО, нанесенных методом магнетронного распыления.

Травление с Ar приводит к уменьшению толщины токопроводящего слоя и, соответственно, снижению площади поперечного сечения (S) проводника. Оптические характеристики покрытия меняются в соответствии с изменением толщины покрытия. Требуемый диапазон энергий 100-8000 эВ, плотности тока 0,005-3 мА/см². Преимущества Ar: химическая инертность, сравнительно высокая атомная масса (39,95 г/моль), низкая стоимость и доступность. Недостаток: распыление «тела» ионного источника – повышенный износ и загрязнение поверхности изделия распыляемыми частицами. Высокая атомная масса обеспечивает высокую скорость травления, «выбивая» молекулы материала с поверхности покрытия. Процесс не селективен в отношении материала – коэффициент его распыления зависит от массы ионов, энергии связи и угла падения пучка.

Покрытия на основе ИТО обладают свойствами менять физические свойства (в т.ч. резистивность) в зависимости от стехиометрического соотношения, применяемого в процессе их формирования. Различные условия роста пленки позволяют окислить состав ИТО с градацией от электропроводного до состояния полного диэлектрика, оперируя отношением исходного вещества к реагенту.

O₂, являясь реактивным газом, в процессе бомбардировки доокисляет поверхностный слой полученного токопроводящего ИТО, сформировав на поверхности имеющегося покрытия полностью диэлектрический слой, тем самым уменьшается S проводника (функционального слоя), соответственно, повышается R (Ом) и ρ (Ом/ \square). Результат – двухслойная по резистивным характеристикам конструкция. Ввиду низкой атомной массы (M(O) = 15,99 г/моль, M(O₂) = 31,99 г/моль), процесс стравливания молекул с поверхности вещества сравнительно менее эффективен. Сравнительно с Ar свойства среды и параметры работы источника будут отличаться – больший объем активного газа, понижение ускоряющего напряжения, что снижает эффективность травления и позволяет поставить эксперимент по окислению ионизированным кислородом практически без травления.

Эксперименты проводятся на магнетронной установке для нанесения покрытий на изделия авиационного остекления. Подложка двигается в качающемся режиме, длина рабочей зоны источника составляет 2200 мм. Цель – подтверждение теоретических данных и

определение динамики роста *линейного сопротивления*, как основополагающей характеристики при бомбардировке кислородом и аргоном. Расстояние между источником и изделием 230 мм. Линейная скорость прохода изделия перед источником $V=0,28$ м/с.

Таблица 1. Окисление ИТО источником ионов для определения динамики на одном изделии

№ этапа эксперимента, комментарий	Удельное сопротивление ρ (Ом/□)	Линейное сопротивление R (Ом)	Количество проходов (N)	Параметры процесса (питание источника, объем газа, давление)
Исходные параметры	8,1-8,2	22,0	-	U=2,1 кВ, P=0,8 кВт, I=0,38А V(O ₂)=300 мл/мин P=4,6×10 ⁻⁴ мБар
1. + 0,4 Ом	-	22,4	2	
2. + 0,3 Ом	-	22,7	8	
3. + 0,1 Ом	8,3-8,4	22,8 (+0,1)	100	

Вывод: глубокое оксидирование в течение 2-3 проходов, далее – стабилизация резистивных характеристик. Быстрая модификация поверхностного слоя на определенную толщину и последующее низкоэффективное травление.

Таблица 2. Определение предельного оксидирования пленки на двух образцах

№ этапа эксперимента, комментарий	Линейное сопротивление R (Ом)	Количество проходов (N)	Параметры процесса (питание источника ионов, объем подачи газа, давление в камере)
Исходные параметры обр.1	21,8	-	U=2,1 кВ, P=0,8 кВт, I=0,38А V(O ₂)=300 мл/мин P=4,6×10 ⁻⁴ мБар
1. оксидирование	23,1(+1,3)	160	
Исходные параметры обр.2	21,2	-	
2. оксидирование	22,6 (+1,4)	350	

Вывод: Результат оксидирования поверхности на этапе №1 является предельным.

Таблица 3. Попеременная обработка кислородом и аргоном – оксидирование и снятие окисленного слоя ионизацией аргоном на одном изделии

№ этапа эксперимента, комментарий	Газ	Линейное сопротивление R (Ом)	Количество проходов (N)	Параметры процесса (питание источника ионов, объем подачи газа, давление в камере)
Исходные параметры	-	21,6	-	-
1. предельное оксидирование, подтверждено	O ₂	22,9 (+1,3)	150	U=2,1 кВ, P=0,81 кВт, I=0,38А V(O ₂)=300 мл/мин P=4,6×10 ⁻⁴ мБар
2. травление аргоном, снимается оксид ИТО, => R не меняется	Ar	22,9 (без изм.)	20	U=2,7 кВ, P=1,1 кВт, I=0,4А V(Ar)=160 мл/мин P=5,0×10 ⁻⁴ мБар
3. травление аргоном, оксид стравлен, начался рост R	Ar	23,4 (+0,5)	80	U=2,8 кВ, P=1,2 кВт, I=0,42А V(Ar)=165 мл/мин P=5,1×10 ⁻⁴ мБар
4. травление аргоном, медленный и стабильный процесс	Ar	24,0 (+0,6)	100	U=2,7 кВ, P=1,1 кВт, I=0,4А V(Ar)=160 мл/мин P _{process} =5,0×10 ⁻⁴ мБар

Вывод: Подтверждение предыдущих результатов, определение динамики, доказательство существования диэлектрического слоя.

Оба метода повышения сопротивления на готовых изделиях доказаны и эффективно могут применяться на производстве. Следует отметить, что оксидирование выигрывает в скорости процесса у травления аргоном до момента предельного окисления на заданную толщину, далее переходя в слаботекущее травление.

Подбор режима упрочнения защитных стекол методом низкотемпературного ионного обмена

Е.О. Козлова, **Н.А. Рукавичкин**, Н.В. Остролуцкая, А.Е. Пигалев, Ф.И. Паршин, Д.Н. Петрачков
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: rukavichkinna@technologiya.ru

Защитные стёкла обеспечивают устойчивость приборов к внешним воздействиям в условиях эксплуатации при больших нагрузках. Важнейшим требованием к данным изделиям является повышенное значение прочности, для достижения которого используется термохимический метод упрочнения стекла – низкотемпературный ионный обмен. Процесс упрочнения происходит в расплаве KNO_3 и основан на образовании сжимающих напряжений в поверхностном слое стекла за счет замены иона щелочного металла меньшего радиуса – Na^+ на более крупный ион из расплава – K^+ при температуре ниже T_g .

Низкотемпературный ионный обмен применяется в производстве защитных стекол достаточно давно, однако замена материалов и оборудования приводит к необходимости актуализации параметров существующего процесса. Задача заключается в подборе оптимального режима упрочнения, который обеспечит соответствие готового изделия заданным техническим требованиям.

В условиях производства АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» изучалось влияние на прочностные характеристики стекла двух параметров ионообменного упрочнения: температуры и длительности выдержки в расплаве KNO_3 . В качестве объекта исследования выступали образцы листового стекла марки М1 ГОСТ 111-2014 толщиной 3 мм. После процесса упрочнения изделия должны соответствовать требованиям по прочности на изгиб – 250 МПа и глубине сжатого слоя – не менее 25 мкм. Испытания образцов на предел прочности при центрально симметричном изгибе (ЦСИ) проводили по методике ОАО «НИТС» 1.232.46-87. Для определения величины поверхностных сжимающих напряжений и глубины сжатого слоя использовали методику ПМ 596.282.

На рисунке 1 представлены значения предела прочности при ЦСИ образцов листового стекла, упрочненных по разным режимам. На рисунке 2 показаны эпюры поверхностных сжимающих напряжений в образцах, упрочненных по тем же режимам.

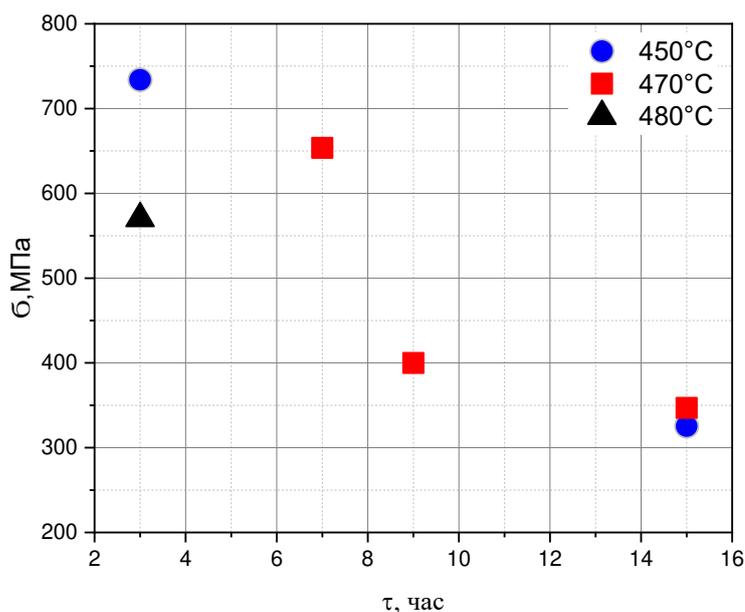


Рис. 1. Значения предела прочности при ЦСИ образцов листового стекла, упрочненных при температурах 450, 470 и 480 °C и разной длительности выдержки (τ)

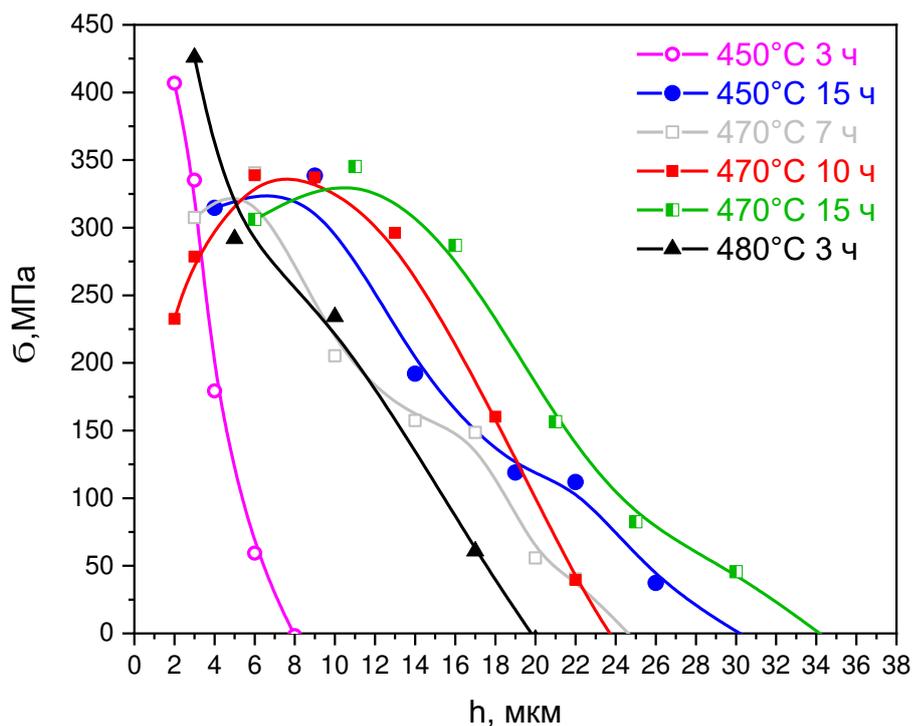


Рис. 2. Эпюры сжимающих напряжений в листовом стекле, упрочненном в расплаве KNO_3 , по режимам: 450 °С, 3 ч; 450 °С, 15 ч; 470 °С, 7, 10 и 15 ч; 480 °С, 3 ч

Для образцов стекла, упрочненных по исходному режиму ионообменного упрочнения (температура расплава 480 °С, длительность выдержки в расплаве – 3 ч), наблюдается полное соответствие техническим требованиям по прочности $\sigma = 570$ МПа при недостаточно большой глубине сжатого слоя (h), которая составляет 18-20 мкм.

Для корректировки режима и увеличения глубины сжатого слоя было решено продлить выдержку образцов в расплаве, снизив при этом температуру, с целью уменьшения релаксации сжимающих напряжений. Кроме того, понижение температуры расплава при длительной обработке является обязательным условием для замедления процесса термического разложения KNO_3 .

Сравнение полученных эпюр напряжений показывает, что необходимая глубина сжатого слоя (> 25 мкм) достигается в образцах, упрочненных по режимам: 470 °С, 15 ч и 450 °С, 15 ч. Предел прочности стекла при ЦСИ для данных режимов составляет 345 МПа и 325 МПа соответственно. Оба значения полностью удовлетворяют заданным требованиям, однако на образцах стекла, упрочненных при температуре 470 °С с выдержкой в расплаве более 10 ч, наблюдались следы нарушения поверхности, что является недопустимым.

Таким образом, на основании проведенного исследования подобраны параметры режима упрочнения защитных стекол методом низкотемпературного ионного обмена: температура – 450 °С при длительности выдержки в расплаве KNO_3 – 15 ч. Актуализация процесса упрочнения изделий проведена из расчета минимальных энергозатрат, что в свою очередь обеспечивает экономическую эффективность производства.

Неорганическое терморегулирующее покрытие

Д.А. Лавров, А.М. Икаев, Д.И. Селиверстов, О.С. Баврина
«ЦНИИХМ им. Д.И. Менделеева», г. Москва, Россия
E-mail: lavrovdimok1997@mail.ru

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) широко применяются для наружной и внутренней окраски изделий и конструкций в качестве пассивных систем терморегулирования. Для поддержания заданного теплового режима используются терморегулирующие покрытия (ТРП) класса «солнечный отражатель». Такие ТРП должны обладать низким значением коэффициента поглощения солнечной энергии (α_s) и высоким значением коэффициента излучения (ϵ).

Наиболее перспективными направлениями разработки терморегулирующих покрытий являются композиции на основе силикатных красок. Основными компонентами таких композиций являются пигменты (BaSO_4 , BaAl_2O_4 , TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , MgO , Al_2O_3 и др.), обеспечивающие требуемые оптические характеристики ТРП, неорганические связующие на основе силикатов щелочных металлов ($\text{R}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где $\text{R}=\text{Li}^+$, Na^+ , K^+), выполняющие функции связывания пигмента и обеспечивающие адгезию к материалу изделий, а также модифицирующие и корректирующие добавки, применяемые при необходимости для улучшения адгезии, механической прочности и изменения функциональных свойств покрытий.

Были апробированы различные рецептурно-технологические варианты покрытий. В качестве неорганического связывающего компонента композиции покрытия использовалось коммерческое связующее на основе натриевого жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ в комбинации с пигментом в виде синтезированного сульфата бария BaSO_4 . В качестве основы для нанесения использовались алюминиевые пластины из сплава АМг6. Подготовка поверхности образцов была выполнена посредством травления в 1М растворе NaOH с последующим осветлением поверхности в концентрированном растворе HNO_3 . Для модификации поверхности образцов использовали 10% раствор натриевого жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Измерение коэффициента излучения (ϵ) проводили с помощью рефлектометра инфракрасного «РИ-К», коэффициент поглощения солнечной энергии (α_s) на интегрирующей сфере Labsphere RTC-060-SF в комплексе со спектрометром «Ocean Optics». Был выполнен термогравиметрический анализ композиций на приборе для термического анализа Labsys DTA/TGA. Был проведен качественный и количественный анализ состава ТРП с использованием энерго-дисперсионного анализатора BRUKER, а также покрытие было исследовано при помощи рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра Rigaku Ultima IV. Характер поверхности полученного покрытия был исследован при помощи сканирующего электронного микроскопа HITACHI TM3030Plus.

Оценку внешнего вида покрытия проводили по ГОСТ 9.407-2015. Адгезию оценивали согласно ГОСТ 15140-78, методом параллельных надрезов. Оценку газовыделения полученных покрытий проводили по ГОСТ 50109-92. Также было проведено исследование покрытия на предмет адсорбции соединений из воздуха.

Полученное ТРП обладает требуемыми показателями оптических характеристик ($\alpha_s \leq 0,25$, $\epsilon \geq 0,9$) и высокой адгезией к материалу основы. По результатам оценки внешнего вида и защитных свойств покрытия дефекты не выявлены.

УФ-отверждаемые защитно-упрочняющие покрытия для оптических кварцевых волокон

О.А. Синеокова, О.С. Сивохиной, Н.А. Бондаренко
АО «НИИ полимеров», г. Дзержинск, Россия
E-mail: sineokova@nicp.ru

В настоящее время волоконно-оптические линии связи являются одним из основных высокоскоростных способов передачи информации и лидируют на телекоммуникационном рынке. Они успешно конкурируют с традиционными линиями и беспроводными технологиями и широко используются в телекоммуникационных сетях разных уровней, а также в промышленности в волоконно-оптических датчиках физических величин и различных волоконно-оптических устройствах.

При вытяжке кварцевого оптического волокна (ОВ) с целью его защиты от воздействия окружающей среды и предотвращения дополнительных потерь, обусловленных микро- и макроизгибами, на него наносят защитно-упрочняющие покрытия (ЗУП). Наиболее часто в качестве ЗУП применяют акриловые УФ-отверждаемые покрытия двух типов: первичное и вторичное. Первичное покрытие имеет низкий модуль упругости и относительно высокое удлинение и защищает ОВ от микроизгибов, вызывающих дополнительные светопотери при передаче сигнала. Вторичное покрытие, имеющее высокий модуль упругости, наносится на слой первичного покрытия и защищает ОВ от воздействия внешних факторов и механических повреждений. ЗУП наносятся на поверхность кварцевого ОВ при его непосредственном изготовлении в едином технологическом процессе.

ЗУП должны обладать следующими основными свойствами: жидким агрегатным состоянием без кристаллизации в интервале температур от -60 до 60 °С, определенной вязкостью при температуре нанесения, композиционной однородностью, стабильностью при хранении, показателями преломления, обеспечивающими контроль concentричности при нанесении, хорошей смачивающей способностью, необходимой адгезией к ОВ и одновременно возможностью легко сниматься с ОВ, небольшой усадкой при отверждении. Кроме того, покрытия, полученные из УФ-отверждаемых композиций должны обеспечивать малое влагопоглощение.

Основу УФ-отверждаемых ЗУП составляют олигомеры различной природы, которые определяют основные свойства отверждённых покрытий. В АО «НИИ полимеров» синтезированы олигоуретанаакрилаты (ОУА) различного строения – продукты взаимодействия диизоцианатов, полиоксипропиленгликолей и гидроксипропилакрилатов; эпоксиакрилаты, полученные акрированием разнообразных эпоксидных смол. Изучено влияние моно-, полифункциональных мономеров-разбавителей, сшивающих агентов, фотоинициаторов, модифицирующих добавок на физико-механические, оптические, вязко-упругие свойства ЗУП, а также на влагостойкость, адгезионную прочность и скорость фотоотверждения покрытий.

В результате проведенных исследований разработаны оригинальные рецептуры защитно-упрочняющих полимерных покрытий серии Квант с комплексом необходимых свойств, некоторые из которых представлены в таблице 1.

Разработанные УФ-отверждаемые акрилатные композиции Квант-408/409 нашли применение в кварцевых световодах, используемых при производстве оптического кабеля для изделий специальной техники, а защитно-упрочняющие полимерные покрытия Квант-410/411 применяются при создании волоконно-оптических гироскопов, обеспечивая сохранение их функциональных характеристик в диапазоне температур от минус 55 до плюс 40 °С. Сравнительные ДСК-кривые ОВ с покрытиями Квант представлены на рис. 1

Таблица 1. Свойства УФ-отверждаемых полимерных покрытий

Наименование показателя	Покрyтия 1		Покрyтия 2	
	КВ-408	КВ-409	КВ-410	КВ-411
Динамическая вязкость при 25 °С, мПа·с,	4800	5500	7000	5700
Показатель преломления жидкого состава, n^{23}	1,487	1,518	1,473	1,519
Показатель преломления отвержденного полимера, n^{23}	1,500	1,539	1,483	1,540
Усадка, %	2,2	3,4	2,0	3,5
Модуль упругости при растяжении при относительной деформации 2,5%, МПа	1,2	500	2,0	700
Относительное удлинение при разрыве, %	120	12	200	12
Предел прочности при растяжении, МПа	1,4	30	2,0	38
Влагопоглощение (6 сут, 35 °С, 95% влаж.), %	1,1	1,4	1,0	1,4
Поверхностное натяжение, мН/м	33	23	32	22
Температура стеклования, °С (ДСК)	-36	49	-61	48
Температура пика на кривой тангенса угла механических потерь (ДМА), °С	-20	67	-60	56
Доза УФ-облучения для достижения 95% степени отверждения (фото-ДСК), Дж/см ²	0,8	0,3	1,0	0,3

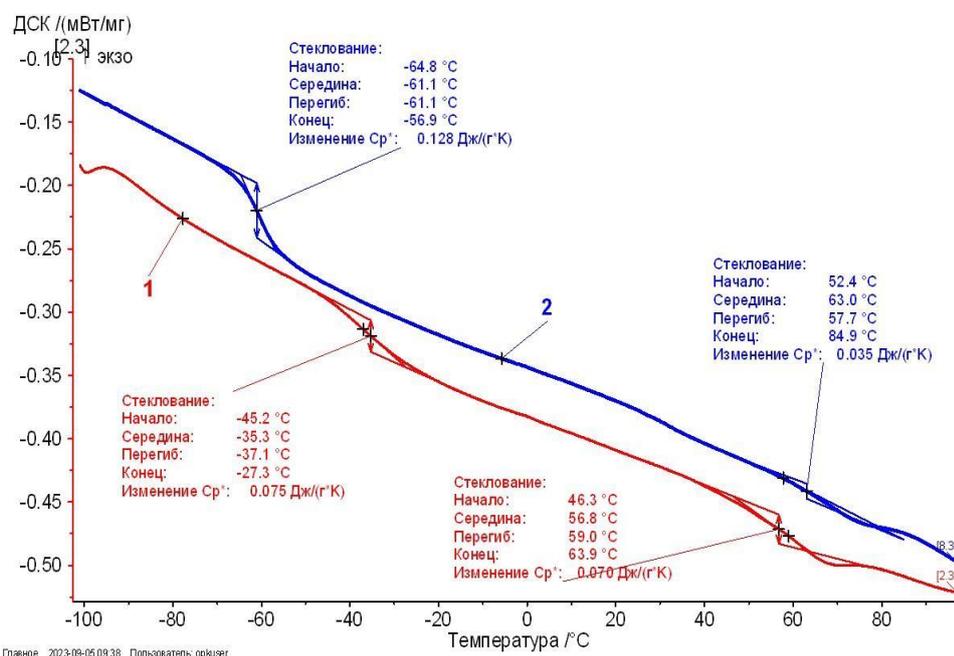


Рис. 1. ДСК кривые ОВ с покрытиями Квант:
1 – Квант-408/409, 2 – Квант-410/411

Разработанные покрытия Квант с комплексом свойств обеспечивают работоспособность изделий оптического назначения.

Кристаллизация стекол в диборатном разрезе $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3\text{--BaO}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$

И.Г. Полякова, Н.Г. Тюрнина, З.Г. Тюрнина, Е.О. Лушникова

НИЦ «Курчатовский институт» – Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), г. Санкт-Петербург, Россия

Email: turnina.ng@isrcas.ru

После открытия в конце прошлого века уникальных нелинейно-оптических (НЛО) свойств β -метабората бария ($\beta\text{-BaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ или ВВО) начались поиски оптимальных условий синтеза совершенных кристаллов и поиск других кристаллических соединений с сопоставимыми свойствами. Система $\text{Na}_2\text{O}\text{--BaO}\text{--B}_2\text{O}_3$, в которой оксид натрия играет роль флюса, позволяет выращивать достаточно совершенные кристаллы ВВО в области составов, где содержание B_2O_3 меньше 50 моль %. В области стеклообразования системы, при содержании B_2O_3 более 50 моль %, ВВО растет с образованием твердых растворов оксида натрия в метаборате бария, что понижает качество кристаллов. В системе найдено несколько тройных соединений, но ни одно из них не подходит для целей нелинейной оптики. В стеклообразующей части системы таких соединений обнаружено два: $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{BaO}\cdot 9\text{B}_2\text{O}_3$ (1:2:9) и $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{BaO}\cdot 5\text{B}_2\text{O}_3$ (1:2:5).

Стекла системы $\text{Na}_2\text{O}\text{--BaO}\text{--B}_2\text{O}_3$, систематически не изучались. Известна только одна работа, в которой исследовались свойства стекол при замещении натрия барием в диборатном разрезе $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3\text{--BaO}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ системы. Было показано, что некоторые свойства, в частности температура стеклования T_g , имеют значительные отклонения от аддитивности в средней части разреза, что может быть связано с наличием в стекле надструктурных группировок, вносимых тройными соединениями 1:2:9 и 1:2:5. Собственно кристаллизация стекол изучалась ограничено, вблизи составов стехиометрий.

Целью данной работы было изучение кристаллизации стекол диборатного разреза системы $\text{Na}_2\text{O}\text{--BaO}\text{--B}_2\text{O}_3$ (рис. 1). Стекла с содержанием 66,7 моль % B_2O_3 и с последовательной заменой BaO на Na_2O варили в платиновых тиглях из шихты при температуре 1150-1250 °С. Для определения температур стеклования, кристаллизации $T_{кр}$ и плавления $T_{пл}$ использовался метод ДТА (дериватограф, тигли платиновые, скорость нагрева 10 К/мин). Для идентификации образующихся соединений порошки стекол кристаллизовали при температурах, определенных из кривых ДТА с последующим РФА (ДРОН-3).

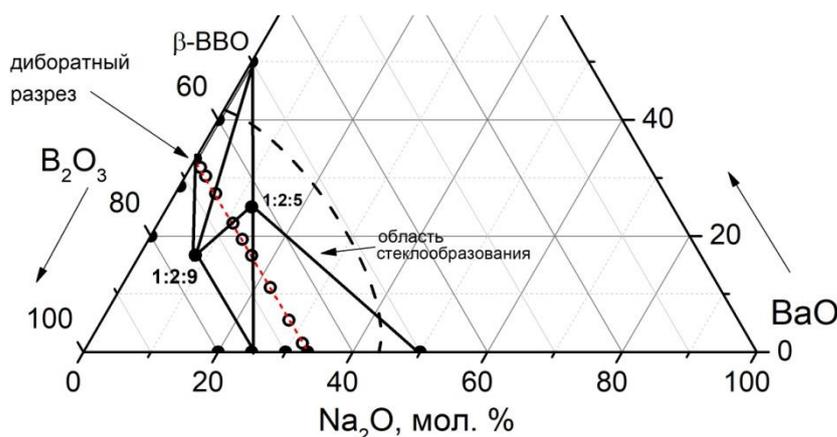


Рис. 1. Составы стекол в диборатном разрезе $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3\text{--BaO}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ и опирающиеся на него треугольники сосуществующих фаз для температуры 600-700 °С. Кружки – составы сваренных стекол, черные точки – составы кристаллических соединений

Из рисунка 2 мы видим, что изучаемый диборатный разрез является именно разрезом, частным сечением треугольника концентраций. При температурах ниже солидуса ни в одной своей части он не представляет собой псевдобинарной системы, что позволяет выполнить триангуляцию для значительной части системы (рис. 1).

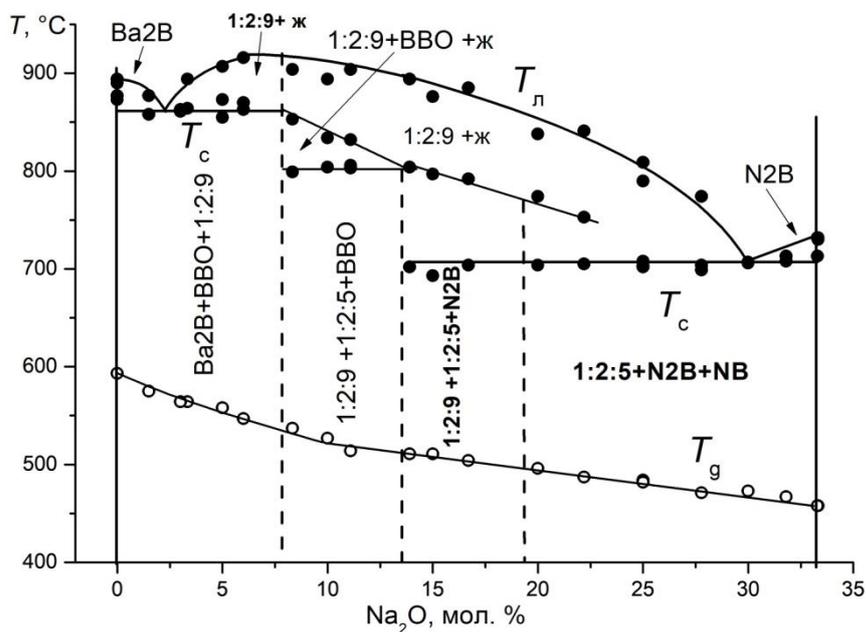


Рис. 2. Фазовые равновесия и температура стеклования в диборатном разрезе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3$

Рисунок 2 показывает также, что большая часть поверхности ликвидуса системы является полем первичной кристаллизации соединения 1:2:9, и именно его надструктурные группы должны в первую очередь определять строение его стекла.

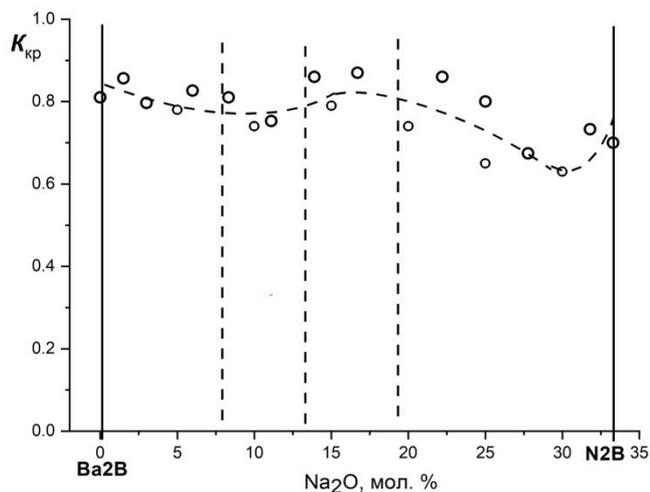


Рис. 3. Коэффициент склонности стекол к кристаллизации $K_{кр}$ в бинарном разрезе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3$

Коэффициент склонности стекол к кристаллизации на рисунке 3 показывает, что введение в бинарное стекло второго оксида слегка понижает кристаллизационную способность стекол.

Исследование стекла с высоким содержанием Al_2O_3

Р.А. Татьяна, Ю.И. Машир, Е.Х. Мамаджанова, Е.К. Яблонский
АО «НИТС им. В.Ф. Солинова», г. Москва, Россия
E-mail: tatyanin@intgs.ru

Было исследовано стекло производства фирмы CSG HOLDING CO, LTD под названием Kirin King Glass (КК). Это линейка алюмосиликатного стекла, которое содержит от 13 до 40% оксида алюминия. Для исследования выбрано стекло КК3 с содержанием Al_2O_3 13%.

Были определены светопропускание, химический состав стекла. Сняты дилатометрические кривые и определены коэффициент термического расширения и температура стеклования.

Разработаны температурные режимы моллирования поверхностей одинарной и двойной кривизны.

Отмечены особенности качества поверхности смоллированных стекол при совместном моллировании стекла КК-3 и обычного листового силикатного стекла.

Разработаны режимы термохимического упрочнения стеклозаготовок. С помощью метода Алейникова определена глубина ионообменного слоя, величина сжимающих напряжений и построены эпюры сжимающих напряжений стекла КК-3 на глубину до 370 мкм.

Микрохрупкость определяли на автоматическом микротвердомере WIKI 200 JS под нагрузкой 100 г.

Наряду с замерах глубины и степени сжимающих напряжений были произведены испытания упрочненных образцов стекла на центрально-симметричный изгиб по методике АО «НИТС им. В.Ф. Солинова» №1.232.46-87.

Проведен сравнительный анализ величины сжимающих напряжений, глубины упрочненного слоя, прочности на центрально-симметричный изгиб, ударопрочности стекла КК-3 и обычного листового силикатного стекла.

Изготовлены опытные ударостойкие образцы изделий остекления транспортного средства и проведены испытания по классу P2A и Бр6 ГОСТ 30826-2014.

Отмечены преимущества и недостатки использования стекла КК-3 для производства изделий конструкционной оптики и прозрачной брони.

Золь-гель синтез оксидных неорганических материалов

А.А. Бойко, Е.Н. Подденежный, М.Ф.С.Х. Аль-Камали
ГГТУ им. П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь
E-mail: boiko@gstu.by

Широкое применение золь-гель синтеза для получения функциональных оксидных материалов обусловлено целым рядом преимуществ этого метода по сравнению с традиционным получением материалов из порошков. Здесь, прежде всего, необходимо отметить значительное снижение температуры синтеза т.к. происходит спекание массива наноразмерных частиц, обладающих большой поверхностной энергией. Понижение температуры термообработки приводит наряду с уменьшением затрат энергии к существенному повышению чистоты изделий, прежде всего за счёт меньшей летучести примесей из используемых при этом конструкционных материалов (материалы тиглей, футировка печей и т.д.). В случае использования для синтеза алкоксидов металлов, благодаря лёгкости их очистки, становится возможным получение особо чистых материалов, что очень важно для производства оптических изделий. Если добавить сюда высокую степень гомогенности в мультикомпонентной золь-гель системе, что особенно важно для равномерного распределения специально вводимых добавок, а также возможность получения материалов с практическим сохранением формы и объёма от заливки жидкого золя до получения конечного продукта – преимущества золь-гель технологии для производства новых материалов с уникальными свойствами становятся очевидными.

Наряду с получением оптических изделий на основе аморфных оксидных материалов, не менее важным является использование золь-гель процесса для разработки технологий, позволяющих получать кристаллические оксидные оптические материалы. Эти материалы синтезируются в виде наноструктурированных порошков, высокоплотных структур заданного химического состава, размера и морфологии частиц, причем при более низких температурах и более простом аппаратном оформлении, чем в традиционных процессах. Разработка новых методов и подходов к получению подобных структур также представляет несомненный интерес.

Переход от золя до стеклообразного (на примере кремнезема) состояния проходит через ряд этапов, в результате которых формируются новые и трансформируются предшествующие фазы. Структурная схема последовательных этапов золь-гель синтеза объемного материала, основана на процессе гидролиза тетраэтилортосиликата (ТЭОС) в кислой среде с последующим диспергированием пирогенного кремнезема (аэросила) и принудительным гелеобразованием (рис. 1).

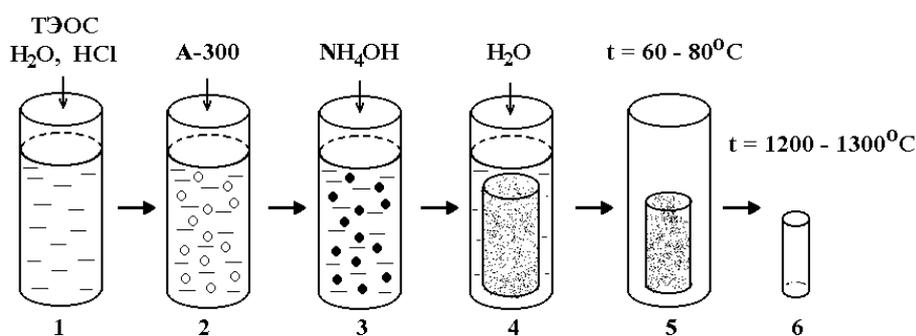


Рис. 1. Основные этапы золь-гель синтеза: 1 – гидролиз ТЭОС; 2 – диспергирование аэросила; 3 – гелеобразование; 4 – созревание и промывка геля; 5 – сушка геля; 6 – термообработка и уплотнение геля

Механизм формирования объемного геля, по нашим представлениям, разбивается на ряд этапов: этап образования агломератов, этап формирования частиц микрогелей и этап роста геля по всему объему системы с включением всей жидкой фазы (вода, этанол, ионы Cl^- , NH_4^+ , OH^-). Доля твердой фазы в геле составляет 13÷15% по объему. Показано, что гелеобразование композиционно-коллоидной системы происходит, в основном, за счет конденсации гидроксильных групп, при этом образующаяся кремнеземная сетка включает в свой состав более плотные первичные частицы и агрегаты аэросила и скрепляет их наподобие цементирующей фазы.

С использованием комплекса физико-химических и структурных методов исследованы закономерности трансформации ксерогель $\text{SiO}_2 \rightarrow$ монолитное твердое тело при нагреве в температурном интервале 60÷1250 °С. Установлена зависимость линейной величины усадки от температуры для композиционных ксерогелей с различным соотношением частиц диоксида кремния в золе, а также для аэросильных образцов.

Рассмотрена также роль технологических сред в атмосфере печи при уплотнении ксерогеля с учетом коэффициентов диффузии различных газов (воздуха, Ar, He), рассчитаны критические размеры газового пузырька в объеме кварцевого стекла в процессе консолидации, что влияет на качество получаемого материала и на этой основе предложены газовые среды, необходимые для формирования малодефектных гель-стекол. На основании данных спектроскопии в ИК-диапазоне, комбинационного рассеяния, ДТА, ТГ, АСМ, РЭМ предложена модель коллапсирования полидисперсного геля, установлены оптимальные условия режимов термообработки.

По разработанной технологии были получены кварцевые гель-стекла, легированные ионами Cr^{3+} , Co^{2+} , Fe^{3+} , Cu^+ , Ce^{3+} , Ce^{4+} и др. с содержанием легирующего оксида в стекле от 0,1 до 1,6 мас. % без явлений фазового разделения. Использование в качестве наполнителя в исходные композиционные золи аэросила А-300, модифицированного оксидом хрома и обработка ксерогелей в атмосфере водорода, позволили получить хромсодержащие наноконкомпозиты, имеющие большую оптическую однородность, чем у гель-стекол, легированных ионами Cr^{3+} .

Образцы полученных легированных гель-стекол приведены на рисунке 2.

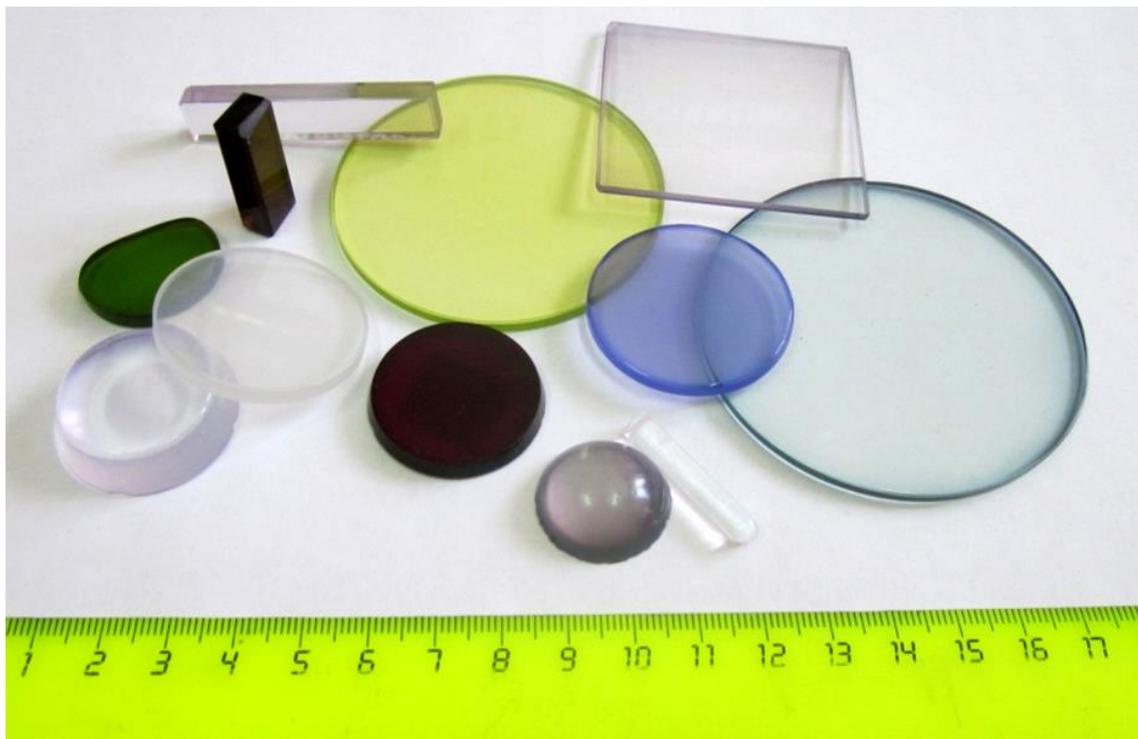


Рис. 2. Образцы полученных легированных гель-стекол

О методах исследования оптических констант пленок металлов

О.Ф. Просовский, Ю.О. Просовский, А.Н. Исамов, А.Ю. Буднев, В.А. Смольянинов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, г. Обнинск, Россия
E-mail: lab37@technologiya.ru

Одним из сложных для производства видов тонкопленочных покрытий являются металлооптические покрытия – покрытия, имеющие в своей оптической конструкции тонкие полупрозрачные слои металлов, как правило, толщина этих слоев составляет 1-15 нм. Сложность изготовления металлооптических покрытий заключается не только в проблемах воспроизведения тонких слоев, толщина которых измеряется десятками атомарных слоев, но и определением реальных спектральных значений показателя преломления n и коэффициента поглощения k . Необходимость точного воспроизводства толщины покрытия предъявляет высокие требования к самому напылительному оборудованию и системе контроля напыляемых покрытий. Крайне важно располагать комплексом «напылительное оборудование – система контроля», обеспечивающим высокую воспроизводимость результатов. Столь сложные интерференционные структуры не могут быть изготовлены с первой попытки. Практика показывает, что для получения годных изделий требуется проведение нескольких пробных процессов, поэтому для достижения успеха необходимо располагать оборудованием, которое в состоянии обеспечить высокую повторяемость оптических констант пленок, применяемых пленкообразующих материалов.

Для проведения исследований по определению оптических констант пленкообразующих материалов необходимо обладать высококласным измерительным оборудованием (спектрофотометром), обеспечивающим точность измерений пропускания и отражения не хуже 0,1%. Наличие такой измерительной базы позволяет совместно с блоком специализированных программ математического моделирования (в нашем случае OptiLayer) провести необходимые исследования оптических констант (n и k) получаемых тонких пленок.

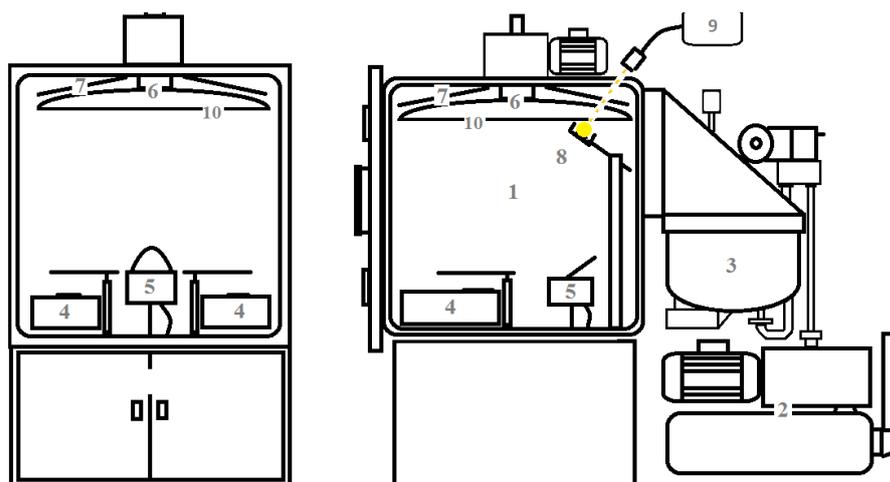
Особенностью анализа поглощающих слоев, которыми и являются пленки металлов, является проблема определения реальной геометрической толщины исследуемой пленки металла. Это связано с решением математической задачи, которая описывается одним уравнением с двумя неизвестными. Исходя из этого, метод исследования оптических констант требует получения дополнительной информации для анализа. Для поглощающих сред в обязательном порядке должна быть измерена спектральная зависимость отражения от обратной стороны покрытия BsR . Расчет оптических констант пленок металлов в среде модуля математического моделирования OptiChar не гарантирует получение истинных значений спектральных зависимостей n и k . Это связано, как отмечалось выше, со сложностью точного определения геометрической толщины крайне тонких металлических слоев. В то же время истинность расчета определения оптических констант легко проверить. Для этого необходимо провести нанесение двухслойного покрытия, состоящего из первого слоя металла, тонкая пленка которого подвергается исследованию, и второго слоя из диэлектрического материала, оптические константы которого известны и стабильны. Далее в среде программного модуля OptiRe происходит математическое моделирование определения оптических констант пленки исследуемого металла. Необходимо отметить, что пленки металлов, полученные в вакууме, обладают повышенной химической активностью. и нанесение следующих слоев диэлектрических пленок оксидов сопряжено с проведением реактивных процессов, т.е. процессов напыления, требующих подачи в объем вакуумной камеры реактивного газа (кислород, азот), что в свою очередь приводит к окислению полученной пленки металла. Данный факт регистрируется оптической системой контроля и приводит к получению недостоверных данных. Лучшим вариантом решения данной проблемы является использование пленок фторида магния.

Исследование оптических постоянных полупрозрачных тонких пленок алюминия, полученных методом электронно-лучевого испарения

А.Н. Исамов, Ю.О. Просовский, О.Ф. Просовский, А.Ю. Буднев, В.А. Смольянинов
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: lab37@technologiya.ru

В настоящее время тонкопленочные покрытия играют ключевую роль в современной оптической промышленности. Современная номенклатура производимых покрытий крайне широка и позволяет решать самые разные научно-технические задачи. Сегодня широкое распространение получили тонкие пленки алюминия, которые широко применяются для получения металл-диэлектрических покрытий, архитектурных покрытий и особенно в области оптоэлектроники. В то же время, характеристики оптических элементов, имеющих в своем составе тонкопленочные покрытия, включающие в себя слои металлов, существенным образом зависят от оптических постоянных тонких металлических слоев (показатель преломления, коэффициент поглощения, толщина). Оценка значений этих величин и определение их связи с параметрами технологического процесса позволяет получать светофильтры с характеристиками, близкими к теоретическим.

Для проведения исследования была выбрана вакуумная напылительная установка электронно-лучевого типа на основе камеры ВАК-760. Структурная схема установки приведена на рисунке 1.



1 - внутреннее пространство камеры, 2 - форвакуумный стенд, 3 - криогенный насос, 4 - электронно-лучевые пушки, 5 - ионный источник, 6 - кварцевый датчик-резонатор, 7 - нагреватель, 8 - источник света (галогенная лампа), 9 - светоприемник в составе системы ВВОМ, 10 - подложкодержатель

Рис. 1. Структурная схема вакуумной напылительной установки

Данная установка имеет в своем составе систему прямого широкополосного контроля толщины наносимых оптических покрытий ВВОМ. Данная система позволяет вести контроль непосредственно на напыляемом образце. Кроме того, система обладает возможностью реоптимизации оптической конструкции непосредственно во время ее нанесения, что существенно повышает воспроизводимость покрытия от процесса к процессу. Структурная схема используемой системы контроля приведена на рисунке 2.

Кроме того, в исследованиях применяется универсальное устройство – чейнджер. Применение подобного устройства позволяет провести несколько экспериментов за один процесс вакуумирования камеры, что позволяет снизить как временные затраты, так и продлить ресурс работы оборудования. Устройство приведено на рисунке 3.

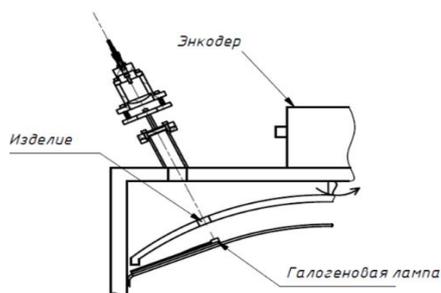


Рис. 2. Структурная схема системы прямого широкополосного контроля толщины наносимых оптических покрытий



Рис. 3. Общий вид чейнджера

При помощи перечисленного оборудования был проведен ряд экспериментов, в результате которых были получены полупрозрачные пленки алюминия, представленные на рисунке 4.

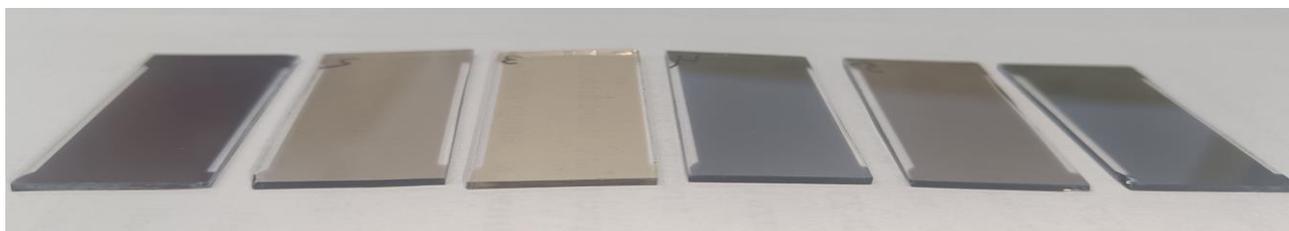


Рис. 4. Полупрозрачные пленки алюминия

На основании полученных прекурсоров спектральные характеристики и оптические константы пленок были проанализированы при помощи САПР OptiLayer. В таблице 1 приведены расчетные толщины полученных пленок и соответствующие им коэффициенты пропускания.

Таблица 1. Расчетные толщины полученных пленок и соответствующие им коэффициенты пропускания

Толщина покрытия	Спектральный коэффициент пропускания на длине волны 500 нм
3 нм	50%
7 нм	30%
14 нм	25%
20 нм	15%
23 нм	10%
30 нм	5%

При моделировании оптических постоянных полупрозрачных пленок алюминия необходимо рассматривать трехслойные конструкции.

Сделано предположение, что пленки с расчетными толщинами 30, 23, 20 нм являются закрытыми, а пленкам с расчетной толщиной менее 14 нм присуща островковая структура.

Температура процесса осаждения полупрозрачных пленок алюминия методом электронно-лучевого испарения существенным образом влияет на переход структуры растущей пленки из сплошной в островковую.

Проектирование и экспериментальная отработка термостойких иллюминаторов орбитального корабля «Буран»

В.П. Тимошенко

АО «НПО «Молния», г. Москва, Россия

E-mail: timoshenko@npomolniya.ru

В состав остекления орбитального корабля (ОК) «Буран» входят шесть иллюминаторов фонаря, два верхних и два задних иллюминатора кабины, иллюминатор входного люка. Напротив каждого одностекольного иллюминатора носовой части фюзеляжа (НЧФ) расположен соответствующий двухстекольный иллюминатор кабины экипажа, которая является автономным модулем и имеет свои герметичные иллюминаторы. Расположение иллюминаторов и схема крепления стекол показаны на рисунке 1. На внутреннюю поверхность стекол НЧФ нанесено прозрачное теплоотражающее покрытие из двуокиси олова SnO_2 . Рамки остекления НЧФ выполнены из титанового сплава ВТ-23, рамки остекления иллюминаторов кабины – из алюминиевого сплава 1201Т1. Расстояние между стеклами иллюминаторов НЧФ и кабины составляет 130÷160 мм. Расстояние между стеклами кабины экипажа – 20мм.

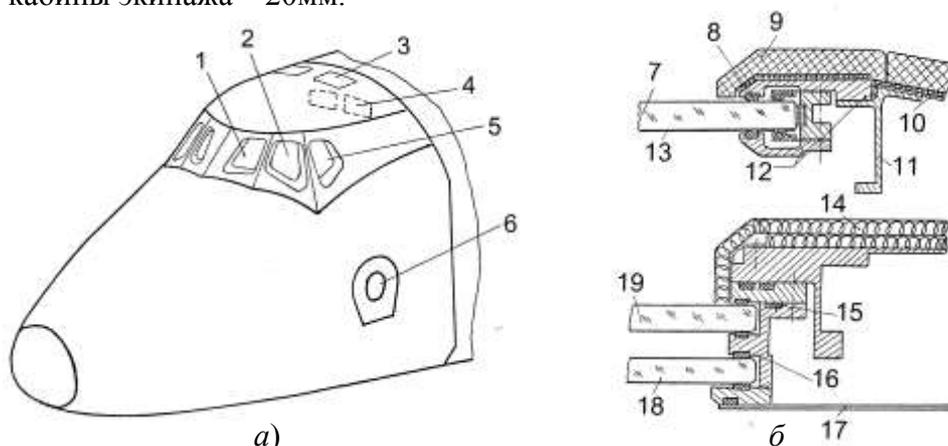


Рис.1. Схема расположения (а) и конструкция типowego крепления (б) стекол иллюминаторов ОК «Буран»:

- 1 – лобовой; 2 – средний; 3 – верхний; 4 – задний; 5 – боковой; 6 – входного люка;
7 – стекло 1 КВ; 8 – кварцевый жгут; 9 – плиточная теплозащита ТЗМК-10; 10 – обшивка фюзеляжа Д-16; 11 – каркас фонаря ВТ-23; 12 – рамка остекления ВТ-23; 13 – покрытие SnO_2 ; 14 – теплоизоляция кабины АТМ-10С; 15 – резиновое уплотнение; 16 – рамка остекления 1201Т1; 17 – кабина; 18 – стекло 3 ОТМ-010; 19 – стекло 2 КВ

Для внешних стекол иллюминаторов фюзеляжа и кабины используется термостойкое кварцевое стекло марки КВ, выдерживающее нагрев воздушной плазмой свыше 800 °С по траектории спуска ОК в атмосфере. Внутренние стекла иллюминаторов кабины выполнены из высокопрочного стекла ОТМ-010.

В процессе теплового проектирования остекления проводились многочисленные расчеты тепловых режимов стекол и рамок остекления для всех этапов полета ОК «Буран» – выведение на орбиту, орбитальный полет с различной ориентацией относительно Солнца и Земли, возвратный спуск с орбиты на Землю. При этом детально рассматривались внешние тепловые нагрузки, учитывались процессы радиационного и конвективного теплообмена между стеклами и деталям рамок остекления, воздухом кабины. Учитывалось проникновение нагретого воздуха через негерметичные кварцевые жгуты наружных стекол.

Установлено, что на этапе спуска с орбиты максимальные температуры наружных стекол иллюминаторов входного люка и лобового достигают 620-680 °С, при этом

теплоотражающее прозрачное покрытие SnO_2 , более чем на 40% уменьшает теплопритоки в кабину, снижая тем самым нагрузку на систему терморегулирования.

Конструктивные особенности рамок остекления и толщина внешней плиточной теплозащиты многократно варьировались с целью выполнить ограничения на допустимые температуры применяемых конструкционных и клеевых материалов, а также ограничения на поле обзора из кабины экипажа.

Расчетным путем установлено, что проникновение нагретого воздуха через негерметичные кварцевые жгуты наружных стекол на этапе спуска ОК в атмосфере не оказывает заметное влияние на уровень максимальных температур элементов окантовки. Более того, на заключительном этапе полета ОК, где плотность воздуха резко растет, а его температура падает до минус 50 °С, затекание холодного воздуха приводит к охлаждению конструкции окантовок на 10-60 °С.

Экспериментальная отработка конструкции остекления ОК «Буран» проводилась на нескольких установках, наиболее представительными из которых можно считать стенд радиационного нагрева ТПИ-9 СибНИА и высокочастотный индукционный плазматрон ВГУ-3-200 ИПМех РАН.

В стенде ТПИ-9 испытывалась конструкция лобового иллюминатора вместе с частью окружающей силовой конструкции НЧФ покрытой плиточной теплозащитой. Нагрев осуществлялся кварцевыми галогенными лампами и проводился в вакуумной камере, обеспечивающей заданные параметры изменения давления по траектории спуска. Охлаждение объекта испытаний при имитации заключительного этапа полета производилось общей струйной системой охлаждения с использованием смеси жидкого азота и атмосферного воздуха. Дополнительное охлаждение более теплоемкой поверхности стекла выполнялось отдельной струйной системой охлаждения.

Успешно проведено около 100 циклических испытаний, имитирующих спуск ОК «Буран» в атмосфере. Подтверждена надежность разработанной конструкции. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что позволило подтвердить обоснованность использования расчетных методов для всестороннего теплового анализа системы остекления ОК «Буран».

После испытаний иллюминаторов ОК «Буран» в стендах радиационного нагрева остался открытым вопрос о поведении стекол и элементов их крепления в условиях обтекания воздушной плазмой. Подобные испытания могут быть проведены с высоким качеством только на индукционных плазматронах типа ВГУ-3-200 с чистым потоком плазмы, параметры которого близки к натурным. В качестве объекта испытаний был выбран натуральный иллюминатор входного люка. Модель представляет собой цилиндр с наружным диаметром около 500 мм, высотой 200 мм и имеет в наружном стекле размер в свету 240 мм. В ее состав входят три штатных стекла, элементы их крепления, прокладки, уплотнения, каркас, плиточная теплоизоляция.

Тепловые режимы испытаний задавались на основании предварительно полученных расчетных значений температуры стекол иллюминатора. Результаты измерений температуры поверхности наружного стекла с использованием термопар и термовизора АГА-780 оказались достаточно близкими к заданным. Максимальная температура поверхности наружного стекла в отдельных испытаниях достигала 700-740 °С. Перепад температур между центром и краем стекла составил примерно 160 °С. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных значений температур стекол на протяжении всего времени экспериментов.

Проведенное комплексное тепловое проектирование и экспериментальная отработка элементов остекления ОК «Буран» в условиях, приближенных к натурным, позволили обосновать правильность принятых технических решений и обеспечить эффективное функционирование остекления кабины экипажа на всех этапах космического полета в условиях многократной эксплуатации.

Дилатометрические измерения в лазерной гироскопии

Н.Р. Запотылько, **А.В. Власов**

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, Россия

E-mail: www38vlas@mail.ru

Условия эксплуатации лазерных гироскопических приборов предъявляют особые требования к свойствам конструкционных материалов, в частности, к температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР). Несущий корпус резонатора кольцевого лазерного гироскопа должен быть выполнен из материала с ультранизким ТКЛР и являться герметичной оболочкой для активной газовой смеси.

Зеркала, образующие кольцевой резонатор, должны быть изготовлены из того же материала, что и корпус, или близкого к нему по свойствам, так как корпус резонатора соединен с оптическими зеркалами методом оптического контакта (ОК). Надежность и ресурс работы прибора во многом определяется механической прочностью и вакуумной плотностью соединений этого вида.

Современные лазерные гироскопы работают в широком интервале температур. При изменении температуры происходит изменение длины оптического периметра резонатора. Температурное приращение оптического периметра зависит от ТКЛР материала корпуса. Для компенсации температурных приращений, кроме использования материала корпуса с ультранизким ТКЛР, применяется система регулировки периметра (СРП), исполнительными элементами которой являются два пьезоэлектрических двигателя, установленные на зеркалах. Для разработки их оптимальной конструкции необходимо знать зависимость изменения ТКЛР материала корпуса в рабочем интервале температур.

В современном мире разработаны и успешно используются различные модификации приборов для измерения ТКЛР – дилатометров, работа которых основана на различных принципах. Для исследований ТКЛР в АО «НИИ «Полюс» используется термомеханический анализатор ТМА F3 Hyperion (рис. 1), чувствительный элемент которого работает на электромагнитной индукции.



Рис. 1. Термомеханический анализатор ТМА F3 Hyperion

Заготовки из ситалла СО-115М поставляются с Лыткаринского завода оптического стекла (ЛЗОС), при этом в сопроводительной документации на каждую заготовку указан номер варки. Для проведения исследований ТКЛР используются круглые образцы (керна) длиной 25 мм и диаметром 6 мм (рис. 2). Керны вырезаются по одному из одной заготовки каждой варки.



Рис. 2. Керн из ситалла СО-115М

Измерения проводились по следующему режиму: охлаждение образца до минус 70 °С со скоростью 5 °С/мин, выдержка при данной температуре в течение 15 мин, нагрев до 105 °С со скоростью 3 °С/мин.

На ЛЗОСе ситалл изготавливается в ваннных печах непрерывного действия. Каждые четыре-пять лет печь для варки ситалла останавливается. Изготовление новой печи с учетом модернизации технологии и введения автоматизированного контроля технологических параметров при варке обуславливает другое качество выплавляемого ситалла.

В качестве примера на рисунке 3 представлены зависимости относительного удлинения ($\Delta l/l_0$) образцов из ситалла СО-115М, произведенного на ЛЗОСе в разное время: с начала 1990-х по ~ 2010-е гг. («старые варки») до 2016-2020 гг. («новые варки»). В настоящее время печь с июня 2020 г. остановлена, идет строительство новой печи. Диапазон температур измерения: от минус 60 до 90 °С.

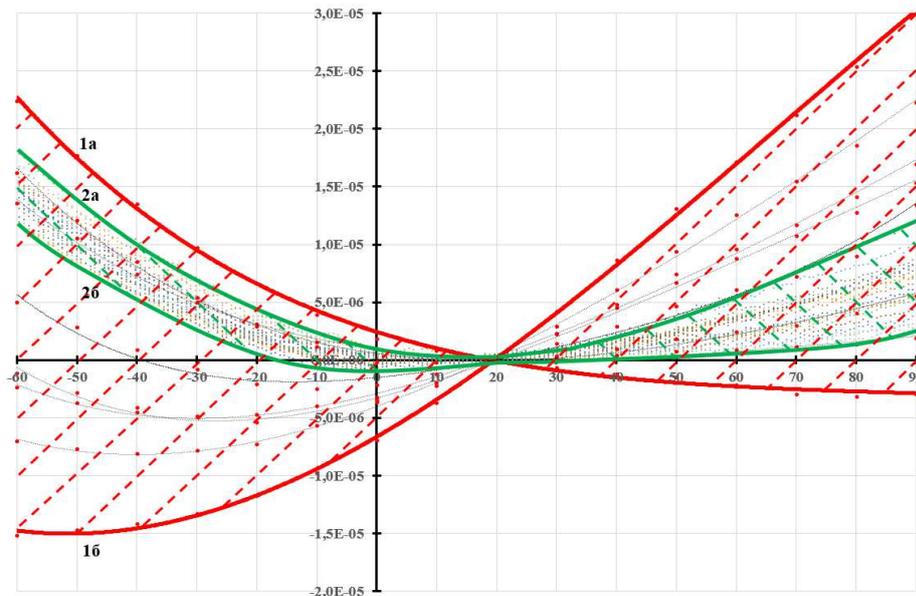


Рис. 3. Температурные зависимости dl/l ситалла СО-115М различных варок:
1а, 1б – диапазон значений dl/l ситалла «старых» варок;
2а, 2б – диапазон значений dl/l ситалла «новых» варок.

Как видно из рисунка 3, диапазон значений dl/l ситалла «новых» варок примерно в три раза уже, чем диапазон значений dl/l ситалла «старых» варок. При использовании ситалла «новых» варок с максимальным ΔL_{max} изменение оптического резонатора ЛГ с периметром 16 см составит 2,63 мкм, что соответствует изменению периметра \sim на 4 λ ($\lambda = 0,63$ мкм), а при использовании ситалла «старых» варок ΔL_{max} составляет 7,22 мкм, что соответствует изменению периметра \sim на 12 λ .

Таким образом, для компенсации периметра лазерного гироскопа достаточно СРП с перестройкой на 4 λ .

Когерентные методы и аппаратура контроля качества профилей крупногабаритных оптических поверхностей на основе анализа статистических характеристик рассеянного лазерного излучения

Д.Г. Денисов

МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), г. Москва, Россия

E-mail: denisov_dg@mail.ru

Задача исследования показателей качества структуры поверхностей оптических и лазерных деталей, является важной и актуальной в оптических технологиях, поскольку оперативный высокоточный межоперационный контроль позволяет обеспечить высокие эксплуатационные и технологические показатели. Стоит отметить, что для обеспечения высоких технологических показателей качества различных оптических и лазерных деталей нового поколения, необходим не только современный подход к методам и средствам обработки деталей, но и реализация перспективных высокоточных бесконтактных методов диагностики.

Особое внимание в единой технологической цепочке занимают стадии от средней шлифовки до глубокой полировки, когда статистические параметры изготавливаемых профилей достигают от единиц и долей микрон до ангстремных уровней. В этом случае важно корректно применять приближения теории дифракции: от приближений Кирхгофа до метода малых возмущений (рис. 1).



Рис. 1. К разработке критериев качества оптических поверхностей и метрологическим требованиям приборов контроля параметров качества поверхностей оптических деталей

В этом контексте рассмотрим и проработаем методологию и математический аппарат двух методов: метода контроля эллипсометрических характеристик для дифрагированной зеркальной компоненты и слабо рассеянного излучения в окрестности зеркальной компоненты, а также модифицированного метода дифференциального рассеяния. Последнее

приближение и метод, основанный на регистрации индикатрисы рассеянного лазерного излучения, характерен для диагностики высотных статистических параметров субнанометрового уровня и на сегодняшний день применяются различные классы оптико-электронных приборов и систем, основанные на данной идеологии.

Наибольший интерес в задачах высокоточного аттестационного контроля представляют такие перспективные приборы и системы, как: динамические интерферометры и интерферометры белого света, а также приборы, позволяющие оценивать среднеквадратическое значение поверхностных неоднородностей по данным анализа индикатрисы рассеянного лазерного излучения (рис. 2).

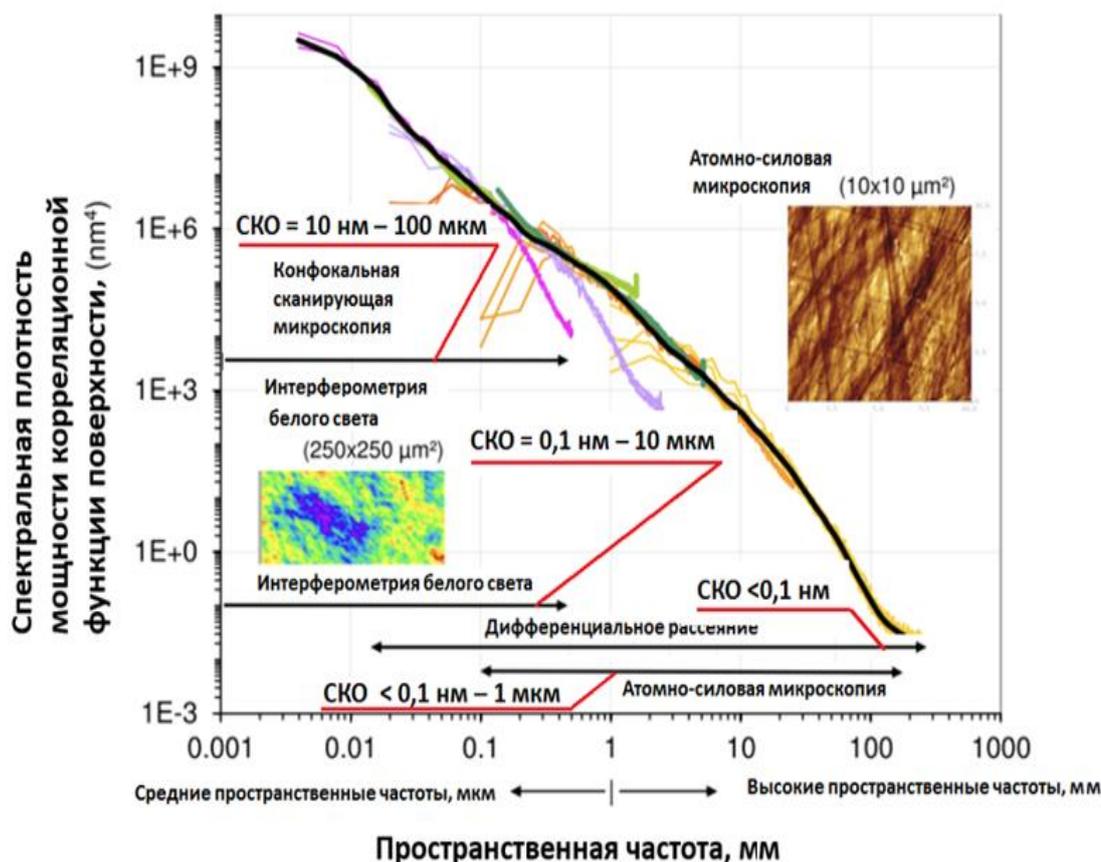


Рис. 2. Предложения по классификации оптико-электронных приборов контроля качества оптических поверхностей на основе целевой функции – спектральной плотности мощности корреляционной функции

В рамках приближения дифракции Кирхгофа в работе предложен и методически и математически реализован метод диагностики эллипсометрических параметров дифрагированного лазерного излучения, позволяющий проводить измерение как качества оптических поверхностей, так и поверхностных плёночных загрязнений, и осадений, царапин и дефектов в виде точек.

Отечественная бюджетная система прямого монохроматического контроля толщины наносимых оптических покрытий высокой точности

Ю.О. Просовский¹, О.Ф. Просовский¹, Д.Г. Денисов², А.Ю. Буднев¹, А.Н. Исамов¹, В.А. Смольянинов¹

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²МГТУ

им. Н.Э. Баумана (НИУ), г. Москва

E-mail: lab37@technologiya.ru

В настоящее время оптические покрытия занимают особое место в современной мировой оптической промышленности. Невозможно представить какое бы то ни было оптическое изделие без тонкопленочного оптического покрытия, будь то линзы, объективы, окуляры, светофильтры, экраны телефонов, автомобильные, авиационные и железнодорожные стекла. С уверенностью можно утверждать, что оптические покрытия на сегодняшний день применяются абсолютно во всех сферах нашей жизни как в гражданских, так и в военных. Ключевым элементом для получения прецизионного оптического покрытия является наличие качественной системы контроля толщины наносимого покрытия. Каким бы ни было совершенным вакуумное технологическое оборудование, оснастка, пленкообразующие материалы без качественной системы контроля толщины оптического покрытия невозможно будет получить хорошее оптическое покрытие. Основная задача систем контроля толщины наносимых оптических покрытий – обеспечить получение заданного оптического покрытия с высокой точностью и позволить получать данное покрытие стабильно от процесса к процессу.

На сегодняшний день в РФ нет ни одной организации, которая бы на промышленном уровне занималась выпуском систем оптического контроля для напылительного оборудования. В то же время, на территории Российской Федерации существует ряд организаций, обладающих устаревшими вакуумными напылительными установками (типа ВУ-1А, ВУ-2М) и стоимость современной системы контроля, как правило зарубежного производства, будет соизмерима со стоимостью всей вакуумной установки. Применение подобного дорогостоящего контрольно-измерительного оборудования приводит к увеличению производственных издержек и, соответственно, к снижению конкурентоспособности выпускаемой продукции, даже несмотря на повышение ее качества. Кроме того, интеграция сложной системы контроля в технологический процесс устаревшего напылительного оборудования влечет за собой необходимость модернизации его системы управления, что в свою очередь не всегда рационально в свете выпускаемой продукции. Также эксплуатация современных систем контроля требует наличия определенных компетенций персонала. Поэтому, перед нами была поставлена задача создания отечественной системы прямого монохроматического контроля, обладающей следующими характеристиками:

- невысокая стоимость готовой системы, позволяющая повысить качество выпускаемой продукции без применения дополнительных финансовых затрат;
- простота интеграции, настройки и эксплуатации;
- высокие параметры точности и чувствительности, не уступающие, а в некоторых случаях и превосходящие значения существующих реализаций систем контроля;
- малые габаритные размеры, обеспечивающие простоту установки на производственном оборудовании;
- универсальность.

В данной работе представлены характеристики разработанной системы монохроматического контроля. Конструкция ключевого элемента системы – монохроматора создана на основе узкополосного интерференционного (рис. 1).

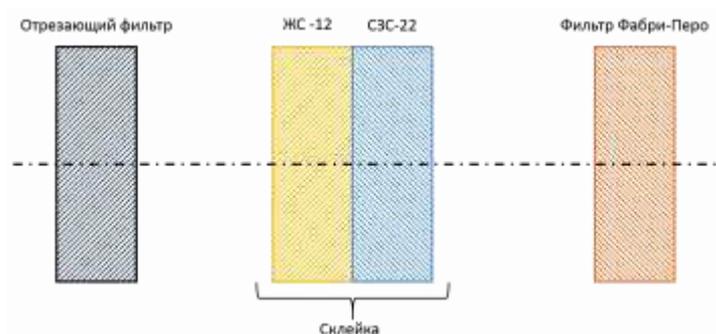


Рис. 1. Структурная схема монохроматора

Данный тип систем контроля был выбран не случайно, поскольку именно системы оптического монохроматического контроля обладают наилучшими точностными характеристиками, а также имеют самую высокую чувствительность к толщине наносимого слоя покрытия. Сравнительный анализ характеристик разных типов систем контроля приведен на рисунке 2.

Контроль	Прямой Широкополосный	Прямой монохроматический	Косвенный оптический	Косвенный неоптический
Характеристика				
Диапазон работы	Видимый, ИК, УФ	Видимый, ИК, УФ	Видимый, ИК, УФ	Видимый, ИК, УФ
Минимальная толщина слоя	3 – 5 нм	1 – 2 нм	4 – 5 нм	1 – 2 нм
Воспроизводимость покрытий	76%	93%	65%	48%
Чувствительность (по пропусканию)	0,1%	0,01%	0,5%	-
Стоимость	От 2 000 000 руб.			

Рис. 2. Сравнительный анализ характеристик типов систем контроля толщины наносимых оптических покрытий

Характеристики разработанной системы следующие:

- общий спектральный коэффициент пропускания – 78%;
- спектральная ширина монохроматора – 0,8 нм;
- отношение сигнал/шум – 85 дБ;
- чувствительность системы – на уровне 0,2 нм;
- погрешность системы, не более – 0,015%.

Таким образом, спроектированная система обладает характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам. В то же время, стоимость производства подобной системыкратно ниже, а простота эксплуатации позволит без проблем внедрить устройство в любой технологический процесс без привлечения дополнительных ресурсов. Также, наличие системы контроля с подобными характеристиками позволит напылять тонкие слои (меньше 5 нм) оптической конструкции с крайне высокой точностью (на уровне $\pm 0,2$ нм), что в ближайшей перспективе позволит наносить оптические конструкции любой сложности.

Сравнительный анализ адгезии лакового покрытия к тонким плёнкам оксидов металлов

В.А. Смольянинов, Ю.О. Просовский, О.Ф. Просовский, А.Н. Исамов, А.Ю. Буднев, И.Н. Левкин

АО «ОНИИ «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: lab37@technologiya.ru

В настоящее время во многих отраслях промышленности наблюдается замещение традиционных материалов новыми. Широкое распространение нашли изделия из поликарбоната и полиметилметакрилата (ПММА). Органические стёкла, по сравнению с обычным силикатным стеклом, обладают рядом преимуществ: имеют меньший вес, более высокую ударную прочность. Термопластичность органических стёкол позволяет достаточно просто формовать сложнопрофильные изделия, а поликарбонат вообще является литьевым материалом и позволяет получать отливки оптических деталей.

Однако органическому стеклу присущ ряд недостатков. Одним из основных недостатков является низкая устойчивость к абразивному воздействию. Органические стёкла уступают силикатным стёклам по твёрдости поверхности: оргстекло более подвержено механическим повреждениям. Ввиду этого становится актуальным вопрос о модификации поверхности органических стёкол с целью её упрочнения. Одним из способов модификации поверхности является нанесение прозрачных покрытий в виде тонких плёнок оксидов веществ и специальных лаков.

Современные подходы к изделиям конструкционной и приборной оптики подразумевают применение тех или других многослойных тонкоплёночных покрытий, которые придают принципиально новые свойства изделиям из полимерных материалов.

На рисунке 1 представлен фрагмент остекления самолёта с упрочнённой поверхностью и специальными свойствами.



Рис.1. Остекление фонаря самолета с модифицированной поверхностью

Как правило, специальные свойства изделиям придают тонкоплёночные покрытия, получаемые нанесением тонких плёнок в вакууме. К материалам, широко используемым в конструкциях тонкоплёночных покрытий, относятся плёнки оксид индия-олова (ИТО) и диоксид титана (TiO_2). Плёнки ИТО интересны своей прозрачностью и электропроводностью, что позволяет на их основе создавать различные типы функциональных покрытий. Плёнки TiO_2 обладают высоким показателем преломления и позволяют создавать интерференционные структуры с широкой зоной заграждения.

В то же время интерференционные покрытия обладают очень малыми толщинами – в реальных приложениях толщины оптической конструкции составляют десятки и сотни нанометров, а также требуют применения лаковых слоёв для придания абразивной устойчивости изделиям. В реально разработанных конструкциях толщина защитного лакового

слоя составляет 5-8 мкм, что в десятки раз повышает абразивную устойчивость изделий из органического стекла.

В данном ракурсе актуальным вопросом является адгезия лакового слоя к тонкоплёночному покрытию, полученному в вакууме.

Для исследования адгезии лакового покрытия к тонким плёнкам оксидов металлов были подготовлены образцы из органического стекла с покрытиями из оксида индия-олова (ITO) и диоксида титана (TiO₂).

Для дальнейших испытаний разработано несколько вариантов трёхслойной (четырёхслойной) тонкоплёночной конструкции, при которой слои ITO и TiO₂ отделены от полимерной подложки лаковым подслоем для обеспечения высокой адгезии плёнок оксидов металлов к подложке. Структура покрытий представлена на рисунке 2.

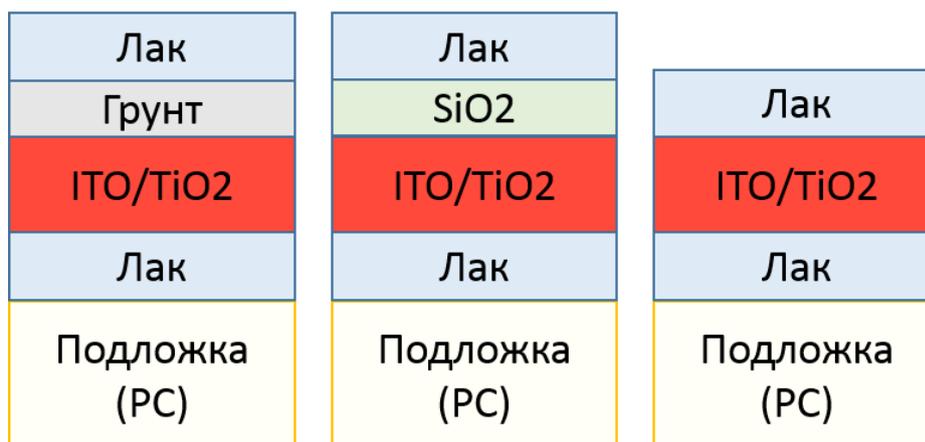


Рис. 2. Варианты структуры покрытий

Материал образцов: ПММА 8 мм, размер 100×100 мм. Исследование адгезии лакового покрытия проводилось методом решётчатых надрезов, суть которого заключалась в нанесении решётчатых надрезов на лаковое покрытие и дальнейшей оценке его состояния.

На расстоянии не менее 10 мм от края образца были нанесены режущим инструментом по линейке 6 параллельных надрезов длиной не менее 20 мм и шагом в 3 мм друг от друга. По аналогии были нанесены разрезы в перпендикулярном направлении относительно первых. В результате на поверхности исследуемых образцов были получены решётки из квадратов одинакового размера.

После нанесения решётки было произведено исследование отслоения покрытия с помощью клейкой ленты (скотча), плотно приклеенной к поверхности образца, затем удалённой резким движением.

Из всех испытанных вариантов многослойных защитных покрытий, наиболее предпочтительной является комбинация «Лак + ITO + SiO₂ + Лак», показавшая удовлетворительные результаты при исследовании и оценке адгезии лака к оксидной плёнке металла методом решётчатых надрезов (рис. 3).

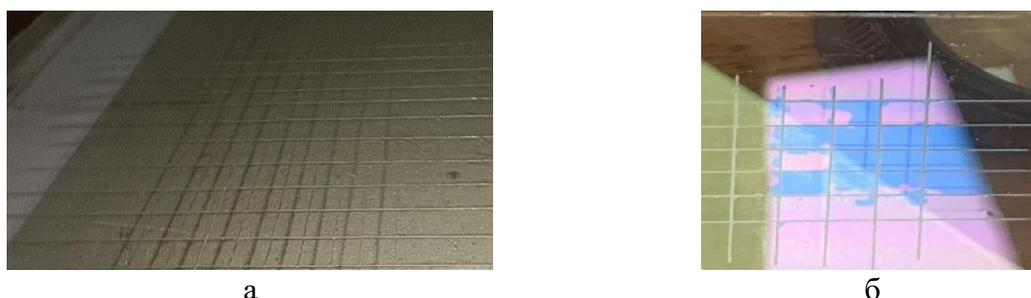


Рис. 3. Образцы с покрытием: «Лак + ITO + SiO₂ + Лак» (а), «Лак + ITO + Лак» (б)

Исследование адгезии кремнийорганического герметика «Герсиласт АК-28» к силикатному и органическому стеклу

Ф.И. Паршин, Н.А. Рукавичкин, О.В. Левкина, Д.Н. Петрачков, Е.В. Кузьмина
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: parshinfi@technologiya.ru

В мировой практике эксплуатации гражданских воздушных судов особые требования предъявляются к быстрой замене остекления кабины экипажа самолета, а именно не более 3 ч с момента остановки воздушного судна. Для выполнения данного требования крупнейшими авиастроителями используются конструкции остекления с обрамлением из герметика «CAF 5751 AXAD OFF-WHITE». Данный герметик имеет ряд технологических особенностей, а именно быстрое отверждение (5 мин после смешивания), беспористость, отсутствие эффекта памяти, повышенная адгезия к силикатному и органическому стеклу.

Для решения задачи по импортозамещению нами был применен российский герметик «Герсиласт АК-28» производства АО «ГНИИХТЭОС». На начальном этапе работ с данным герметиком были проведены комплексные исследования адгезии к силикатному и органическому стеклу. Производителем для исследования были представлены различные вариации подслоя. Вариативность в компоненте №3 осуществлялась за счет изменения его состава. Результаты исследований кратко представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследований подслоев

№	Используемый при подготовке подслоя	Адгезия к силикатному стеклу	Характер разрушения	Адгезия к органическому стеклу	Характер разрушения	Адгезия к органическому стеклу с зашкуровкой	Характер разрушения
		t_{cp} , кгс/см ²		t_{cp} , кгс/см ²		t_{cp} , кгс/см ²	
1	Без подслоя	25,3	К	7,1	А	7,4	А
2	Компонент №3/1	29,3	К	9,2	А	6,8	А
3	Компонент №3/2	29,5	К	11,4	А	29,5	К
4	Компонент №3/3	32,2	К	19,4	А+К	18,6	А
5	Компонент №3/4	29,9	К	28,4	К	32,3	К
6	1% раствор АГМ-9 в спирте	27,7	К	7,9	А	5,6	А
7	10% раствор АГМ-9 в спирте	28,5	К	6,6	А	9,0	А
8	П9 и П11	29,2	К	20,2	А+К	22,2	А+К

Характер разрушения: А – адгезивный, К – когезивный.

Выводы:

- все варианты подслоев показывают незначительное улучшение адгезии герметика к силикатному стеклу, в связи с чем необходимы дополнительные исследования по поиску подходящих подслоев, улучшающих адгезию материалов;
- выявлена необходимость обязательного нанесения подслоя на органическое стекло при нанесении герметика «Герсиласт АК-28»;
- подслои «компонент №3» и «П9 с П11» показали лучшие результаты адгезии как к силикатному стеклу, так и к органическому стеклу. Предпочтительность когезивного характера разрушения указывает на перспективность применения «компонента №3».

Силиконовые компаунды для оптики

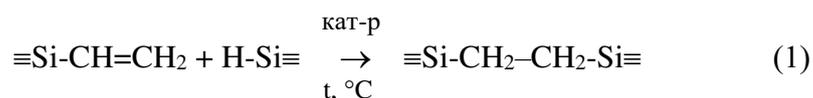
Е.И. Алексеева, И.Ю. Рускол, Е.В. Соколюк, А.А. Малахов, П.А. Стороженко
АО «ГНИИХТЭОС», г. Москва, Россия
E-mail: alekseeva@eos.ru

Силиконовые полимеры и материалы на их основе нашли широчайшее применение во всех сферах человеческой деятельности. Они используются в электронике, микроэлектронике, оптоэлектронике, электротехнике, в автомобильной и авиационной отраслях, строительной индустрии; за последние годы резко увеличилось их потребление в медицине и в качестве предметов домашнего обихода.

Для создания новых материалов, отвечающих самым сложным запросам, используются современные способы производства с привлечением нанотехнологии.

Благодаря направленному синтезу и усовершенствованным методам анализа получены компаунды с высокой оптической и химической чистотой, биологически инертные, хорошими физико-механическими и диэлектрическими характеристиками, высокой термо- и морозостойкостью.

Базовыми механизмами полимеризации, используемыми при разработке рецептур силиконовых компаундов, являются реакция полиприсоединения (1) и радикальная полимеризация под воздействием ультрафиолетового облучения (2) согласно схемам:



где R = –H или –CH

Как видно из схем, полимеризация проходит без выделения побочных продуктов, что позволяет использовать такие композиции не только как пленочные или покровные, но и как заливочные для закрытых объемов любой конфигурации.

Силиконовые материалы могут иметь в вулканизованном состоянии различное физическое состояние: от гелеобразного и эластомерного (компаунды, клеи – торговая марка «СИЭЛ») до стеклообразного (компаунды и клеи – торговая марка «СТЫК»). Эксплуатационный суммарный ресурс разработанных материалов от -90 °С до 350 °С, они обладают высокой радиационной стойкостью (например, компаунд СИЭЛ 159-275 выдерживает дозу до 10⁷ рад без существенного изменения физико-механических и оптических характеристик), хорошей масло-бензостойкостью (СИЭЛ 159-305), адгезией к таким поверхностям, как металл, стекло, керамика и пр. (когезионный отрыв). Компаунды серии СТЫК поддаются полировке и шлифовке (твердость по Бринеллю достигает 100÷120).

Оптически прозрачные силиконовые компаунды могут применяться при изготовлении светодиодов (рис. 1а), волоконных световодов (рис. 1б), триплексов, многоцветных жидкокристаллических модулей (МЖМ, рис. 2) и различных оптоэлектронных устройств (ОЭУ).

Разработанные компаунды обладают высоким светопропусканием (до 92-98% в видимом диапазоне спектра) и варьруемым показателем преломления (от 1,375 до 1,540), что очень важно при их использовании, например, в качестве промежуточных слоев в триплексах различного состава, в качестве покрытий волоконных световодов, а также просветляющих пленок для стекол с различным показателем преломления и т.п.

Следует отметить, что высокий уровень пропускания света сохраняется в условиях эксплуатации (при повышенных и пониженных температурах и влажности).

Высокочистые силиконовые компаунды указанного типа практически не содержат ионогенных примесей соединений (Na, K, Ca, Cl и др.), металлов переходной валентности (Fe, Ni, Cd и др.), а также радиоактивных соединений (U, Th и др.).

В зависимости от типа прибора или устройства разработанные силиконовые компаунды могут отверждаться при умеренных температурах – от комнатной до 160 °С – соответственно в течение от суток до 30 минут; либо под воздействием УФ-облучения различной интенсивности при комнатной температуре и продолжительности от нескольких минут до нескольких секунд. Термоотверждаемые компаунды обладают способностью к полимеризации в слоях различной толщины, в то время как УФ-отверждаемые только в тонких, не более 0,1-0,2 см. Однако УФ-отверждаемые компаунды позволяют использовать трафаретную печать и селективный метод вулканизации.

К термоотверждаемым компаундам относятся так называемые компаунды LIM / LSR (жидкие инъекционные материалы/жидкие силиконовые эластомеры). Эти материалы могут быть как прозрачными, так и окрашенными, отличаются широким диапазоном твердости от 30 до 60 по Шору А; способностью к литьевому формованию и использованию в качестве заливочных составов с высокой прочностью на разрыв и сопротивлением раздиру.

В настоящее время выпускается большая серия материалов типа СИЭЛ и СТЫК – более 50 наименований различного назначения.



Рис. 1. Применение оптически чистых силиконовых компаундов типа СИЭЛ:
а – светодиод; б – волоконный световод

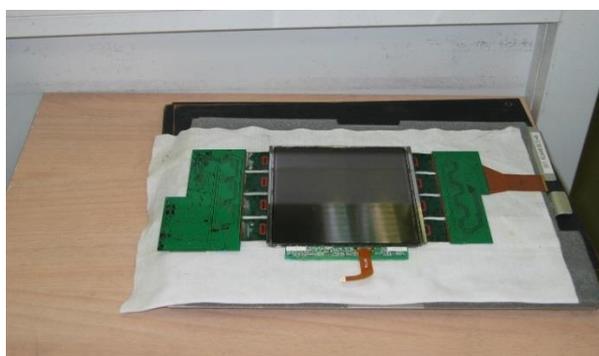


Рис. 2. Многоцветный жидкокристаллический модуль

Технологические аспекты нанесения клея МТК

Н.Р. Глембовский¹, Д.Н. Петрачков¹, Н.В. Шаталин¹, Д.А. Остролуцкий¹, П.Н. Чижов¹,
Н.В. Садкова², В.А. Роговицкий², Н.С. Скрылев²

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

²Филиал ПАО «ОАК» – «ОКБ Сухого», г. Москва, Россия

E-mail: glem341@technologiya.ru

Для наклеивания накладок из пластин листового поликарбоната на остекление ЛА разработана технология нанесения монтажного тиксотропного клея (МТК). Представлены результаты лабораторных испытаний на клеевой сдвиг при сравнении клея МТК с другими клеями и герметиками.

Клей МТК разработан АО «Композит» (г. Королев, Россия) на основе модифицированных соединений полиуретана. Его основные преимущества: малогазющий, радиационно-стойкий, холодного отверждения. Клей работоспособен в интервале температур от -196 °С до 150 °С (кратковременно до 200 °С). Клей МТК предназначен для контактного склеивания материалов с обеспечением фиксации (давление прижима) в течение от 5 до 15 мин деталей из алюминиевых сплавов, стекло- и углепластиков.

В качестве примера будет рассматриваться склейка пластины поликарбоната, в дальнейшем – накладка (толщина 3 мм, ширина 60 мм, марка LEXAN), на остекление фонаря ЛА из поликарбоната (толщина 8 мм, марка LEXAN), имеющая кривизну. Склейка производится при помощи клея МТК. На данной конструкции остекления отработана технология приклеивания накладок, обеспечивающая требования по показателям прочности (рис. 1).

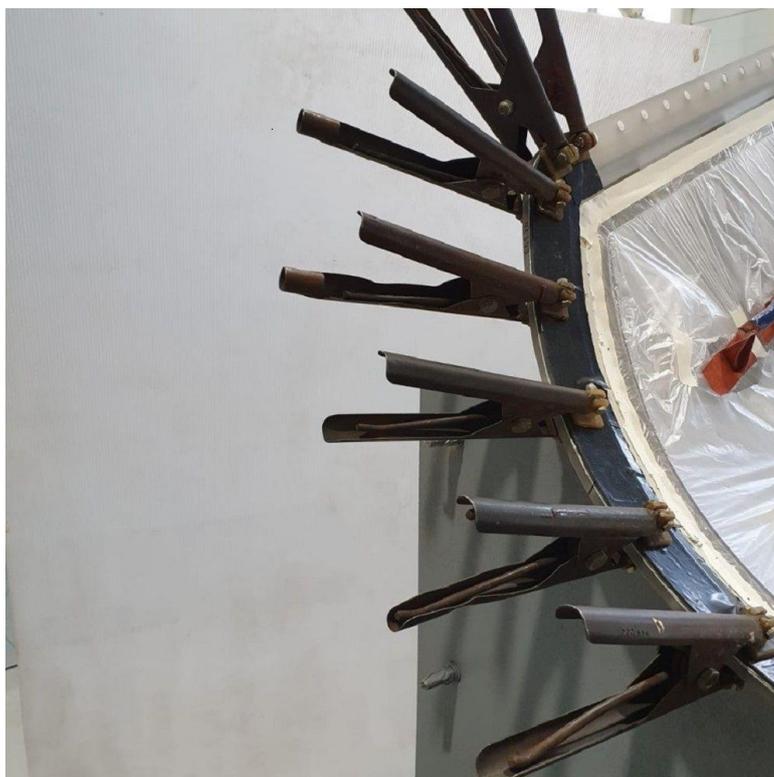


Рис. 1. Финальная стадия приклеивания накладки к остеклению

В производственном комплексе «ОКБ Сухого» были проведены испытания образцов с применением клея МТК в сравнении с клеем ПУ-2А. Клей ПУ-2А – многокомпонентный полиуретановый клей на основе полиэфира, ацетона и полиизоцианата.

Целью проведения испытаний являлась сравнительная оценка прочностных показателей

клея МТК и клея ПУ-2А при приклеивании лавсановой ленты к поликарбонату. Определялись показатели прочности при сдвиге клеевых соединений на конструктивно-подобных и стандартных образцах.

Пластины из поликарбоната для образцов были изготовлены в производственном комплексе «ОКБ Сухого» по инструкции ПИ 1.2.515-2005 ФГУП «ВИАМ».

Объекты испытаний – образцы из поликарбоната марки LEXAN 50×25×12 мм с приклеенной на клею МТК и клею ПУ-2А лавсановой лентой ЛЛТ (рис. 2). Испытания на определение условной прочности при сдвиге проводили при температурах 20, 90 и 120 °С.

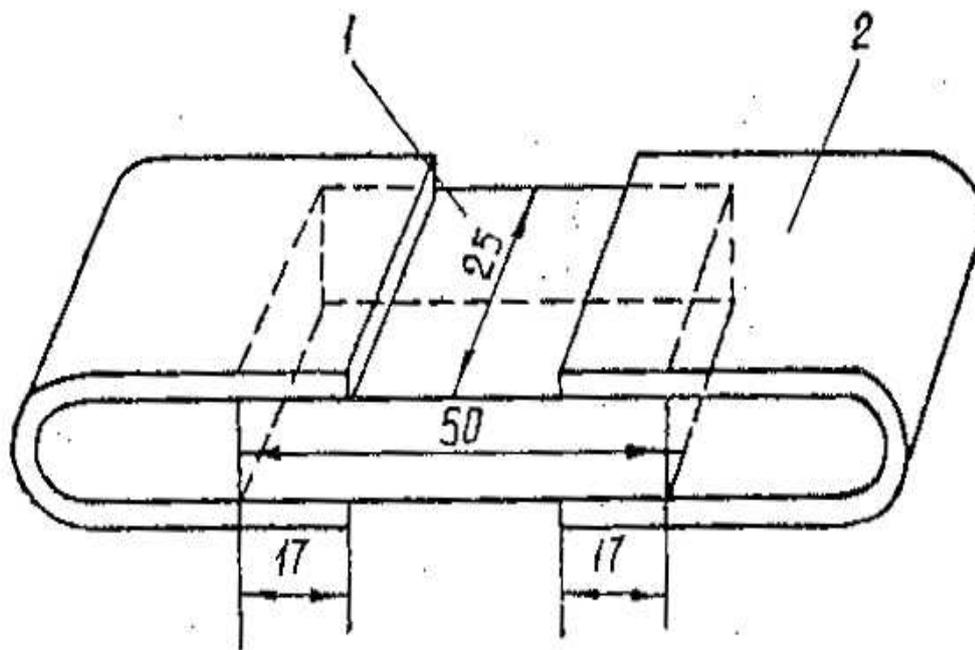


Рис. 2. Образец, склеенный из поликарбоната и лавсановой ленты, для определения условной прочности на сдвиг при растяжении: 1 – стекло, 2 – лента

Результаты испытаний образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов на определение условной прочности при сдвиге

Образцы из поликарбоната LEXAN, склеенные с лавсановой лентой	Температура испытаний, °С		
	20	90	120
	Условная прочность при сдвиге, кгс/см		
Клей МТК	138	77	40
Клей ПУ-2А	144	74	58

В клею ПУ-2А растворитель – ацетон, в клею МТК растворитель – этилацетат.

Пониженные показатели прочности клеевых соединений на образцах из поликарбоната с клеем МТК при 120 °С по сравнению с клеем ПУ-2А могли возникнуть из-за того, что растворитель этилацетат, входящий в состав клея МТК, менее агрессивный (по шкале химической активности) и выявляет меньшую первоначальную адгезионную прочность, чем ацетон, входящий в состав клея ПУ-2А. Первоначальная высокая прочность клеевых соединений с клеем ПУ-2А, обусловленная действием сильного растворителя (ацетона), может снижаться в процессе эксплуатации изделия из-за разрушения со временем структуры поликарбоната ацетоном.

В докладе рассматривались способы и приемы нанесения клея МТК, исследование клеевых соединений клея МТК и поликарбоната, сравнительный анализ с клеем ПУ-2А.

Влияние модифицирующих добавок на варочные, кристаллизационные свойства и фазовые превращения при синтезе стекол в стронцийалюмосиликатной системе

А.И. Кузьмин, М.В. Воропаева, И.А. Северенков, Ф.И. Паршин
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

Стеклокристаллические материалы на основе алюмосиликатных систем находят широкое применение в различных областях науки и техники в силу комплекса высоких теплофизических, механических и диэлектрических свойств. Однако развивающаяся техника предъявляет все более жесткие требования к этим материалам.

В последние годы делается акцент на разработку более высокотемпературных материалов, в частности, получаемых в бесщелочной стронцийалюмосиликатной системе ($\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$). В данной системе в широком поле кристаллизации образуется основная кристаллическая фаза, стронциевый анортит и твердые растворы на его основе с высокими температурами плавления.

Стеклокристаллические материалы на основе Sr-анортита обладают высокой прочностью и имеют низкое значение диэлектрической проницаемости, стабильное в широком интервале температур. Однако, получение ситаллообразующих стекол в этой системе связано с технологическими трудностями, связанными с высокими температурами варки стекла. Одним из возможных путей улучшения технологичности является модифицирование составов функциональными добавками, не приводящее к существенному изменению фазового состава и как следствие, к изменению основных свойств конечного стеклокристаллического материала.

В настоящей работе был проведен синтез стекол в системе $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. В качестве добавок использовались ZnO , CaF_2 , ZrO_2 , BaO . Варка стекол осуществлялась в лабораторной электропечи сопротивления в корундовых тиглях емкостью 250 мл. Готовую стекломассу выработывали в пластины и диски, а затем проводили их отжиг.

Наилучший результат был достигнут при использовании комбинированной добавки CaF_2 и ZnO , а также добавки BaO . Составы обладали хорошими варочными свойствами, а при выработке стекол отсутствовала кристаллизация. В свою очередь экспериментальные составы, содержащие ZrO_2 , имели высокую вязкость стекломассы, а также были склонны к частичной кристаллизации при выработке.

Кристаллизационную способность стекол изучали методом массовой кристаллизации. При воздействии температуры стекла подвергаются глубоким структурным изменениям, визуально сопровождающимся опалесценцией, переходящей по мере повышения температуры в кристаллизацию с получением материала белого цвета. Фазовый состав образцов материала после массовой кристаллизации был определен с помощью метода рентгенофазового анализа (РФА). Основной кристаллической фазой всех исследуемых образцов является алюмосиликат стронция, представляющий твердый раствор моноклинной структуры (стронциевый анортит), также присутствует титанат алюминия (тиалит) и рутил. По результатам РФА видно, что функциональные добавки не оказывают влияния на фазовый состав ситаллов, и фазы, отличные от фаз модифицируемого состава, не образуются.

Для изучения влияния функциональных добавок на характеристические температуры синтезированных стекол были проведены исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

В результате проведенных экспериментальных синтезов было показано, что наибольший интерес для дальнейшей работы представляют составы, содержащие в качестве модифицирующих добавок CaF_2 и ZnO , а также добавки BaO .

Секция IV

**УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ И
ИНФОРМАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

Государственная поддержка деятельности государственных научных центров Российской Федерации

О.В. Коваль¹, О.Н. Комиссар¹, Е.А. Алешина²

¹АО «ОНИП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²АГНЦ «Наука», г. Москва, Россия

E-mail: kovalov@technologiya.ru

Институт государственных научных центров Российской Федерации (ГНЦ РФ) был образован более 30 лет назад в связи с выходом Указа Президента Российской Федерации от 22.06.1993 № 939 «О государственных научных центрах Российской Федерации». За этот период ГНЦ РФ, как центры компетенций по созданию опережающего научно-технического задела внесли значительный вклад в развитие национальной инновационной системы страны.

Сегодня ГНЦ РФ являются значимым элементом национальной системы науки и технологий, в ряде случаев – выполняют роль системообразующих объектов научной инфраструктуры для развития новых технологий. Актуальность и значимость системы ГНЦ РФ подтверждает новый Указ Президента Российской Федерации В.В. Путина от 12.08.2022 № 546 «О государственных научных центрах», направленный на оптимизацию и совершенствование механизмов работы ГНЦ РФ, а также на совершенствование нормативно-правовой базы, регулирующей их деятельность, в соответствии с современными условиями и потребностями государственного сектора науки.

Роль системы ГНЦ РФ еще более усилилась в свете следующих важнейших стратегических документов: Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»; Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».

Не вызывает сомнения, что ГНЦ РФ являются основой обеспечения суверенитета Российской Федерации в технологической сфере, поскольку именно они способны быстро и эффективно создавать и применять наукоемкие технологии, критически важные для обеспечения независимости и конкурентоспособности государства.

На данный момент система ГНЦ РФ объединяет 45 ведущих научных организаций, функционирующих во всех стратегически значимых сферах деятельности общества и государства: Авиация и космос; Медицина и биотехнологии; Метеорология и гидрология; Метрология; Судостроение и транспорт; Химия и материаловедение; Электроника и приборостроение; Электротехника, робототехника и машиностроение; Ядерная физика и технологии.

Анализ деятельности ГНЦ РФ, проведенный с использованием материалов Базы данных, содержащей сведения об оценке и о мониторинге результативности деятельности научных организаций, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы гражданского назначения (<http://www.sciencemon.ru>), а также сведений Федеральной службы государственной статистики (<http://www.rosstat.gov.ru>) полностью подтверждает весомый вклад данных научных организаций в реализацию научно-технологического развития страны по всем приоритетным направлениям.

Так, например, ГНЦ РФ участвуют в реализации всех семи приоритетов научно-технологического развития, сформулированных в Стратегии технологического развития Российской Федерации. Кроме того, ГНЦ РФ выполняют научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по всем приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации и ведут работы по 26 из 27 критических технологий, содержащимся в Перечне критических технологий Российской Федерации.

Кроме того, ГНЦ РФ, выполняют научные исследования и разработки в рамках важнейших государственных программ и проектов полного инновационного цикла, участвуют

в национальном проекте «Наука и университеты», а также являются участниками научно-образовательных центров мирового уровня, центров компетенций Национальной технологической инициативы, центров трансфера технологий, выполняют работы в рамках государственного оборонного заказа. ГНЦ РФ обеспечивают функционирование 20 центров коллективного пользования научным оборудованием, успешно ведут прогнозно-аналитическую и экспертную деятельность, подготовку научных кадров высшей квалификации, активно внедряют результаты своей интеллектуальной деятельности (РИД) в гражданский оборот. 26 из 44 ГНЦ РФ входят в перечень системообразующих предприятий российской экономики, 31 из 44 ГНЦ РФ включены в сводный реестр организаций оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации, 18 из 44 ГНЦ РФ включены в перечень стратегических предприятий и организаций России.

ГНЦ РФ для реализации своих функций и решения важнейших государственных стратегических задач самостоятельно содержат большие площади земельных участков, а также сохраняют и поддерживают на современном уровне свою уникальную экспериментальную, стендовую и полигонную базу, что требует больших финансовых затрат в условиях дефицита собственных оборотных средств.

В настоящее время в отношении ГНЦ РФ действуют следующие преференции:

– освобождение от налогообложения имущества в соответствии со статьей 381 Налогового кодекса Российской Федерации;

– освобождение от налогообложения в отношении земельных участков, используемых ГНЦ РФ, находящихся в Москве, в целях научной деятельности в соответствии с Законом города Москвы от 24.11.2004 № 74.

Несмотря на то, что Правительству Российской Федерации Указом Президента РФ от 12.08.2022 № 546 «О государственных научных центрах Российской Федерации» в 3-месячный срок было поручено определить меры государственной поддержки ГНЦ РФ при осуществлении ими научной и (или) научно-технической деятельности в интересах развития отраслей экономики, новых мер поддержки до сегодняшнего дня принято не было.

Ассоциацией государственных научных центров «НАУКА» при поддержке экспертов ГНЦ РФ были разработаны предложения по расширению мер поддержки ГНЦ РФ, в том числе: прямое бюджетное финансирование проведения ГНЦ РФ опытно-технологических работ, выполняемых по согласованным с представителями отраслей промышленности программам развития; прямое бюджетное финансирование содержания и обслуживания объектов уникальной экспериментальной, стендовой и полигонной базы, используемых ГНЦ РФ для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; прямое бюджетное финансирование работ по разработке прогноза научно-технологического развития и отраслевых документов стратегического планирования Российской Федерации; полное освобождение всех ГНЦ РФ от уплаты налога на землю и др.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. ГНЦ РФ – ключевые организации отраслевой науки – центры компетенций мирового уровня, обладающие уникальной научно-экспериментальной базой и высококвалифицированными кадрами, которые способны осуществлять наукоемкие разработки и эффективно их внедрять в серийное производство в кратчайшие сроки за счет постоянного создания опережающего научно-технического задела по всем приоритетным направлениям развития науки, техники и критическим технологиям Российской Федерации.

2. Необходимо принять дополнительные меры государственной поддержки ГНЦ РФ – уникальных научно-технологических комплексов, вносящих весомый вклад в обеспечение национальной безопасности и технологического суверенитета страны, что позволит повысить эффективность реализации функций ГНЦ РФ, убрать барьеры для трансфера технологий и значительно увеличить масштабы внедрения высокотехнологичной продукции в серийное производство, а значит снизить угрозы технологическому суверенитету и безопасности Российской Федерации.

Обобщенная публикационная активность и воспроизводство кадров высшей квалификации

С.В. Баушев¹, А.Г. Сайбель¹, **В.В. Ермакович²**

¹АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург, Россия; ²КНВШ, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ermakovich_nika@hotmail.com

Наука представляет собой систему знаний, агрегированных в форме книг, статей и отчетной научно-технической документации, а также распределенных среди научных работников и реже – случайных обладателей. Функцией науки является формирование актуальной системы общественно полезных знаний. Структурно наука оформлена в виде научных организаций, различающихся профилем и методами исследований, существенной частью которых являются техническое оснащение и коллекции артефактов. Объектами науки являются: природа, техника, общество, знания и модели, которые изучаются как в статике, так и в динамике, а также во взаимодействии.

Если представить совокупные знания в виде лепестковой диаграммы, каждый лепесток которой соответствует научному направлению, то результативность научных исследований может быть оценена величиной прироста площади диаграммы. Вместе с тем, такой подход не учитывает прикладной значимости науки. Поэтому результативность исследований необходимо оценивать с учетом их актуальности, соблюдая баланс между сиюминутными и перспективными потребностями общества.

Технология научных исследований может быть декомпозирована на этапы: добывание информации, сбор и систематизация, обработка, хранение и доведение до потребителя. Первый этап осуществляется из двух источников: наблюдения за окружающим миром и литературные источники. Основной сложностью второго этапа является объем и разнородность знаний, что влечет необходимость создания системы структурированных хранилищ и обучения научных работников работе с информацией. Отдельным вопросом является систематизированное хранение противоречивых (в ряде случаев взаимоисключающих) знаний. Обработка и обмен знаниями преимущественно осуществляется через публикации. На современном уровне поиск информации в периодической и событийной печати затруднен ее обилием, что влечет необходимость разработки мер по развитию данного направления научной деятельности.

Потенциальная возможность управления наукой существует при наличии двух предпосылок. Первая из них – это понимание состояния системы знаний, которое требуется иметь к определенному сроку. Вторая – наличие состоятельной оценки текущего состояния системы знаний. Тогда может быть сформирован вектор усилий, переводящих систему знаний из текущего состояния в требуемое. Для успешного функционирования науки необходимо наличие: цели, мотивированных квалифицированных исполнителей, всестороннего обеспечения деятельности (материально-технического, методического, информационного), системы управления и контроля.

Важным инструментом стимулирования исследований являются грантовые программы, осуществляемые в двух вариантах: поддержка исследований, представленных на конкурс, и проведения конкурса на лучшее решение поставленной задачи.

Ключевым элементом всей науки являются кадры. Во-первых, их надо найти и заманить в науку, например, путем организационных решений, позволяющих двигаться по карьерной лестнице только высококвалифицированным специалистам. Во-вторых, их надо научить работать, в том числе писать статьи. Здесь им надо помочь, в том числе с выбором моделей и математического аппарата для выполнения исследований. Необходимо делать не обладателя диплома кандидата наук, а самого кандидата наук, знающего свою отрасль науки через кандидатский минимум, умеющего ставить и решать сложные инженерно-технические задачи на современном научном уровне, без обязательной привязки к модным течениям.

Система мотивации научной деятельности на инновационном предприятии

Н.И. Ершова, Н.В. Горбунова, О.Н. Комиссар, О.А. Кирилец
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: ershovani@technologiya.ru

Материальное стимулирование за ученую степень кандидатов и докторов наук является важным аспектом в системе управления научным персоналом и одним из главных факторов повышения производительности труда. Мотивированные работники работают более продуктивно, они более склонны к самореализации, поиску новых идей, достижению результата. В любой организации существуют профессиональные группы с различным характером деятельности, в которых научный персонал занимает особое место. Создание успешно функционирующей системы мотивации является достаточно сложной задачей, стоящей перед руководством организации, особенно если вопросы стимулирования направлены на развитие научной деятельности.

Целью работы является исследование факторов, мотивирующих сотрудников, занятых в научной сфере, на выполнение своей трудовой деятельности, повышение результативности этой деятельности и разработка эффективной мотивационной системы для данной категории персонала.

Для достижения поставленной цели были использованы как обзорный теоретический, так и экспериментальный системный подход к проведению исследования (анализ документов, методы экспертного опроса и экспертной оценки, анализа присланных замечаний). В рамках теоретического исследования был проведен анализ работ российских и зарубежных авторов по проблемам мотивации персонала и внедрения различных систем стимулирования. Эмпирической базой исследования являются законодательные акты Российской Федерации в сфере науки и научно-технической деятельности, положения и нормы государственной корпорации «Ростех», локальные нормативно-правовые акты организаций, осуществляющих научные исследования и разработки, экономические и правовые основы оплаты труда научных сотрудников.

Обоснована необходимость и целесообразность совершенствования оплаты научного труда путем внедрения системы мотивации на основе ключевых показателей эффективности (КПЭ), отражающих реальные результаты научных достижений персонала. Система мотивации на основе КПЭ, или KPI (Key Performance Indicator) – это возможность установить четкие критерии для получения работниками вознаграждения, определения результатов деятельности – мотивация на результат. Рассмотрены три основных этапа разработки системы мотивации.

Первый этап предусматривает анализ текущей ситуации. Анализируются показатели, которые будут оказывать влияние на успех и эффективность ее функционирования. После анализа определены ближайшие цели, выраженные в конкретных показателях.

На втором этапе осуществляются расчеты, учитывающие все финансовые ресурсы, которые планируется инвестировать в персонал в ближайшем году.

Третий этап предполагает непосредственно разработку мотивационной системы и ее внедрение.

Система мотивации создается в соответствии с задачами того или иного направления в структуре организации. Разработанная пробная система мотивации официально внедряется и доводится до сведения сотрудников.

В рамках данного исследования представлен созданный и внедренный порядок установления надбавок за достижения в научной деятельности.

В основе подхода, разработанного в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», государственном научном центре Российской Федерации, лежит система КПЭ для оценки деятельности работников, имеющих ученые степени, с элементами вознаграждения,

заложенными в рекомендациях Госкорпорации «Ростех» по формированию системы мотивации и управления результативностью работников. Этот подход к поощрению научных работников является дополнительным стимулом в системе оплаты труда, существующим помимо основного вида премирования за полученный результат.

В разработанном локальном нормативном акте предусматривается следующая двухуровневая система стимулирования:

1. Разовое поощрение за присуждение ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук. Работникам предприятия, успешно защитившим диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук или на соискание ученой степени доктора наук по теме, соответствующей видам научной и научно-технической деятельности предприятия, выплачивается единовременное вознаграждение в размере, пропорциональном среднемесячному заработку работника предприятия.

2. Ежемесячное поощрение за достижения в научной деятельности путем установления надбавки на определенный срок. Установление надбавок за достижения в научной деятельности учитывает индивидуальный вклад каждого работника в соответствующее направление деятельности предприятия. Размеры надбавок дифференцируются в зависимости от качественных и количественных показателей эффективности научной и научно-технической деятельности, оценка которых производится по соответствующим разработанным критериям объективного характера. Перечень показателей эффективности для оценки научных достижений учитывает специфику научной деятельности разных категорий научного персонала. Надбавка устанавливается в % к окладу, ее фактический размер зависит от активности работника и результативности его работы. Отчетный период составляет 2 года.

Ключевые показатели эффективности утверждаются Президиумом Ученого совета, в состав которого входят ведущие ученые и руководители научно-производственных направлений. Размер надбавки может составить до 30% должностного оклада работника.

В результате проведенного анализа разработанной системы мотивации на основе КПЭ можно сделать следующие выводы:

1. Внедрение новой системы мотивации привело к повышению престижа научных профессий, тем самым увеличив привлекательность науки как сферы для профессиональной реализации квалифицированных кадров.

2. Отмечено существенное повышение показателей научной деятельности – повышение публикационной активности, рост числа сотрудников с ученой степенью, участия в научных мероприятиях, и т.д. Данные показатели, в свою очередь, обеспечивают сохранение за предприятием статуса государственного научного центра Российской Федерации.

3. Разработанные меры стимулирования обеспечивают цикл непрерывной подготовки специалистов высокой квалификации, способствуют их карьерному росту и развитию научного потенциала страны в области фундаментальных и прикладных исследований.

4. Стимулирование научной деятельности, генерации знаний, перевода этих знаний в наукоемкий товар является также конкурентным преимуществом предприятия. Результаты исследований и разработок реализуются в важнейших инновационных проектах, в том числе государственной значимости.

5. Принципы мотивации научного труда соответствуют организационной культуре, встраиваются в общекорпоративную систему управления персоналом, в том числе в методологическую основу системы оплаты труда научного сотрудника. Проведенный авторами анализ показал, что использование количественных показателей результативности научного труда позволяет рационально сбалансировать уровни стимулирования для различных должностей, охватывать все уровни компании, все должности и иметь единые принципы построения для всех.

Управление интеллектуальной собственностью в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

И.А. Дудов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: dudov@technologiya.ru

Сегодня, в условиях обострившейся международной обстановки и беспрецедентных экономических санкций, введенных западными государствами в отношении России, ускоренное научно-техническое развитие и оперативное внедрение его результатов в промышленное производство как в оборонной, так и в гражданской сферах приобретают критически важное значение.

В процессе научных исследований, конструкторских и технологических разработок создаются охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД) – объекты интеллектуальной собственности.

Управление интеллектуальной собственностью является важнейшим инструментом обеспечения конкурентных преимуществ для организации, и, в первую очередь, легальной монополии на изготовление продукции.

Система управления правами на результаты интеллектуальной деятельности (СУ РИД) в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина» (Предприятие) функционирует в соответствии с требованиями закона и нормативных актов Государственной корпорации «Ростех» (Корпорация) с учётом специфики Предприятия и базируется на многолетнем опыте работы в сфере интеллектуальной собственности. Основными задачами СУ РИД являются следующие:

- выявление охраноспособных РИД;
- обеспечение правовой охраны РИД, в том числе поддержания охранных документов в силе;
- организация учёта РИД и исключительных прав на них (управленческого, бухгалтерского, налогового);
- урегулирование отношений с авторами РИД, в том числе организация материального стимулирования изобретательской деятельности;
- исследование патентной чистоты продукции, а также реализация других мероприятий, направленных на идентификацию и минимизацию рисков в сфере интеллектуальной собственности;
- обеспечение коммерциализации РИД;
- защита интеллектуальных прав Предприятия, в том числе в судебном порядке.

Основными видами РИД, создаваемых в процессе научно-производственной деятельности Предприятия, являются изобретения, полезные модели и секреты производства (ноу-хау). Объектами правовой охраны выступают технологии (59%), конструкции изделий (36%) и материалы (5%).

В целях регламентации бизнес-процессов, реализуемых в рамках СУ РИД, на Предприятии утверждены и действуют 23 локальных нормативных акта, в том числе разработанных в соответствии с приказом Корпорации от 18.12.2015 № 234 «О создании системы типовых стандартов (правовых актов) по управлению правами на результаты интеллектуальной деятельности в организациях Государственной корпорации «Ростех».

Первичным звеном СУ РИД Предприятия являются профильные структурные подразделения – лаборатории, отделы, цеха, сотрудники которых своим творческим трудом создают охраноспособные РИД и в работе которых используются эти результаты в дальнейшем.

По факту создания РИД авторы оформляют и подают уведомление на имя руководителя Предприятия, который, в свою очередь, в зависимости от тематики РИД направляет его на

рассмотрение одного из четырёх коллегиальных экспертных органов – научно-технических советов научно-производственных комплексов (НТС НПК).

Проанализировав представленное вместе с уведомлением описание созданного технического решения, НТС НПК определяет целесообразность и рекомендуемую форму правовой охраны РИД, что отражается в протоколе заседания. После этого комплект первичных материалов по созданному РИД направляется в юридическую службу для оформления его правовой охраны.

В структуре юридической службы сформировано направление интеллектуальной собственности, выполняющее ключевые функции в сфере управления правами на РИД, в том числе обеспечение правовой охраны РИД и координацию в рамках СУ РИД. Руководитель направления интеллектуальной собственности юридической службы является членом Экспертного совета при Комитете по управлению нематериальными активами Корпорации, а также НТС Предприятия.

Реализация отдельных функций и задач в области управления правами на РИД возложена на структурные подразделения, к компетенции которых относятся вопросы экономики и финансов, бухгалтерского и налогового учёта, безопасности, развития науки и инноваций.

В целях стимулирования изобретательской активности работников на Предприятии выплачиваются вознаграждения за создание и использование объектов патентного права (ВЗС и ВЗИ соответственно).

ВЗС выплачивается одновременно по факту получения патента на РИД. Базовой единицей для расчёта ВЗС является минимальный размер оплаты труда в Российской Федерации (МРОТ).

ВЗИ рассчитывается и выплачивается ежегодно. Размер ВЗИ определяется как произведение нескольких показателей: базовой ставки, рассчитываемой на основании МРОТ; количества авторов; коэффициента-регулятора, определяемого исходя из объёма реализации соответствующей продукции в денежном выражении; коэффициента старения.

Высокая изобретательская активность работников Предприятия (в среднем 46 заявок на изобретения и полезные модели ежегодно за последние 3 года) свидетельствует об эффективности реализуемых мер материального стимулирования.

По состоянию на август 2024 года Предприятие является правообладателем 463 изобретений, 7 полезных моделей, 28 секретов производства (ноу-хау). Авторами указанных РИД выступают 420 человек – действующих и бывших работников Предприятия, а также небольшое число соавторов из смежных организаций.

Всего за период существования Предприятия получено более 1700 авторских свидетельств СССР и патентов Российской Федерации, что подтверждает мировую новизну и высокий научно-технический уровень разработок на каждом этапе развития Предприятия. Первый охраняемый документ на изобретение был выдан Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете министров СССР 03 июля 1967 года.

На сегодняшний день 15% охраняемых РИД Предприятия используются в производстве, 85% – это опережающий научный задел.

Доля выручки от реализации продукции, при изготовлении которой использованы РИД, в общей выручке Предприятия за 2023 год составляет 48%.

В соответствии с отчётом о результатах мониторинга функционирования СУ РИД за 2023 год в организациях Корпорации, подготовленным АО «РТ-Интеллектэкспорт», Предприятие занимает лидирующие позиции среди организаций Корпорации по количеству полученных патентов в 2023 году (4-е место) и количеству действующих патентов (5-е место).

За успешную изобретательскую деятельность 2 действующим работникам Предприятия присвоено звание «Почётный изобретатель Российской Федерации», 3 работника награждены Почётным знаком Федеральной службы по интеллектуальной собственности, 4 работника – дипломами Федеральной службы по интеллектуальной собственности.

Опыт актуализации информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 4 «Производство керамических изделий»

М.А. Вартамян

РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

E-mail: marivartanyan@mail.ru

Как в России, так и за рубежом производство керамических изделий отнесено к числу ресурсоемких отраслей промышленности, предприятия которых обязаны соответствовать требованиям наилучших доступных технологий (НДТ) и получать комплексные экологические разрешения. В российских информационно-технических справочниках (ИТС) по НДТ, которые являются документами национальной системы стандартизации, приводятся результаты сравнительного анализа достигнутых промышленными предприятиями результатов по трем группам показателей – ресурсоемкости, углеродоемкости и эмиссиям загрязняющих веществ, а также устанавливаются соответствующие отраслевые требования.

В 2023 году была реализована плановая актуализация ИТС 4 «Производство керамических изделий» (утвержден приказом Росстандарта от 27.12.2023 № 2807), процесс актуализации ИТС был организован на площадке российского Бюро НТД. Состав технической рабочей группы (ТРГ) 4-2023 «Производство керамических изделий» был утвержден приказом Минпромторга России от 23.01.2023 № 164, в него вошли 7 представителей промышленных предприятий, отраслевых ассоциаций; 9 представителей профильных научных и учебных институтов; 6 представителей экологических организаций, надзорных органов, федеральных органов исполнительной власти. По сравнению с редакцией 2015 года структура справочника не получила существенных отличий. Наибольшие изменения внесены в область применения справочника: была уточнена формулировка вида хозяйственной деятельности «Производство керамики технического назначения, в том числе керамических изоляторов» и по инициативе предприятий добавлен новый вид деятельности «Производство керамических пропантов». Производство технической керамики в рамках ИТС 4 обсуждается, прежде всего, на примере производств фарфоровых изоляторов и керамических электронагревателей, при активном участии производителей иных видов керамической продукции специального назначения.

Выявленные НДТ в актуализированной версии ИТС 4 сгруппированы по нескольким основным категориям («Общие методы», «Повышение энергоэффективности» (ЭЭ), «Повышение ресурсной эффективности» (РЭ), методы снижения воздействия на окружающую среду), установлены границы их применимости. Показано, что в производстве технической керамики неприменимы такие НДТ, как «Оптимизация заготовок (формы и размеров)» (ЭЭ), а также «Использование отходов в качестве вторичного сырья» и «Использование брака полуфабрикатов / изделий в других отраслях» (РЭ).

В актуализированной версии справочника уточнен перечень маркерных веществ и скорректированы величины технологических показателей выбросов (ТПВ) и показатели энергетической эффективности по подотраслям. Для производства технической керамики (на примере производства керамических изоляторов) специализированные ТПВ не обсуждаются; принято удельное потребление энергии ≤ 25 ГДж/т продукции. Вновь установленные значения ТПВ будут обязательными для достижения предприятиями, соответствующий приказ Минприроды России находится в стадии разработки.

В актуализированной версии справочника впервые введены индикативные показатели удельных выбросов парниковых газов (ПГ) при производстве керамических изделий. Национальный бенчмаркинг для отрасли выполнен с учетом требований ГОСТ Р 113.00.11-2022. При проведении бенчмаркинга количественная оценка удельных выбросов ПГ выполнялась для основного производственного процесса по данным производства керамического кирпича и камня.

Технологические процессы, включенные в границы расчета удельных выбросов ПГ от производственных процессов (производств):

а) включены все процессы, прямо или косвенно связанные с производственными процессами (подготовка сырья; смешивание компонентов; формование и придание формы изделиям; сушка изделий; обжиг изделий; обработка изделий; сортировка, упаковка изделий; очистка дымовых газов);

б) не учитываются выбросы диоксида углерода (CO₂) в процессах добычи сырьевых материалов и топлива, а также при их транспортировке.

В справочнике подробно рассмотрена методология расчета выбросов ПГ в производстве керамических изделий. Особое внимание уделено методическим подходам к количественной оценке и основным направлениям снижения выбросов, а также критериям установления индикативных показателей удельных выбросов ПГ. К основным технологиям, обеспечивающим декарбонизацию предприятий керамической промышленности, отнесены:

- модернизация действующих производств с внедрением наилучших доступных технологий;

- повышение ресурсной эффективности (контроль за уровнем потребления (дематериализация, достаточность);

- снижение содержания углерода в исходном сырье;

- повышение эффективности использования керамических изделий;

- повышение энергетической эффективности (за счет перехода на новые технологии обжига);

- реструктуризация топливного баланса;

- вовлечение вторичных ресурсов, вторичного сырья в хозяйственный оборот в качестве сырьевых компонентов;

- электрификация используемой электрической и тепловой энергии;

- использование альтернативных видов энергии и топлива, включая биомассу, геотермальную энергию (тепловые насосы), «зеленый» водород;

- внедрение технологий улавливания и хранения углерода (CCUS).

В контексте повышения энерго- и ресурсоэффективности с предприятиями, принявшими участие в работе над справочником, широко обсуждались и были впервые включены в число НДТ системы менеджмента бережливого производства (НДТ 1.3). Определено, что НДТ заключается во внедрении и соблюдении системы менеджмента бережливого производства (СМБП, lean production), которая включает в себя, в зависимости от конкретных обстоятельств, меры, представленные в разделе 4.2.1.6 актуализированной версии ИТС 4-2023. Наибольший интерес СМБП представляют для предприятий по производству технической керамики, которые отличает:

- крайняя специфичность производимых операций и, как следствие, большое количество уникальных инструментов, оснастки, оборудования и станков;

- сложная структура управления и контроля, обусловленная разными графиками работ, широким спектром выполняемых операций и жесткими требованиями отдела технического контроля.

Достигнутый природоохранный эффект выражается, прежде всего, в уменьшении количества образующихся твердых производственных отходов за счет уменьшения брака заготовок и изделий на всех технологических переделах. Также сокращается доля бракованных изделий, поступающих на тепловую обработку (операции сушки и обжига), что дает возможность уменьшить удельное потребление энергии и снизить величину удельных выбросов газообразных веществ.

Представители промышленности в составе ТРГ внесли весомый вклад в работу над справочником. Представляется очень важным более широкое участие в совершенствовании ИТС предприятий по производству именно технической керамики, в силу разнообразия применяемых на таких производствах подходов к повышению ресурсной эффективности.

Подготовка специалистов по направлению «Сверхвысокочастотные системы»

А.В. Гусинский, Н.А. Певнева

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: peuneva@bsuir.by

Освоение все более высокочастотных диапазонов спектра электромагнитных колебаний дает возможность увеличения скоростей передачи информации по беспроводным каналам связи, а также открывает новые возможности практического применения сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в самых разных отраслях науки и техники: медицине, дефектоскопии, материаловедении, радиолокации, телекоммуникациях и т.д., а также в технике специального назначения. Развитие СВЧ-техники требует одновременного развития средств измерений СВЧ-диапазона и их метрологического обеспечения, что является в том числе одним из компонентов метрологической безопасности государства. На протяжении последних лет в вышеуказанных областях ведутся интенсивные исследования, приводящие к созданию новой техники и технологий, необходимость освоения которых диктуется в первую очередь требованиями обеспечения конкурентоспособности экономики.

В сфере деятельности специалистов входит разработка и эксплуатация систем и технологий СВЧ-техники и измерительных систем, включая системы дистанционного зондирования, используемых для получения различной информации о большом количестве разнообразных объектов, которые находят все более широкое применение в производственно-хозяйственной инфраструктуре.

Промышленность, использующая СВЧ-методы обработки материалов и диагностики, заинтересована в данных специалистах, которые будут владеть соответствующими технологиями, а также уметь эксплуатировать сложные автоматизированные информационно-измерительные комплексы производственного назначения.

В медицинской технике СВЧ-технологии являются основой быстрой и качественной диагностики ряда заболеваний и их лечения. Знания и навыки, полученные специалистами данной специальности, позволят им развивать методы и эксплуатировать системы диагностики в медицине.

Особо важной является возможность создания инженерами предлагаемой специальности радиолокационных систем наблюдения за аэродинамическими и баллистическими объектами, систем слежения за летательными аппаратами, определения расстояния до удаленных объектов и установления их координат, а также создания и эксплуатации информационно-измерительных систем различного назначения и их компонентов, таких как датчиков для контроля различных физических величин с применением СВЧ-техники, что определяет необходимость подготовки высококвалифицированных специалистов соответствующего профиля. Важной областью деятельности специалистов данного профиля является разработка изделий радиолокационного зондирования самого разного назначения.

Специалисты в области СВЧ-систем будут также востребованы на предприятиях и в организациях, создающих и эксплуатирующих соответствующие средства измерений, а также занимающихся их метрологическим обеспечением.

Выпускники данной специальности будут работать на инженерных должностях на научно-производственных предприятиях, занимаясь разработкой и проектированием новых систем СВЧ-техники и измерительной техники, новых методов построения информационно-измерительных систем и СВЧ-систем, обеспечивающих функционирование беспроводных телекоммуникационных сетей нового поколения, разработкой и эксплуатацией соответствующего оборудования.

Система управления подготовкой научных работ на соискание ученой степени кандидата наук

Н.И. Ершова, О.Н. Комиссар

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: ershovani@technologiya.ru

Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина – центр компетенций России в области создания наукоемкой, высокотехнологичной продукции из неметаллических материалов для авиационной, ракетно-космической техники, транспорта.

С 1994 года предприятие носит статус Государственного научного центра Российской Федерации. Основу ГНЦ РФ ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина составляют 812 человек, занимающихся исследованиями и разработками (исследователи, техники, вспомогательный персонал), их доля составляет 28% от общего количества сотрудников. Доля исследователей в общей численности работников, занятых исследованиями и разработками – 53%. Численность исследователей в возрасте до 39 лет – 46%.

Одним из главных факторов успешного функционирования научных организаций является наличие в них конкурентоспособных на международной арене высококвалифицированных кадров научной среды.

Несмотря на наметившиеся в последнее время тенденции к усилению роли науки в обществе и принимаемые на государственном уровне соответствующие меры, в системе подготовки кадров высшей квалификации существует группа проблем. Часть проблем является следствием тяжелейшего экономического кризиса 90-х годов, который привел к нарастанию разрыва между разными поколениями исследователей; падению престижа научного труда в России; старению научно-педагогических кадров; понижению интереса молодежи к научно-педагогической деятельности, с другой стороны, появляются проблемы, обусловленные современной ситуацией.

Научный корпус ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина представляют 5 членов Российской инженерной академии (РИА), 2 академика Международной инженерной академии (МИА), 10 докторов наук, 55 кандидатов наук, 4 профессора, 7 доцентов.

В соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, возможны две формы работы над диссертацией – обучение в аспирантуре и самостоятельная подготовка с дальнейшим прикреплением соискателем для сдачи кандидатских экзаменов и завершения подготовки кандидатской диссертации.

Подготовка диссертации на соискание ученой степени кандидата наук без обучения в аспирантуре отличается от аспирантуры в основном тем, что соискатель не проходит курс обучения, и не участвует в научной и педагогической работе кафедры, а занимается только подготовкой диссертационного исследования.

Отмечено, что в целом система подготовки научных и научно-педагогических кадров не всегда поддается управлению имеющимся набором правовых, нормативных и организационных механизмов государственного регулирования. Большое значение в связи с этим приобретают дополнительные меры организационно-правового характера, разработанные на научно-производственных предприятиях.

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» реализуется поддержка обеих форм получения ученой степени кандидата наук. В структуре предприятия функционируют структурные блоки, в задачи которых, входит, в том числе, участие в подготовке научных кадров:

В функции блока директора по научной работе входит организация подготовки научных кадров через систему соискательства, а также участие предприятия в подготовке

аспирантов, координация деятельности научно-методического совета в целях повышения эффективности подготовки аспирантов и соискателей ученой степени.

Блок директора по персоналу выполняет, в частности, задачи установления контактов с образовательными организациями с целью взаимовыгодного сотрудничества в области подготовки кадров высшей квалификации; организация проектов по разработке и внедрению системы мотивации научного персонала, в том числе на основе ключевых показателей эффективности.

Активную помощь соискателям ученой степени кандидата наук, независимо от формы подготовки диссертации, оказывают также советы – ученый совет, научно-методический совет и совет молодых ученых и специалистов (СМУС).

Анализ продолжительности подготовки диссертационных работ сотрудниками предприятия с использованием разных форм подготовки (от начала работы над диссертацией до защиты) показал, что средняя длительность подготовки составляет 11 лет.

Для повышения эффективности подготовки научных кадров в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» в течение последних 10 лет разработаны и внедрены ряд мер в помощь сотрудникам, планирующим подготовку и защиту диссертационной работы:

1. Сформирована информационная база:
 - перечень научных руководителей диссертационных работ из числа ученых предприятия;
 - перечень диссертационных профильных советов;
 - список специальностей по диссертациям, соответствующих основным направлениям деятельности предприятия;
 - список научно-технических журналов, рекомендуемых ВАК при подготовке диссертационных работ;
 - перечень потенциальных оппонентов диссертационных работ.
2. Для повышения публикационной активности в 2023 году введено в действие новое положение о выплате работнику АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» надбавки к должностному окладу за опубликование произведения науки и компенсации расходов, произведенных при оплате публикаций произведений науки.
3. Оптимизирована система мотивации соискателей и аспирантов.
Разработанные и введенные в действие в 2021 году локальные нормативные акты предусматривают выплату вознаграждения только за конечный результат (защиту диссертации). Размер вознаграждения в несколько раз больше, чем аналогичного вознаграждения, выплачиваемого в соответствии с действовавшим ранее порядком.
4. В 2024 году в АО ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина вступило в действие Положение о порядке подготовки к защите диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата наук.

Основные задачи, решаемые в рамках данного Положения:

- научная, методическая и организационная помощь аспирантам и соискателям;
- контроль работы над диссертационным исследованием;
- координация действий подразделений, в обязанности которых входит, в том числе, участие в подготовке научных кадров.

Базовый элемент нового положения – индивидуальный план соискателя / аспиранта, разработанный с учетом особенностей структуры научно-производственной и кадровой деятельности предприятия. План определяет все необходимые этапы подготовки, их последовательность и взаимосвязь, что существенно упрощает процесс работы над диссертацией будущих ученых. Благодаря систематическому мониторингу и контролю процесса подготовки диссертаций, защита диссертаций как научный результат встраивается в общую систему планирования научной деятельности.

Методика отбора малых научно-производственных предприятий для целей научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

В.В. Байдала, Т.Е. Раецкая
АО «ЭКОН», г. Обнинск, Россия
E-mail: raetskayat@yandex.ru

Сегодня в Российской экономике сложилась ситуация, когда для снижения логистических и производственных рисков многие отечественные предприятия переходят к организации полного цикла производства продукции. Создание новых производственных участков или масштабирование существующих – это дорогостоящая инвестиция, недоступная, в большинстве случаев, для малых и средних предприятий (МСП), развивающихся в условиях ограниченных ресурсов.

Авторы видят решение проблемы в интеграции и кооперации отечественных предприятий для реализации совместных наукоёмких проектов.

Но как найти подходящего партнера, готового реализовать совместный научно-исследовательский проект?

Авторы предлагают методику отбора предприятий для целей научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) для интеграционного взаимодействия и региональной кооперации, объектом которых являются малые научно-производственные структуры.

Методика предполагает отбор предприятий по критериям:

1. Отнесение экономического субъекта к малому и среднему предпринимательству.
2. Территориальное расположение компаний. Для рассмотрения выбираем Калужскую область, как регион проведения научного исследования.
3. Область деятельности компаний.
4. Участие компании в профильных объединениях и сотрудничество с инфраструктурой поддержки.
5. Положительная динамика показателей финансово-хозяйственной деятельности за период.

Схематично алгоритм методики отбора может быть представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Алгоритм реализации методики отбора малых научно-производственных предприятий для целей НИОКР

Методика позволяет преобразовать первоначальный массив данных из 12 957 организаций Калужского региона в список, состоящему из 22 предприятий, которые в полном объёме удовлетворяют всем условиям первичного и вторичного отбора.

Результаты исследования показывают, что данная методика позволяет произвести отбор предприятий для целей НИОКР или создать иную вариативную выборку, если задать отличные от представленных в исследовании критерии по размеру, региону и области деятельности компании.

Также данная методика может быть полезна организациям инфраструктуры поддержки малого бизнеса, для актуализации баз предприятий - получателей поддержки.

Управление публикационной активностью в научно-производственной организации

И.С. Атрохин, Н.И. Ершова

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

E-mail: atrohinis@technologiya.ru

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» является одним из ведущих научно-производственных предприятий России в области создания наукоемкой высокотехнологичной продукции для авиационной, ракетно-космической деятельности, транспорта и вооружения.

С 1994 года ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина (ОНПП «Технология») носит статус Государственного научного центра Российской Федерации (ГНЦ РФ), и задача мотивации публикационной деятельности работников особенно важна, так как в соответствии с Указом Президента Российской Федерации «О государственных научных центрах» от 12.08.2022 № 546 одним из основных направлений деятельности ГНЦ РФ определено создание и практическое применение результатов научно-технической деятельности.

Результат научной деятельности считается созданным, когда итоговый результат отражен в научных публикациях.

Существует ряд показателей эффективности научной деятельности в организации: это и количество заключенных договоров на научно-исследовательские работы (НИР), количество научных школ, участие в конференциях и т.д. Однако основным показателем эффективности такой деятельности остается публикационная активность.

Публикационная активность – это результат научно-исследовательской деятельности автора или коллектива авторов, представленный в виде научной публикации, например, статьи в журнале, коллективном сборнике, в трудах научной конференции, авторской или коллективной монографии, отчёта по НИР. Качество и количество публикаций являются одними из ключевых показателей эффективности деятельности научной организации.

От публикационной активности каждого сотрудника зависит суммарный показатель научной активности организации. Кроме того, научные публикации – это показатель компетенций организации в конкретной области, способ заявить о своих исследовательских интересах научному сообществу.

В настоящее время в Минобрнауки России принимаются меры по созданию Национальной системы оценки результативности научных исследований и разработок. Данная инициатива была обсуждена еще в 2023 году, по итогам обсуждения было принято, в том числе, решение пересмотреть требования к наличию у ученых публикаций в зарубежных научных изданиях, включенных в системы цитирования Web of Science и Scopus.

Также, в соответствии с приоритетами научно-технологического развития РФ на период 2027-2032 гг. в рамках национального проекта «Наука», запланирован переход к передовым цифровым, интеллектуальным технологиям, роботизированным системам обработки больших объёмов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

Некорректная система учета и низкая публикационная активность приводит к несоответствию квалификации научных и научно-педагогических кадров России современному мировому уровню, что отражается непосредственно на конкурентоспособности научных исследований и получаемых в их результате заключений.

Целью исследования является определение оптимального метода учета публикационной активности и оценка влияния материальной мотивации сотрудников на примере научно-производственного предприятия.

В ОНПП «Технология» в 2014 году разработано положение о выплате работнику надбавки к должностному окладу за опубликование произведения науки (Положение). Проведён анализ публикационной активности сотрудников за период с 2014 по 2023 год с учетом данных о годовом бюджетировании расходов, связанных с введением в действие нового нормативно-правового акта.

Показано, что общее количество публикаций ОНПП «Технология» в 2018 году увеличилось на 50%, а в 2023 году – на 75% по сравнению с 2014 годом. При этом сумма доплат за опубликование произведения науки в 2023 году увеличилась более чем на 65% в сравнении с 2018 годом.

Стоит отметить что положение, введенное в действие в 2014 году, принципиально обновлялось в последующие годы, в том числе путем увеличения зависимости от качества публикации и, соответственно, уровня издания. Публикационная активность работников ОНПП «Технология» показала эффективность используемых мотивационных механизмов.

В связи с увеличением количества публикаций возникла необходимость совершенствования систематизации их учета. В ОНПП «Технология» были опробованы и внедрены некоторые из них:

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) – единственная национальная информационно-аналитическая система, в которую входят 12 млн. публикаций российских авторов и информация о цитировании этих публикаций более чем из 6,8 тыс. российских научных журналов. Система предназначена не только для оперативного обеспечения научных исследований актуальной справочно-библиографической информацией, но является также аналитическим инструментом, позволяющим осуществлять оценку результативности и эффективности деятельности научно-исследовательских организаций, ученых, уровень научных журналов и т.д.

«Истина» – интеллектуальная система тематического исследования научно-технической информации. База данных, содержащая информацию о публикациях сотрудников вузов и других научных организаций. Имеет обширную базу публикаций (93000 книг; 17000 патентов; 981000 статей; 203000 тезисов докладов) и более 193000 пользователей. Система предназначена для учета и анализа научной деятельности сотрудников организации.

Две эти системы являются общедоступными источниками информации, однако в научных организациях также активно используется система учета IC: Бит.наука.

Бит.наука – это закрытый системный источник сбора информации внутри предприятия. Система имеет возможность формирования отчетов (по периодам, подразделениям, отдельным авторам, изданиям), интегрирована с IC.ЗУП (ученые степени, звания, должности, подразделения возраст).

Основное преимущество системы Бит.наука в сравнении с Истиной – это интеграция с РИНЦ (через портал e-library). Организация учета публикаций в ОНПП «Технология» с помощью системы Бит.наука выявил ряд преимуществ:

- Системный источник сбора информации;
- Возможность формирования отчетов (в соответствии с характером запроса по периодам, подразделениям, отдельным авторам, изданиям);
- Распределение долей авторов;
- Отображение актуальных импакт-факторов изданий (показатель значимости издания, определяемый количеством ссылок на материал).

Данная система в большей степени оценивает уровень издания, публикации и вклада автора в научную публикацию.

К недостаткам можно отнести отсутствие подключения к сети Интернет на предприятии оборонно-промышленного комплекса (ОПК) в связи с необходимостью соблюдения режима безопасности, что приводит к ограничению функциональных возможностей системы, затруднению обновления информации об изданиях. Тем не менее система Бит.наука наиболее востребована для ученых, так как имеет функцию выгрузки информации в РИНЦ.

Внедрение разработанной системы мотивации и применение системы учета Бит.наука в ОНПП «Технология» является действенным стимулирующим механизмом и может быть использована для интенсификации публикационной активности на других предприятиях ОПК.

Опыт импортозамещения на примере тестирования многофункционального программного комплекса ЛОГОС

Д.А. Рогов, **А.Н. Прасолов**, В.А. Грачев, В.В. Кирюшина, П.В. Бондаренко
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия
E-mail: info@technologiya.ru

В период с марта по октябрь 2023 года в рамках проведения мероприятий по импортозамещению на АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» проводилось тестирование многофункционального программного комплекса «ЛОГОС» (ПК ЛОГОС), разработанного ВНИИЭФ, г. Москва. ПК ЛОГОС предназначен для численного моделирования процессов, протекающих при рассмотрении аэро-, гидродинамики, тепломассопереноса, статической, динамической и вибрационной прочности и разрушения, а также для проведения сопряженных или связанных мультидисциплинарных расчетов. Для установки на компьютеры в научно-исследовательском секторе расчетов прочности и надежности были предоставлены пробные лицензии программного комплекса. Тестировались следующие модули, входящие в состав ПК ЛОГОС: ЛОГОС-Препост, ЛОГОС-Аэро, ЛОГОС-Тепло, ЛОГОС-Прочность. Целью данного тестирования являлось установление соответствия возможностей программного комплекса требованиям и характеристикам, необходимым для решения задач, возникающих в расчетной практике научно-исследовательского сектора.

На первых этапах освоения и тестирования ПК ЛОГОС решались элементарные модельные задачи: расчет напряжений и прогибов в консольно закрепленной балке под действием сосредоточенной поперечной силы, шарнирно опертой пластине под действием внешнего равномерного давления. Результаты расчетов сравнивались с готовыми аналитическими решениями и результатами, полученными в используемых в расчетной практике сектора программных комплексах Nastran, ANSYS. Расхождение результатов по сравнению с аналитическим решением и результатами, полученными в других программных комплексах, не превысило $\Delta = 6\%$, что показывает хорошую сходимость и, следовательно, успешное прохождение первых этапов в освоении программного комплекса.

Далее в процессе тестирования решались задачи по оценке напряженно-деформированного, а также теплового состояния элементов актуальных конструкций летательных аппаратов и оснастки для проведения их испытаний.

В модулях ЛОГОС-Препост и ЛОГОС-Препост (Аэро-Гидро) проводится подготовка моделей для последующего расчета в модулях ЛОГОС-Прочность, ЛОГОС-Тепло и ЛОГОС-Аэро.

Задача внешнего обтекания носовой части летательного аппарата (ЛА) решалась в модуле ЛОГОС-Аэро, также задача была решена в программном комплексе FloEFD. В качестве результатов получены распределения давления, коэффициента теплоотдачи и температуры восстановления по поверхности носовой части ЛА. Результаты, полученные в модуле Логос-Аэро отлично согласуются с решением из FloEFD.

Задача по оценке полей температур в конструкции радиопрозрачного теплозащитного вкладыша для аппаратуры спутниковой навигации решалась в модуле ЛОГОС-Тепло, кроме того задача была решена в Nastran и ANSYS. Распределение температуры во вкладыше в конечный момент времени аэродинамического нагрева показано на рисунке 1. Максимальная величина внутренней температуры рассчитанная в ЛОГОС составляет $T_{вн, \max} = 435,7$ К, в Nastran и ANSYS – $T_{вн, \max} = 415,7$ К. Расхождение между максимальной величиной внутренней температуры посчитанной в ЛОГОС и величиной, полученной в других программных комплексах, не превысило $\Delta = 4,6\%$, что показывает хорошую сходимость.

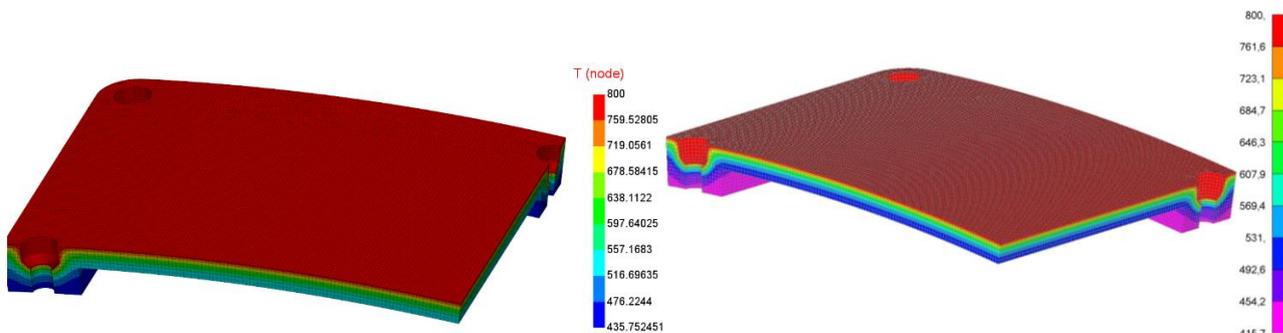


Рис. 1. Распределение температуры во вкладыше в конечный момент времени аэродинамического нагрева. $T_{\text{вн,max}} = 435,7 \text{ К}$ (ЛОГОС), $T_{\text{вн,max}} = 415,7 \text{ К}$ (Nastran)

В модуле ЛОГОС-Прочность проводился расчет испытательной оснастки. Решалась задача по оценке напряжений, возникающих в створках защитного кожуха в случае разрушения оболочки ЛА при опрессовке внутренним давлением. Распределение нормальных напряжений (Па) в дверях кожуха в направлении оси Z показаны на рисунке 2. Их максимальная величина рассчитанная в ЛОГОС составляет $\sigma_{z,\text{max}} = 1,64 \text{ МПа}$, в Nastran – $\sigma_{z,\text{max}} = 1,69 \text{ МПа}$.

Максимальное расхождение между результатами не превысило $\Delta = 3\%$, что показывает хорошую сходимость. Также производился расчёт НДС сборки из трёх цилиндрических тумб с фланцевыми соединениями между ними при нагружении их изгибающим моментом. Максимальные перемещения, возникающие в конструкции, посчитанные в ЛОГОС составляют $w_{\text{max}} = 2,069 \text{ мм}$, в ANSYS – $w_{\text{max}} = 2,068 \text{ мм}$. Результаты отлично согласуются между собой, расхождение между ЛОГОС и ANSYS не превысило $\Delta = 0,07\%$.

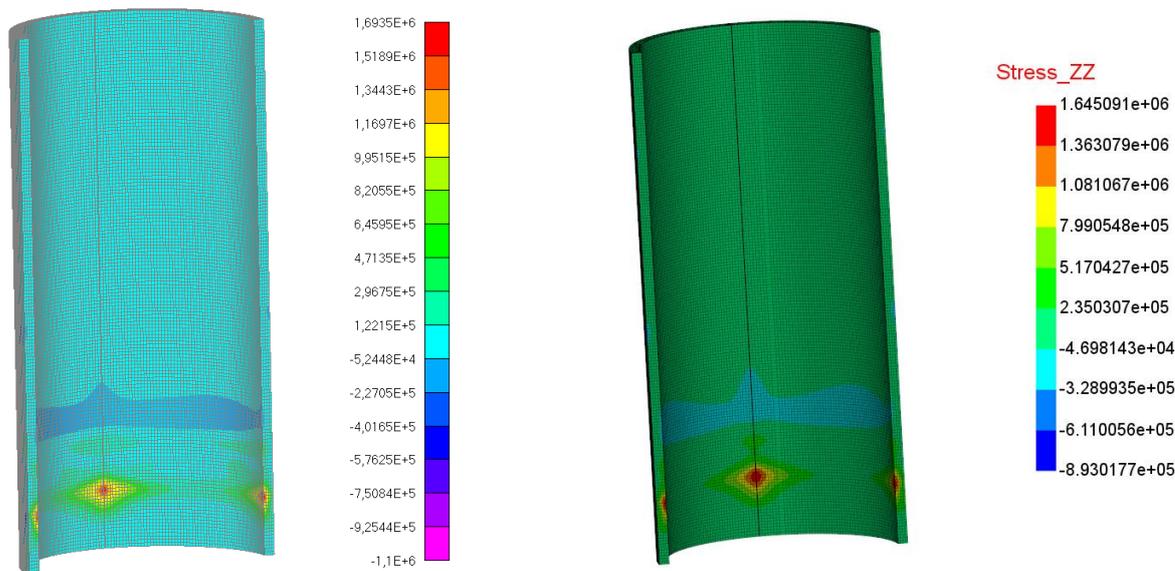


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений (Па) в дверях кожуха в направлении оси Z $\sigma_{z,\text{max}} = 1,69 \text{ МПа}$ (Nastran), $\sigma_{z,\text{max}} = 1,64 \text{ МПа}$ (ЛОГОС)

На заключительном этапе работ по освоению и тестированию ПК ЛОГОС был составлен отчет с расчетным приложением и высказан ряд дополнительных пожеланий разработчикам к реализации в программном комплексе для более оптимального решения задач, ставящихся перед коллективом научно-исследовательского сектора.

На основании результатов, полученных при тестировании и содержащихся в отчете можно утверждать, что цель тестирования была достигнута и возможности ПК ЛОГОС в основном соответствуют требованиям и характеристикам, необходимым для решения задач, возникающих в расчетной практике АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

Актуальность внедрения концепции бережливого производства в процесс управления научной деятельностью организации

Д.А. Анашкин¹, И.С. Атрохин¹, А.Н. Блинов^{1,2}

¹АО «ОНИПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; ²КНИТУ, г. Казань, Россия

E-mail: info@technologiya.ru

Научная деятельность в оборонно-промышленном комплексе (ОПК) России имеет отдельную специфику в различных отраслях, а также некоторые особенности нормативно-правового регулирования. Традиционно, на протяжении многих лет, российские организации, выпускающие продукцию военного и гражданского назначения, выступают локомотивами научно-технического прогресса. За последние десятилетия ОПК прошел серьезную модернизацию, что привело к активной трансформации большинства процессов, а после начала в 2022 году специальной военной операции произошла дополнительная консолидация активов предприятий. Необходимость оперативного реагирования на замещение инновационной продукции из недружественных стран требует от российского ОПК в кратчайшие сроки разрабатывать, испытывать и серийно внедрять огромное количество новых технических решений, материалов и технологий военного назначения.

Проведение масштабных боевых действий в настоящее время показывает, что вооруженные силы России имеют современные и во многом уникальные экземпляры военной и специальной техники, превосходящие некоторые образцы из стран Североатлантического альянса и их сателлитов. Однако несмотря на все преимущества, в процессе активной эксплуатации стало очевидно отставание оборудования по отдельным техническим параметрам. В целом за последние два года произошло заметное совершенствование тактики и стратегии ведения боевых действий. Долгосрочные военные конфликты способствуют росту инновационных и прорывных промышленных решений. В этой ситуации от ученых, конструкторов и инженеров, задействованных в ОПК, требуется активно менять свои подходы к работе, необходимо кратное ускорение процессов разработки, отработки и внедрения в серию новых видов техники. Теория управления в сложившихся условиях также накопила большой массив знаний, что позволило сформулировать и упорядочить новые положения, позволяющие адекватно анализировать процессы, прогнозировать и регулировать их развитие.

В середине 20-го века американским экономистом Уильямом Демингом были сформулированы 14 принципов управления и развития. К сожалению, прорывные мысли Деминга не были полноценно реализованы и не вошли в обиход управленцев. Аналогичная ситуация возникла с бережливым производством (БП) и теорией ограничений (ТОС), при всей привлекательности новых идей и доказанной успешности использования, в доминирующей части компаний полноценно внедрить новые философии не получилось. Этому препятствовала склонность принимать быстрые и легкие решения, чаще всего мотивированные ленью, жадностью и другими человеческими факторами.

Долгое время научная деятельность воспринималась как плохо прогнозируемая и крайне затратная активность. И по мере развития науки и ее классификации по отдельным направлениям, стоимость проведения научных исследований росла при одновременном снижении эффективности этой работы. Долгое время основными методами оказания воздействия на ученых в целях стимулирования их активности служили: гранты (государственные или коммерческие), нематериальные поощрения, пожертвования и назначения на должности (вплоть до пенсионного возраста), что внушало устойчивость и неподверженность значительным изменениям в жизни сотрудников.

Первым серьезным прорывом можно считать создание организаций, закрытых ведомственных учреждений где ученые, конструкторы и инженеры целенаправленно работали над решением необходимых для вооружённых сил задачами. Это позволило в рекордно

короткие сроки создать танкостроительную, ракетную, авиационную и другие научные школы.

Следующим этапом стало создание проектного управления научными и конструкторскими изысканиями. Однако данные подходы к управлению научной детальности, применяемые Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства, созданного в США во время космической гонки, не смогли конкурировать с советской системой.

Эпоха цифровизации позволила научной деятельности сделать шаг в создании компьютерных сетей и баз данных, что позволило повысить оперативность и прозрачность результатов деятельности ученых. Последующая информатизация деятельности по проектированию и созданию компьютерных рабочих станций позволила радикально ускорить разработку конструкций и проведение научных расчетов. Но к концу 20-го века происходит существенное сокращение государственных расходов на науку. При этом ввод критерия «интеллектуальная собственность» при оценке стоимости компании привело к резкому увеличению расходов на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Ряд компаний в последние годы тратят ежегодно внушительные средства на научные разработки. Создаются крупные научные центры, но при этом эффективность инвестиций в науку остается на низком уровне.

Важным прорывом повышения эффективности научной деятельности стала теория решения изобретательских задач (ТРИЗ). Многие иностранные компании стали активно внедрять ТРИЗ в своих лабораториях. Современные тренды, связанные с нейронными сетями (искусственный интеллект) показывают, что на данный момент этот инструмент можно использовать в научных целях для поиска информации, однако возможности получения новых знаний достаточно ограничены.

Фактически на данный момент в мировом ОПК возникает негативная ситуация, связанная с эффективностью управления научной деятельности. Точки роста от новых возможностей, которые дают цифровые технологии пройдены. «Узким местом» в научной деятельности, как и столетие назад являются: консервативность и инертность мышления ученого и принципы организации совместной работы из-за когнитивных ограничений человека, создающие определённые трудности при проведении современных исследований. И если консервативность и инертность мышления ученого помогает преодолевать ТРИЗ, то вопрос организации совместной работы ученых в интересах заказчиков исследования является проблемным местом.

В 2009 году в России вышел перевод книги Манн Д. «Бережливое управление бережливым производством». В ней достаточно подробно описаны общие подходы и направления действий, нацеленных на формирование бережливого управления (БУ). Идеи БУ основываются на общем базисе БП. Соответственно, внедряя принципы и инструменты БУ возможно ускорить процесс научных исследований и оформления результатов при достижении максимальной удовлетворённости заказчика.

Используя визуальный контроль, стандартные операционные карты, запуская систему подачи и реализации предложений по улучшению, строя карты потока создания, внедряя системы организации рабочих мест, формируя систему хранения документации, повышая самодисциплину и общую научную культуру, формируя научные ячейки и другие методы, инструменты и подходы, возможно без серьезных инвестиций и привлечения дополнительных работников кратно повысить скорость работы научных подразделений и, соответственно, обеспечить вооруженные силы России самой совершенной и востребованной продукцией двойного и военного назначения.