

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ  
РОССИЙСКАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ**

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
“ОБНИНСКОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
”ТЕХНОЛОГИЯ”**



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



**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ  
XVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**23-25 октября 2007 г.  
ОБНИНСК**

XVIII международная  
Научно-техническая конференция

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

Сборник тезисов докладов

Учредители конференции:

Федеральное агентство по промышленности

Федеральное агентство по науке и инновациям

Российская инженерная академия

Государственный научный центр Российской Федерации

Федеральное государственное унитарное предприятие

«Обнинске научно-производственное предприятие

«Технология»

Обнинск, 2007

Под общей редакцией докт. техн. наук, проф., акад. *В.В.Викулина*

Редакционная коллегия:

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

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

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

*В.В.Кирюшина; А.М.Каплунова*, канд. хим. наук; *Л.А.Климакова*.

Сборник подготовили: *И.Л.Шкарупа* – ответственный за выпуск;

*Л.К.Ващенко* – редактор; *Н.П.Григоренко*.

Компьютерный набор, верстка и печать текста выполнены на издательской системе ФГУП «ОНПП «Технология».

© 249035, г. Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 15  
ФГУП «ОНПП «Технология»

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| <b>Викулин В.В.</b><br>Успехи в области создания конструкций из неметаллических материалов ..... | 15 |
|--|----|

### ЖАРОПРОЧНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

|  |    |
|--|----|
| <b>Судальцев Е.И., Дмитриев А.В., Харитонов Д.В.</b><br>Перспективы создания новых керамических материалов ..... | 16 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А.</b><br>Получение и исследование термоармирующих покрытий на стекло-керамических волокнистых материалах ..... | 18 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Сафаралиев Г.К., Шабанов Ш.Ш., Пашук Е.Г., Билалов Б.А., Кардашова Г.Д.</b><br>Упругие свойства керамических материалов SiC – AlN..... | 18 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Якушкина В.С., Кораблёва Е.А., Викулин В.В., Русин М.Ю., Саванина Н.Н.</b><br>Разработка и внедрение керамики на основе диоксида циркония для электрохимических устройств..... | 20 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Харченко Е.Ф., Гавриков И.С.</b><br>Разработка органокерамических бронеструктур с использованием материалов повышенной эффективности ..... | 21 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Параносенков В.П., Чикина А.А., Голубева Н.А.</b><br>Разработка материала на основе литого самосвязанного карбида кремния СКК (Л) ..... | 22 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Параносенков В.П., Плясункова Л.А., Чикина А.А., Голубева Н.А.</b><br>Формирование микроструктуры самосвязанного карбида кремния при парофазном силицировании ..... | 23 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Неповинных В.И., Соколова З.Н., Авдеева Е.Н.</b><br>Исследования возможности контроля набора заготовки УЗ-методом при шликерном литье..... | 24 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Вартамян М.А., Лукин Е.С., Попова Н.А.</b><br>Керамика с низкой температурой обжига для электронной техники ..... | 25 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| <b>Горчакова Л.И., Куликова Г.И., Алексеев М.К., Бизин И.Н.</b><br>Структура и свойства керамических материалов на основе волластонита..... | 27 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Алексеев М.К., Русанова Л.Н., Горчакова Л.И., Конанова А.Ю., Куликова Г.И.</b><br>Антипригарная суспензия на основе нитрида бора для нужд алюминиевой промышленности .. | 28 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <b>Бородай Ф.Я., Платонов В.В., Хамицаев А.С., Волков М.А.</b><br>Особенности формования конусообразных сложнопрофильных изделий из водных шликеров. | 29 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| <b><i>Рудыкина В.Н., Плясункова Л.В., Келина И.Ю., Викулин В.В.</i></b><br>Исследование влияния микроструктуры на прочностные свойства уплотнённого<br>реакционносвязанного нитрида кремния .....                            | 30 |
| <b><i>Храновская Т.М., Саванина Н.Н., Рогов Г.К.</i></b><br>Практическое использование корундомуллитового огнеупорного материала.....  | 31 |
| <b><i>Соколова З.Н., Некрасов Е.В., Неповинных В.И., Пащутина Т.А.</i></b><br>Проблемы контроля глубины пропитки изделий из кварцевой керамики ультразвуковым<br>методом .....   | 32 |
| <b><i>Цверева В.Г., Воробьев С.Б., Степанов П.А., Неповинных В.И., Хамицаев А.С.</i></b><br>Исследование свойств герметика как адгезива в условиях<br>высокотемпературных режимов старения.....                              | 34 |
| <b><i>О.М.Алифанов, В.В.Черепанов</i></b><br>Определение и прогнозирование физических свойств высокопористых волокнистых материалов<br>на основе модифицированной модели ортогональных случайно- неоднородных структур ..... | 35 |
| <b><i>Захаров А.И., Попова Н.А., Лысенков А.С., Каргин Ю.Ф., Загоржевский В.В.</i></b><br>Получение плотной керамики на основе нитрида кремния.....  | 37 |
| <b><i>Арсланова Н.И., Пронин Б.Ф.</i></b><br>Разработка и исследование радиопрозрачных теплозащитных материалов<br>класса SiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> .....   | 39 |
| <b><i>Лемешев Д.О., Макаров Н.А., Попова Н.А.</i></b><br>Оптически прозрачная керамика на основе оксида иттрия и иттрий-<br>алюминиевого граната.....  | 39 |
| <b><i>Макаров Н.А., Лукин Е.С., Попова Н.А.</i></b><br>Керамика для мелющих тел .....  | 41 |
| <b><i>Голдин Б.А., Рябков Ю.И., Секушин Н.А.</i></b><br>СВЧ – спектроскопия корундовой керамики, легированной Cr, Ti, Fe,<br>в диапазоне частот 8 – 26 ГГц.....  | 43 |
| <b><i>Забезжайлов М.О., Бородай С.П.</i></b><br>Определение показателей поглощения и рассеяния в области<br>полупрозрачности стеклокерамики ОТМ-357 .....  | 45 |
| <b><i>Рожкова Т.И., Суздальцев Е.И., Зайчук Т.В.</i></b><br>Ионообменное упрочнение стеклокерамики литийалюмосиликатного<br>состава в солях NaNO <sub>3</sub> и KNO <sub>3</sub> .....                                       | 46 |
| <b><i>Суздальцев Е.И., Рожкова Т.И., Зайчук Т.В.</i></b><br>Ионообменное упрочнение стеклокерамического материала β-сподуменового состава и<br>деградация прочности под воздействием внешних факторов .....                  | 48 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Бородай С.П., Палий И.С.</b><br>Использование метода ИК-спектроскопии для определения толщин ионо-обменного и напряжённого слоёв в литийалюмосиликатной стеклокерамике .....                                      | 49 |
| <b>Каримбаев Т.Д., Николаева М.П., Даньшин К.А.</b><br>Оценка жаростойкости и термоциклической устойчивости образцов моделей сегментов из керамического КМ типа SiC/SiC в условиях, близких к эксплуатационным ..... | 51 |
| <b>Каримбаев Т.Д., Мыктыбеков Б.</b><br>Применение многопроцессорной вычислительной машины для решения контактной задачи НДС керамической лопатки турбины высокого давления газотурбинных двигателей.....            | 52 |
| <b>Адылов Г.Т., Файзиев Ш.А., Минасманова Г.С., Ирматова Ш.К., Олимжанов Б.К., Руми М.Х.</b><br>Керамогранит на основе нетрадиционного сырья .....   | 52 |
| <b>Пайзуллаханов М.С., Файзиев Ш.А., Нодирматов Э.</b><br>Карбид кальция, полученный на базе местного сырья на Большой Солнечной Печи .....  | 54 |
| <b>Бакланова Н.И., Зима Т.М., Ляхов Н.З.</b><br>Разработка интерфейсных покрытий на углеродных и SiC волокнах для высокотемпературных керамических композитов .....  | 56 |
| <b>Билалов Б.А., Кардашова Г.Д., Сафаралиев Г.К., Абилова Н.А.</b><br>Электроимпульсное формирование керамики в системе SiC-AlN .....  | 57 |
| <b>Чевыкалова Л.А., Михальчик И.Л., Плясункова Л.А., Келина И.Ю., Загоржевский В.В.</b><br>Исследование микронных порошков СВС нитрида кремния в технологии горячего прессования .....                               | 58 |
| <b>Поляков В.Е., Антонов В.В., Некрасов Е.В.</b><br>Контроль глубины пропитки пористой кварцевой керамики кремнийорганическими олигомерами .....   | 60 |
| <b>Гафаров Б.Р., Гусев С.А., Милёхин Ю.М., Садовничий Д.Н.</b><br>Генерация давления в гетерогенном материале при неравновесном энерговыделении в компонентах .....  | 62 |
| <b>Шаяхметов Р.У., Бакунов В.С., Якупова Л.В., Мустафин А.Г.</b><br>Жаростойкие композиты с повышенными эксплуатационными свойствами.....  | 63 |
| <b>Ануфриева Е.В., Лукин Е.С.</b><br>Высокоплотная корундовая керамика для электронной техники .....   | 65 |
| <b>Буякова С.П., Молчунова Л.М., Кульков С.Н.</b><br>Синтез высокопористых керамик на основе нанокристаллического ZrO <sub>2</sub> .....   | 67 |
| <b>Буякова С.П., Кульков С.Н.</b><br>Структура нанокристаллического диоксида циркония после механической обработки .....   | 69 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Баринов С.М., Сергеева Н.С., Свиридова И.К., Кирсанова В.А., Ахмедова С.А., Фадеева И.В., Комлев В.С., Ковалёва Е.С., Шворнева Л.И., Куцев С.В.</b><br>Пористые керамические гранулы из магнийзамещённого гидроксипатита для заполнения костных дефектов..... | 71 |
| <b>Анучин С.А.</b><br>Методики и средства автоматизированных исследований теплофизических свойств керамических материалов аэрокосмического назначения.....   | 72 |
| <b>Райлян В.С., Русин М.Ю., Фокин В.И.</b><br>Система диагностирования конструкции керамических обтекателей ракет .....  | 74 |
| <b>Судальцев Е.И., Дмитриев А.В., Харитонов Д.В.</b><br>Исследование влияния дисперсности добавок SiO <sub>2</sub> на свойства получаемых заготовок.....   | 74 |
| <b>Ленский В.В., Чикина А.А., Андреев М.В., Анисимов А.С., Параносенков В.П., Келина И.Ю.</b><br>Разработка и результаты испытания монопанели для СИБ из литого самосвязанного карбида кремния .....   | 76 |
| <b>Ленский В.В., Келина И.Ю., Баконин В.И., Безруков Л.Н.</b><br>Результаты испытаний керамических материалов в бронеконструкциях .....  | 78 |
| <b>Липовцев Ю.В., Куракин В.И., Хамицаев А.С.</b><br>Математическая модель процесса шликерного литья керамических оболочек.....  | 79 |
| <b>Рогов Д.А., Шкарупа И.Л.</b><br>Нестационарный расчет температур в стеклоплавильных тиглях, выбор конструкции тигля.....  | 81 |
| <b>Томчани О.В., Арутюнян Г.Р., Павлова В.П., Долматов С.А., Шуль Г.С.</b><br>Наноструктурные теплоизоляционные материалы .....  | 83 |
| <b>Павлова В.П., Арутюнян Г.Р., Кашкарова Е.М., Пляскина Л.А., Софeyчук Ю.М., Томчани О.В.</b><br>Термостойкий волокнистый теплоизоляционный материал .....  | 85 |
| <b>Карагедов Г.Р., Мызь А.Л., Ляхов Н.З.</b><br>Нанокompозитные материалы в системе ZrO <sub>2</sub> – α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> с экстремальными механическими характеристиками .....  | 86 |
| <b>Тимофеев А.Н., Лахин А.В., Богачев Е.А., Тимофеев И.А.</b><br>Сопловой насадок ЖРД из углерод–керамического композиционного материала C–SiC.....  | 87 |
| <b>Ветров В.В., Дунаев В.А., Дунаева И.В., Никитин В.А.</b><br>Математическое моделирование сопряженных процессов аэрогазодинамики и динамики деформирования аэродинамического обтекателя ракеты.....  | 89 |
| <b>Андреанов Н.Т., Файков П.П.</b><br>Влияние некоторых технологических факторов на спекаемость шпинельных порошков.....   | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Крылов В.П., Никишов С.С., Ромашин В.Г.</b><br>Определение электрической толщины криволинейных диэлектрических изделий при одностороннем доступе.....  | 91  |
| <b>Куракин В.И., Прасолов А.Н.</b><br>Комбинированный итерационный метод для решения нелинейных задач механики.....   | 93  |
| <b>Горчакова Л.И., Бизин И.Н., Кузнецова В.Ф., Жуков А.А.</b><br>Порошки волластонита различных марок в технологии керамических изделий. Применимость и влияние на свойства керамики.....   | 95  |
| <b>Горчакова Л.И., Бизин И.Н., Кузнецова В.Ф.</b><br>Способ получения керамики на основе волластонита для футеровки алюмопроводов с низкой усадкой при эксплуатации.....  | 96  |
| <b>Шадрин А.П., Николаев Б.Е., Неповинных О.В., Ромашин А.В., Степанов М.В.</b><br>Универсальный автоматизированный комплекс измерения внешнего контура и снятия припуска по толщине стенки обтекателя.....                                   | 98  |
| <b>Неповинных О.В., Шадрин А.П., Николаев Б.Е.</b><br>Концептуальная модель построения программно-аппаратного комплекса (ПАК) для измерения РТХ обтекателей с его разделением по структуре на два независимых оптимальных направления.....    | 99  |
| <b>Шкарупа И.Л., Келина И.Ю., Саванина Н.Н., Курская И.Н., Рудыкина В.Н., Плясункова Л.И.</b><br>Исследование стеклостойкости керамических материалов.....  | 101 |
| <b>Саванина Н.Н., Русанова Л.Н., Куликова Г.И., Горчакова Л.И., Бизин И.Н., Алексеев М.К., Кузнецова В.Ф., Конанова А.Ю.</b><br>Разработка изделий из волластонитовой керамики и внедрение их на предприятиях алюминиевой промышленности..... | 102 |
| <b>Мамаева А.А., Сагдолдина Ж.Б., Вдовиченко Е.В.</b><br>Изменение микроструктуры пленок TiAl на подложке ситалла и поликора.....   | 104 |
| <b>Райлян В.С., Фокин В.И., Афтаев В.В.</b><br>Система контроля качества клеевого соединения керамических обтекателей ракет.....  | 105 |
| <b>Райлян В.С., Алексеев Д.В., Фокин В.И.</b><br>Методика теплопрочностных испытаний элементов летательных аппаратов с перфорированной стенкой.....   | 106 |
| <b>Бородай Ф.Я., Подобеда Л.Г., Василенко В.В.</b><br>Комбинированные оболочки на основе кварцевой керамики и стеклопластика для антенных обтекателей ракет.....  | 106 |
| <b>Власов А.С., Платов Ю.Т., Кондрукевич А.А.</b><br>Цветовые особенности фарфора, содержащего оксид неодима.....   | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Неповинных В.И., Атрощенко В.Ф.</b><br>К вопросу о контроле геометрических параметров носовой части<br>остроконечных обтекателей рентгеновским методом.....   | 110 |
| <b>Куликова Г.И., Цветкова М.М., Конанова А.Ю., Алексеев М.К., Ева Т.И.</b><br>Изготовление крупногабаритных и сложнопрофильных изделий из<br>воластонита с применением способа водного шликерного литья .....         | 112 |
| <b>Евдокимов В.Ю., Овсянников Н.А., Чернявский А.С., Тютюкова Ю.Б.,<br/>Гнидаш С.В., Баринов С.М.</b><br>Разработка композиционных материалов с алюмооксидной матрицей и дисперсными<br>металлическими частицами ..... | 113 |
| <b>Шадрин А.П., Николаев Б.Е., Ромашич А.В.</b><br>Вопросы оптимизации кинематической и структурной электрической схем стендов<br>измерения РТХ радиопрозрачных обтекателей .....                                      | 114 |
| <b>Емельянов И.В., Степанов М.В., Шадрин А.П.</b><br>Модель базы данных и методика анализа результатов измерений РТХ радиопрозрачных<br>обтекателей и выработки рекомендаций по их последующей обработке .....         | 114 |
| <b>Соколова З.Н., Неповинных В.И.</b><br>Исследование возможности контроля плотности в изделиях из кварцевой кера-<br>мики с использованием поверхностных и поперечных ультразвуковых волн .....                       | 115 |
| <b>Рудыкина В.Н., Плясункова Л.А., Сидоренко М.А., Келина И.Ю., Шаталин А.С.</b><br>Соединение образцов композита SiC-C <sub>f</sub> .....   | 117 |
| <b>Кульков С.Н.</b><br>Структура, фазовый состав и особенности технологии наносистем на основе<br>стабилизированного диоксида циркония.....  | 118 |
| <b>Шкарупа И.Л., Викулин В.В., Русин М.Ю., Курская И.Н., Рудыкина В.Н.,<br/>Саванина Н.Н.</b><br>Результаты заводских испытаний керамических стеклоплавильных<br>аппаратов .....                                       | 119 |
| <b>Дзема Н.В., Эпов А.Г., Харахонов Г.А., Королёв Д.А.</b><br>Контроль отклонений профиля поверхности обтекателей в процессе<br>обработки.....   | 120 |
| <b>Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б.</b><br>Применение изделий из пористых проницаемых керамических материалов – эффективный<br>способ решения энергетических и экологических проблем.....                  | 122 |
| <b>Арутюнян Г.Р., Пляскина Л.А., Кашкарова Е.М., Павлова В.П.</b><br>Приближенный метод расчета толщины слоя изоляции цилиндрических поверхностей.....   | 123 |
| <b>Александрова О.В.</b><br>Интеллектуальный капитал как фактор активизации инновационных<br>процессов на предприятиях с наукоемким производством .....  | 125 |

## СТЕКЛООБРАЗНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

|   |     |
|---|-----|
| <b>Самсонов В.И., Ромакин А.Н., Просовский О.Ф.</b><br>Перспективы развития авиационного остекления.....  | 128 |
| <b>Семин М.А., Кулабухова Е.А., Петровых Н.В.</b><br>Полупроводниковое стекло.....  | 128 |
| <b>Алексеева Л.А., Келина Р.П.</b><br>Синтез ситаллов с комплексом диэлектрических, термических и механических свойств<br>в бесщелочной магнийалюмосиликатной системе ..... | 129 |
| <b>Трушкова Л.А.</b><br>К вопросу об ионообменном упрочнении стеклокерамического материала<br>литийалюмосиликатного состава .....   | 130 |
| <b>Ромакин А.Н.</b><br>К вопросу об определении прочностных характеристик силикатных и органических стекол...   | 130 |
| <b>Семин М.А., Егоров А.А., Козлова Н.Н.</b><br>Проблемы шликерной технологии при получении высокопористых ячеистых материалов из<br>стекла.....                            | 131 |
| <b>Каплунова А.М., Глазкова Н.В., Келина Р.П.</b><br>Разработка состава термостойкого желтого стекла для изделий<br>линзового типа .....                                    | 133 |
| <b>Каплунова А.М.</b><br>Особенности получения сине-зеленого стекла, окрашенного медью,<br>в алюмоборосиликатной и алюмосиликофосфатной системах .....                      | 134 |
| <b>Сысоев В.К., Вятлев П.А., Захарченко А.В., Булкин Ю.Н.</b><br>Лазерное разделение стеклянных изделий .....   | 134 |
| <b>Сысоев В.К., Вятлев П.А., Захарченко А.В., Сигаев В.Н.</b><br>Лазерная поверхностная штрих-гравировка оксидных стекол .....  | 136 |
| <b>Сысоев В.К., Вятлев П.А., Капустин П.И.</b><br>Лазерная резка акриловых диффузных экранов для LCD дисплеев .....   | 138 |
| <b>Шарагов В.А., Азаренко О.В., Лысенко Г.А.</b><br>Оптимизация режимов HF-секционирования промышленных стекол.....   | 139 |
| <b>Пестов А.В.</b><br>Технология изготовления гнутых стеклоизделий с отверстием методом моллирования<br>листового стекла .....  | 141 |
| <b>Пестов А.В., Максимова Л.И.</b><br>Моллирование стеклозаготовок для остекления шкал приборов самолетов .....   | 142 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Адылов Г.Т., Руми М.Х., Файзиев Ш.А., Пайзуллаханов М.С., Нодирматов Э.З.</i><br>Пироксеновые ситаллы на основе базальтовых пород Койташского<br>рудного поля.....  | 143 |
| <i>Просовский О.Ф., Горюнов Г.Н.</i><br>Применение математического моделирования для синтеза оптических конструкций<br>тонкопленочных многофункциональных покрытий нано-<br>размерной толщины.....   | 145 |
| <i>Пестов А.В., Пигалев А.Е., Петрачков Д.Н., Темных В.И., Самсонов В.И.,<br/>Кауппонен Б.А., Ткаченко П.Я., Овсянникова И.Ю., Поминов В.В.</i><br>Технология нанесения покрытий на крупногабаритные сложнопрофильные изделия с<br>использованием многокомпонентного раствора и устройство для ее осуществления..... | 145 |
| <i>Пестов А.В., Чашиников И.Г., Кауппонен Б.А.</i><br>Технология изготовления отражателей эллипсоидной формы с большой<br>стрелой прогиба .....  | 147 |
| <i>Пестов А.В., Антонов И.В., Кауппонен Б.А., Силенок Н.А.</i><br>Технология и форма моллирования стеклзаготовок отражателей для аэродромных<br>прожекторных огней приближения.....  | 149 |

## ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

|   |     |
|---|-----|
| <i>Раков Э.Г., Аношкин И.В., Кондрашов С.В., Грачев В.П., Баронин И.В.,<br/>Кербер М.Л., Сивков С.П., Горбунова И.Ю., Малых А.В., Тренисова А.Л.</i><br>Получение углеродных нанотрубок, нановолокон и композитов с угле-<br>родными нанотрубками и нановолокнами ..... | 151 |
| <i>Застрогина О.Б., Швец Н.И., Петухов В.И., Барботько С.Л.</i><br>Новое фенолоформальдегидное связующее для пожаробезопасных<br>материалов интерьера пассажирских самолетов .....  | 152 |
| <i>Постнов В.И., Швец Н.И., Петухов В.И., Застрогина О.Б., Макрушин К.В.</i><br>Исследование технологических свойств фенолоформальдегидного<br>связующего РС-Н.....   | 152 |
| <i>Шуль Г.С., Томчани О.В., Обухова Н.С., Ворвуль С.В., Сидоренко М.А., Матухина И.А.</i><br>Исследование теплостойких связующих и полимерных композитов<br>на их основе .....  | 154 |
| <i>Чумин О.В., Павловский Д.В.</i><br>Использование полимерных материалов Plexiglas и Rohacell<br>в конструкциях летательных аппаратов .....  | 155 |
| <i>Волков В.С., Шуль Г.С., Денисова Е.В., Крюков А.М.</i><br>Исследование стеклосотопастов на основе теплостойких связующих .....   | 156 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Волков В.С., Шуль Г.С., Крюков А.М., Садикова Н.А., Борисова С.И., Разумовский В.А., Денисова Е.В., Кулагина И.В., Гриценко М.В.</b><br>Стеклопластиковые сотовые наполнители для авиации .....                       | 156 |
| <b>Хабенко А.В., Юдина Л.В., Бойко Л.И., Долматов С.А., Томчани О.В.</b><br>Эпоксипуретановый компаунд с повышенной устойчивостью к термоудару.....  | 158 |
| <b>Хабенко А.В., Юдина Л.В., Котухова А.М., Долматов С.А.</b><br>Эпоксидный компаунд для заливки элементов электрооборудования автомобилей .....   | 159 |
| <b>Садовничий Д.Н., Милёхин Ю.М., Тютнев А.П.</b><br>Электризация высокоэнергетичными электронами эпоксидного компаунда.....   | 160 |
| <b>Кулманов М.А., Кальменова Г.А., Мусина А.С.</b><br>Композиционные материалы на основе полиимидных связующих и применение их в качестве индикаторных электродов .....  | 162 |
| <b>Быков А.И., Шестухина С.Н., Моторин Д.В.</b><br>О проблемах разработки технологии изготовления препрегов на основе однонаправленных углеродных материалов.....  | 162 |
| <b>Соколов В.В., Богданов А.П., Фоменко В.В.</b><br>Термические характеристики материалов на основе клеевого препрега ВК-36РД.....   | 163 |
| <b>Клопота А.В., Петропольский В.С., Валко В.П.</b><br>Вакуум-автоклавное формование интегральных конструкций с аэродинамическим контуром.....   | 164 |
| <b>Лавро Н.А., Гежа С.А., Горянов А.В.</b><br>Опыт изготовления радиопрозрачного обтекателя самолета .....   | 165 |
| <b>Лепикаш Е.Р., Обухова Н.С., Шуль Г.С., Добрецова И.Н.</b><br>Исследования по разработке технологии изготовления пятислойных радиопрозрачных укрытий сотовой конструкции из стеклопластиков .....                      | 167 |
| <b>Смердов А.А., Таурова Л.П., Цветков С.В., Кулиш Г.Г., Селезнев В.А., Лебедева О.В.</b><br>Исследование возможностей изготовления полимерных герметизирующих оболочек композитных баллонов давления .....              | 168 |
| <b>Волков В.С., Шуль Г.С., Денисова Е.В., Выморков Н.В., Осауленко А.В.</b><br>Исследования по созданию перспективных сотовых ЗПК из ПКМ .....   | 169 |
| <b>Быков А.И., Шестухина С.Н., Литицкая В.А., Комиссарова И.Н.</b><br>Способы и технологические особенности изготовления матрицы теплообменной.....  | 170 |
| <b>Валко В.П., Данильченко А.Н., Петропольский В.С.</b><br>Совершенствование конструкции и технологии изготовления деревянных мастер-моделей для формования крупногабаритной оснастки из композиционных материалов ..... | 170 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Петропольский В.С., Валко В.П., Клопота А.В.</b><br>Объемная формовочная оснастка для изготовления интегральных авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов .....   | 171 |
| <b>Лепикаш Е.Р., Обухова Н.С., Шуль Г.С., Шкиркова Л.М., Баранов А.А., Сорочинская Е.А.</b><br>Исследование материалов мастер–моделей для крупногабаритных радиопрозрачных крытий .....  | 172 |
| <b>Целиков В.А.</b><br>Несущая конструкция съемочной оптико-электронной аппаратуры для малых космических аппаратов .....   | 173 |
| <b>Климакова Л.А., Половый А.О., Степанов П.А.</b><br>Теплофизические свойства эпоксидных углепластиков для прецизионных конструкций .....   | 174 |
| <b>Зельнев В.Н., Буш А.В., Выморков Н.В., Волков Д.А., Попов А.Г., Оленин И.Г., Гаврилов А.С., Бахтин А.Г., Севальнев А.В.</b><br>Конструкторско-технологическая обработка и изготовление нижнего отсека третьей ступени ракеты-носителя “Протон-М” из композиционных материалов ..... | 175 |
| <b>Климакова Л.А., Лавыгин Е.С.</b><br>Проектирование углепластиковых подкрепленных панелей крыла самолета с помощью MSC NASTRAN .....   | 176 |
| <b>Выморков Н.В., Хмельницкий А.К., Мартынова Л.А., Беляков Е.В.</b><br>Конструкторско-технологические аспекты изготовления замкнутого контура трехслойного углепластикового отсека с алюминиевым сотозаполнителем.....  | 177 |
| <b>Буш А.В., Выморков Н.В., Зельнев В.Н., Волобуева Н.Б.</b><br>Конструктивно-технологические решения фрагмента цилиндрического стержня из композиционных материалов.....  | 178 |
| <b>Хмельницкий А.К., Выморков Н.В., Попова А.В., Гончаров К.А., Головин О.А.</b><br>Панели систем обеспечения терморегулирования производства ФГУП “ОНПП “Технология”.....   | 179 |
| <b>Сливинский В.И., Сливинский М.В.</b><br>Сотовые заполнители и конструкции в изделиях авиакосмической техники и конверсии .....  | 180 |
| <b>Степанов Н.В.</b><br>Расчетно-экспериментальная методика определения несущей способности опорных узлов в трехслойных конструкциях с сотовым заполнителем.....   | 181 |
| <b>Попов А.Г., Петрова О.Л., Савельев Д.И., Степанов Н.В.</b><br>Определение зависимостей прочностных и упругих характеристик сотового заполнителя АМг2-Н-2,5-30п на основе статистической обработки массивов экспериментальных данных.....  | 183 |
| <b>Стариковский Г.П., Жовнер П.Б.</b><br>Применение спектрального метода при контроле трехслойных сотовых конструкций из ПКМ.....  | 185 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Стариковский Г.П., Стрельцов Д.С.</b><br>Исследование контактного способа неразрушающего контроля изделий<br>из ПКМ.....  | 185 |
| <b>Мухаметов Р.Р., Минаков В.Т., Чурсова Л.В., Ахмадиева К.Р.</b><br>Разработка технологического связующего для изготовления теплонагруженных<br>КМ конструкционного назначения .....  | 186 |
| <b>Мухаметов Р.Р., Минаков В.Т., Чурсова Л.В., Шмойлов Е.Е.</b><br>Разработка терморезистивного связующего для изготовления композиционных материалов<br>методом RTM .....   | 188 |
| <b>Дорофеев А.А., Калошкин С.Д., Чердынцев В.В., Коришунов А.И., Кравченко В.С.,<br/>Юрьева Н.В.</b><br>Технология получения и свойства композиционного материала на основе<br>механоактивированного сверхвысокомолекулярного полиэтилена,<br>наполненного бронзовой пудрой..... | 190 |
| <b>Сапожников С.Б., Форенталь М.В.</b><br>Численное моделирование и оптимальное проектирование<br>композитных защитных структур .....  | 190 |
| <b>Серезин С.С., Смирнов Н.С., С.Н.Шестухина, О.В.Маркин, А.И.Быков</b><br>Разработка конструкции трехслойных панелей пола из полимерных композиционных<br>материалов.....   | 192 |
| <b>А.Г.Попов, В.В.Волошин</b><br>Особенности экспериментального определения сдвиговых механических характеристик<br>высокомодульных ПКМ.....   | 193 |
| <b>Т.Д.Каримбаев, А.А.Луппов</b><br>Исследования конструктивных особенностей полых широкохордных лопаток,<br>изготовленных с применением композиционных материалов.....  | 194 |
| <b>Т.Д.Каримбаев, М.Ю.Ромейков</b><br>Перспективные корпуса вентиляторов из композиционных материалов .....  | 195 |

## **УСПЕХИ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**В.В.Викулин** (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Государственный научный центр РФ ФГУП “ОНПП “Технология” является одним из ведущих предприятий России в области неметаллических материалов для авиационной и ракетно-космической техники (полимерные композиты, конструкционная керамика, оптическое и цветное стекло, ситаллы). Исследования, разработка материалов и конструкций, организация производства представляют единый инновационный процесс, обеспечивающий поставку высоко-технологичной наукоемкой продукции заказчикам.

Глубокие научные исследования в области технологии полимерных композиционных материалов позволили разработать и производить новое поколение конструкций для авиакосмических объектов: головные углепластиковые обтекатели ракет-носителей “Протон–М”, “Рокот”, “Ангара”; размеростабильные конструкции и панели терморегулирования для спутника связи “Купон”, космического радиотелескопа “Спектр–Радиоастрон”, космических аппаратов “Кондор”, “Ramos”, “Экспресс–АМ”, “Гонец”, “Ресурс–ДК”, “Kazsat”; крупногабаритные панели крыла обратной стреловидности истребителя Су-47 “Беркут”; интегральные агрегаты фюзеляжа, крыла, хвостового оперения, панели пола и внутреннего интерьера самолетов Ил-114, Ту-204, Ту-334, Бе-200, Су-29, Су-31, вертолетов Мн-8 и др.

Разрабатываются звукопоглощающие панельные сотовые конструкции из полимерных композитов с высокими акустическими характеристиками для силовых установок самолетов Ту-204, Ил-76МФ, Ил-96 с целью выполнения международных норм ИКАО по уровню шума. Новым перспективным направлением является создание изделий радиотехнического назначения из полимерных композиционных материалов для мобильных РЛС наземного и морского базирования. Выполненная в рамках международного проекта “Atlas” разработка прецизионных размеростабильных конструкций из углепластика для детектора переходного излучения строящегося ускорителя ЛНС получила высокую оценку специалистов CERNa (Швейцария).

Ведутся комплексные исследования по созданию высокотермостойких радиопрозрачных материалов, разработка и поставка антенных обтекателей из керамики и стеклопластика для всех отечественных управляемых ракет различных классов (С-300, С-400 “Триумф”, Х-31, Х-35, 48Н6, РВВ-АЕ и др.). Разработана принципиально новая технология изготовления обтекателей из стеклокерамики, обеспечившая отказ от импортных закупок.

Проводятся исследования по созданию нового класса конструкционных материалов – керамоматричных композитов. На основе наноразмерных порошков разрабатываются материалы для твердых электролитов, прецизионных деталей волоконно-оптических линий связи и др. деталей. Впервые в мире были получены керамические материалы с эффектом самоармирования, благодаря чему прочность и ресурс работы изделий увеличились. Организовано производство огнеупорной керамики из волластонита и освоена широкая номенклатура изделий для предприятий алюминиевой промышленности.

Выпускаются высокопрочные электрообогреваемые изделия остекления кабин пилотов самолетов и вертолетов, в т. ч. остекление с многофункциональными наноразмерными покрытиями, обеспечивающими защиту летного персонала от воздействия электромагнитного излучения, солнечной радиации и обладающими антибликовыми свойствами и абразивостойкостью.

Уникальные разработки и высокий научно-технический потенциал ОНПП “Технология” в области неметаллических материалов позволяют создавать наукоемкую продукцию для перспективной авиакосмической, ракетно-космической, автомобильной, металлургической и других отраслей промышленности, в том числе для разрабатываемых авиалайнеров SSJ, MC-21, истребителя V поколения.

# ЖАРОПРОЧНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Е.И.Сыздальцев, А.В.Дмитриев, Д.В.Харитонов*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Развитие авиационной промышленности, в частности, ракетной техники, связано с повышением параметров эксплуатации изделий. Многочисленные составные элементы летательных устройств со сверхзвуковой скоростью полета изготавливаются, как правило, из огнеупорных, эрозионно- и термостойких материалов. К наиболее характерным элементам подобного типа можно отнести головные радиопрозрачные антенные обтекатели ракет. Воздействие дождя, пыли, высоких температур в комплексе с аэродинамическим давлением вызывает значительное разрушение элементов конструкций летательных аппаратов, включающее одновременно испарение, сублимацию, сгорание и унос растрескавшихся и оплавленных частиц материала.

Обеспечить требования работоспособности данных конструкций могут лишь материалы, сочетающие в себе комплекс таких характеристик, как низкая теплопроводность, высокая термостойкость и механическая прочность, высокая эрозионная устойчивость, способность переходить из твердого или вязкого состояния в газообразное и др. Решающим фактором в выборе материала для реального обтекателя является стабильность диэлектрической проницаемости и относительно невысокое значение тангенса угла диэлектрических потерь.

Следует отметить, что материалов, которые одновременно сочетали бы в себе все перечисленные свойства, сохраняли первоначальный размер и форму конструкций в процессе эксплуатации и обладали хорошей технологичностью при производстве крупногабаритных деталей сложного профиля, в мировой практике не существует. В настоящее время в качестве теплозащитных и конструкционных материалов для несущих элементов летательных аппаратов применяются такие неметаллические материалы, как пластики, ситаллы, термостойкие технические стекла, различные виды керамик [1,2]. В ряду наиболее перспективных материалов для изготовления антенных обтекателей скоростных ракет находятся кварцевая керамика и ситаллы.

Кварцевая керамика нашла широкое применение в обтекателях высокоскоростных ракет различных классов, работающих на скоростях 5–10 М. Однако этот материал имеет целый ряд недостатков, главным образом высокую пористость [3]. Наличие пористости у материала существенно ограничивает возможности его применения. Насыщение керамики влагой из окружающей среды резко ухудшает её электрические свойства. Даже при небольшом содержании влаги в образце (до 0,3%) отмечается резкое увеличение  $\text{tg}\delta$  [4]. Поэтому в реальных условиях использование кварцевой керамики без специальных покрытий не представляется возможным. Отмечается низкая эрозионная устойчивость пористых материалов к дождевому воздействию [5], приводящая к быстрому разрушению конструкции, а также высокая скорость уноса и образование слоистости в условиях высокотемпературного воздействия, что приводит к ухудшению радиотехнических характеристик изделий [6]. В то же время технологии, обеспечивающей получение высокоплотных, а особенно крупногабаритных изделий из кварцевой керамики до настоящего времени не существует как у нас в стране, так и за рубежом.

Для изделий морского и аэродромного базирования широкое применение нашли ситаллы (Пирокерам-9606, Пирокерам-9608, АС-418, АС-370 и др.), которые используются и в США, и в России для изготовления обтекателей ракет “Земля-Воздух” и “Воздух-Воздух”, работающих на скоростях 4–7 М. В связи с отсутствием пористости материал имеет хорошую устойчивость к длительному воздействию морской воды, повышенной влажности даже без применения

специальных покрытий [7]. К недостаткам данного материала следует отнести невысокую технологичность процесса изготовления крупногабаритных обтекателей.

В противовес традиционным ситаллам можно поставить стеклокерамику литийалюмосиликатного состава, разработанную в ФГУП «ОНПП «Технология», которая представляет собой высокоплотный, высокотермостойкий радиопрозрачный материал [7]. Для изделий радиотехнического назначения этот материал может быть использован с большим успехом, т.к. низкая пористость обеспечивает широкое применение его в производстве антенных обтекателей. Однако диэлектрические свойства стеклокерамики накладывают некоторые ограничения на тактико-технические характеристики ракеты. Поэтому возникает проблема создания нового, композиционного материала, удовлетворяющего все более возрастающим требованиям ракетной техники.

Таким образом, проблема создания перспективных летательных аппаратов во многом зависит от возможности синтеза материалов с улучшенными диэлектрическими свойствами для производства антенных обтекателей.

Для получения материалов с различными значениями диэлектрической проницаемости одним из направлений является использование добавок другого материала, имеющего гораздо более низкое значение диэлектрической проницаемости [8]. Из литературы известно о возможности введения в стеклокерамику добавок таких материалов, как  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$ .

Для решения поставленной задачи был сделан выбор в пользу введения в стеклокерамику литийалюмосиликатного состава добавок  $SiO_2$ , так как полученный материал обладает не только высокой механической прочностью, но и имеет широкий диапазон диэлектрических свойств.

Дальнейшие исследования материалов с добавками  $SiO_2$  могут проводиться во многих направлениях: выбор метода введения добавки; выбор оптимального количества добавки; исследования свойств литейных шликеров; выбор режима спекания и т.д.

В результате проведенного анализа существующих материалов и технологии их получения можно сделать вывод о том, что в настоящее время задача по созданию новых керамических композиционных материалов является актуальной и требует скорейшего решения.

#### Литература

1. Шнейдерман Я.А. Новые материалы антенных обтекателей летательных аппаратов // Зарубежная радиоэлектроника. 1976. №3. С.97–117.
2. Пивинский Ю.Е., Ромашин А.Г. Кварцевая керамика.– М.: Металлургия, 1974.–264 с.
3. Соломин Н.Б., Бородай Ф.Я., Комиссарова Н.Ю. Диэлектрические свойства кварцевой керамики // Электронная техника. 1968. Вып.3, сер. 14. С. 25–31.
4. Серова А.С, Бородай Ф.Я. Влагопоглощение кварцевой керамики и защита её органическими покрытиями // Жаропрочные неорганические материалы: сб. тез. докл., ОНТИ, НИТС, 1975.– С.155–160.
5. Lucey G.K., Ireland R.Ah. Improved Test to Determine Rain-Erosion Resistance in Fuse Nose Cones,-Originators Report, HDL-TR-1559,1971.– P.68.
6. Бородай Ф.Я., Дверняков В.С. Исследование поведения кварцевой керамики в условиях высокотемпературного газового потока. // Жаропрочные не-органические материалы: сб. тез. докл., ОНТИ, НИТС, 1975.– Вып. 4.– С. 150-155.
7. Суздальцев Е.И. Синтез высокотермостойких, радиопрозрачных стеклокерамических материалов и разработка технологии изготовления на их основе обтекателей летательных аппаратов : дис. докт. техн. наук : 05.17.11/ Суздальцев Евгений Иванович. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2002.– 431с.
8. Патент № 2222504 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03 С 10/12, С 04 В 35/19. Способ получения изделий из стеклокерамического материала литийалюмосиликатного состава. Суздальцев Е.И., Харитонов Д.В. и др., заявл. 24.06.2002; опубл. 27.01.2004.Бюл.№ 3.–С. 7.

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОАРМИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

*С.С.Солнцев, В.А.Розененкова, Н.А.Миронова*  
(ФГУП “ВИАМ”, г.Москва, Россия)

Одним из способов повышения термopочностных и конструкционных характеристик стеклокерамических и керамических волокнистых материалов является применение неорганических керамических термоармирующих покрытий (ТАП).

В работе представлены результаты по созданию керамических термоармирующих покрытий на основе элементоорганических керамообразующих полимеров и нанодисперсных тугоплавких модифицирующих добавок и теплозащитных материалов с применением указанных покрытий.

ТАП сложного состава получали в результате процесса пиролитического разложения полисилазанов, поликарбосиланов и полиборэтоксисилоксанов с добавками термодинамически устойчивых тугоплавких нанодисперсных кислородных и бескислородных соединений [1,2].

Проведены исследования температурно-временных режимов формирования покрытий, температуроустойчивости, механических свойств и коэффициента звукопоглощения образцов с ТАП.

Установлено, что стеклокерамический материал с термоармирующим покрытием температуроустойчив до 1200°C в течение 1000 часов и при 1500°C в течение 2-х часов, механическая прочность ( $\sigma_{сж}$ ,  $\sigma_{изг}$ ) образцов возрастает в 2–4 раза.

Показано, что перфорирование образцов приводит к снижению входного акустического сопротивления и значительному росту коэффициента звукопоглощения, достигающего в широкополосном максимуме величины  $\alpha - 0,75-1$  при полосе звукопоглощения 800–5000 Гц.

На основании проведенных исследований разработана технологическая схема изготовления, нанесения и формирования ТАП, позволяющая получать регламентированные свойства образцов стеклокерамических теплозащитных материалов с термоармирующим покрытием.

Применение ТАП позволит повысить ресурс работы теплозащитных материалов в 2–3 раза, повысить рабочую температуру на 200–300°C и улучшить эксплуатационные характеристики теплозащитных материалов.

### Литература

1. Солнцев С.С., Минаков В.Т., Розененкова В.А. и др. Комплексные температуроустойчивые защитные покрытия для керамокерамических композиционных материалов // Тр. XVIII совещания по температуроустойчивым функциональным покрытиям. Ч.2.– Тула: ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2001.– С.8–10.
2. Солнцев С.С., Минаков В.Т., Розененкова В.А. и др. Термоармолокн теплозвукопоглощающих материалов // Тр. XIX Всеросс. совещания по температуроустойчивым функциональным покрытиям.– Т.2.– С.118–121.

## УПРУГИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ SiC – AlN

*Г.К.Сафаралиев, Ш.Ш.Шабанов, Е.Г.Паишук, Б.А.Билалов, Г.Д.Кардашова* (ДГУ, г.Махачкала, Россия)

Упругие свойства образцов при комнатной температуре измерены методом резонансной ультразвуковой спектроскопии (RUS) на установке и по методике, описанной в работе [1]. В отличие от традиционных резонансных методов измерения, основанных на расчете параметров по одной резонансной частоте, в RUS упругие модули находятся путем подгонки измеренного

спектра откликов образца к рассчитанному по известной геометрии образца и его упругим свойствам [2–7]. Упругие модули варьируются в процессе обработки до сведения к минимуму отклонения спектров в смысле наименьших квадратов. В методе RUS чаще всего используются образцы в виде прямоугольных параллелепипедов (RPR) [4,5]. Однако использование образцов в форме дисков с отношением толщины к диаметру 0,2–0,8 имеет заметные преимущества [2,6,7]. Кроме того, в расчетную процедуру входят только два размера (диаметр и толщина) в отличие от RPR, где нужны три. Это заметно снижает погрешность, поскольку получить зернистые образцы с точно выдержанной геометрией удается очень редко. Вклад погрешности измерений размеров еще больше снижается для радиальных мод, поскольку их частота слабо зависит от толщины [2].

В наших измерениях использовался точечный метод возбуждения и регистрации колебаний образца в диапазоне частот 30–700 кГц. Удавалось зарегистрировать 20–30 резонансов. Приборная погрешность измерения частоты около  $10^{-6}$ . Массив оцифрованных данных “частота–амплитуда” обрабатывался на ЭВМ для поиска частоты и добротности отклика. Использовалась аппроксимация Гаусса–Лагранжа. В результате получаем экспериментальный спектр отклика {fex}. Отклонения измеренных значений частоты отклика при изменении положения точек возбуждения и приема по всей поверхности образцов не превышали 0,05%. Учет влияния контакта с датчиками производился путем экстраполяции к нулю зависимости частоты резонанса от силы прижима [1]. Остаточная погрешность при учете контакта не превышает 0,05%. Таким образом, погрешность измерения спектра частот примерно 0,1%.

Идентификация низших мод колебаний производилась путем изучения зависимости амплитуды отклика от положения точек возбуждения и регистрации. Затем, зная частоты первых двух изгибных мод колебаний и частоту низшей радиальной моды, по методике [2] определялись модули упругости первого приближения. Далее, в соответствии с методикой RUS, рассчитывался ожидаемый спектр частот {fr} в предположении изотропности образцов. Такая процедура обеспечивает отклонение рассчитанного {fr} и экспериментального {fex} спектров в пределах 1–2 % уже в первом приближении.

Важно, что сравнение {fr} и {fex} позволяет очень надежно идентифицировать моды колебаний. По частоте первой толщинной (“звуковой”) моды колебаний уточнялось значение модуля сдвига  $C_{44}=G$  и расчет {fr} повторялся. Дальнейшая подгонка спектров {fr} и {fex} осуществлялась по алгоритму Ньютона или Левенберга–Маркада. Как правило, уже после третьей итерации среднеквадратичное отклонение частот спектров перестает уменьшаться и для наших образцов составляет 0,2–0,4%. Возможно, это связано с анизотропией образцов.

Погрешность измерения модулей упругости оценена как сумма вкладов погрешности подгонки спектров (~0,3%), измерения частоты отклика (0,1%), геометрических размеров (~0,5%) и плотности (~1%), что составляет примерно 2%. Керамика SiC–AlN была получена методом горячего прессования при температуре меньше 2170 К и давлении до 35 МПа. Процесс горячего прессования проводится в среде N<sub>2</sub> в течение 1 часа. Были получены образцы следующих составов: (0,9 SiC – 0,1 AlN; 0,7 SiC – 0,3 AlN; 0,5 SiC – 0,5 AlN; 0,3 SiC – 0,7 AlN; 0,1 SiC – 0,9 AlN). Образцы имели форму цилиндрических дисков. Плотность полученных образцов керамики SiC–AlN составляла в среднем 3,21 г/см<sup>3</sup>. Механическая добротность более 15000 и мало отличалась от состава. Политипный состав исходного порошка карбида кремния содержал преобладающее количество 6H и 15R.

Из справочной литературы известны плотность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона керамических SiC и AlN с нулевой пористостью. Упругие свойства керамических материалов на базе твердых растворов SiC–AlN изучены в работах [8–9]. В работе [8] упругие свойства измерены резонансным методом на сферических образцах. В работе [9] использована стандартная резонансная методика измерения ASTM C 1259-94 на образцах в виде тонких дисков. Результаты наших исследований представлены в таблице.

| AlN,% | C11   | stdC11 | G     | stdG   | E      | stdE    | $\mu$  | std $\mu$ |
|-------|-------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|-----------|
| 10    | 451,5 | 6,7725 | 174,5 | 4,3625 | 407,6  | 10,19   | 0,1682 | 0,0050    |
| 30    | 432,5 | 8,2175 | 164,5 | 4,277  | 392,5  | 8,2425  | 0,1932 | 0,0062    |
| 50    | 403   | 8,06   | 147,1 | 3,0891 | 356,77 | 9,27602 | 0,2126 | 0,0074    |
| 70    | 369,1 | 7,7511 | 132,6 | 2,652  | 323,4  | 7,7616  | 0,22   | 0,0064    |
| 90    | 370   | 8,51   | 126,2 | 2,9026 | 313    | 9,703   | 0,2407 | 0,0072    |

Наши данные по коэффициенту Пуассона находятся в очень хорошем согласии с литературными и хорошо описываются линейной аппроксимацией. Значения модуля Юнга лежат заметно ниже литературных и при концентрации 30% AlN наблюдается незначительное повышение над общим трендом.

#### Литература

1. Пашук Е.Г., Халилов Ш.А. Установка для измерения упругих свойств методом ультразвуковой резонансной спектрометрии // Физическая электроника: мат IV Всеросс. конф. ФЭ-2006.– Махачкала, 2006.– С. 225–228.
2. Милосердин Ю.В., Баранов В.М. Высокотемпературные испытания реакторных материалов.–М: Атомиздат, 1978. –280 с.
3. Migliori, A., Sarrao, J.L., Visscher, et all. Resonant ultrasound spectroscopic techniques for measurement of the elastic moduli of solids // Physica B. 1993. V183. P.1–24.
4. Migliori, A.Sarrao, J.L.Resonant ultrasound spectroscopy.–Wiley & Sons Inc.,1997.–247 с.
5. Maynard J. Resonant ultrasound spectroscopy // Phys. Today. 1996. V.49. P. 26–31.
6. Lebedev A.V., Bredikhin V.V., Soustova I.A. at.all. Resonant acoustic spectroscopy of microfracture in a Westerly granite sample // J.Geophys. Res. 2003. V.108, № B10. EPM11. P.1–12.
7. Лебедев А.В., Бредихин В.В. Реконструкция функции Грина в задачах акустической спектроскопии. Препринт № 671, ИПФ РАН.– Нижний Новгород, 2000. – 20с.
8. Elastic properties of SiC, AlN, and their solid solutions and particulate composites/R. Ruh, A.Zangvil, J.Barlowe //American Ceramics Society Bulletin. 1985. V.64, N10. P.1368 –1373.
9. Microstructure-property relations of hot-pressed silicon carbide-aluminum nitride compositions at room and elevated temperatures /A.H.Lubis, N.L.Hecht, J.G.A.Graves//Journal of the American Ceramic Society 1999. V.82, №9. P.2481–2489.

## РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

**В.С.Якушкина, Е.А.Кораблёва, В.В.Викулин, М.Ю.Русин, Н.Н.Саванина**  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Разработаны материалы и технологии изготовления керамики из частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ), имеющие необходимый комплекс требуемых свойств, для твёрдых электролитов различных электрохимических устройств.

Разработан технологический процесс получения высокодисперсных порошков ЧСДЦ с размером частиц 25–40 нм в агломератах не более 1–2 мкм, основанный на методе химического осаждения из растворов солей. Разработанная технология обеспечивает получение керамики с прочностью при изгибе до 900 МПа, вязкостью разрушения 8–10 МПа·м<sup>1/2</sup>, плотностью 5,85–6,0 г/см<sup>3</sup>.

Результаты лабораторных испытаний быстродействующих датчиков окисленности с твёрдыми электролитами из керамики  $ZrO_2-MgO$  в жидкой стали показали, что датчики соответствуют техническим требованиям и могут быть использованы при создании отечественных конкурентоспособных кислородных зондов, применяемых при экспресс-анализе в металлургическом производстве. Время выхода, или быстродействие, испытанных датчиков на стабильные показания э.д.с. превосходит быстродействие широко используемых в металлургии зарубежных датчиков системы “Celox” (Бельгия).

Датчики активности кислорода с твёрдыми электролитами из керамики  $ZrO_2-Y_2O_3$ , используемые в жидкометаллическом теплоносителе, аттестованы и внедрены на экспериментальных установках и стендах Государственного научного центра РФ “Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского” (г. Обнинск). Ресурс работы датчиков составляет более 5000 часов.

Рассмотрены технологические особенности формирования агрегатов наночастиц порошка ЧСДЦ на различных этапах изготовления с применением высокотехнологичного оборудования: реакционного аппарата GR-15 и распылительной сушилки В-290 фирмы “BUCHY” (Швейцария). Проведено электронно-микроскопическое исследование морфологического строения агрегатов наночастиц порошка ЧСДЦ.

Разрабатываемые технологии получения наноразмерных частиц порошка ЧСДЦ с использованием высокотехнологичного оборудования апробированы при изготовлении керамических плёнок чувствительных элементов автомобильного датчика кислорода планарного типа. Проведены исследовательские испытания чувствительных элементов.

## **РАЗРАБОТКА ОРГАНОКЕРАМИЧЕСКИХ БРОНЕСТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

*Е.Ф.Харченко, И.С.Гавриков*

(НПП “Армоком-Центр”, г.Хотьково, МО, Россия)

При разработке средств индивидуальной бронезащиты (СИБ) или специальных конструкций, обеспечивающих защиту от высокоэнергетических пуль или осколков, необходимо учитывать сложный комплекс физико-механических свойств материалов и параметров взаимодействия поражающего элемента и брони. Традиционно бронезащитный элемент, способный осуществлять защиту по высшим классам, состоит из высокотвёрдого экрана на основе керамических плиток и энергоёмкой композитной подложки. В качестве фронтального слоя, как правило, используют плитки на основе карбидов (карбид бора, карбид кремния) или оксида алюминия.

В настоящее время в России серийно производится только бронекерамика на основе оксида алюминия. В ряду керамик, используемых при производстве бронезащитных элементов, оксид алюминия занимает последнее место по критерию эффективность – масса. В свою очередь заказчики (эксплуатирующие подразделения) в технических требованиях к СИБ устанавливают максимально возможное снижение общей массы изделия (жилеты, шлемы, щиты) при сохранении или даже повышении класса защиты. В связи с этим, нашим предприятием совместно со специалистами ФГУП “ОНПП “Технология”, были проведены исследования по разработке органокерамических бронезащитных элементов с фронтальным слоем, состоящим из плиток на основе карбида кремния. В работе также была оптимизирована армирующая составляющая органопластиковой подложки. Установлено, что при замене тканой армирующей составляющей на однонаправленный материал эффективность органокерамического бронезащитного элемента повышается на 15–20%.

По результатам проведённых исследований изготовлены опытные образцы органокерамических бронезащитных элементов с фронтальным слоем из монопанели карбида кремния и тыльным слоем – органопластиковой подложкой на основе однонаправленного материала. На

рисунке показан бронезащитный элемент после огнестрельных испытаний по 5-му классу защиты (ГОСТ Р 50744-95).

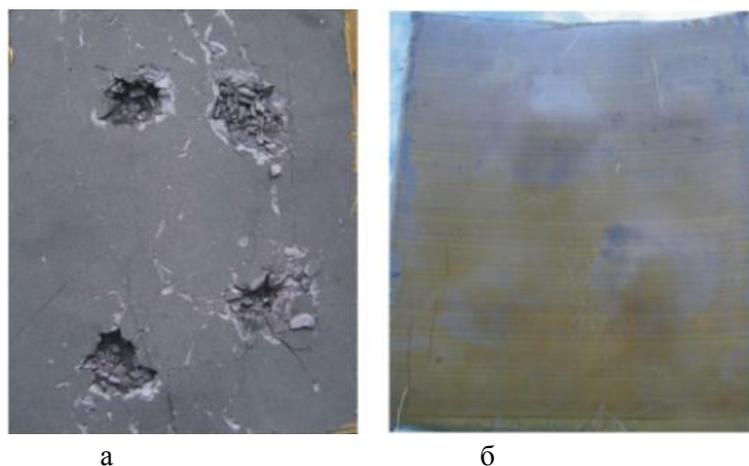


Рис. Органокерамический бронезащитный элемент после огнестрельных испытаний:  
а – фронтальный вид (характер разрушения керамического экрана);  
б – вид с тыла (100% непробитие)

При использовании данной структуры органокерамического бронезащитного элемента в изделиях возможно снизить их массу в 3–4 раза по сравнению с металлическими аналогами или в 1,4–1,6 раза по сравнению с изделием на основе оксида алюминия с органопластиковой подложкой, армированной тканым материалом.

## **РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЛИТОГО САМОСВЯЗАННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ СКК (Л)**

*В.П.Параносенков, А. А.Чикина, Н.А.Голубева*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Технология получения материала на основе литого самосвязанного карбида кремния является малоизученным направлением, а изготовление сложнопрофильных изделий из данного материала в России практически отсутствует.

Материалы на основе СКК получают силицированием заготовок, состоящих из смеси порошков карбида кремния и углерода. В наших работах для приготовления шликера оптимальным явился состав с соотношением масс порошков М20 и М5 – 1:1 и количеством связки 18–20 %. Углерод в заготовки вводился пропиткой.

На шликерах данного состава была отработана технология литья заготовок при температуре 75–80°C и давлении сжатого воздуха 4–5 атм.

Использование порошков карбида кремния с узким гранулометрическим составом и безпомольной технологии приготовления шихты за счет низкого содержания порошков фракции менее 1 мкм позволили провести удаление связки из заготовок в засыпке из прокаленного глинозема при максимальной температуре не выше 200°C и скорости подъема не более 10°C/ч.

В качестве основной технологии для введения углерода была выбрана пропитка раствором фенолформальдегидного полимера с последующей его полимеризацией и пиролизом в порах заготовок до образования углеродного остатка. Для этой цели был использован бакелитовый лак ЛБС-1, представляющий собой 35%-ый раствор полимера в этиловом спирте.

Для повышения количества углеродного остатка путем исключения потерь массы углерода при окислении как исходного полимера, так и образующегося углерода процесс пиролиза проводили в инертной среде. Кроме того, для уменьшения газовыделения при пиролизе

применялось повышенное давление газа, что позволило сохранить целостность заготовок, а также обеспечить выход углеродного остатка до 50–60 % мас.

Отработка режимов парофазного силицирования и спекания заготовок, прошедших пиролиз, проводилась в вакуум-компрессионной печи. В результате исследований была выбрана максимальная температура 2150–2200°C. Для обеспечения полноты силицирования и воспроизводства режимов потребовался избыток кремния с коэффициентом  $K=2,0$  и полное предварительное силицирование технологической графитовой оснастки.

Технология силицирования парами кремния полупроводниковой чистоты позволяет получать сложнопрофильные изделия (т. к. металлический кремний можно расположить рядом с силицируемой заготовкой), сформировать объемную высокочистую структуру вторичного карбида кремния.

По разработанной технологии получен самосвязанный карбид кремния с высокодисперсной однородной микроструктурой, со средним размером частиц около 10 мкм. В микроструктуре наблюдается также некоторое количество закрытых пор того же размера.

Полученная керамика имеет следующие свойства: плотность кажущаяся – 3,0 г/см<sup>3</sup>; пористость открытая – 0,40 %; предел прочности при статическом изгибе при температуре 293К – 280 МПа; критический коэффициент интенсивности напряжений – 2,50 МПа·м<sup>1/2</sup>; микротвердость – 20000 МПа.

Из данной керамики были изготовлены и прошли испытания изделия: вставки, рыхлители, элементы бронезащиты.

## **ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ САМОСВЯЗАННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ ПРИ ПАРОФАЗНОМ СИЛИЦИРОВАНИИ**

*В.П.Параносенков, Л.А.Плясункова, А.А.Чикина, Н.А.Голубева*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В данной работе с использованием метода растровой электронной микроскопии проведено исследование процесса формирования микроструктуры литого самосвязанного карбида кремния. В качестве метода формования при получении карбида кремния было выбрано термопластичное шликерное литье, введение в заготовки с удаленной связкой раствора фенолформальдегидного полимера, его дальнейшая полимеризация и пиролиз. Силицирование углеродного остатка, который образовался в порах заготовки после пиролиза, осуществлялось парами кремния полупроводниковой чистоты при температуре 2150°C.

Показано, что при парофазном силицировании формируется объемная структура материала, состоящая из первичного и вторичного карбида кремния, а также примесей свободного кремния. Преобладающий размер зерен в структуре материала, как и в исходных образцах, составляет 5–10 мкм. Границы зерен выражены нечетко (рис.1).

Микроструктура поверхности керамики более плотная и крупнозернистая (размер зерен 10–30 мкм), чем микроструктура в объеме образца (рис.2).

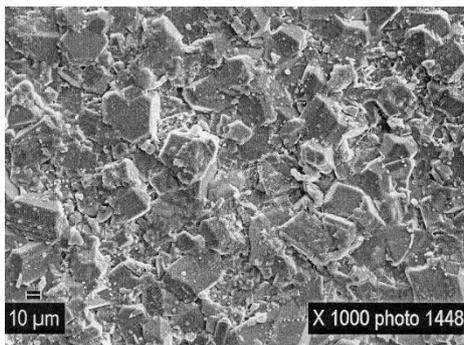
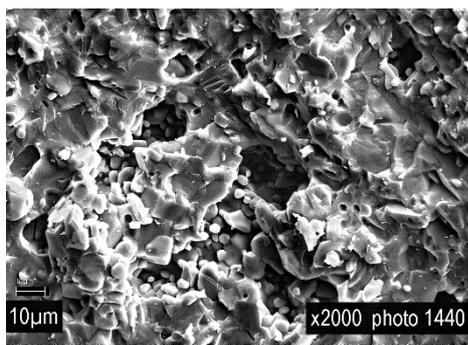


Рис.1

Рис.2

Перекрытие поровых каналов вторичным карбидом кремния и конденсирующимся металлическим кремнием приводит к появлению в керамике закрытой пористости, размер пор составляет 5–10 мкм.

При парофазном силицировании существенного роста зерен карбида кремния в объеме образца не наблюдается, что свидетельствует о преимущественном протекании прямого силицирования высокодисперсного углеродного остатка парами кремния.

После силицирования получена керамика с плотностью 3,0 г/см<sup>3</sup>, открытой пористостью до 0,5 %, прочностью при поперечном изгибе 260–280 МПа и микротвердостью 18000–23000 МПа.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ НАБОРА ЗАГОТОВКИ УЗ-МЕТОДОМ ПРИ ШЛИКЕРНОМ ЛИТЬЕ

**В.И.Неповинных, З.Н.Соколова, Е.Н.Авдеева**  
(ФГУП «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия)

Качество формования керамических заготовок методом шликерного литья в пористые формы во многом определяется степенью достоверности контроля за временем окончания набора заготовки, который производится, как правило, с помощью футштока. При таком способе контроля набора велико влияние субъективных факторов на качество получаемой заготовки и существует возможность внесения в заготовку дефектов.

Были проведены исследования возможности контроля набора заготовки УЗ-методом.

Для проведения экспериментов была собрана установка на базе ультразвукового дефектоскопа УД2-12 и четырехканального цифрового запоминающего осциллографа Le Croy. Данные контроля сохранялись в памяти осциллографа через определенные промежутки времени для последующего анализа.

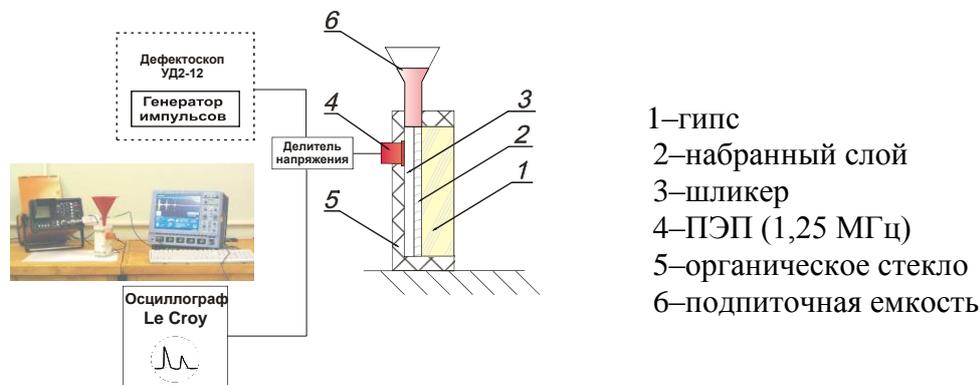
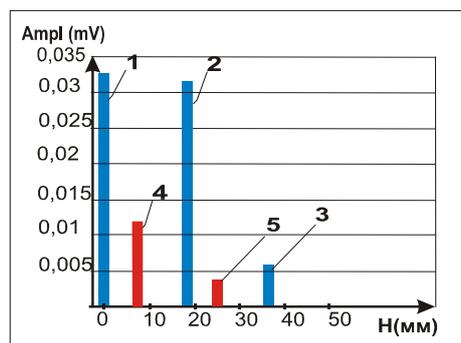


Рис.1. Схема УЗ-контроля набора заготовки с фотографией экспериментальной установки

Полученные осциллограммы изображают типичную картину донных импульсов, многократно отраженных от границы “шликер – гипс”.



- 1 – зондирующий импульс
- 2, 3 – первый и второй импульсы, отраженные от гипса
- 4, 5 – первый и второй импульсы, отраженные от набранной заготовки

Рис. 2. Графическое отображение расшифровки осциллограмм

Через некоторое время в каждой серии импульсов появляется еще один, расположенный между зондирующим и донным импульсами. Это импульс, отраженный от границы “шликер – набранная заготовка”. По мере набора заготовки он перемещается по направлению к зондирующему импульсу, амплитуда его растет. В момент окончания набора он сливается с зондирующим импульсом.

В процессе исследовательской работы были проведены эксперименты с различными характеристиками шликера. Анализ полученных результатов подтвердил известные зависимости времени набора заготовки от вязкости, влагосодержания и других параметров шликера, причем линейная аппроксимация получаемых значений времени набора и акустических характеристик во всех экспериментах имела высокую достоверность (более 0,9). Также подтверждена возможность контроля толщины набранного слоя УЗ-методом.

Следовательно, можно сделать вывод, что ультразвуковой метод контроля набора заготовки возможен и может быть рекомендован для внедрения в процесс формования при выпуске изделий большими сериями.

## КЕРАМИКА С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОБЖИГА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*М.А.Вартанян, Е.С.Лукин, Н.А.Попова*  
(РХТУ им.Д.И.Менделеева, г.Москва, Россия)

Более широкое развитие электроники стало возможным благодаря выполнению функциональных узлов электронных устройств в виде малогабаритных интегральных схем. Необходимость дальнейшей миниатюризации вынудила исследователей обратиться к новым видам проводников и, как следствие, использовать подложки из керамики с температурой спекания ниже 1000°C. В настоящее время применяют два способа изготовления подобных материалов. Согласно первому обязательной стадией является варка стекла легкоплавкого состава. Достоинствами такого подхода являются возможность гибкого регулирования характеристик материала и большой выбор оксидных систем, в которых такие стекла образуются. Так производится подавляющее большинство коммерческих материалов этого вида. Однако в ряде случаев присутствие в материале стекловидной фазы ухудшает электрофизические свойства изделий, что заставляет искать иные пути создания НСК. Главное отличие материалов, получаемых по второму способу, в том, что формирование плотной структуры происходит в процессе спекания предварительно синтезированных фаз.

Целью работы является разработка материала, характеризующегося высокими электрофизическими показателями (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  7 – 9, тангенс угла

диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  не выше  $10^{-3}$ ), с температурой спекания не выше  $950^\circ\text{C}$ . Перспективными в этом отношении являются составы в системах  $\text{V}_2\text{O}_3\text{--CaO--SiO}_2$  и  $\text{V}_2\text{O}_3\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3$ . В качестве исходных материалов были использованы  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученный прокаливанием дисперсного гидроксида алюминия. Режим термообработки исходных составов выбирали по данным ДТА, исходя из положения температурных экстремумов, соответствующих протекающим при синтезе физико-химическим процессам.

Первоначально в системе  $\text{SiO}_2\text{--V}_2\text{O}_3\text{--CaO}$  был выбран эвтектический состав с температурой плавления  $977^\circ\text{C}$ . Было установлено, что при обжиге в выбранном интервале температур материал не спекается и необходимо найти способы, обеспечивающие его полное спекание. Поскольку температура плавления эвтектики составляет  $977^\circ\text{C}$ , в материал необходимо вводить добавки, позволяющие снизить температуру появления жидкой фазы. Для подбора такой добавки воспользовались известным соотношением, связывающим температуру появления жидкой фазы в системе и температуру плавления наиболее легкоплавкого компонента в исходной системе и в частных двойных системах.

Наименьшей среди всех компонентов температурой плавления обладает  $\text{V}_2\text{O}_3$ . Поэтому для снижения температуры появления жидкой фазы оценивали минимальную температуру плавления в системе  $\text{R}_x\text{O}_y\text{--V}_2\text{O}_3$ . Самую низкую температуру обеспечивает введение  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (расчетные температуры появления жидкой фазы в тройной системе 722 и 749 К, соответственно). Однако введение  $\text{SiO}_2$  вызывает отклонение состава от эвтектического, поэтому в качестве добавки был выбран  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , вводимый с исходными компонентами эвтектики в количестве 1, 2 и 3 мол. %.

По результатам микроскопических исследований, в отсутствие добавок материал слагается из кристаллов монокората и моносилката кальция, причем имеет место их взаимное прорастание. Вводимый оксид алюминия либо полностью (при содержании 1 мол. %), либо частично растворяется в появляющейся аморфной фазе.

С увеличением содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в составе композиции при одной и той же температуре обжига наблюдается рост средней плотности и уменьшение открытой пористости. При введении  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в количестве 1 мол. % материал спекается до нулевой открытой пористости и плотности ( $2,4 \text{ г/см}^3$ ), близкой к теоретической. Дальнейшее увеличение содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 2 и 3 мол. % приводит к деформации образцов, связанной с резким снижением вязкости боросиликатного расплава.

Механическая прочность образцов остается невысокой, хотя увеличение содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при одинаковой температуре и ведет к ее повышению. Наибольшей прочностью обладает керамика с нулевой открытой и минимальной закрытой пористостью. При частоте 1 МГц  $\varepsilon = 8,2 \pm 0,3$ ,  $\text{tg}\delta = 4,3 \cdot 10^{-3}$ .

Во второй разрабатываемой системе,  $\text{V}_2\text{O}_3\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3$ , в качестве рабочих были выбраны составы с постоянным соотношением  $\text{CaO/V}_2\text{O}_3$ , близким к соотношению этих оксидов в точке эвтектики с минимальной температурой плавления в бинарной системе  $\text{CaO--V}_2\text{O}_3$ . Оксид алюминия вводили в количестве 10, 20 и 30 мас. %. Образцы готовили как по схеме с предварительным синтезом кристаллических фаз, так и по способу, предполагающему введение легкоплавкого стекла. Варку стекол осуществляли из тех же шихт, из которых синтезировали кристаллические фазы. Стекло, сваренное из данного исходного состава, добавляли к материалу, полученному термообработкой того же состава. Температура варки стекол составляла  $1250^\circ\text{C}$ , вводимое количество – 10, 20, 30 и 40 мас. %.

При обжиге образцов происходит кристаллизация стекла и формируется многофазный материал. Оксид алюминия частично вступает в реакцию с  $\text{CaO}$ , выделяющимся при разложении карбоната, с образованием биалюмината кальция, а частично остается в свободном виде, причем его содержание возрастает по мере увеличения доли  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в составе шихты. С оксидом кальция также реагирует  $\text{V}_2\text{O}_3$  с образованием моно- и двухкальциевого бората. Размер кристаллов всех фаз составляет 1–3 мкм. По границам зерен наблюдаются прослойки аморфной фазы, состоящей в основном из  $\text{V}_2\text{O}_3$ , количество которой с увеличением доли  $\text{Al}_2\text{O}_3$  уменьшается. К особенностям

данных составов следует отнести то, что после термообработки исходной шихты для синтеза кристаллических фаз оксид алюминия в свободном виде отсутствует, находясь либо целиком в составе тройного соединения  $\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , либо образуя непрерывный ряд твердых растворов с бинарными соединениями бората кальция.

Наилучшими показателями обладает состав, содержащий 20 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , который спекается до нулевой открытой пористости и плотности  $2,3 \text{ г/см}^3$ . Однако присутствие непрерывных прослоек аморфной фазы, толщина которых сравнима с размерами кристаллов, негативно сказывается на механических и электрофизических свойствах: прочность на изгиб составляет всего  $100 \pm 15 \text{ МПа}$ , измеренные при частоте 1 МГц  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$   $8,1 \pm 0,1$  и  $7,5 \cdot 10^{-3}$ , соответственно.

Таким образом, материал эвтектического состава в системе  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--CaO--SiO}_2$  с добавкой 1 мол.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , имеющий предел прочности на изгиб  $190 \pm 40 \text{ МПа}$ ,  $\epsilon = 8,2 \pm 0,3$  и  $\text{tg } \delta = 4,3 \cdot 10^{-3}$ , а также материал в системе  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3$ , содержащий 20 мас.% оксида алюминия и имеющий предел прочности на изгиб  $100 \pm 15 \text{ МПа}$ ,  $\epsilon = 8,1 \pm 0,1$  и  $\text{tg } \delta = 7,5 \cdot 10^{-3}$ , являются перспективными для использования в электронной технике.

## **СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЛАСТОНИТА**

*Л.И.Горчакова, Г.И.Куликова, М.К.Алексеев, И.Н.Бизин*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Свойства керамики в значительной степени определяются ее структурой. Структура в свою очередь зависит от условий получения керамики – состава и дисперсности исходных компонентов, условий формования и спекания керамики.

Керамические материалы на основе волластонита, получаемые гидротермальным способом, имеют ярко выраженную текстуру, обусловленную ростом игольчатых кристаллов в процессе синтеза волластонита. Такая керамика при невысоких значениях прочности характеризуется высокой термостойкостью и отлично работает в условиях циклического воздействия агрессивных расплавов.

Структура и свойства керамики, получаемой из природного волластонита, в значительной степени определяются свойствами исходного сырья. Природный волластонит обычно содержит гидросиликаты. При повышенной температуре гидросиликаты переходят в собственно волластонит, сохраняя исходную морфологию, что обуславливает игольчатую структуру керамики. Кроме гидросиликатов, природный волластонит в качестве примесей содержит заметное количество плавней – полевых шпатов, пироксенов, образующих аморфную стеклофазу при спекании, что также оказывает существенное влияние на структуру и свойства керамики. Были изучены образцы керамики, полученные при одинаковых технологических условиях из порошков волластонита, сильно различающихся по морфологии. При изучении образцов керамики, различающихся по прочности в 3 раза, установлено, что спекание керамики с большим содержанием тонкодисперсных частиц осуществляется более полно. В составе материала обнаруживаются удлиненные кристаллы волластонита с распределенной по границам зерен стеклофазой, но в образце керамики с прочностью 15 МПа уже присутствует растворение кристаллов волластонита в стеклофазе, чего нет в образце с прочностью 5 МПа. Прочность на сжатие имеет меньший разброс значений – от 30 до 40 МПа.

Величина механической прочности не всегда является критичной для работоспособности изделий. Важнейшим свойством, характеризующим работоспособность керамики в условиях циклического воздействия расплавов, является ее термостойкость. В настоящей работе термостойкость определяли по падению прочности при однократном нагреве. Падение прочности начинается при  $500^\circ\text{C}$  (18%), в интервале температур от  $600$  до  $900^\circ\text{C}$  потери

прочности составляют 34%, при 1000°C – около 50%. Эти параметры в большинстве случаев достаточны для обеспечения работоспособности материала в изделиях, где реальная температура эксплуатации не превышает 750°C и нет резких перепадов температуры.

Важно отметить, что керамика на основе природного волластонита с выраженной морфологией удлинённых частиц при более низких механических характеристиках имеет более высокую термостойкость, а, главное, не склонна к катастрофическому разрушению после появления первых трещин.

Теплопроводность керамики определяли методом стационарного теплового потока на образцах 70x70x10 мм. Из-за высокой пористости керамики зависимости величины теплопроводности от структуры не выявлено, для исследуемой керамики значения теплопроводности определяются ее плотностью и находятся в интервале 0,4–0,7 Вт/м·К при практической неизменности до 700°C.

Средний коэффициент термического расширения в интервале температур 20–700°C составляет  $(50 - 60) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

## **АНТИПРИГАРНАЯ СУСПЕНЗИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДА БОРА ДЛЯ НУЖД АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*М.К.Алексеев, Л.Н.Русанова, Л.И.Горчакова, А.Ю.Конанова, Г.И.Куликова* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Нитрид бора (BN) гексагональной структуры является химически инертным соединением по отношению к расплавам многих металлов, стекол, различных солей и поэтому нашел широкое применение в качестве смазки и защитных покрытий в высокотемпературных технологиях, где необходимо исключить химическое взаимодействие контактирующих материалов.

Обычными способами получения защитных антиадгезионных и антипригарных BN-покрытий на огнеупорах являются нанесение на рабочую поверхность суспензий на основе порошков нитрида бора с помощью краскопульта или кисти и окунание вручную. Крупными производителями таких суспензий являются фирмы “Advanced Ceramics Corporation”, “Union Carbide” (США), “Acheson” (Франция), “ESK” (Германия), которые изготавливают широкий ассортимент паст и аэрозолей с различной концентрацией твердой фазы BN. В то же время производство подобной продукции в России отсутствует. Поэтому представляет интерес, как научный, так и практический, разработка отечественного аналога таких суспензий.

В настоящее время в ФГУП “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, разработана рецептура и технология производства антипригарной суспензии на основе нитрида бора. Производимая в масштабах опытного производства антипригарная суспензия представляет собой вязкую жидкость голубого цвета, расслаивающуюся при длительном хранении, но легко вновь приобретающую гомогенность при перемешивании. Она является концентратом, предназначенным для разбавления в 2–3 раза чистой водой перед применением.

Нанесенное покрытие обеспечивает значительное снижение разрушения огнеупоров при контакте с расплавом алюминия за счет исключения химического взаимодействия металла с огнеупором и уменьшения механического зацепления оксидных пленок за неровности огнеупора.

Интенсивный голубой цвет суспензии, который обеспечивается введенным неорганическим пигментом, не влияющим на антиадгезионные качества нитрида бора, облегчает контроль целостности нанесенного покрытия в процессе эксплуатации, так как цвет не утрачивается в пределах рабочих температур покрытия – до 800°C.

Введенные в состав суспензии вспомогательные вещества снижают пенообразование в процессе нанесения покрытий, что улучшает качество получаемого слоя BN, и обеспечивают закрепление частиц на поверхности огнеупора, устраняя осыпание нитрида бора.

На текущий момент проведены производственные испытания антипригарной суспензии на основе нитрида бора на ряде крупных предприятий по переработке алюминия, в том числе на

заводах “КрАЗ” (г. Красноярск), “БрАЗ” (г. Братск). Суспензия наносилась на рабочие поверхности огнеупорных желобов, служащих для транспортировки металла к разливочному узлу, а также на поверхности различных втулок, колец и других керамических элементов, работающих в контакте с расплавленным металлом.

На всех предприятиях, где проходили испытания, было отмечено высокое качество суспензии, удобство работы с ней и существенный технико-экономический эффект от ее использования. Качество суспензии оценивается как равное или превосходящее импортные аналоги, расход ее составляет около  $20 \text{ г/м}^2$  при нанесении на поверхность типовых огнеупоров – бетонов алюмосиликатного состава.

Производительность опытного производства суспензии в ФГУП “ОНПП “Технология” в настоящее время составляет до 1500 кг/месяц.

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМОВАНИЯ КОНУСООБРАЗНЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОДНЫХ ШЛИКЕРОВ**

***Ф.Я.Бородай, В.В.Платонов, А.С.Хамицаев, М.А.Волков***  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

При формировании конусообразных крупногабаритных изделий, какими являются оболочки антенных обтекателей, методом водного шликерного литья наблюдается значительное изменение скорости набора заготовки по высоте изделия. Контроль набора на прозрачных макетах, отбор проб шликера по высоте формы в процессе набора показали, что причиной является:

1. Гравитационное осаждение крупных зерен (100–500 мкм) в носке и более быстрое заполнение носовой части остроконечной заготовки. Кардинальным методом снижения этого эффекта является отвод крупнозернистого осадка за пределы формируемой заготовки в съемную камеру. Предложены конструкции формовых комплектов с камерой – сборником осадка;

2. Изменение реологических и технологических свойств шликера в период набора заготовки по высоте формы. Особенно сильное изменение происходит в прибыльных емкостях и верхней части формы. Обычно для компенсации усадки шликера и нейтрализации расслоения применяют доливку свежего шликера. Зная высоту гравитационного расслоения и коэффициент усадки шликера при наборе, можно для каждого формового комплекта подобрать объем и высоту подпиточных емкостей, обеспечивать поддержание параметров шликера в полости формы в пределах требований ТП. Разработаны конструкции формовых комплектов, у которых подпитка осуществляется непрерывно по всему периметру торца формируемой заготовки, а объем подпиточных емкостей составляет  $V_n = kV_\phi + Sh$ , где  $k$  – коэффициент усадки шликера,  $V_\phi$  – объем шликера в форме,  $S$  – среднее значение общей площади емкостей,  $h$  – критическая высота расслоения шликера;

3. Влияние конусности равнотолщинной гипсовой формы на скорость набора керамической заготовки, суть которого заключается в том, что с уменьшением радиуса кривизны поверхности формы на единицу объема отформованной заготовки приходится существенно больший объем гипса, чем на большем радиусе. Эффект можно устранить изготовлением формы с переменной толщиной гипсового слоя и обеспечением равенства  $V_f:V_{отл}=\text{const}$ .

К конструктивным факторам изменения всасывающей способности гипсовой формы можно также отнести:

- степень открытости каркаса формы;
- вакуумирование формы и повышение гидростатического давления на шликер подачей сжатого воздуха;
- обогрев формы теплым воздухом и др.

Для керамических антенных обтекателей важной необходимостью является создание оболочек с утолщением в зоне размещения антенного блока и расположения металлического шпангоута.

В последнее время нами апробирован с положительным результатом ряд методов формования и конструкций формовых комплектов, позволяющих получать оболочки с утолщением в верхней, торцевой зоне. Сюда относятся:

- формовые комплекты с составным сердечником. Это может быть сердечник телескопической конструкции с подвижной внутренней частью для формования более тонкой носовой зоны или сердечник со съёмными накладками. Последний позволяет формовать изделия с обратным конусом или поднутрением;

- разнотолщинные оболочки можно формовать и на обычных формовых комплектах, у которых с целью исключения усадочных напряжений на всю поверхность жесткого сердечника или его часть нанесено легкодеформируемое покрытие, например 0,5–3,0 мм. Применение такого покрытия исключает необходимость тщательного контроля окончания времени набора заготовки, уменьшает брак по толщинам;

- впервые для получения керамических изделий конической формы и, в частности разнотолщинных, применено центробежное формование. Особенностью способа формования является то, что сначала обычным шликерным литьем в гипсовой форме набирают слой керамики заданной толщины, затем изделие доформовывают центробежным литьем при скорости вращения формы 500–1000 об/мин в течение 10–30 минут. При этом существенно ускоряется процесс формования изделий.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА УПЛОТНЁННОГО РЕАКЦИОННОСВЯЗАННОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ

*В.Н.Рудыкина, Л.В.Плясункова, И.Ю.Келина, В.В.Викулин*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Исследована микроструктура образцов уплотнённого реакционносвязанного нитрида кремния со спекающими добавками оксидов иттрия и магния после определения прочности при изгибе и вязкости разрушения. Вязкость разрушения измеряли на половинках образцов после определения прочности при изгибе. Свойства образцов приведены в таблице.

| № образца | Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> | Открытая пористость, % | Прочность при изгибе, МПа | Вязкость разрушения, МПа·м <sup>1/2</sup> | По данным |
|-----------|--|------------------------|---------------------------|---|-----------|
| 53-22     | 3,32                                   | 0,6                    | 500                       | –   |           |
| 53-24     | 3,33                                   | 0,3                    | 1060                      | –   |           |
| 53-49     | 3,30                                   | 0,3                    | 540                       | –   |           |
| 53-59     | 3,28                                   | 0,6                    | 570                       | 7,7                                       |           |
| 53-60     | 3,30                                   | 0,3                    | 550                       | 7,6                                       |           |
| 53-62     | 3,30                                   | 0,3                    | 680                       | 8,4                                       |           |
| 53-63     | 3,20                                   | 0,6                    | 600                       | 8,5                                       |           |
| 52-29     | 3,32                                   | 0,6                    | 730                       | 7,9                                       |           |
| 52-34     | 3,35                                   | 0,3                    | 690                       | 8,3                                       |           |
| 52-37     | 3,34                                   | 0,3                    | 740                       | 7,8                                       |           |
| 52-38     | 3,33                                   | 0,3                    | 645                       | 8,3                                       |           |

фрактографического анализа поверхности разрушения образцов уплотнённого реакционносвязанного нитрида кремния следует, что инициаторами разрушения являются поры и включения. Микроструктурный анализ показал, что для всех образцов характерно наличие

удлинённых кристаллов, что обуславливает эффект самоармирования и, соответственно, высокие значения вязкости разрушения.

Детальное рассмотрение микроструктуры образцов позволило установить, что разброс значений прочности также связан с неравномерным распределением по сечению образцов иттрий- и магнийсодержащих фаз и величиной размера пор. Микроструктура образца с максимальной прочностью 1060 МПа характеризуется зональным строением, что определяет, в свою очередь, характер разрушения керамики.

Приведённые данные, с одной стороны, свидетельствуют о реализации в материале высокого уровня физико-механических свойств, с другой – о необходимости проведения исследований по оптимизации технологии его получения с целью повышения и стабилизации фазовой и структурной однородности керамики.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРУНДОМУЛЛИТОВОГО ОГНЕУПОРНОГО МАТЕРИАЛА**

*Т.М.Храновская, Н.Н.Саванина, Г.К.Рогов*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Современный уровень развития ряда отраслей промышленности требует наличия таких огнеупорных материалов, которые, имея высокую температуру эксплуатации, не изменяют химический состав контактирующих с ними материалов, устойчивы в различных агрессивных средах. Примером такого огнеупорного материала служит корундомуллитовая керамика марки ОТМ-959, разработанная в ФГУП “ОНПП “Технология”. Основные исходные материалы: электрокорунд и плавленный муллит, обеспечивают материалу чистоту химического состава и высокую температуру эксплуатации, а разработанная технология получения изделий из данной керамики позволяет получать фасонные и габаритные изделия достаточно сложной конфигурации.

Материал ОТМ-959 имеет следующие физико-технические свойства:

- кажущаяся плотность, г/см<sup>3</sup> – 3,08 – 3,11;
- открытая пористость, % – 16,1 – 16,5;
- предел прочности, МПа:
  - при статическом изгибе – 17 – 25;
  - при сжатии – 100 – 180;
- теплопроводность при 700°С, Вт/(м·К) – 4,2.

Изделия, изготовленные из этого материала, показали хорошую работоспособность при температурах до 1800°С в атмосфере увлажненного водорода, в азотной и насыщенной углеродом средах. Горелочные камни эксплуатируются в течение 2–3 лет в газовых печах при температурах на горелках до 1650°С. Тигли емкостью до 250 кг расплавленного металла позволяют получать в вакуумных индукционных печах никель высокой химической чистоты без механического засора. Исследованы изменения в структуре материала, происходящие в процессе эксплуатации тигля в зависимости от количества плавок перегретого до 1700° С никеля. Поддоны, подставки, крышки, опоры, планшайбы, защитные стаканы и другие изделия различного назначения успешно эксплуатируются в промышленных условиях в высокотемпературных печах и установках. Цилиндрические изделия длиной до 700 мм продолжительно и стабильно работают без высокотемпературной деформации в оборудовании по тарировке платиновых и платинородиевых термопреобразователей.

## ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ ПРОПИТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

*З.Н.Соколова, Е.В.Некрасов, В.И.Неповинных, Т.А.Папутина*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В целях улучшения целого ряда свойств кварцевой керамики – упругих, прочностных, влагозащитных и др., радиопрозрачные обтекатели (РПО), изготовленные из этого материала, подвергают пропитке ацетоновыми растворами смол с последующей полимеризацией. Пропитка может быть как равномерной по глубине, так и переменной [1].

Глубина пропитки зависит от многих факторов: плотности исходной керамики, плотности пропитывающего раствора, времени пропитки, степени неоднородности свойств по толщине пропитываемой оболочки и других, которые порой трудно предусмотреть. При разрезке экспериментальных оболочек или при их разрушении часто можно наблюдать, что при одинаковом времени пропитки разных участков пропитанный слой имеет разную глубину. Иногда оболочки на отдельных участках пропитывались насквозь. В связи с этим была поставлена задача поиска неразрушающих методов контроля глубины пропитки, и, что более важно, активного метода контроля процесса пропитки, благодаря которому можно было бы этим процессом управлять.

После пропитки кварцевой керамики кремнийорганической смолой и процесса полимеризации многие свойства кварцевой керамики, в том числе упругие, изменяются в зависимости от степени заполнения пор. Логично предположить, что при этом изменятся параметры ультразвуковых колебаний – скорость и затухание, напрямую зависящие от упругих свойств материала. Было исследовано изменение скорости УЗК в зависимости от глубины пропитки на образцах. Поскольку ясно, что для кварцевой керамики с разной плотностью глубина пропитки будет разной при прочих равных условиях (времени пропитки, плотности пропитывающего раствора), то все образцы были разделены на 4 группы по плотности, охватывающие общий диапазон от 1,95 до 2,01 г/см<sup>3</sup>. Плотность в образцах определяли ультразвуковым методом и методом гидростатического взвешивания. Глубину пропитки варьировали путем изменения времени пропитки от 1 до 120 мин. После пропитки раствором ТМФТ и полимеризации измеряли скорость УЗК в тех же точках, что и до пропитки. Затем образцы разрезали и измеряли глубину пропитки. В результате были построены зависимости изменения скорости УЗК от глубины пропитки. Оказалось, что для малого времени пропитки (не более 10 мин.) зависимость практически линейная, затем при увеличении времени пропитки она принимает нелинейный характер, близкий к кривой второго порядка.

На основании полученных зависимостей для каждой группы образцов рассчитаны корреляционные уравнения для определения глубины пропитки.

Апробация этого метода на нескольких оболочках с разной исходной плотностью показала, что в большинстве случаев расхождение между реальной и прогнозируемой глубинами пропитки не превышает 1 мм.

Существенным недостатком метода, ограничивающим его точность, является наличие нескольких корреляционных уравнений связи “изменение скорости УЗК – глубина пропитки” для разных групп по плотности. Ясно, что чем более узкий диапазон плотности будет соответствовать каждой группе, тем точнее будет результат, но при этом число групп может значительно увеличиться. Кроме того, реальная оболочка имеет разброс по плотности и по высоте и по образующим, иногда довольно значительный. В связи с этим предприняты попытки выбора некоторого промежуточного критерия, связь которого с изменением скорости УЗК имела бы устойчивый характер независимо от исходной плотности. Например, зависимость величины  $K = (\Delta C)^2 \cdot H^{1/2}$  от изменения скорости УЗК, построенная для всего массива образцов, имеет коэффициент корреляции  $R^2=0,99$  (рис.). Здесь  $\Delta C$ , м/с – изменение скорости УЗК после пропитки;  $H$ , мм – глубина пропитки.

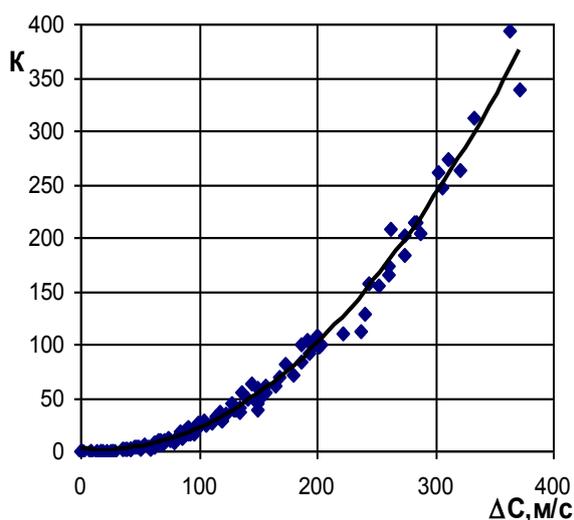


Рис. Зависимость критерия К от изменения скорости после пропитки

Следует учесть, что экспериментальные данные по зависимости “скорость УЗК – глубина пропитки” получены на образцах. Условия пропитки образцов отличаются от условий пропитки оболочки при переменной пропитке из-за постоянного обновления пропитывающего раствора в замкнутом объеме и глубина пропитки образцов и оболочек (при одном и том же времени пропитки и одинаковой плотности исходной керамики) также неодинакова (оболочки пропитываются глубже).

Это подтвердилось при разрезке пропитанных экспериментальных оболочек. На данном этапе метод рекомендован для выборочного контроля и для набора экспериментального материала на изделиях, предназначенных для разрушающих испытаний.

Предпринимались попытки исследования возможности применения ультразвуковых методов для контроля динамики пропитки. Предпосылкой послужили проведенные ранее работы по исследованию ультразвуковых характеристик при насыщении кварцевой керамики водой.

Фиксировалось время прохождения УЗ-импульса в образце в процессе пропитки раствором ТМФТ через определенные промежутки времени. Наблюдался рост времени прохождения, причем в разных образцах в различной степени. Иногда изменение носило скачкообразный характер. Но изменения времени прохождения импульса, а следовательно, скорости УЗК весьма незначительны и это вряд ли может служить реальной основой для изучения динамики процесса.

Исследовали также изменение затухания УЗК в процессе пропитки. Измерения амплитуды эхосигнала проводились с помощью осциллографа Le Croy. По мере насыщения образца пропитывающим раствором затухание растет. Технические трудности, присущие амплитудным методам и связанные с обеспечением стабильного акустического контакта, а также необходимость обеспечить достаточное усиление, не позволили на данном этапе продолжить исследования по затуханию УЗК. В настоящее время ведутся поиски других методов неразрушающего контроля динамики процесса пропитки.

#### Литература

1. Разработка технологии и конструкции двухслойных головных частей летательных аппаратов: дис.канд.техн.наук: 05.17.11/Русин Михаил Юрьевич. – М.: НИИТС, 1988. – 267с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГЕРМЕТИКА КАК АДГЕЗИВА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ СТАРЕНИЯ

*В.Г.Цварава, С.Б.Воробьев, П.А.Степанов, В.И.Неповинных, А.С.Хамицаев* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Анализ поверхностей разрушения клеевого шва в клеевых композициях стеклокерамика–герметик–сплав 32НКД показал, что в процессе старения образцов при температурах  $\geq 250\text{--}300^\circ\text{C}$  в слое герметика образуется сравнительно симметричная относительно центра склейки зона деструкции, характеризующаяся специфическим рисунком своего микрорельефа, цветом и характером разрушения (соотношением площадей когезионного, адгезионного и смешанного разрушения). Специфика рисунка этой зоны определяется величиной температуры, а также продолжительностью выдержки образца при данной температуре и толщиной клеевого шва. Эксперименты на композициях металл–герметик–стекло и стекло–герметик–стекло показали, что эта зона, возникнув в центре склейки на начальном этапе старения, увеличивается по площади, распространяясь от центра к периферии склейки по мере продолжения старения [1]. В этой же работе приводятся примеры поверхностей разрушения образцов без теплового старения и образцов, прошедших старение в изотермическом режиме при температурах 250, 300 и  $320^\circ\text{C}$  в течение различных временных интервалов.

Эксперименты показали, что фиксируемая на поверхности разрушения зона аномальной деструкции не связана ни с механическим воздействием на слой адгезива во время сдвиговой деформации ни с различием КТЛР у керамики (стекла) и металла. Поэтому было сделано предположение, что формирование такой структуры в толще клеевого слоя в процессе теплового старения обусловлено пространственной анизотропией физико-химических процессов, протекающих при термодеструкции герметика, которые, в свою очередь, могут сопровождаться неравномерным распределением температуры по площади склейки.

Для проверки этого предположения было изготовлено два образца (контрольный и экспериментальный), каждый из которых представлял собой склейку с помощью герметика Виксинт У-2-28 двух стеклянных пластин размером  $\approx 80 \times 80 \times 7$  мм. Толщина стекол – 4 мм, толщина клеевого шва – 0,5 мм. При склейке экспериментального образца в слое герметика были установлены 3 термопары ХА (диаметр 0,2 мм). Термостарение образцов проводилось в изотермическом режиме в печи сопротивления без принудительной вентиляции рабочего объема.

Испытания начинались с теплового старения контрольного образца при температуре  $(300,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ . Они показали, что темное пятно в центре образца визуально можно обнаружить через 16 часов теплового старения (рис.1). Потеря веса образцом за это время составила 0,20%. Продолжение термостарения в течение еще 16 часов сопровождалось увеличением площади пятна, а потеря веса достигла примерно 0,25%. Аналогичные процессы происходили и при тепловом старении экспериментального образца (рис.1).

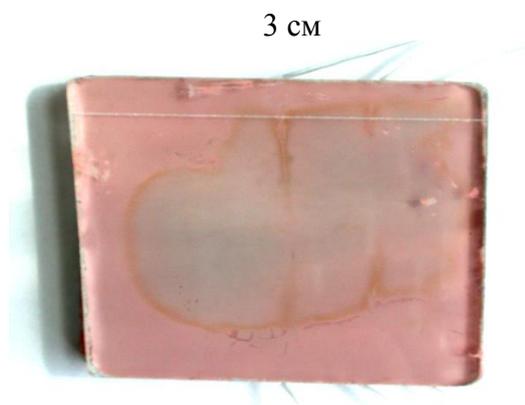


Рис.1. Экспериментальный образец после 32 ч старения при температуре 300°C

Исследование поля распределения температуры по площади клеевого соединения в процессе термодеструкции герметика проводилось с использованием автоматизированного комплекса исследования теплофизических свойств материалов "РОТАН". Анализ термограмм, полученных на этом комплексе, показал, что после выхода печи на стационарный режим (300,0±0,5)°C термопары фиксировали убывание температуры от центра склейки, где она составляла ≈ 300°C, к периферии, так что различие в температурах между крайними термопарами достигало 7–8°C (рис.2). В режиме старения образца при температурах ≤ 250°C указанных выше перепадов температуры между центром склейки и ее периферией не наблюдалось, так что температурное поле по всей площади склейки являлось практически однородным.

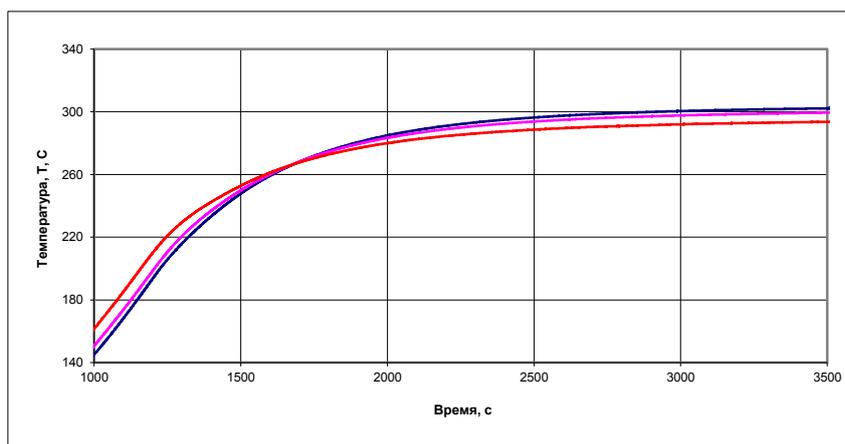


Рис. 2. Распределение температуры по площади клеевого соединения экспериментального образца

#### Литература

1. Цверава В.Г., Русин М.Ю., Верева В.Г., Бородай С.П., Неповинных В.И., Хамицаев А.С. Влияние высокотемпературной тепловой обработки на свойства герметика Виксинт У-2-28 // Клеи. Герметики. Технологии. 2006. № 3. С.26–31.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СЛУЧАЙНО- НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР

*О.М.Алифанов, В.В.Черепанов* ( МАИ, г.Москва, Россия )

Теплозащитные высокопористые волокнистые материалы типа ТЗМК и ТЗМ находят широкое применение в различных областях техники. Значительная часть их физических свойств получается, как правило, лишь экспериментально. При этом определение различных составляющих характеристик, таких, как кондуктивная и радиационная компоненты эффективной теплопроводности и т.п., является достаточно проблематичным. Еще большие проблемы возникают при определении эффективных характеристик материала, значения которых формируются процессами, имеющими сугубо локальный или спектральный характер. К ним можно отнести эффективные коэффициенты аккомодации энергии, комплексные показатели преломления, коэффициенты рассеяния и поглощения излучения и т.д. В целом сама возможность определения и прогнозирования таких свойств композитов либо весьма ограничена, либо практически исключена без привлечения средств моделирования.

Сильнейшая локальная неоднородность и анизотропия волокнистых высокопористых материалов значительно сужает спектр подходов к математическому моделированию их

структуры и свойств. Поэтому получение их характеристик с помощью регулярной ортогональной случайно-неоднородной волокнистой модельной системы [1] до сих пор остается не имеющим альтернативы.

Практическая работа с такой модельной системой позволила выявить ряд ее недостатков, которые и были устранены в предлагаемой модифицированной модели. К ним следует отнести, прежде всего, заложенное в основу старой модели требование постоянства величины объема элементарных фрагментов модельной системы. Это условие, с одной стороны, не имеет под собой сколько-нибудь значимого физического обоснования, а, с другой – фактически исключает повторяемость результатов усреднения характеристик генерируемых серий элементарных фрагментов ортогональной системы, которые и интерпретируются при таком подходе как характеристики исследуемого материала. Преодолена и свойственная оптической части модели [1] ограниченность рассматриваемых спектральных диапазонов, а также исключен ряд частных ограничений и моделей, определяющих свойства компонентов системы.

На основе модифицированной модели был создан новый программный комплекс, позволяющий адекватно описывать материалы рассматриваемых типов. На рис.1 приведены полученные в результате расчетов кривые температурных зависимостей как эффективной теплопроводности, так и ее радиационной и кондуктивной составляющих для материала ТЗМК-10 при давлении  $P=1$  атм. Там же показаны имевшиеся в нашем распоряжении результаты эксперимента, проведенного в ВИАМ (г.Москва).

Основным достижением модифицированного подхода является достижение высокой надежности в получении свойств волокнистых композитов, имеющих, с одной стороны, определенные гистограммы распределения волокон по длинам, диаметрам и типам материалов, из которых они изготовлены, а, с другой – имеющие такие априори задаваемые характеристики, как показатели анизотропии и эффективная массовая плотность. Высокая повторяемость значений характеристик генерируемых статистических ансамблей элементарных фрагментов среды открывает широкие возможности по включению программного комплекса в глобальные программные оболочки, позволяющие решать как вопросы прогнозирования свойств материалов, так и обратные задачи по определению эффективных характеристик композитов, которые крайне сложно определить экспериментально. На рис.2 показана рассчитанная для ТЗМК-10 температурная зависимость эффективного коэффициента аккомодации энергии молекул воздуха при их взаимодействии с кварцевым волокном.

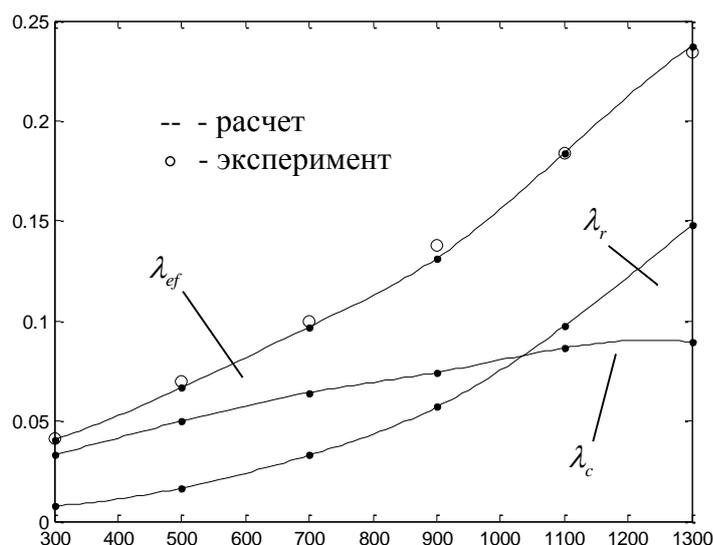


Рис.1. Результаты расчетов и эксперимента для ТЗМК-10 :

$\lambda_{ef}$  – эффективная;  $\lambda_r$  – радиационная;

$\lambda_c$  – кондуктивная теплопроводности

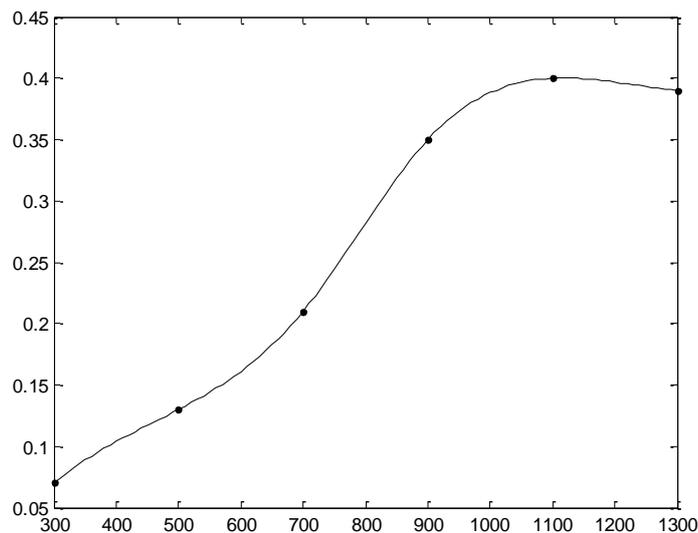


Рис.2. Температурная зависимость эффективного коэффициента аккомодации энергии для ТЗМК-10 (P = 1 атм)

#### Литература

1. Alifanov O.M., Bojkov N.A. Les Methodes des Previsions In Formatiquers des Materaux Composities de Haute Porosite et de L'analyse des Systems de la Protection Thermique a leur Basc. // Proc.of Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing. Noordwijk, The Netherlands, 27–29 March 1996 (ESA SP-386, June 1996).

## ПОЛУЧЕНИЕ ПЛОТНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

*А.И.Захаров, Н.А.Попова* (РХТУ им.Д.И.Менделеева, г.Москва),  
*А.С.Лысенков, Ю.Ф.Каргин* (ИПК РАН, г.Москва),  
*В.В.Закоржевский* (ИСМАН, г.Черноголовка, МО, Россия)

Нитрид кремния – один из самых перспективных высокотемпературных материалов. Исследования показали, что материалы на основе нитрида по комплексу свойств значительно превосходят другие типы керамических материалов. Нитрид кремния и материалы на его основе обладают высокой рабочей температурой (до 1700°C), износостойкостью, химической инертностью, повышенной прочностью и трещиностойкостью. Однако получение плотноспеченной керамики на основе нитрида кремния затруднено в связи с высокой степенью его диссоциации при обжиге. Поэтому для получения плотноспеченного нитрида кремния требуются добавки, способствующие уплотнению образцов при температурах ниже температуры начала значительной диссоциации нитрида кремния.

Поскольку образование силикатных и сиалоновых фаз в процессе спекания способствует уплотнению материалов на основе нитрида кремния, представляет интерес использование в качестве минерализирующих заранее синтезированных добавок систем  $Al_2O_3-Y_2O_3$  и  $Al_2O_3-Si_2O_3$ .

Достижение высоких эксплуатационных характеристик нитридной керамики может быть обеспечено применением в качестве исходного сырья порошков, свойства которых отвечают следующим требованиям:

- высокое содержание основного продукта (низкое содержание кремния, оксидов металлических элементов, кислорода до 1,5 масс.%);
- монофракционность частиц высокой дисперсности;

– высокое содержание  $\alpha$ -фазы нитрида кремния.

С целью выбора наиболее перспективного отечественного сырья исследовался порошок нитрида кремния, полученный в ИСМАН методом СВС, с содержанием  $\alpha$ -фазы 95 %, удельной поверхностью порошка 7,4 м<sup>2</sup>/г.

Также использовался порошок нитрида кремния, полученный методом плазмохимического синтеза с удельной поверхностью 20 м<sup>2</sup>/г.

Спекающие добавки алюмоиттриевого граната и муллита синтезировали отдельно и вводили в количестве до 20 %.

Добавки алюмоиттриевого граната и муллита были синтезированы из смеси гидроксидов алюминия и иттрия, полученных методом соосаждения, и белой сажи. Концентрация раствора солей 0,95 С, где С – растворимость солей при температуре кипения. Смесь гидроксидов фильтровали, промывали и прокаливали при 1000°С в течение 2 ч.

Спекание образцов осуществляли в засыпке из гранулированного порошка нитрида кремния в среде азота в температурном интервале 1750–1950°С, продолжительность выдержки составляла 2 ч.

Полученные образцы исследовали методами петрографического, рентгенофазового анализа и электронной микроскопии. Определяли плотность, водопоглощение и механическую прочность образцов. Свойства полученных материалов приведены в таблице.

Плотность образцов лежит в пределах 2,9 – 3,1 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость составила 1–10 %. Предел прочности при изгибе образцов, полученных из порошка СВС, был не более 450 МПа. Наилучшие результаты отмечены у спеченных при 1900°С материалов из смеси порошков нитрида кремния, полученных методами СВС и плазмохимического синтеза, смешанных в соотношении 7 : 3, с 10 % добавок муллита и алюмоиттриевого граната: плотность таких образцов превышала 2,95 г/см<sup>3</sup>, прочность на изгиб – 520 МПа.

Анализ фазового состава образцов показал, что основная фаза была представлена изометрическими кристаллами нитрида кремния размером 6–7 мкм (при спекании с 10 % муллита) и 3 мкм (с добавкой алюмоиттриевого граната). В последнем случае присутствовали также призматические кристаллы размером 4–8 мкм. Добавки образовывали непрерывную фазу, частично растворяющую зерна нитрида кремния по их периферии, а при использовании добавок алюмоиттриевого граната – кристаллизующуюся в форме твердого раствора кубической сингонии.

Таблица

Керамические свойства и механические характеристики материалов на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

| Добавка, количество (масс.%) | Средняя плотность, г/см <sup>3</sup> |          | P <sub>о</sub> , % | $\sigma_{изг}$ , МПа |
|------------------------------|--------------------------------------|----------|--------------------|----------------------|
|                              | прессовки                            | керамики |                    |                      |
| Муллит, 10                   | 1,82                                 | 3,05     | 1,2                | 540                  |
| Муллит, 20                   | 1,81                                 | 2,88     | 7,4                | 300                  |
| Алюмоиттриевый гранат, 10    | 1,84                                 | 3,01     | 4,2                | 515                  |
| Алюмоиттриевый гранат, 20    | 1,77                                 | 2,99     | 2,3                | 400                  |

Электронно-микроскопические исследования образцов добавки муллита показали, что их микроструктура в основном состоит из плотной стеклообразной матрицы с единичными порами размером 10–15 мкм. В матрице располагаются призматические кристаллы нитрида кремния длиной до 10 и диаметром до 3 мкм.

Таким образом, при содержании добавки, превышающем 10 %, плотность и прочность образцов снижались вследствие образования значительных количеств вторичных фаз, в том числе стеклофазы. Образцы с максимальными значениями прочности были получены при

меньшем количестве вводимых добавок и характеризовались однородным распределением стеклофазы сложного состава и плотным срастанием кристаллов нитрида кремния.

В результате проведенной работы получена керамика на основе порошков  $\text{Si}_3\text{N}_4$  различной природы с пределом прочности при изгибе 500–540 МПа.

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ КЛАССА $\text{SiO}_2\text{--SiO}_2$**

*Н.И.Арсланова, Б.Ф.Пронин* (ОАО “Композит”, г.Королев, МО, Россия)

В настоящее время в качестве РТЗМ для защиты антенно-фидерных устройств летательных аппаратов широко применяются как керамические материалы, так и стеклопластики на основе органических и неорганических связующих, армированные кварцевыми или кремнеземными волокнами и тканями.

Керамические материалы превосходят стеклопластики по радиотехническим свойствам, но уступают им по стойкости к ударным нагрузкам, а также по технологичности при изготовлении крупногабаритных деталей сложной формы.

В последние годы значительно возросли требования к РТЗМ по уровню и стабильности диэлектрических и радиотехнических характеристик в сочетании с высокими прочностными и теплофизическими свойствами в условиях воздействия высоких давлений и тепловых потоков. Керамика в большей степени удовлетворяет этим требованиям, однако возможность ее применения несколько ограничивает низкая стойкость к термоударам в сравнении со стеклопластиковыми.

В связи с этим был разработан новый класс композиционных материалов (КМ) на основе  $\text{SiO}_2\text{--SiO}_2$ , который представляет собой системы с высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  (до 99,5%), получаемые методом насыщения объемного кварцевого наполнителя диоксидом кремния многократными пропитками водной коллоидной дисперсией кремния (кремнеземом) с последующей сушкой и термообработкой для удаления влаги и формирования структуры матрицы с образованием силоксановых связей.

Отработаны технологические режимы изготовления деталей из материалов на основе  $\text{SiO}_2\text{--SiO}_2$ , исследован комплекс свойств разработанного материала, изготовлены и поставлены комплекты деталей для применения в изделии РКТ.

## **ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ОКСИДА ИТТРИЯ И ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА**

*Д.О.Лемешев, Н.А.Макаров, Н.А.Попова*  
(РХТУ им.Д.И.Менделеева, г.Москва, Россия)

В последнее время проведено множество исследований, как отечественных, так и зарубежных, по созданию прозрачных керамических материалов, что показывает их востребованность в современной промышленности.

В отличие от обычной керамики аналогичного типа эти материалы имеют практически беспористую структуру, способны пропускать свет, сохраняя другие свойства, присущие обычным, аналогичным по составу керамическим материалам, а в отдельных случаях и превосходят их.

Материалы на основе оксида иттрия и иттрий-алюминиевого граната обладают высоким показателем светопропускания в видимой области спектра.

Такие материалы призваны заменить стекло в приборах, которые работают в условиях ночного видения, высоких температур, агрессивных сред и т.д. В настоящее время стекло не удовлетворяет новым предъявляемым к нему требованиям.

Светопропускание, высокая плотность, возможность получения изделий с высоким классом обработки поверхности (за счет отсутствия в таких материалах стекловидных фаз) способствовали тому, что области применения прозрачных материалов существенно расширились. Например, введение в керамику ионов-активаторов  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  позволяет использовать эти материалы в качестве рабочего тела твердотельного лазера.

О технологии керамики из оксида иттрия накоплено достаточно много сведений. Приведены сведения об изготовлении такой керамики спеканием в вакууме или водороде при высоких температурах. Заготовки получали полусухим или изостатическим прессованием из различных материалов. Однако спекание керамики из оксида иттрия до плотного состояния без введения модифицирующих добавок ( $\text{ThO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$  и др.) практически невозможно. Получение прозрачной керамики на основе оксида иттрия без введения добавок возможно только методом горячего прессования.

Для получения беспористого поликристаллического материала необходимо при спекании вызвать такие диффузионные процессы на границах и в объеме кристаллов, которые обеспечат полное зарастание всех внутрикристаллических пор. Для этого требуется уменьшить скорость диффузионных процессов между кристаллами и увеличить скорость диффузии в объеме кристаллов. Указанные эффекты достигаются при введении в материал модифицирующих добавок, которые образуют с основным оксидом твердые растворы, причем ионный радиус катиона вводимого оксида должен быть близок к ионному радиусу катиона основного оксида. Растворяясь в решетке основного оксида, добавка уменьшает поверхностную энергию границ кристаллов, что снижает диффузию между границами и скорость роста зерен. Для увеличения скорости диффузии в объеме кристалла необходимо, чтобы валентности катиона добавки и основного оксида различались. Это различие приводит к образованию дополнительного количества вакансий по катиону и аниону и существенно увеличивает скорость зарастания пор.

Использование таких дорогостоящих оксидов и методов их изготовления приводит к повышению стоимости конечного изделия. Присутствие четырехвалентных катионов добавки препятствует использованию таких материалов в лазерной технике, поскольку способствует глушению лазерного излучения.

Керамика на основе иттрий-алюминиевого граната является одним из перспективных материалов, поскольку обладает рядом ценных свойств: высокой температурой плавления, отсутствием полиморфных превращений, хорошими электрофизическими свойствами, повышенной устойчивостью в плазме щелочных металлов, очень высокой термостойкостью.

Получение прозрачных материалов из иттрий-алюминиевого граната связано с использованием дорогостоящего и сравнительно малопроизводительного оборудования.

Объединение этих свойств в одном материале – есть цель данной работы. Этот материал имеет сравнительно низкую температуру спекания  $1700\text{--}1890^\circ\text{C}$ . Такой материал лишен недостатка материала на основе оксида иттрия, поскольку не имеет четырехвалентных ионов в своей структуре, и, следовательно, может использоваться в лазерной технике.

Методы получения исходных порошков оксида иттрия и иттрий-алюминиевого граната разнообразны. Оксид иттрия возможно получать золь-гель методом, методом осаждения, непосредственного синтеза. Иттрий-алюминиевый гранат – твердофазным методом, методом “горения”, методом “вымораживания”, методом соосаждения, золь-гель методом, гидротермальным методом.

В данной работе оксид иттрия синтезировали из карбоната иттрия, полученного методом осаждения из концентрированного раствора хлорида иттрия в раствор осадитель карбоната аммония. Карбонат иттрия прокаливали в диапазоне температур  $900\text{--}1500^\circ\text{C}$ .

Иттрий-алюминиевый гранат синтезировали из смеси гидроксидов иттрия и алюминия, полученной методом соосаждения из концентрированного раствора стехиометрической 3:5

смеси хлорида иттрия и хлорида алюминия в раствор осадитель аммиака. Смесь гидроксидов иттрия и алюминия также прокачивали в диапазоне температур 900–1500°C.

Исходная смесь гидроксидов и полученный после прокачивания иттрий-алюминиевый гранат 3:5 исследовали методом ИК-спектроскопии. Расшифровка данных анализа позволяет сделать вывод о наличии зарождения связей иттрий-алюминиевого граната 3:5 уже на стадии соосаждения. Это дает основание судить о наследовании структуры кристаллической решеткой иттрий-алюминиевого граната и возможности получать методом соосаждения тонкодисперсный, монофракционный и активный порошок.

Светопропускание конечных изделий напрямую зависит от ряда факторов: степени чистоты порошка, метода его получения, дисперсности и фракционного состава.

Электронно-микроскопическое исследование полученных порошков иттрий-алюминиевого граната 3:5 подтвердило предположение о наследовании структуры. Размер частиц иттрий-алюминиевого граната не более 400 нм.

Электронно-микроскопическое исследование полученных порошков оксида иттрия также выявило наследование оксидом иттрия структуры исходного материала. Размер частиц оксида иттрия не превышает 400 нм.

Далее порошки оксида иттрия и иттрий-алюминиевого граната 3:5 смешивали в соотношении 1–70 масс.% (по оксиду иттрия). Смешение проводили в тефлоновых барабанах в планетарной мельнице в течение 3, 5, 10 и 20 мин. Из полученных порошков под давлением 100 МПа прессовали диски диаметром 31 мм и высотой 3–4 мм. В качестве связки использовался 6 % раствор парафина в четыреххлористом углероде или 5 % раствор поливинилового спирта. Диски обжигали в воздушной среде при 1000–1500°C с выдержкой при конечной температуре 2–4 ч, а затем спекали в вакуумной печи при 1600–1890°C с выдержкой 1–10 ч. Далее образцы подвергали “осветлению” при 600–1200°C.

Полученные результаты доказывают возможность получения оптически прозрачных керамических материалов на основе оксида иттрия и иттрий-алюминиевого граната 3:5 без введения модифицирующих добавок.

## **КЕРАМИКА ДЛЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ**

*Н.А.Макаров, Е.С.Лукин, Н.А.Попова*  
(РХТУ им.Д.И.Менделеева, г.Москва, Россия)

Современное состояние развития техники требует создания новых видов керамических материалов, обладающих регулируемой структурой и стабильным уровнем физико-химических свойств. Одна из проблем отечественного материаловедения – решение вопроса о разработке износостойкой керамики, которая могла бы быть с успехом применена в качестве футеровочных элементов помольных агрегатов и мелющих тел.

В настоящее время все большее значение приобретают мелющие тела на основе оксида алюминия. Их важнейшее преимущество по сравнению с другими материалами, используемыми в аналогичных целях, – более интенсивное измельчающее воздействие, что, несомненно, приводит к интенсификации помола. Это преимущество важно, прежде всего, для шликеров с высокой плотностью и вязкостью.

Цель данной работы – исследовать износостойкость различных мелющих тел на основе оксида алюминия и кинетику измельчения этими материалами кварцевого песка и электроплавленного корунда (ЭПК).

Керамика под маркой “Ш” разработана в РХТУ им. Д. И. Менделеева, материал Уралит произведен на ООО “Конаковский фаянс”, Alubit 90 – компанией “Industrie Bitossi SpA” (Италия). Керамика Уралит и Alubit 90 выбрана как наиболее часто используемая на сегодня в промышленности.

Для проведения модельных экспериментов в барабан загружали мелющие тела, измельчаемый материал и воду в соотношении 1:1:1. Намол контролировали по потере массы через каждые 10 ч измельчения. Удельную поверхность измельчаемого материала определяли методом ПСХ.

По величине намола за 100 ч испытаний на кварцевом песке мелющие тела располагаются в ряд: Alubit 90 < Ш-2 < Ш-3 < Ш-1 < Уралит. Рассчитанные значения скоростей истирания составили (%/час): Ш-1 –  $10,4 \cdot 10^{-3}$ ; Ш-2 –  $6,1 \cdot 10^{-3}$ ; Ш-3 –  $7,9 \cdot 10^{-3}$ ; Уралит –  $26,0 \cdot 10^{-3}$ ; Alubit 90 –  $4,7 \cdot 10^{-3}$ .

По достижении наибольшей величины удельной поверхности за 100 ч испытаний мелющие тела располагаются в ряд: Ш-2 > Alubit 90 > Ш-3 > Ш-1 > Уралит.

Эксперименты по измельчению ЭПК показали, что по величине намола мелющие тела располагаются в ряд: Ш-2 < Ш-3 < Alubit 90 < Ш-1 < Уралит. Скорости истирания составили (%/час): Ш-1 –  $26,3 \cdot 10^{-3}$ ; Ш-2 –  $18,1 \cdot 10^{-3}$ ; Ш-3 –  $21,5 \cdot 10^{-3}$ ; Уралит –  $40,5 \cdot 10^{-3}$ ; Alubit 90 –  $25,2 \cdot 10^{-3}$ .

По величине максимальной удельной поверхности за 100 ч испытаний мелющие тела располагаются в ряд: Ш-3 > Ш-2 > Ш-1 > Alubit 90 > Уралит.

Наиболее оптимальным материалом, с точки зрения низкой истираемости и высоких значений удельной поверхности измельчаемого материала, является Ш-2.

Проанализирована кинетика измельчения по экспоненциальному уравнению:

$$\frac{S_{\max} - S_0}{S_{\max} - S_{\tau}} = \exp(k\tau), \quad (1)$$

где  $S_{\max}$  – максимально достижимая удельная поверхность;  $S_0$  и  $S_{\tau}$  – удельная поверхность в момент времени  $\tau = 0$  и  $\tau$ ;  $k$  – эмпирический коэффициент,

и уравнению Л. П. Карпиловского:

$$S_{\tau} = S_0 + \frac{b\tau}{c\tau + 1}, \quad (2)$$

где  $b$  – скорость прироста удельной поверхности в момент времени  $\tau = 0$ ;  $c$  – замедление скорости прироста удельной поверхности во времени.

Результаты приведены в табл. 1 и 2.

Наиболее полную оценку дисперсности измельчаемого материала дает функция распределения частиц по размерам. Применительно к процессам тонкого измельчения она является двухпараметрической, т.е. однозначно определяется характеристическим размером частиц и дисперсией распределения. Вследствие сложности их учета удобнее пользоваться удельной поверхностью. Такое упрощение вследствие аффинности кривых распределения для одинаковых порошков одного и того же материала, измельчаемых в мельнице определенного типа, вполне оправдано.

Таблица 1

Анализ кинетики измельчения по экспоненциальному уравнению

| Материал | Электроплавленный корунд        |                | Кварцевый песок                 |                |
|----------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|
|          | $S_{\max}$ , см <sup>2</sup> /г | $k \cdot 10^3$ | $S_{\max}$ , см <sup>2</sup> /г | $k \cdot 10^3$ |
| Ш-1      | 18650                           | 19,0           | 19110                           | 43,0           |
| Ш-2      | 15740                           | 27,0           | 32600                           | 45,0           |
| Ш-3      | 18368                           | 27,0           | 25600                           | 30,0           |
| Alubit   | 19493                           | 18,0           | 32004                           | 34,0           |
| уралит   | 8641                            | 68,0           | 9597                            | 92,0           |

Анализ кинетики измельчения по уравнению Л. П. Карпиловского

| Материал | ЭПК         |                |                |                | Песок       |                |                |                |
|----------|-------------|----------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|----------------|
|          | до перегиба |                | после перегиба |                | до перегиба |                | после перегиба |                |
|          | $b$         | $c \cdot 10^3$ | $b$            | $c \cdot 10^3$ | $b$         | $c \cdot 10^3$ | $b$            | $c \cdot 10^3$ |
| Ш-1      | 44,5        | -2,9           | 165,6          | 21,0           | 358,9       | 26,3           | 358,9          | 26,3           |
| Ш-2      | 15,5        | -16,2          | 239,2          | 28,0           | 81,6        | -16,1          | 848,1          | 39,9           |
| Ш-3      | 16,2        | -14,0          | 257,9          | 35,0           | 79,5        | -10,9          | 377,0          | 35,8           |
| Alubit   | 16,8        | -14,6          | 92,8           | 11,1           | 19,6        | -30,1          | 775,1          | 55,0           |
| Уралит   | 11,4        | -28,0          | 95,0           | 40,8           | 39,2        | -8,3           | 333,5          | 132,0          |

Выполнена обработка экспериментальных данных с помощью графического пакета Advanced Grapher V.2.08. Из имеющихся моделей зависимостей  $S_{y0} = f(\tau)$  максимальный коэффициент корреляции и минимальное стандартное отклонение характерны для полиномиальных зависимостей  $n$ -ой степени, для которых  $n = 6$ .

Проведены опытно-промышленные испытания разработанной керамики в лаборатории ОАО “Дулевский красочный завод”. В качестве материала для измельчения использовали керамическую краску, представляющую собой смесь пигмента и двух гранулированных флюсов. Помол осуществляли в фарфоровых барабанах мокрым способом. Для получения сравнительных данных параллельно при прочих равных условиях осуществляли помол материалов уралитовыми цилиндрами. Лучший из разработанных материалов по износостойкости в 14 раз превосходит уралитовые мелющие тела.

Таким образом, разработаны материалы, имеющие температуру спекания 1500–1520°C, перспективные для использования в качестве мелющих тел и по показателям износостойкости не уступающие зарубежным аналогам. Тщательное регулирование целого комплекса параметров, их согласование друг с другом открывает новые возможности для интенсификации тонкого помола с точки зрения размолоспособности сырьевых материалов, износостойкости мелющих тел и футеровочных элементов.

## **СВЧ – СПЕКТРОСКОПИЯ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ, ЛЕГИРОВАННОЙ $Cr$ , $Ti$ , $Fe$ , В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 8 – 26 ГГц**

***Б.А.Голдин, Ю.И.Рябков, Н.А.Секушин***

(Институт химии Коми научного центра УрО РАН, г.Сыктывкар, Россия)

Для защиты антенн радиолокаторов традиционно используют радиопрозрачные стеклопластики [1]. Эти материалы пропускают СВЧ-излучение в широком диапазоне частот, но обладают относительно невысоким коэффициентом пропускания. В настоящей работе проведено исследование радиопрозрачности керамических материалов на основе корунда. Достоинством этих материалов является высокая ударная прочность и трещиностойкость, что делает их пригодными для использования в качестве бронезащитных элементов.

Синтез образцов осуществлялся по традиционной керамической технологии. Были исследованы три типа образцов, химический состав которых представлен в табл.1. Формовку образцов проводили прессованием в стальных пресс-формах при давлении 500 атм. Полученные заготовки обжигали на воздухе при температуре 1450°C в течение 1 часа. Выход на рабочую температуру производили со скоростью 100°C/час, с такой же скоростью проводили и охлаждение образцов после обжига.

Таблица 1  
Химические составы исследованных образцов

| Образец | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  |
|---------|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|
| 1       | 91,76                          | 4,43             | 2,55             | 0,191                          | 1,07                           | следы | –    |
| 2       | 87,34                          | 5,54             | 4,39             | 0,4                            | 2,33                           | следы | –    |
| 3       | 95,1                           | 1,03             | 0,14             | –                              | 0,253                          | 2,017 | 1,14 |

Рентгено-фазовый анализ показал, что преобладающим структурным типом является твердый раствор (Al, Cr, Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со структурой корунда. Обнаружено незначительное количество силлиманита Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>. Выявлены также следы псевдобрукита FeTiO<sub>3</sub> (перовскитовый структурный тип).

Для изучения СВЧ-свойств керамики нами был использован измеритель коэффициента стоячей волны панорамный Р2-60, с помощью которого производились измерения в трех диапазонах частот: 1) 8 – 12 ГГц; 2) 12 – 18 ГГц; 3) 17 – 26 ГГц. Керамические образцы выпиливали с поперечным сечением, равным внутреннему размеру волновода, соответственно 10 x 23 мм; 8 x 16 мм; 5,5 x 11 мм. Затем образцы устанавливали в волновод и производили измерения коэффициента стоячей волны, из которого определяли коэффициенты отражения  $K_{omp}$  и пропускания  $K_{np}$ .

Рассматриваемые материалы интересны тем, что их спектры в СВЧ-диапазоне имеют тонкую структуру. Особый интерес представляют полосы “сверхпрозрачности”, положение которых для трех образцов приведено в табл.2.

Таблица 2  
Положение полос пропускания и величины коэффициентов отражения и пропускания

| Образец | № полосы | Положение, ГГц | $K_{omp}$ (%) | $K_{np}$ (%) |
|---------|----------|----------------|---------------|--------------|
| 1       | 1        | 10,7±0,2       | 4,7±0,1       | 92±1         |
|         | 2        | 14,1±0,2       | 10,0±0,4      | 87±1         |
|         | 3        | 20,0±0,2       | 11,0±0,4      | 86±1         |
| 2       | 1        | 10,6±0,2       | 6,0±0,4       | 91±1         |
|         | 2        | 14,5±0,2       | 6,0±0,3       | 91±1         |
|         | 3        | 19,5±0,2       | 14,5±0,5      | 83±1         |
| 3       | 1        | 17,0±0,2       | 7,0±0,3       | 90±1         |
|         | 2        | 22,0±0,2       | 7,5±0,3       | 90±1         |

Обнаруженные окна “сверхпрозрачности” в рассматриваемых керамических материалах могут быть объяснены переходами ядер примесных атомов между уровнями сверхтонкого расщепления под действием падающей электромагнитной волны. В начальный момент идёт накачка энергии, при которой осуществляются переходы с нижнего на верхний уровень. После возникновения инверсной заселенности создаются условия для вынужденных переходов с верхнего на нижний уровень. Из теории индуцированных переходов известно, что возникающая при этом вторичная волна имеет ту же частоту, фазу и направление распространения, что и первичная. Практически 90% энергии проходит через материал. Эта величина значительно превышает коэффициент пропускания широкополосных радиопрозрачных материалов из стеклопластика [1]. Таким образом, исследованные материалы могли бы быть использованы для механической защиты СВЧ-оборудования в тех случаях, когда работа последних осуществляется на фиксированной частоте.

## Литература

1. Гуртовник И.Г. и др. Радиопрозрачные изделия из стеклопластика / Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.Г. – М.: Мир, 2002. – 368 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛУПРОЗРАЧНОСТИ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ОТМ-357

*М.О. Забейжайлов, С.П. Бородай*

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

Стеклокерамика ОТМ-357 является частично прозрачным, сильно рассеивающим материалом. Перенос тепла в ней помимо теплопроводности по твердому каркасу осуществляется также излучением. Чтобы учесть радиационную составляющую переноса тепла при определении её коэффициента теплопроводности, необходимо знать показатели поглощения и рассеяния [1] этого материала в области спектра, где располагаются максимумы теплового излучения (0,5–4,5 мкм). В ходе работы выполнено определение спектральных натуральных показателей (далее в тексте – показателей) поглощения и рассеяния по спектрам коэффициентов пропускания и отражения стеклокерамики и стекла ОТМ-553, идентичного со стеклокерамикой химического состава, на образцах различной толщины.

Измерения коэффициентов пропускания и отражения в диапазоне длин волн 0,5 – 4,5 мкм образцов стеклокерамики и стекла выполнялись на спектрофотометрах СФ-14, ИКС-29 (“ЛОМО”), DU-8B (“Beckman Instruments”), а также на Фурье-спектрометрах Nicolet Antaris, Nicolet 380 (“Thermo Electron”). Толщина образца стекла составляла 9,95 мм, толщина образцов стеклокерамики изменялась от 0,076 до 0,388 мм. Плотность стекла и истинная плотность стеклокерамики измерялись по ГОСТ 2211-92 и обе составляли 2,55 г/см<sup>3</sup>, кажущаяся плотность стеклокерамики – по ГОСТ 2409-95 и равнялась 2,49 г/см<sup>3</sup>.

Спектральная зависимость показателя поглощения образцов стекла  $\kappa_{\text{стекла}}$ , мм<sup>-1</sup>, определялась в соответствии с ГОСТ 7601-78 по формуле:

$$\kappa_{\text{стекла}}(\lambda) = \frac{1}{d} \cdot \ln \frac{(1 - r_{\text{стекла}})^2}{\tau_{\text{стекла}}(\lambda)}, \quad (1)$$

где  $d$  – толщина, мм;  $r_{\text{стекла}}$  – коэффициент отражения от одной грани образца;  $\tau_{\text{стекла}}$  – спектральный коэффициент пропускания образца толщиной  $d = 9,95$  мм.

Было установлено, что в спектральном диапазоне 0,5 – 4,5 мкм в стеклокерамике и в стекле, из которого она получалась путём термической обработки, наблюдаются одни и те же основные полосы поглощения. Поэтому в качестве оценочного значения показателя поглощения стеклокерамики  $\kappa_{\text{кер}}(\lambda)$  использовали в этом диапазоне показатель поглощения стекла, скорректированный по плотности стеклокерамики:

$$\kappa_{\text{кер}}(\lambda) = \kappa_{\text{стекла}}(\lambda) \cdot \frac{\rho_{\text{каж}}}{\rho_{\text{ист}}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{каж}}$  и  $\rho_{\text{ист}}$  – кажущаяся и истинная плотности стеклокерамики.

Ослабление направленного светового потока в стеклокерамике происходит за счёт отражения, поглощения и рассеяния света. По спектрам коэффициентов пропускания и отражения тонких образцов стеклокерамики рассчитывали спектры показателя ослабления света, а затем, вычитая полученные по формуле (2) спектры  $\kappa_{\text{кер}}(\lambda)$ , выполняли расчёт спектральных зависимостей показателей рассеяния  $s_{\text{кер}}(\lambda)$  (ГОСТ 7601-78):

$$s_{\text{кер}}(\lambda) = \left( \frac{1}{d} \cdot \ln \frac{(1 - r_{\text{кер}}(\lambda))^2}{\tau_{\text{кер}}(\lambda)} \right) - \kappa_{\text{кер}}(\lambda), \quad (3)$$

где первый член – спектральный натуральный показатель ослабления стеклокерамики толщиной  $d$ , мм.

Чтобы учесть вклад рассеяния и поглощения в радиационную составляющую теплопроводности материала, необходимо располагать информацией о показателях поглощения и рассеяния элементарного слоя. Под элементарным слоем понимается такой слой, в котором количество поглощенной или рассеянной энергии пропорционально объему слоя [2]. Это означает, что показатели поглощения и рассеяния не должны зависеть от толщины образца, т.е.

$$k_{кер}(d) = const, \quad (4)$$

$$s_{кер}(d) = const. \quad (5)$$

Исследование зависимостей  $k_{кер}(\lambda)$  и  $s_{кер}(\lambda)$  от толщины показало, что рассчитанные по формуле (2) значения  $k_{кер}(\lambda)$  (табл.) соответствуют требованию условия (4) для керамики с постоянной плотностью, а  $s_{кер}(\lambda)$ , рассчитанные по формуле (3), зависят от толщины.

Полученные зависимости спектральных показателей рассеяния от толщины образцов стеклокерамики  $s_{\lambda}(d)$  были проанализированы и в соответствии с условием (5) оценены значения спектральных показателей рассеяния элементарного слоя стеклокерамики (табл.).

Таблица

Оценочные значения спектральных показателей поглощения и рассеяния элементарного слоя стеклокерамики ОТМ-357

| $\lambda$ , мкм | $k_{\lambda}$ , мм <sup>-1</sup> | $s_{\lambda}$ , мм <sup>-1</sup> | $\lambda$ , мкм | $k_{\lambda}$ , мм <sup>-1</sup> | $s_{\lambda}$ , мм <sup>-1</sup> |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0,50            | 0,018                            | ≤20                              | 3,00            | 0,424                            | ≤13                              |
| 0,70            | 0,004                            | ≤18                              | 3,50            | 0,153                            | ≤13                              |
| 0,85            | 0,004                            | ≤17                              | 4,00            | 0,180                            | ≤13                              |
| 2,50            | 0,012                            | ≤13                              | 4,48            | 1,009                            | ≤13                              |

Таким образом, в результате проведенной работы выполнена оценка величины спектральных натуральных показателей поглощения и рассеяния элементарного слоя материала ОТМ-357 в области спектра 0,5–4,5 мкм. Полученные результаты могут быть использованы при отработке программного обеспечения для расчета коэффициента теплопроводности керамических материалов с учетом их частичной прозрачности.

#### Литература

1. Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под общ. ред. А.Е. Шейндлина – М.: Энергия, 1974. – 472 с.
2. Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света / под общ. ред. Б.И. Степанова и А.П. Иванова. – Минск: Наука и техника, 1971. – 487 с.

## ИОНООБМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ЛИТИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОГО СОСТАВА В СОЛЯХ NaNO<sub>3</sub> И KNO<sub>3</sub>

*Т.И.Рожкова, Е.И.Суздальцев, Т.В.Зайчук*  
(ФГУП «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия)

Стеклокерамический материал ОТМ-357, разработанный на нашем предприятии, обладает необходимым комплексом технологических свойств, позволяющим изготавливать из него обтекатели различных типоразмеров для оснащения ракет корабельного и авиационного базирования [1]. Повышенные требования к прочности материала при его использовании в конкретных конструкциях вызывают необходимость его дополнительного упрочнения.

Ранее нами были выполнены работы, позволившие путем ионообменного упрочнения в NaNO<sub>3</sub> получить стеклокерамический материал с прочностью, превосходящей прочность исходного материала не менее чем на 25% [2]. В данной работе предпринята попытка упрочнения

стеклокерамики ОТМ-357 литийалюмосиликатного состава в смеси  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$ , что, по нашему предположению, должно создать большие сжимающие напряжения в поверхностном слое стеклокерамики и повысить степень упрочнения стеклокерамики за счет наличия в ионообменном реагенте ионов  $\text{K}^+$ , имеющих больший ионный радиус  $1,03\text{\AA}$  по сравнению с ионом  $\text{Na}^+$  с ионным радиусом  $0,95\text{\AA}$ . Как и ранее в работе [3], большое внимание было уделено технологическим факторам и их влиянию на степень упрочнения, а также сохранению качества поверхности изделий и образцов в процессе упрочнения. В качестве основного критерия эффективности упрочнения был принят предел прочности при статическом изгибе, именно по приросту прочности мы оценивали успешность эксперимента, другие физико-технические свойства материала, так или иначе связанные с работоспособностью изделия в эксплуатационных условиях, после упрочнения не должны были уступать свойствам исходного материала.

Образцы из стеклокерамики ОТМ-357 размером  $7 \times 7 \times 60$  мм, исходная прочность которых была известна, упрочняли в смеси  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$ , взятых в различных соотношениях, соответствующих содержанию  $\text{NaNO}_3$  100, 75, 50, 25, 0 масс.%. На поверхность образцов наносили слой солевой смеси, высушивали при  $100\text{--}120^\circ\text{C}$  в течение 15–20 мин, а затем подвергали термообработке при температурах от  $525$  до  $650^\circ\text{C}$  и времени выдержки от 60 до 120 мин. Образцы помещали в предварительно нагретую до рабочей температуры печь и по окончании режима извлекали из нее. Полный цикл упрочнения состоял из нескольких стадий. Например, трехстадийное упрочнение образцов с исходной прочностью  $117,6$  МПа в  $100\%$  растворе  $\text{NaNO}_3$  в течение 60 минут приводит к увеличению прочности до  $168,6$  МПа при температуре ионообменного упрочнения  $650^\circ\text{C}$ , но при этой температуре на образцах появляются поверхностные дефекты. Подобные дефекты могут появляться и в случае использования в качестве ионообменного реагента смеси  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$  при температуре  $600^\circ\text{C}$ . С увеличением содержания  $\text{KNO}_3$  в упрочняющем реагенте прочность возрастает, достигая максимума при соотношении солей  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$  1:1, а затем постепенно снижается с увеличением доли  $\text{KNO}_3$  в смеси. Такая зависимость прочности от соотношения солей в упрочняющем реагенте сохраняется во всем исследованном температурно-временном интервале ионообменной обработки. Так, например, при  $T=575^\circ\text{C}$ , времени выдержки при данной температуре 75 мин и при соотношении  $\text{NaNO}_3 : \text{KNO}_3 = 1:1$  средняя прочность составляет  $178,4$  МПа, а при тех же условиях, но при соотношении  $\text{NaNO}_3 : \text{KNO}_3 = 3:1$  прочность снижается до  $163,7$  МПа. Поверхность образцов при этом остается неповрежденной. Эксперименты показали, что температуры термообработки ниже  $525^\circ\text{C}$  не эффективны для упрочнения, так же как и выдержка менее 60 мин и более 120 мин, а упрочнение образцов при температуре выше  $650^\circ\text{C}$  и выдержке более 120 мин приводит к их локальному разрушению вследствие создания чрезмерно напряженного поверхностного слоя. Для достижения максимального упрочнения достаточно трехстадийного цикла, четвертая стадия может даже приводить к некоторому снижению прочности и локальному разрушению образцов.

Наилучшие результаты были получены при следующих параметрах ионообменного упрочнения: трехстадийное упрочнение при температуре  $575\text{--}600^\circ\text{C}$  и времени выдержки при рабочей температуре 60–75 минут в смеси  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$ , взятых в соотношении 1:1. При этом среднее значение прочности образцов составляет  $182$  МПа, а на отдельных образцах прочность достигает и  $270$  МПа, и поверхность образцов не претерпевает каких-либо изменений.

#### Литература

1. Суздальцев Е.И. Синтез высокотермостойких радиопрозрачных стеклокерамических материалов и разработка технологии изготовления на их основе обтекателей летательных аппаратов: дис. докт. техн. наук: 05.17.11/ Суздальцев Евгений Иванович. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2002.– 431с.

2. Суздальцев Е.И., Рожкова Т.И., Зайчук Т.В. Ионообменное упрочнение стеклокристаллического материала  $\beta$ -сподуменового состава // Конструкции и технологии

получения изделий из неметаллических материалов: сб. тез. докл. Ч. 1. – Обнинск, 2004.– С.28–29.

3. Суздальцев Е.И., Рожкова Т.И., Зайчук Т.В. Исследование взаимосвязи качества поверхности образцов  $\beta$ -сподуменовой стеклокерамики со степенью упрочнения при ионном обмене // Огнеупоры и техническая керамика. 2005. №12. С. 14–16.

## **ИОНООБМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА $\beta$ -СПОДУМЕНОВОГО СОСТАВА И ДЕГРАДАЦИЯ ПРОЧНОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ**

*Е.И.Суздальцев, Т.И.Рожкова, Т.В.Зайчук*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Настоящая работа является продолжением серии работ по упрочнению стеклокристаллического материала  $\beta$ -сподуменового состава с целью повышения механической прочности и эксплуатационной надежности изделий. Упрочнение происходит в результате термообработки образца или изделия, на которые предварительно нанесен слой натриевой соли, например, нитрата натрия. При этом происходит ионный обмен: щелочной ион меньшего радиуса ( $\text{Li}^+$ ) обменивается на ион большего радиуса ( $\text{Na}^+$ ), что приводит к возникновению остаточных сжимающих напряжений и, как следствие, к увеличению прочности материала.

Степень упрочнения определяется в основном температурой обработки и ее длительностью. Экспериментально установлено, что однократная термообработка при температуре в интервале 525–600°C продолжительностью 45–60 мин позволяет увеличить прочность материала не более чем на 20%. Для большего упрочнения кратность обработки увеличивали до 6. Каждая стадия дает прирост прочности по сравнению с предыдущей в среднем на 5–7%. Максимального повышения прочности удается достичь при трехкратной или четырехкратной термической обработке при 550–600°C в течение 45–60 мин. При температуре обработки выше 600°C уже при двукратной обработке в течение 60 мин можно повысить прочность материала не менее чем на 50%, но при этом неизбежно появление нарушений поверхности и иногда нарушения целостности образца. То же наблюдается и при более низких температурах, но при более чем четырехкратной термообработке. При исходной прочности стеклокерамики 118 МПа путем ионообменного упрочнения при оптимальных режимах удалось повысить прочность до 160–170 МПа.

Измерения предела прочности при статическом изгибе при 20°C выполняли путем определения величины разрушающей нагрузки при изгибе образца, свободно лежащего на двух опорах, сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета, с последующим вычислением максимального напряжения, возникающего в среднем сечении образца или в плоскости его разрушения в соответствии с требованиями ОСТ 110309–86.

В процессе эксплуатации изделий из упрочненной стеклокерамики неизбежно влияние различных внешних факторов: пыли, влаги, агрессивных сред и прочих, приводящих к разупрочнению материала. Причиной деградации прочности, как правило, является уменьшение слоя сжимающих напряжений из-за частичного уноса материала с поверхности. Для моделирования подобных ситуаций с образцов упрочненного материала путем механической шлифовки снимали слои материала от 50 до 500 мкм с шагом 25–50 мкм. После каждой соответствующей шлифовки измеряли предел прочности при статическом изгибе и сравнивали со значениями предела прочности исходного (неупрочненного) и упрочненного материала. По мере удаления упрочненного слоя прочность уменьшается и, наконец, достигает уровня, соответствующего прочности неупрочненного материала. В наших экспериментах прочность исходного материала составляла 128 МПа, прочность упрочненного материала – 170 МПа. При удалении поверхностного слоя до 100 мкм прочность материала не изменяется в пределах погрешности измерений, при удалении слоя в 250 мкм прочность уменьшается до 145 МПа, а при

удалении 275 мкм поверхностного слоя прочность становится равной прочности исходного материала, то есть 128 МПа. Таким образом, можно предположить, что слой сжимающих напряжений, созданный при его упрочнении, составляет 275 мкм. При воздействии различных неблагоприятных факторов прочность упрочненного материала сохраняется, если с его поверхности не будет происходить уноса (удаления) материала более чем на 100 мкм, высокий уровень прочности сохраняется вплоть до удаления 250 мкм с поверхности образца.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИК-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИН ИОНООБМЕННОГО И НАПРЯЖЁННОГО СЛОЁВ В ЛИТИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКЕ**

*С.П.Бородай, И.С.Палий* (ФГУП «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия)

Для контроля толщины ионообменного и напряжённого слоёв, которые создаются в литийалюмосиликатной стеклокерамике путём ионного обмена, в данной работе был использован метод ИК-спектроскопии отражения.

В ИК-спектре стеклокерамики имеются две полосы поглощения (отражения), расположенные при 1005 и 1075 см<sup>-1</sup>, которые обусловлены валентными антисимметричными колебаниями атомов кислорода и кремния в немоستиковых –Si-O<sup>-</sup>... Li<sup>+</sup> и мостиковых O-Si-O связях, соответственно.

В процессе ионного обмена происходит замена более мелких и лёгких ионов лития на более крупные и тяжёлые ионы натрия. При этом в спектре должна появиться на низкочастотном крыле полосы при 1005 см<sup>-1</sup> ещё одна полоса поглощения, обусловленная валентными антисимметричными колебаниями атомов натрия в немостиковых -Si-O<sup>-</sup>... Na<sup>+</sup> связях. В результате появления этой полосы происходит расширение максимума полосы поглощения (отражения) при 1005 см<sup>-1</sup> и снижение его интенсивности. Эту аналитическую полосу использовали в данной работе для определения толщины ионообменного слоя. Критерием определения толщины ионообменного слоя служило воссоздание формы этой аналитической полосы, которая наблюдается в спектре исходного образца, в спектре образца, содержащего ионообменный слой, после поэтапного его удаления.

Создание механических напряжений сжатия в кварцевом стекле приводит к сужению полосы отражения при 1100 см<sup>-1</sup>, обусловленной, как и полоса при 1075 см<sup>-1</sup> в стеклокерамике, валентными антисимметричными колебаниями мостиковых O-Si-O связей. Поэтому для определения толщины напряжённого слоя была использована методика, которая основана на анализе полуширины полосы отражения, расположенной при 1075 см<sup>-1</sup>, в процессе удаления ионообменного слоя шлифовкой и полировкой. Критерием определения толщины напряжённого слоя служило равенство полуширин аналитических полос отражения у образца с напряженным слоем после его удаления и у образца исходной стеклокерамики.

Процедура определения толщины ионообменного слоя и напряжённого слоя заключалась в следующем. Регистрировали спектры ИК-отражения исходного образца и образца с ионообменным слоем, а также измеряли микрометром толщину d<sub>1</sub> последнего. Затем после каждого поэтапного снятия части ионообменного слоя определяли толщину образца и регистрировали его спектр отражения в области расположения указанных выше аналитических полос. Когда спектр отражения полосы при 1005 см<sup>-1</sup> восстанавливал исходную форму, по измеренной микрометром толщине d<sub>2</sub> образца и исходной толщине d<sub>1</sub> этого же образца рассчитывали толщину d ионообменного слоя:

$$d = d_1 - d_2.$$

Когда же полуширина полосы отражения при 1075 см<sup>-1</sup> после поэтапного удаления ионообменного слоя становилась равной полуширине исходной керамики, вычисленная по формуле разность толщин равнялась толщине напряжённого слоя.

Исследовались образцы, прошедшие 1–5 циклов ионного обмена, процедура проведения которого описана в [1, 2].

Измерение спектров отражения выполнялось на инфракрасном спектрофотометре ИКС-29 до нанесения ионообменного слоя (исходный), после нанесения и частичного снятия ионообменного слоя шлифовкой и полировкой поверхности образца. Оказалось, что наличие ионообменного слоя на поверхности образца стеклокерамики способствует расширению полосы отражения при  $1005\text{ см}^{-1}$  и снижению её интенсивности. Из-за этого её спектральное положение становится трудно определить. Когда в результате поэтапного удаления слоя обнажается поверхность материала, не подвергнутого ионному обмену, то разрешение полосы отражения становится идентичным тому, которое наблюдается в исходном материале. Наблюдалось также сужение полосы отражения при  $1075\text{ см}^{-1}$  на образцах, содержащих напряжённый слой.

Результаты определения толщин ионообменных и напряжённых слоёв представлены в табл.

| № образца | Толщина слоя, мкм |              |
|-----------|-------------------|--------------|
|           | ионообменного     | напряжённого |
| 1у        | $323 \pm 24$      | $228 \pm 21$ |
| 2у        | $292 \pm 14$      | $229 \pm 22$ |
| 3у        | $320 \pm 40$      | $220 \pm 7$  |
| 4у        | $387 \pm 58$      | $235 \pm 3$  |
| 5у        | $572 \pm 8$       | $272 \pm 31$ |

Из таблицы видно, что количество циклов ионного обмена до трёх практически не влияет на толщину ионообменного слоя и она лежит в интервале от 292 до 323 мкм. Дальнейшее увеличение количества циклов способствует увеличению толщины ионообменного слоя. При пяти циклах она составляет 572 мкм.

Видно также, что толщина напряжённого слоя меньше толщины ионообменного слоя. При количестве ионообменных циклов до четырёх толщина напряжённого слоя составляет 220 – 235 мкм. Увеличение количества циклов до пяти способствует некоторому увеличению толщины этого слоя.

Таким образом, используя предложенные нами разновидности методик измерений, методом ИК-спектроскопии отражения определены толщины ионообменных и напряженных слоёв в литийалюмосиликатной стеклокерамике.

#### Литература

1. Суздальцев Е.И., Рожкова Т.И., Зайчук Т.В. Ионообменное упрочнение стеклокристаллического материала  $\beta$ -сподуменового состава // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб. тез. докл. Ч.1.– Обнинск, 2004.– С. 28–29.

2 Суздальцев Е.И., Рожкова Т.И., Зайчук Т.В. Упрочнение стеклокристаллического материала  $\beta$ -сподуменового состава путём ионного обмена // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб. тез. докл. Ч.1.– Обнинск, 2004.– С. 141–143.

## **ОЦЕНКА ЖАРОСТОЙКОСТИ И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБРАЗЦОВ МОДЕЛЕЙ СЕГМЕНТОВ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО КМ ТИПА SiC/SiC В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ**

*Т.Д.Каримбаев, М.П.Николаева, К.А.Даньшин*  
(ФГУП “ЦИАМ им.П.И.Баранова”, г.Москва, Россия)

Одним из возможных способов увеличения коэффициента полезного действия перспективных авиационных двигателей является увеличение температуры газа на входе в турбину. Повышение температуры газа вынуждает использовать эффективные способы охлаждения узлов и деталей, формирующих горячую часть двигателей, или приводит к разработке и использованию новых термостойких композиционных материалов. Проектирование должно быть выполнено совместно с ответными узлами, особенно когда они изготовлены из другого материала, например, металла. В связи с этим на высокотемпературном стенде У-533 в условиях потока продуктов сгорания топлива при давлении до 6 атм. опробованы возможные конструктивные решения для применения температурных компенсаторов при соединении металлических частей высокотемпературного стенда и образцов из композиционного материала. На высокотемпературном стенде У-533 исследовалась жаростойкость новых разрабатываемых материалов (дисперсно-упрочненный карбид кремния SiC/SiC, силицированный углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ), керамический композиционный материал C/SiC, карбид кремния, дисперсно-упрочненный частицами алмаза и др., температура работоспособности которых достигает 1550°C) в условиях, близких к эксплуатационным условиям. Для проведения испытаний разработаны типовые образцы (плоские образцы, образцы с заостренными кромками, образцы модели сегментов сегментной камеры сгорания, модели полых лопаток соплового аппарата). Для снижения уровней, обусловленных отличием коэффициентов линейного расширения неметаллических образцов и металлических элементов (камеры, держатели), температурных напряжений в образцах, отработана методика применения компенсаторов, выполненных из высокотемпературной кремнеземной стеклоткани и высокотемпературных клеев. Методика обработки результатов испытаний включает анализ показаний индикаторных термокрасок, которые позволяют установить достигнутые в ходе испытаний максимальные значения температуры на поверхности испытываемых образцов. Масса сохранившихся образцов из SiC/SiC в испытаниях не претерпела изменений, что свидетельствует о достаточно высоких характеристиках жаростойкости исследуемого материала.

В настоящее время идет интенсивная работа по усовершенствованию высокотемпературного стенда У-533:

- совершенствование конструкции и разработка рекомендаций по применению в авиационных двигателях неметаллических материалов по результатам испытаний образцов, элементов высокотемпературных камер сгорания, моделей лопаток турбины, лопаток соплового аппарата;

- разработка, изготовление приспособлений для крепления неметаллических образцов в канале стенда и отработка методики проведения с их помощью испытаний на жаростойкость образцов из неметаллических материалов;

- разработка способа измерения температуры в ходе испытаний неметаллических образцов и лопаток СА на жаростойкость;

- разработка способа статического нагружения образцов в ходе испытаний на жаростойкость с проведением испытаний неохлаждаемых изделий при температурах до 1500°C.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ НДС КЕРАМИЧЕСКОЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Т.Д.Каримбаев, Б.Мыктыбеков*

(ФГУП “ЦИАМ им.П.И.Баранова”, г.Москва, Россия)

Развитие авиационной техники тесно связано с усложнением методов и средств проектирования и расчета различных объектов, входящих в состав агрегатов и узлов летательных аппаратов. При этом потребности в вычислительных ресурсах растут быстрее, чем возможности, обеспечиваемые развитием собственно вычислительной техники. Для преодоления разрыва между возможностями, предоставляемыми аппаратным обеспечением, и необходимостью исследования значительных расчетных моделей (средствами САЕ, в том числе методом конечных элементов) могут применяться возможности, имеющиеся в составе программных средств расчета и анализа конструкций (САЕ, в частности МКЭ).

В последние годы интенсивно ведутся поисковые работы по созданию и применению в авиационной отрасли керамических композиционных материалов, отличающихся повышенной жаропрочностью, жаростойкостью и малой удельной массой.

Для решения задачи напряженно-деформированного состояния в области соединения металлического диска и неметаллических лопаток можно применить многофункциональный пакет инженерного анализа, например, Ansys. Для реальной оценки напряженно-деформированного состояния и определения опасных сечений и уровней нагрузок в области сочленения двух разнородных материалов необходимо решать полную контактную задачу, имитирующую реальные граничные условия. Решение такой контактной задачи в программном комплексе Ansys имеет повышенную нелинейность и требует существенные вычислительные ресурсы. Применение персональных компьютеров для решения такой сложной многодисциплинарной задачи ограничивается ресурсом машины и операционной системы. Это примерно 1 800 000 степеней свободы на размерность задачи, за счет системных ограничений на размер отводимой приложениям памяти (не более 3 Гб под Windows). Поэтому возникает необходимость применения многопроцессорных вычислительных систем.

На базе 12-процессорного кластера в ЦИАМ были проведены исследования по решению контактной задачи между металлическим диском и керамической лопаткой и проведена оценка эффективности применения многопроцессорных машин для решения контактных задач.

## **КЕРАМОГРАНИТ НА ОСНОВЕ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ**

*Г.Т.Адылов, Ш.А.Файзиев, Г.С.Минасманова, Ш.К.Ирматова, Б.К.Олимжанов, М.Х.Руми*

(Институт материаловедения НПО “Физика–Солнце” АН РУз, г.Ташкент, Узбекистан)

Искусственный гранит (керамогранит) представляет собой продукт, обладающий оригинальными свойствами, отличающими его от остальной керамики. Благодаря высокой износостойкости, малому водопоглощению и, как следствие, особой морозостойкости, он может использоваться абсолютно в любых помещениях. Особая устойчивость к воздействию ультрафиолетовых лучей позволяет применять его для мощения улиц и облицовки фасадов зданий. Кроме того, керамогранит абсолютно не реагирует на воздействие щелочей и кислот (за исключением плавиковой кислоты и ее производных). С экологической точки зрения керамогранит относится к исключительно чистым отделочным материалам, т.е. не имеет радиационного фона. Большое преимущество керамогранита – это бесконечные возможности для выбора цветовых решений.

В настоящее время в Узбекистан керамогранит импортируют из Европы, Турции и Китая. Объем импорта имеет тенденцию постоянного роста, в то время как в республике имеется собственная сырьевая база.

Разработка технологии керамогранита на основе местного сырья создает условия для производства в Узбекистане конкурентного вида отделочного материала высшего класса.

Нами был проведен большой объем экспериментальных исследований по изучению различных месторождений сырья и подбору на их основе оптимальных составов керамогранита.

Химический состав шихты керамогранита, включающий первичный и вторичный каолины Ангренского месторождения, волластонитовый концентрат ВК-2 Койташского месторождения и кварц-серицитовую породу Бойнаксайского месторождения, представлен в табл.1.

Таблица 1

Химический состав шихты, масс. %

|       | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO   | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | ППП   | Σ   |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------|-------------------|------------------|-------|-----|
| Шихта | 65,827           | 18,768                         | 0,905                          | 5,898 | 0,434 | 2,009            | 0,276             | 0,26             | 5,625 | 100 |

Сырьевые компоненты шихты тщательно дозировали, подвергали совместному помолу в футерованной шаровой мельнице при соотношении материал: шары уралитовые : вода, равном 1:1,5:1, до остатка на сите 0,063 мкм не более 1%. Такая степень измельчения способствует увеличению поверхности частичек, составляющих керамическую массу и, следовательно, их реакционной способности при обжиге.

Полученную смесь обезвоживали на распылительной сушилке до влажности 5–7 %. Из полученной шихты прессовали плитки при удельном давлении 500 кг/см<sup>2</sup>, которые обжигали при температуре 1250–1300°C с выдержкой при максимальной температуре 1 час. Используемое давление прессования позволяет достичь плотности сырца на уровне 1,95 – 2,00 г/см<sup>3</sup>.

Рентгенофазовый анализ образцов спеченной керамики (рис.) показал, что в период спекания происходит интенсивная кристаллизация кристобалита и анортита (за счет минеральной добавки CaSiO<sub>3</sub>), а также растворение зерен кварца и муллита в образующейся стеклофазе.

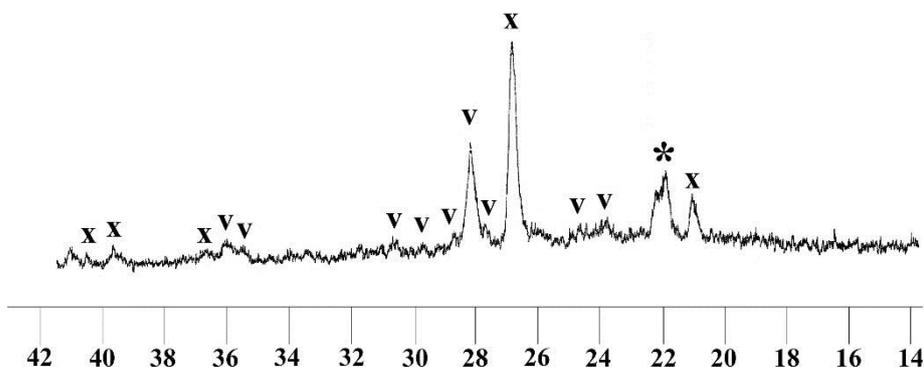


Рис. Рентгенограмма образцов спеченной керамики при T = 1250°C: v – анортит, x – α-кварц, \* – кристобалит.

Введение в состав шихты волластонита не только способствует улучшению физико-химических характеристик спеченной керамики, но и снижает усадку изделий при обжиге, что приводит к уменьшению деформации керамических изделий и к уменьшению брака.

В табл.2 приведены физико-химические свойства спеченной керамики.

## Физико-химические свойства керамики

| Свойства                           | Показатели | Требования<br>ГОСТ 6787-2001 |
|------------------------------------|------------|------------------------------|
| Водопоглощение, %                  | 0,054      | Не более 3,5                 |
| Предел прочности при изгибе, МПа   | 72         | Не менее 28                  |
| Износостойкость, г/см <sup>2</sup> | 0,08       | Не более 0,18                |
| Термостойкость, °С                 | 130        | –                            |
| Кислотостойкость, %                | 99         | –                            |
| Морозостойкость, число циклов      | Более 50   | Не менее 25                  |

Как видно из приведенных данных, плитки керамогранита по физико-химическим показателям соответствуют требованиям ГОСТ 6787-2001 “Плитки керамические для пола. Технические условия” и ГОСТ 13596-93 “Плитки керамические фасадные и ковры из них. Технические условия”.

Для получения цветного керамогранита достаточно к разработанной массе добавить от 5 до 10 масс. % соответствующего красителя сверх 100 % на уровне помола. Выполненные маркетинговые исследования по технологии керамогранита показали перспективность ее освоения в Узбекистане.

## КАРБИД КАЛЬЦИЯ, ПОЛУЧЕННЫЙ НА БАЗЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ НА БОЛЬШОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ

*М.С.Пайзуллаханов, Ш.А.Файзиев, Э.Нодирматов*

(Институт материаловедения НПО “Физика–Солнце” АН РУз, г.Ташкент, Узбекистан)

Исследование высокоогнеупорных материалов имеет большую актуальность, так как они все шире внедряются в различные области науки и техники. Так, в [1] приводятся результаты по синтезу огнеупорных карбидов  $TiC_x$ ,  $SiC$ ,  $WC$ , карбонитридов  $TiC_xN_y$  в потоке солнечного излучения мощностью 1350 кВт/м<sup>2</sup>. При этом уникальные возможности Солнечных Печей, обусловленные их конструктивными и оптическими характеристиками, с одной стороны, и сравнительно легко доступные их технико-экономические параметры – с другой, позволяют активно реализовать научные и производственные намерения [2,3].

Карбид кальция широко применяется в технике главным образом для получения ацетилена, а также для получения цианамиды кальция. Ацетилен образуется при разложении карбида кальция водой:  $CaC_2 + H_2O = C_2H_2 + Ca(OH)_2$ . Процесс разложения карбида кальция водой протекает с выделением тепла. Ацетилен является исходным продуктом для производства разнообразных органических веществ, а также значительное количество его применяется для резания и сварки металлов. Процесс образования карбида кальция по [4]  $CaO + 3C = CaC_2 + CO - 108$  ккал протекает только при высокой температуре и с поглощением большого количества тепла. Начальная температура образования карбида кальция находится в пределах 1700–1800°С. В карбидной печи температура достигает 2000°С, при повышении температуры до 2200°С начинается испарение карбида и разложение его на металлический кальций и углерод.

Большая Солнечная Печь (БСП) мощностью в 1 МВт позволяет реализовать все необходимые технические условия для создания высокотемпературных технологий. А именно, фокальное пятно БСП размером в диаметре до 1 метра характеризуется высокой концентрацией солнечного излучения вплоть до 1000 Вт/см<sup>2</sup> в максимуме, возможностью получения необходимого энергетического распределения, высокой скоростью ввода и отвода

сконцентрированного потока солнечного излучения, контроля и измерения параметров технологического процесса.

В качестве сырья для получения карбида кальция использовались карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$  Паркентского месторождения и кокс Ферганского нефтеперерабатывающего завода. В таблице приведен химический состав сырьевых материалов.

Таблица

Химический состав сырьевых материалов

| Материал        | $\text{CaCO}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{SO}_3$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | C     |
|-----------------|-----------------|----------------|--|-------------------------|------------------------|---------------|-----------------------|----------------------|-------|
| $\text{CaCO}_3$ | 97,80           | 0,70           | 0,96                                   | 0,15                    | 0,008                  | <0,10         | 0,20                  | <0,10                |       |
| Кокс            |                 | 6,60           | 6,30                                   | 0,43                    | 0,035                  | 0,20          | 0,20                  | <0,10                | 86,14 |

В технологии получения карбида кальция к исходному сырью предъявляются жесткие требования в отношении содержания примесей, так как они ухудшают качество готового продукта [4].

Известняк, применяемый для обжига, должен содержать не менее 97–98 %  $\text{CaCO}_3$ , не более 0,008% P и не выше 0,1% S. Антрацит и кокс должны содержать не более 0,04% P и до 1,5% S.

Значение мощности светового потока, соответствующее необходимой температуре, определяли согласно правилу Стефана-Больцмана  $Q=(a/\varepsilon)\sigma T^4$ , где Q – мощность излучения, а и  $\varepsilon$  – коэффициенты поглощения и излучения, соответственно,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, T – температура. При значениях  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}^4)$ ,  $a/\varepsilon \approx 1$ ,  $T=1800^\circ\text{C}$  получим, что мощность светового потока должна быть не менее 110 Вт/см<sup>2</sup>.

Процессы ввода и отвода концентрированного светового потока осуществлялись с помощью систем затвора и автоматической системой управления гелиостатами – АСУГ. Облучение мишени проводилось в течение 0,3 часа. Охлаждение производилось произвольно.

Полученный материал представлял собой куски серого цвета с различными оттенками размером до 2–40 мм. Рентгенофазовый анализ показал, что материал представляет собой карбид кальция тетрагональной модификации.

Качество карбида кальция определяется количеством ацетилена, получаемого при разложении водой 1 кг продукта. Чем чище карбид кальция, тем больше ацетилена выделяется из одного и того же количества карбида кальция. Количество литров ацетилена, выделяемого 1 кг карбида кальция, при его полном разложении водой называется литражом карбида кальция. Литраж технического карбида кальция практически составляет от 235 до 320 л. Литраж полученного карбида кальция на базе местного сырья на БСП составляет порядка 220 л.

#### Литература

1. Journal de physiqueiv V.9. Pr3-1999. Proceedings of 9<sup>th</sup> SolarPaces Intr.Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies 9.
2. Адылов Г.Т., Файзиев Ш.А., Пайзуллаханов М.С. и др. Исследование карбид-кремниевых материалов, полученных с использованием рисовой шелухи // Письма в ЖТФ. 2003. Т.29, вып.6. С.7–13.
3. Пайзуллаханов М.С., Файзиев Ш.А., Адылов Г.Т. и др. Большая Солнечная Печь как инструмент для получения кремнийсодержащих материалов // Гелиотехника. 2004. №2. С.54–57.
4. Кузнецов Л.А. Производство карбида кальция.– М.: Госхимиздат, 1954.– 176 с.

## РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСНЫХ ПОКРЫТИЙ НА УГЛЕРОДНЫХ И SiC ВОЛОКНАХ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

*Н.И.Бакланова, Т.М.Зима, Н.З.Ляхов* (ИХТТМ СО РАН, г.Новосибирск, Россия)

Термомеханические свойства композиционных материалов с керамической матрицей, армированной углеродными (УВ) или карбидокремниевыми волокнами, в значительной мере зависят от степени адгезии между волокнами и матрицей, которая, в свою очередь, определяется состоянием поверхности волокон. Для того чтобы композит не был излишне хрупким, необходима оптимальная прочность связи волокно–матрица, которая достигается нанесением на УВ или SiC волокна специальных покрытий, которые могли бы легко деформироваться под действием приложенных напряжений. Другой важнейшей функцией покрытий является защита волокон от окисления при высоких температурах.

С помощью реакционного осаждения из газовой фазы (RCVD), золь-гель метода и пиролиза кремнийорганических полимеров (PIP) разработаны подходы для нанесения многокомпонентных покрытий на основе карбидов тугоплавких металлов и карбида кремния, а также тугоплавких оксидов на углеродные и SiC волокна конструкционного назначения [1–3]. Разработанные подходы позволяют наносить наноструктурные однородные покрытия на монофиламенты, собранные в жгуты или ткань.

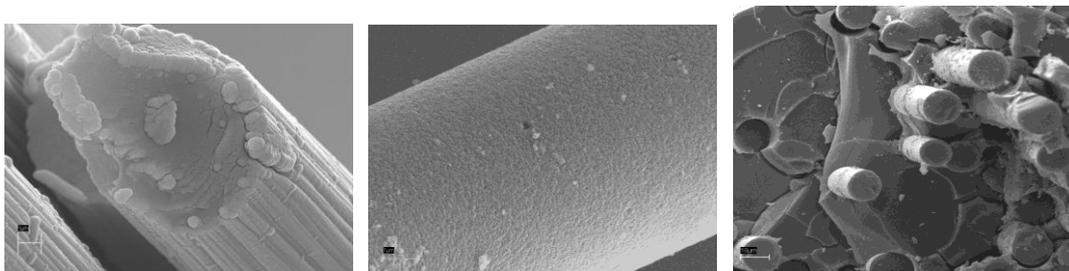


Рис. СЭМ изображение углеродного волокна с HfC/SiC покрытием (слева), SiC волокна марки Туганно-SA™ с ZrO<sub>2</sub> покрытием (в центре) и SiC/ZrO<sub>2</sub>/SiC<sub>f</sub> миникомпозита (справа)

В настоящей работе обсуждаются результаты изучения морфологии, структуры, элементного состава, нанорельефа тонких наноразмерных покрытий на углеродных и карбидокремниевых волокнах с помощью рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, микроРамановской спектроскопии и атомно-силовой микроскопии.

### Литература

1. Baklanova N.I., Zaitsev B.N., Titov A.T. Atomic force and scanning electron microscopy study of the zirconia-coated silicon carbon fibers // *J.Eur.Ceram.Soc.* 2007. V.27, № 6. PP. 2503–2511.
2. Baklanova N.I., Zima T.M., Boronin A.I., Kosheev S.V., Titov A.T., Isaeva N.V., Graschenkov D.V., Solntsev S.S. Protective ceramic multilayer coatings for carbon fibers // *Surf.Coat.Techn.* 2006. V.201, № 6. PP. 2313–2319.
3. Baklanova N.I., Titov A.T., Boronin A.I., Kosheev S.V.. The yttria-stabilized zirconia interfacial coating on Nicalon fiber // *J.Eur.Ceram.Soc.* 2006. V.26, № 9. PP.1725–1736.

## ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИКИ В СИСТЕМЕ SiC-AlN

*Б.А.Билалов, Г.Д.Кардашова, Г.К.Сафаралиев, Н.А.Абилова\**  
(ДГУ, г.Махачкала, \*ДГТУ, г.Махачкала, Россия)

Традиционным способом формования изделий из порошка карбида кремния является метод горячего прессования [1]. Как правило, при горячем прессовании нужны температуры  $\approx 0,5-0,7 T_{пл}$  ( $T_{пл}$  – температура плавления материала порошка), давление  $\approx 100$  МПа, при этом процесс формования длится от десятков минут до нескольких часов [2].

В последнее время большое внимание уделяется разработкам энерго- и ресурсосберегающих технологий, к которым относится и формование изделий порошковой металлургии путем спекания пропусканием электрического тока [3].

Воздействие электрического тока на электропроводные дисперсные материалы порождает ряд интересных явлений. При его прохождении через порошковую заготовку основная энергия выделяется на участках с повышенным электросопротивлением, которыми, как правило, являются контакты между частицами. Этот процесс сопровождается сильным разогревом контактных участков, что зачастую приводит к частичному расплавлению и испарению материала, а, соответственно, и к быстрому спеканию заготовки. Кроме того, под влиянием тока происходит интенсивный массоперенос в твердой фазе. Для поликомпонентных порошковых систем характерно интенсивное сплавообразование (“диффузионное спекание”) или возникновение новых фаз, не входящих в исходную композицию (“реакционное спекание”).

Существенной характеристикой, влияющей на ход процесса электроспекания, является сопротивление спекаемой заготовки. Формуемый материал представляет собой свободно насыпанный порошок карбида кремния и нитрида алюминия.

Формование и спекание смеси порошков карбида кремния и нитрида алюминия путем пропускания через заготовку электрического тока осуществляется в пресс-формах, изготовленных из изоляторов на основе сапфира, а нагружающие пуансоны одновременно служат токопроводами [4]. В качестве источника тока используются импульсные генераторы большой мощности [5].

Один из электродов-пуансонов свободно перемещается в объеме по вертикали. Выборка размера усадки и уплотнение при спекании позволяют применение гофрированного полого цилиндра, в котором находится газ с давлением, превышающим атмосферное. Для увеличения проводимости заготовки пресс-форма нагревается до  $400^{\circ}\text{C}$ . В качестве катализаторов процесса спекания применяли оксид иттрия и углеродные наночастицы (фуллерены) до 1,5 % вес.

На рис. 1 и 2 приведены полученные образцы и изломы керамики на основе карбида кремния различного состава.

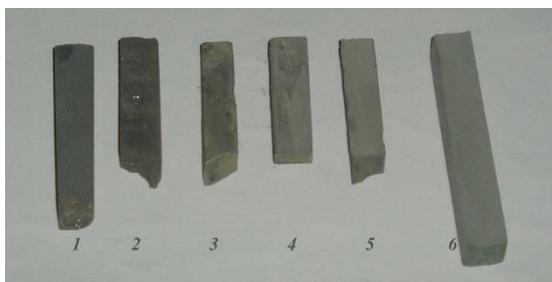


Рис.1. Образцы керамики SiC–AlN, полученные методами электроимпульсного и высокотемпературного спекания: 1– чистый SiC+C<sub>64</sub>(1 % вес.);  
2 – SiC(79 % вес.) – AlN (19 % вес.) – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1,5 % вес.) – C<sub>64</sub>(0,5 % вес.);  
3 – SiC(69 % вес.) – AlN (29 % вес.) – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1,5 % вес.) – C<sub>64</sub>(0,5 % вес.);  
4 – SiC(59 % вес.) – AlN (39 % вес.) – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1,5 % вес.) – C<sub>64</sub>(0,5 % вес.);  
5 – SiC(49 % вес.) – AlN (49 % вес.) – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1,5 % вес.) – C<sub>64</sub>(0,5 % вес.);  
6 – образец керамики SiC (чистый), полученный методом высокотемпературного спекания

В зависимости от параметров процесса (давление, сила тока, продолжительность обработки) ход спекания может осуществляться по-разному, что приводит к изменению в широких пределах структуры и свойств получаемой керамики SiC–AlN, имеющей преимущества перед аналогичной карбидкремниевой керамикой, полученной традиционными способами [6].

Электрическое спекание сравнительно легко поддается механизации и автоматизации. Большим преимуществом электроспекания является совмещение в одной операции формования и спекания, что дает значительное сокращение как временных, так и энергетических затрат.

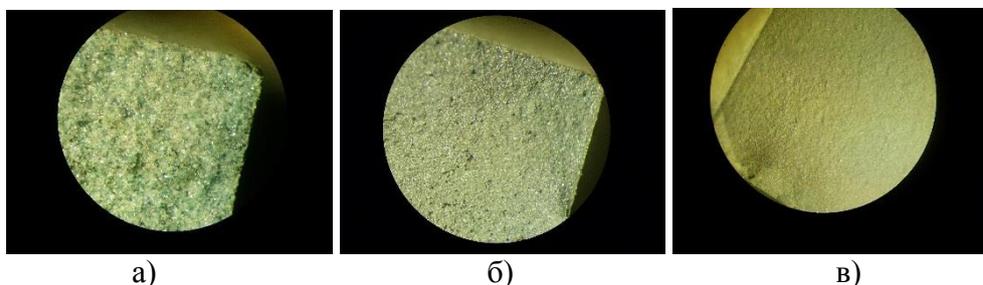


Рис. 2. Поверхность излома керамики, полученной методом электроимпульсного спекания: а) – чистый SiC+C<sub>64</sub>(1 % вес.); б) – SiC(79 % вес.)–AlN (19 % вес.)–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1,5 % вес.)– C<sub>64</sub>(0,5 % вес.); в) – SiC(49 % вес.)–AlN (49 % вес.) –Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1,5 % вес.)–C<sub>64</sub>(0,5 % вес.)

#### Литература

1. *Металлургия и технология полупроводниковых материалов* /Под ред. В.С.Сахарова.– М.:Металлургия, 1972.–544с.
2. Гегузин Я.Е. *Физика спекания*: 2<sup>е</sup>-изд. – М.: Наука, 1984.–311с.
3. Райченко А.И. *Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока*. – М.: Металлургия, 1987.–125с.
4. Akechi K., Hara Z.// *J.Japan. Soc.Powder and Powder Met.* 1978. V.25, № 6. P.193–197.
5. Shakery M.,Al-Hassani S.T.S.,Davies T.J.//*Powder Met.,Int.* 1979. V.11, № 3. P.120–124.
6. Hara Z.,Aktchi K.// *In Titanium-80, Sci and Technol Proc.4 Int.Conf.* (Kyoto, May 19-22).– 1980.–V.3. –P.2265–2274.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОННЫХ ПОРОШКОВ СВС НИТРИДА КРЕМНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

*Л.А.Чевыкалова, И.Л.Михальчик, Л.А.Плясункова, И.Ю.Келина*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия),  
*В.В.Закоржевский* (ИСМАН РАН, г.Черноголовка, МО, Россия)

Высокая стоимость ультрадисперсных порошков на основе нитрида кремния, полученных методом плазмохимического синтеза, обуславливает поиск более дешевого отечественного сырья с такими же высокими характеристиками. Проблемой синтеза таких порошков занимается Исследовательский центр самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) Института структурной макрокинетики РАН в г. Черноголовке.

В работе приводятся результаты исследований изготовленных в ИСМАН композиционных порошков методом СВС с участием оксида магния в качестве активатора спекания. Исследовались микронные порошки на основе нитрида кремния с разным количеством MgO (3, 4 и 5 масс.% MgO). Исходный порошок был выделен из нитрида кремния низкотемпературной фракции (НТ) с содержанием α-фазы более 90% путем измельчения и классификации на струйной мельнице.

Измельчение и классификация исходных порошков приводят, с одной стороны, к увеличению удельной поверхности в 1,5 раза, уменьшению содержания свободного кремния в 2

раза и, с другой стороны, к увеличению содержания примесей в 2 раза и кислорода с 2,85 до 4,6–5,7% масс. Полученный порошок имел  $d_{97} < 1$  мкм (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики микронных порошков

| Наименование  | Химический состав, % масс. |                |                   |      |      |       | $S_{уд.}$<br>м <sup>2</sup> /г | $\alpha/\alpha+\beta \times 100\%$ |
|---------------|----------------------------|----------------|-------------------|------|------|-------|--------------------------------|------------------------------------|
|               | N <sub>2</sub>             | O <sub>2</sub> | Si <sub>св.</sub> | Fe   | Mg   | W     |                                |                                    |
| УФ (исходный) | 36,5                       | 2,85           | 0,67              | 0,08 | –    | 0,04  | 9,9                            | 90,0                               |
| УФ3 (3 % MgO) | 34,2                       | 4,7            | 0,33              | 0,11 | 2,6  | 0,085 | 13,3                           |                                    |
| УФ4 (4 % MgO) | 33,5                       | 4,6            | 0,3               | 0,13 | 3,25 | 0,078 | 15,9                           |                                    |
| УФ5 (5 % MgO) | 33,2                       | 5,67           | 0,24              | 0,16 | 3,85 | 0,11  | 19,0                           |                                    |

Композиционные порошки состава Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – MgO спекали в графитовых пресс-формах при температуре 1750–1800°C и давлении 15–20 МПа в среде азота с выдержкой  $\tau = 0,5$  ч на установке горячего прессования ОТГ-35.

Из экспериментальных партий микронных порошков были получены образцы горячепрессованной керамики размером 7x7x70 и 5x3,5x70 мм.

Проведенные физико-механические исследования показали, что показатели предела прочности и вязкости разрушения всех составов микронных порошков соответствуют паспортным данным разработанного ранее материала ОТМ-922 на основе порошков более широкого гран. состава. Наряду с этим следует отметить, что использование микронных порошков привело к значительному росту микротвердости всех порошков с разным количеством MgO (3, 4 и 5 масс.% MgO). Это обусловлено строением микроструктуры. Анализируя табл. 2, можно отметить, что наиболее высокие значения предела прочности и вязкости разрушения имеют образцы, полученные из состава порошка с 3% MgO.

Исследования микроструктуры на сканирующем электронном микроскопе EVO-40 показали, что основное и одновременно небольшое отличие образцов заключается в формировании зерен, что напрямую связано с количеством вводимой спекающей добавки. В образце с 3% добавкой MgO зерна мелкой фракции не сформировались до конца в призмы, а рост крупных зерен не такой значительный, как при большем проценте добавки в образце с 4% MgO, микроструктура более однородна по морфологическому строению зерен, основная масса как крупных, так и мелких зерен представляет собой призмы. При введении 5% MgO основная масса зерен хорошо сформирована, но в отличие от других образцов в ней наблюдается рост крупных зерен в сечении.

Таблица 2

Результаты исследования свойств горячепрессованной керамики

| Показатели  | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + 3 % MgO |        | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + 4 % MgO |       | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + 5 % MgO |       |
|---|--|--------|--|-------|--|-------|
| П, %  | 0,0 – 0,8                                |        | 0,3 – 0,7                                |       | 0,5 – 1,0                                |       |
| $\sigma$ , МПа  | 630, 680                                 |        | 460, 600                                 |       | 530, 590                                 |       |
| $\sigma^{1000^{\circ}\text{C}}$ , МПа                 |  |        | 559, 567                                 |       |  |       |
| $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>                       | 7,14                                     |        | 6,12                                     |       | 5,36                                     |       |
|   | Ориентация образцов                      |        |  |       |  |       |
|   | ⊥  |        | ⊥  |       | ⊥  |       |
| $K_{Ic}$ методом индентирования, МПа·м <sup>1/2</sup> | 6,7                                      | 7,6    | 6,6                                      | 7,8   | 6,2                                      | 6,9   |
| Микротвердость, МПа                                   | 17660                                    | 20110) | 17270                                    | 18150 | 18640                                    | 22760 |

Микроструктура всех исследуемых образцов плотная и мелкозернистая (рис.). Во всех образцах наблюдается чередование зерен призматической (хорошо сформировавшиеся шестигранные призмы) морфологии размером ~2–8 мкм и зерен призматической и

неопределенной морфологии размером менее  $\sim 1$  мкм. Распределение зерен между собой равномерное.

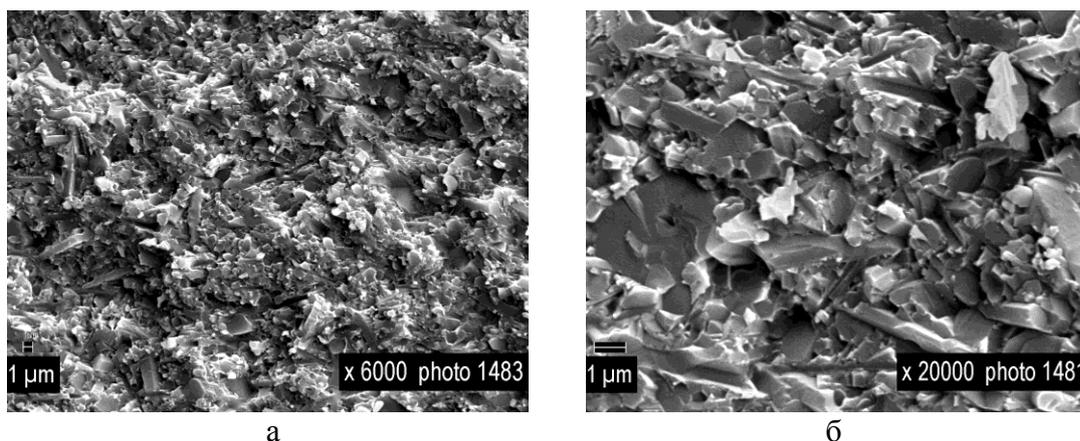


Рис. Микроструктура образцов горячепрессованной керамики состава  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{MgO}$  (3 масс.%): а –  $\times 6000$ ; б –  $\times 20000$

Таким образом, на данном этапе исследований наблюдается тенденция в сторону уменьшения размера зерна и повышения однородности структуры керамики. Можно сказать, что использование микронных порошков сохраняет все достигнутые показатели материала ОТМ-922 и приводит к значительному повышению уровня микротвердости. Это дает возможность использования керамики на основе микронных порошков СВС нитрида кремния для изготовления износостойких деталей.

## КОНТРОЛЬ ГЛУБИНЫ ПРОПИТКИ ПОРИСТОЙ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИМИ ОЛИГОМЕРАМИ

*В.Е.Поляков* (ГОУ ВПО “Сев.-Зап. ГТУ”, г.Санкт-Петербург, Россия),

*В.В.Антонов, Е.В.Некрасов* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В производстве радиопрозрачных обтекателей (РПО) для ракет всех классов в качестве материала оболочек применяются различные виды керамических материалов, в частности кварцевая керамика НИАСИТ. Данный материал обладает пористостью до 10%, что вызывает необходимость нанесения влагозащитных покрытий, и по сравнению с беспористой керамикой низкой прочностью –  $\sigma_{\text{изг}} = 35\text{--}85$  МПа. Пропитка пористых оболочек РПО из НИАСИТа кремнийорганическими олигомерами позволяет решать задачу влагозащитности оболочки РПО и приводит к повышению ее изгибной прочности. Вместе с тем, образованный после полимеризации композиционный материал обладает более низкими диэлектрическими характеристиками ( $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$ ) по сравнению с исходным материалом – кварцевой керамикой НИАСИТ. Процесс радиодоводки РПО ставит задачу разработки эффективных методов контроля глубины пропитки как в динамике самого процесса пропитки, так и после ее полимеризации.

Одним из перспективных методов определения глубины пропитки в динамике процесса является метод фотолюминесценции, базирующийся на настройке лазерного излучения на частоту квантового перехода. Излучение переводит молекулу в возбужденное состояние. При переходе на более низкий энергетический уровень возбуждение снимается путем высвечивания фотона.

Физические процессы, которые лежат в основе этого явления, представляют собой двухступенчатый процесс. На первой стадии молекула переходит в одно из разрешенных возбужденных состояний под действием излучения частоты, равной частоте перехода, затем, возвращаясь, в одно из нижележащих состояний на частоте соответствующего перехода.

Время жизни возбужденных состояний, соответствующих переходам с излучением в УФ- и в видимом диапазоне, составляет для свободных молекул  $10^{-3}$ - $10^{-6}$ с, а в ИК-диапазоне –  $10^{-1}$ – $10^{-5}$ с. Поскольку время безизлучательной вращательной релаксации равно  $10^{-9}$ с, а колебательной –  $10^{-4}$ – $10^{-6}$ с, то за время жизни возбужденных состояний энергия возбуждения успевает распределиться между различными вращательными и колебательно-вращательными уровнями молекул. В результате спектр люминесценции содержит множество линий, соответствующих различным колебательно-вращательным переходам.

Явление люминесценции эффективно используется при исследовании газообразных, жидких и твердых веществ с целью определения их элементного состава и концентрации ингредиентов.

Известны работы, в которых интенсивность люминесценции использовалась как информативный параметр при исследовании фазовых изменений состояния вещества, в частности, при исследовании температуры стеклования в термопластах, предварительно окрашенных органическими красителями. В этом случае стимулированная люминесценция возбуждалась накачкой от импульсных ламп в полосу поглощения органических красителей.

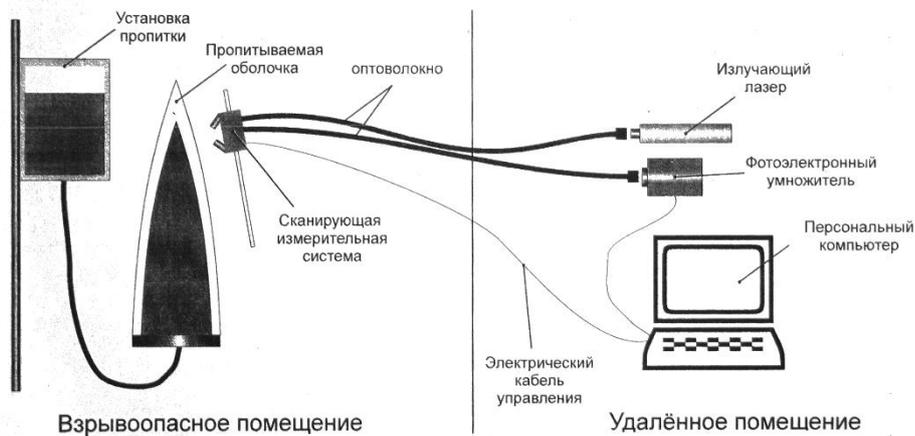
Регистрация интенсивности люминесценции несет информацию о глубине пропитки. Согласно закону Бугера зависимость интенсивности света от длины пути, проходящего светом в керамике, легко находится из уравнения:

$$J(z) = J(0) \exp(-az),$$

где  $J(0)$  – интенсивность света на входе в контролируемый образец;  $a$  – интегральные потери интенсивности люминесценции, обусловленные в основном диффузным рассеянием;  $z$  – контролируемый параметр.

Применение метода индуцированной люминесценции предполагает введение в кремнийорганические соединения органических красителей, таких, как родамин Ж, родамин С, оксазин 17. Концентрация красителя –  $10^{-3}$  г/г. Например, спектральные характеристики кремнийорганического олигомера, активированного родамином Ж, имеют следующие значения: максимальная длина волны поглощения  $\lambda = 534$  нм; максимальная длина волны люминесценции  $\lambda = 564$  нм; полуширина спектров поглощения и люминесценции  $\Delta\lambda = 37$  нм,  $\Delta\lambda = 43$  нм, соответственно. Температура деструкции красителя –  $110^\circ\text{C}$ .

В качестве облучающего лазера может быть использован ИАГ:  $\text{Nd}^{3+}$  – лазер с удвоителем частоты и модулятором добротности. Длина волны генерации лазера  $\lambda_{\text{ген}} = 532$  нм, что совпадает с полосой поглощения родамина.



Облучение контролируемого изделия, доставляемое оптоволокном, проводится с непропитанной стороны. Достигая границы пропитки, лазерное излучение вызывает ее люминесценцию. Свет люминесценции, проходя непропитанную часть, несет информацию о ее толщине, что позволяет определить толщину пропитанной части. Свет люминесценции с помощью оптоволокну транспортируется на входную щель монохроматора. Выделенная дифракционной решеткой монохроматора спектральная линия  $\lambda_{\text{люм}}^{\text{макс}} = 564$  нм преобразуется в электрическое напряжение фотоэлектрическим преобразователем (ФЭУ) и поступает на контроллер, имеющий интерфейс с компьютером. Сканирование осуществляется за счет вращения пропитываемой оболочки и поступательного движения измерительной системы. Управление глубиной пропитки может осуществляться за счет создания противодействия.

Внедрение органических красителей в кремнийорганические матрицы в количестве  $10^{-3}$  г/г не окажет существенного влияния на прочностные характеристики пропитанной кварцевой керамики. Учитывая, что температура полимеризации составляет величину, большую чем  $200^{\circ}\text{C}$ , а температура деструкции родамина Ж –  $110^{\circ}\text{C}$ , полимеризованные кремнийорганические матрицы не изменят свою окраску.

Методика контроля глубины пропитки кварцевой пористой керамики включает в себя измерения спектрального коэффициента пропускания световых пучков от лазеров в широком диапазоне с целью определения окон прозрачности.

Интерес представляет также исследование, связанное с измерением индикатрис рассеяния, что несет информацию о регулярном или нерегулярном распределении пор в кварцевой керамике.

Метод индуцированной люминесценции и предложенная установка позволяют эффективно контролировать глубину пропитки пористой керамики кремнийорганическими соединениями.

## **ГЕНЕРАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ В ГЕТЕРОГЕННОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИИ В КОМПОНЕНТАХ**

*Б.Р.Гафаров, С.А.Гусев, Ю.М.Милёхин, Д.Н.Садовничий*

(ФГУП “Федеральный центр двойных технологий “Союз”, г.Дзержинский, Россия)

Проведен анализ генерации и релаксации теплового давления при объемном импульсном нагреве компонентов композитного гетерогенного материала для произвольной структуры энерговыделения в ячейке композита.

Показано, что усреднение теплового давления по ячейке следует вести с весом сжимаемости, что позволяет учесть геометрию включений путём использования известных решений теории упругости. Оценены поправки, учитывающие неравновесность процесса и работы взаимного деформирования компонентов; предложены способы учета тепловой релаксации между компонентами и диссипативных процессов.

Получено, что при мгновенном и “медленном” изохорическом нагреве даже без учета теплообмена и диссипативных свойств материалов компонентов будут возникать различные средние тепловые давления. Показана аналогия процесса мгновенного нагрева и воздействия ударной волны – приращение энтропии за счет неравновесности процесса есть величина второго порядка по отношению к энергии, внесенной в композит. Мерой диссипативных свойств композита в процессе мгновенного нагрева будет соотношение модулей объемного сжатия компонентов с учетом их объемных долей.

Приведены расчёты микроструктуры энерговыделения и оценки тепловой релаксации для композита типа “полимерная матрица – мелкодисперсная керамика” для двух случаев объемного нагрева – сильноточным электронным пучком и рентгеновским излучением различных энергий

Адекватность модели подтверждена экспериментальным измерением эффективного коэффициента Грюнейзена в зависимости от концентрации наполнителя на сильноточном электронном пучке; показано, что трёхполярные профили скорости тыльной поверхности

образца, зарегистрированные при определённых концентрациях и дисперсности компонентов, обусловлены тепловой релаксацией между компонентами.

## **ЖАРОСТОЙКИЕ КОМПОЗИТЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

*Р.У.Шаяхметов, В.С.Бакунов, Л.В.Якупова, А.Г.Мустафин*  
(ГОУ ВПО “Баш.ГПУ им.М.Акмиллы” г.Уфа)

Значительные сдвиги, происходящие в последнее время в практике производства керамических и огнеупорных материалов, обусловлены расширением области применения жаростойких композитов, получаемых по безобжиговой технологии. Применение их при создании и ремонте тепловых агрегатов в виде штучных фасонных изделий, крупных блоков и сухих огнеупорных масс и использование их в качестве конструкционных, электроизоляционных, теплоизоляционных и других изделий позволяет механизировать производство работ и снизить их трудоемкость. Это свидетельствует об актуальности научно-исследовательских и технологических работ, проводимых в данной области.

Основными вяжущими, применяемыми при создании жаростойких композитов, являются гидравлические (портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый и высокоглиноземистый цементы), водные и безводные силикаты натрия и фосфатные связующие. В последние годы широкое распространение получили безобжиговые композиционные материалы, изготавливаемые с использованием фосфатной связки. Эта технология исключает дорогостоящий процесс термообработки и является практически безотходной. В связи с этим необходимо отметить перспективность исследований, направленных на расширение номенклатуры материалов и изделий с повышенными эксплуатационными свойствами (высокая химическая стойкость в различных средах и в контакте с расплавами цветных металлов, низкий термический коэффициент линейного расширения) из огнеупорных масс на основе фосфатных связующих и различных заполнителей – электрокорунда, карборунда (карбид кремния). Однако в известных работах по получению композитов на фосфатных связках недостаточно рассмотрены физико-химические процессы, определяющие эволюцию структуры таких материалов при нагревании до 1500–1600°C. Фактически не исследованы деформационные свойства материалов в режиме ползучести и ее механизмы при высоких температурах, не изучена взаимосвязь физико-технических свойств и структуры материалов, вследствие этого затруднена разработка рациональных технологий получения материалов и изделий, а также проблематично определить отрасли промышленности, в которых целесообразно их конкретное использование. В работе уделено внимание вопросам улучшения деформационных характеристик при высоких температурах композиционной керамики путем совершенствования технологии уплотнения, направленной на оптимизацию упаковки компонентов смеси массы и формирование контактной зоны зерна заполнителя с цементной частью материала. Задача оптимизации упаковки компонентов композиции, улучшения наиболее слабого звена композиции – контактной зоны связки с заполнителем для повышения в первую очередь высокотемпературных деформационных характеристик, прочности и плотности композиций из различных наполнителей и связок, улучшения других показателей и снижения расхода вяжущего до настоящего времени окончательно не решена и остается также актуальной. Улучшение свойств композиций непосредственно связано с использованием компонентов различной зернистости и составов, уплотненных известными в технологии керамики способами на основе заполнителей – корунда, карборунда, а также оксида алюминия, модифицирующих добавок и фосфатных связующих.

Поэтому разработка технологии получения КМ на ФС, в том числе на основе корунда и карборунда, с использованием результатов исследования кинетики твердения, физико-химических процессов при формировании физико-технических свойств и деформировании

является важной задачей в научном и прикладном аспектах. Такая технология позволяет получать КМ с заданными свойствами при относительно низких температурах термической обработки. Изучение деформационного поведения при нагреве под нагрузкой и ползучести позволяет рационально решать вопросы создания новых и модернизации существующих тепловых, химико-технологических и других агрегатов путем согласования сложных связей в системе “условия эксплуатации–материал–конструкция”.

Для изготовления композиционного керамического материала использованы электрокорунд различной фракции производства ОАО “ЧЭМК”, карбид кремния производства ОАО “Волжский абразивный завод”, модифицирующие добавки (оксиды хрома, циркония, магнезия, минералы и т.д.). В качестве фосфатного связующего – выпускаемые промышленностью фосфатные связующие. Для установления оптимальных эксплуатационных свойств были изготовлены опытно-промышленные образцы путем прессования под нагрузкой 100 МПа и укладки на вибрационном столе в течение 10 минут. Проведенные исследования деформации под нагрузкой от 0,2 МПа и ползучести при температурах до 1600°C под различными нагрузками в рабочих условиях и температурах эксплуатации материалов из оптимальных по составу масс [1], процессов и эволюции структуры, связанных с ними [2–4] на разработанных нами установках [5], позволили отладить технологию жаростойких композитов с повышенными эксплуатационными свойствами для выпуска фасонных особо сложных изделий [6,7]. Стало возможным определить деформацию и ползучесть керамических безобжиговых материалов на основе химических связующих, на цементных вяжущих в широких пределах значений.

Таким образом, проведенные нами исследования и технологические разработки в области создания материалов на основе оксида алюминия, карбида кремния позволяют решить задачи по нахождению путей эффективного применения карбида кремния и материалов на его основе как в традиционных, так и в новых отраслях техники.

#### Литература

1. Шаяхметов У.Ш., Мустафин А.Г. Особенности высокотемпературной ползучести безобжиговых керамических материалов. – М.: Химия, 2005. – 224с.
2. U.Shayachmetov, R.Shayachmetov, Ion Dranca. Use of IR Spectroscopy, X-Ray Diffraction, and Petrograph Analysis to evaluate Structural Changes in Alumophosphate Compositions at Creeping, Intern.// J. of Thermophysics. 2001. V.22, №3. P.979–993
3. U.Shayachmetov, Ion Dranca. Use of method of thermal analysis in studying ceramic materials on the basis of  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $SiC$  and inorganic binders // J. Thermal Anal. Cal. 2001. V.64. 1153–1161
4. Шаяхметов У.Ш., Харитонов Ю.Я., Дранка И. Влияние пластической деформации на фазовый состав и структуру фосфатных материалов // Неорганические материалы. 2003. Т.39, №8. С.991–998.
5. Шаяхметов У.Ш., Бакунов В.С., Валеев И.М., Бикбулатов В.Р. Измерение высокотемпературной деформации и ползучести безобжиговых огнеупоров // Новые огнеупоры. 2006. № 4. С.121–125.
6. Шаяхметов У.Ш. Фосфатные композиционные материалы и опыт их применения – Уфа: РИЦ “Старая Уфа”, 2001. – 176 с.
7. Беляков А.В., Шаяхметов У.Ш. Проблемы применения неформованных огнеупоров // Стекло и керамика. 2003. №3. С. 23–27.

## ВЫСОКОПЛОТНАЯ КОРУНДОВАЯ КЕРАМИКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Е.В.Ануфриева, Е.С.Лукин*

(РХТУ им.Д.И.Менделеева, г.Москва, Россия)

Корундовая керамика обладает рядом уникальных физико-химических свойств, благодаря которым она широко применяется во многих областях техники. На основе корунда созданы разнообразные керамические материалы с мелкокристаллической структурой, пределом прочности при изгибе 300 – 800 МПа, высокими электроизоляционными свойствами, высокой теплопроводностью, светопрозрачностью и радиационной стойкостью, высокой химической стойкостью.

В настоящее время поставлен вопрос о получении высококачественной керамики на основе оксида алюминия для электронной техники. До 1993 года для этих целей использовали керамический материал “поликор” [1]. Для изготовления изделий из “поликора” в Бокситогорске был налажен выпуск специального глинозема марки ГЛМК, который представляет собой высокочистый оксид алюминия с добавкой 0,25 мас.% оксида магния. Этот материал использовали для изготовления подложек и основания резисторов, а также для гироскопов, плунжеров для насосов, трубок для высокоинтенсивных источников света, прочной мелкокристаллической керамики для вакуумно-плотных труб, металлокерамических узлов и т.д. Плотность изделий из “поликора” близка к теоретической, прочность на изгиб – ~ 300 МПа. “Поликор” обладает высокими электрофизическими свойствами. Однако существенным недостатком является неравномерная кристаллическая структура, она представляет собой кристаллы со средним размером 15 – 25 мкм (рис. 1), что может приводить к образованию дефектов в виде пор и раковин при шлифовке и полировке. Это связано с возможным неравномерным распределением оксида магния.

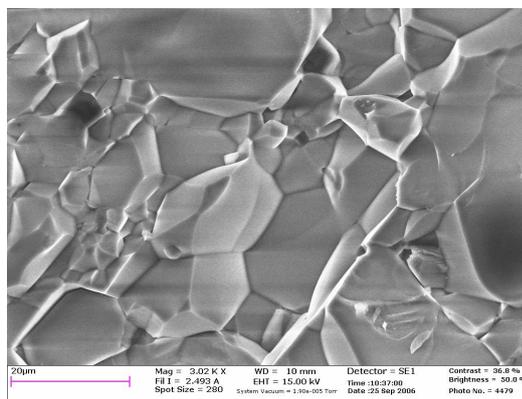


Рис. 1. Микроструктура керамики “Поликор”

Для создания более равномерной микроструктуры высокоплотного материала с размером кристаллов 8–10 мкм в МХТИ им. Д.И.Менделеева разработали и использовали нанодисперсную добавку к глинозему ГЛМК эвтектического состава в системе  $Al_2O_3-ZrO_2$ . Введение 1 мас.% добавки позволило получить новый керамический материал “Корал-2” [2]. Он характеризуется мелкокристаллическим строением и равномерной структурой, прочностью на изгиб до 400 МПа, размером кристаллов 3–6 мкм (рис. 2). Этот материал является перспективным для изготовления подложек и основания резисторов. Были выпущены опытные партии изделий, проведены испытания, и материал был принят к внедрению на заводе “Поликор”.

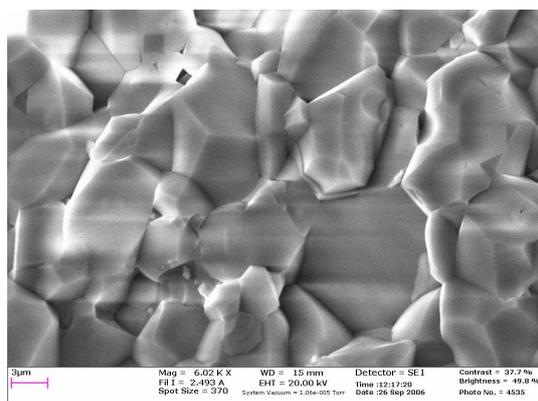


Рис. 2. Микроструктура керамики “Корал-2”

В 1993 году производство глинозема ГЛМК было прекращено. В 2003 году на заводе “Поликор” была возрождена спековая технология производства подложки с применением глинозема Г–0. Проводится работа по созданию корундовой керамики типа “Корал-2” на основе этого материала.

В настоящее время предлагается использование для электронной техники материала, производимого немецкой фирмой “Ceramtec”. Фирма на основе глинозема “Almatis” выпускает изделия под марками Rubalit 708S и Rubalit 710 в виде шлифованных подложек размером 120x120x1,0 мм. Эти изделия широко используются за рубежом в электронной технике. Они отличаются высокой плотностью, практически отсутствием пор и размером кристаллов 2–3 мкм. Нами были проведены предварительные исследования спекания образцов из глинозема марки СТ3000SG, производимого немецкой фирмой “Almatis”. По данным фирмы глинозем содержит 99,8% оксида алюминия, имеет размер кристаллов <1 мкм, спекается на воздухе при температуре 1540°C до плотности 3,90 г/см<sup>3</sup> при усадке 16,8 %. [3]. Нами были изучены строение исходного глинозема, измельченного и глинозема с добавкой 0,3 мас.% оксида магния. Были проведены обжиги на воздухе при температурах в пределах 1450–1600°C. Образцы из глинозема с добавкой оксида магния уже при температуре 1500°C спекаются до плотности 3,92 г/см<sup>3</sup> и прочность на изгиб при этом равна 250 МПа. Размер кристаллов составляет ~ 3 мкм (рис. 3).

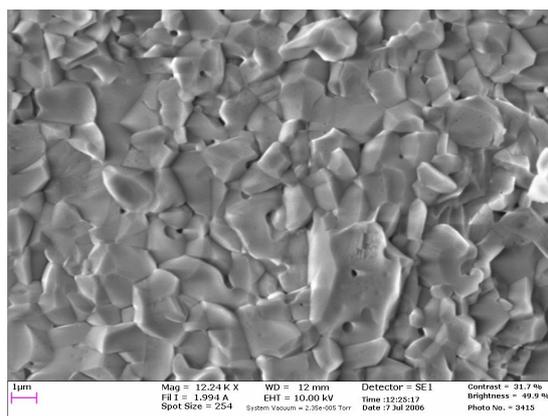


Рис. 3. Микроструктура керамики на основе глинозема фирмы “Almatis”

Также были проведены обжиги в вакууме при температурах в пределах 1450–1650°C. Керамика из глинозема марки СТ3000SG с добавкой оксида магния, спеченная при температуре 1550°C, имеет размер кристаллов 2–3 мкм, плотность – 3,90 г/см<sup>3</sup>, прочность – 290 МПа. Полученные данные свидетельствуют о возможности применения глинозема “Almatis” для изготовления подложек микросхем.

## Литература

1. Попильский Р.Я., Панкратов Ю.Ф., Койфман Н.М. О формировании беспористой структуры поликристаллического корунда // Докл. АН СССР. 1964. Т.155, № 2. С. 326 – 329.
2. О проблемах получения оксидной керамики с регулируемой структурой / Е.С. Лукин, Н.Т. Андрианов, Н.Б. Мамаева и др. // Огнеупоры. 1993. №5. С. 11–15.
3. Horst H. Pohland. Aluminum oxide. Production, properties, applications // Verlag moderne industrie.– 1999.– 70 p.

## СИНТЕЗ ВЫСОКОПОРИСТЫХ КЕРАМИК НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО $ZrO_2$

*С.П.Буякова, Л.М.Молчунова, С.Н.Кульков*  
(ИФПМ СО РАН, г.Томск, Россия)

Использование в технологии получения пористых керамик нанокристаллических порошков позволяет за счет создания стабильной мелкокристаллической структуры существенно увеличить прочностные характеристики пористого керамического каркаса. Благодаря развитой поверхности нанокристаллических частиц, соотношение площади контакта, формирующегося между соседними частицами порошка в процессе спекания, к площади отдельной частицы значительно выше, чем в крупнокристаллических порошковых материалах, в результате чего достигается более высокая прочность керамического каркаса. Однако, несмотря на перспективы, открываемые применением нанопорошков в технологии получения керамик в промышленном производстве керамических изделий, высокодисперсные порошки используются весьма ограничено вследствие недостатка данных о поведении нанокристаллических порошковых систем в условиях механического и термического воздействий.

Цель данной работы – исследование особенностей формирования структуры пористой керамики при прессовании и спекании нанокристаллического порошка диоксида циркония  $ZrO_2$ , частично стабилизированного оксидом иттрия.

Изучен порошок, состоящий из изолированных сферических частиц и многочисленных агрегатов, составленных частицами, не имеющими регулярной формы, среди которых наблюдались обломки сфер, и пленки, рисунок. Количество сферических частиц в порошке не превышало одной четверти от всей совокупности частиц. Средний размер частиц в порошке составил 0,6 мкм. Порошок находился преимущественно из высокотемпературной тетрагональной модификации диоксида циркония, количество низкотемпературной моноклинной фазы не превышает 10%. Темнопольное исследование (ПЭМ) порошка показало, что частицы являются поликристаллическими агрегатами, состоящими из кристаллитов, размер которых от 5 до 70 нм. Средний размер кристаллитов, определенный по уширению рентгеновских рефлексов, составил 20 нм для тетрагональной фазы и 50 нм для моноклинной фазы.

Диаграмма прессования  $ZrO_2$ , рис. 1а, состоит из трех линейных отрезков с разным наклоном, что, вероятно, обусловлено сменой преобладающих механизмов компактирования от квазижидкого перемещения частиц до компактирования за счет разрушения структурных элементов порошка (прессование осуществлялось под давлением до 700 МПа). При этом, как показал анализ фазового состава поверхности прессовок, во всем интервале давления прессования наблюдается приращение моноклинной фазы диоксида циркония, что свидетельствует о разрушении частиц нанокристаллического порошка диоксида циркония в процессе прессования, рис. 1б.

Анализ структуры прессовок, полученных при давлении 50, 100 и 300 МПа, показал, что в прессовках, полученных при давлении 50 МПа, присутствует большое количество сферических частиц и сохранившихся агрегатов, однако средний размер частиц меньше, чем в исходном порошке. Разрушению подверглись наименее прочные и крупные агрегаты. Средний размер

частиц в прессовках, полученных при давлении 100 МПа, относительно исходного состояния порошковой системы уменьшился в два раза и составил 0,3 мкм, значительно сократилось количество сферических частиц, но присутствовали многочисленные агрегаты. Агрегаты сохранились и в прессовках, полученных при давлении 300 МПа, но средний размер частиц в них составил 0,15 мкм, что меньше среднего размера частиц в исходном порошке в четыре раза.

Установлено, что наиболее интенсивное уплотнение при спекании прессовок из нанокристаллического порошка  $ZrO_2$  в интервале гомологических температур 0,56 – 0,63 происходило на стадии нагрева, а изотермическая выдержка в течение 7 часов позволила увеличить плотность керамики не более чем на 5–7%.

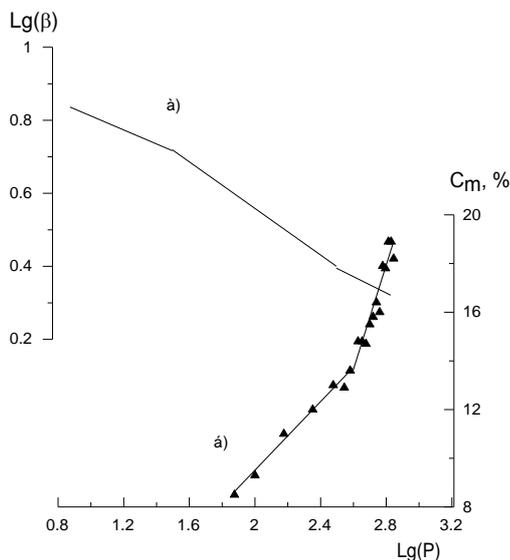


Рис. 1. а) – диаграмма прессования порошка  $ZrO_2(Y)$ ;  
 б) – зависимость количества моноклинной фазы диоксида циркония на поверхности прессовок от давления прессования

Анализ зависимостей величины усадки на изотермической стадии спекания, рис. 2, выявил, что показатель степени  $n$  уравнения кинетики усадки ( $\Delta L/L = K\tau^n$ , где  $\Delta L/L$  – относительная усадка,  $K$  – кинетический коэффициент скорости процесса,  $n$  – константа, отражающая механизм уплотнения), во-первых, практически одинаков для режимов спекания при гомологических температурах 0,56 и 0,63, и, во-вторых, в несколько раз превосходит показатель степени для режима спекания при гомологической температуре 0,63.

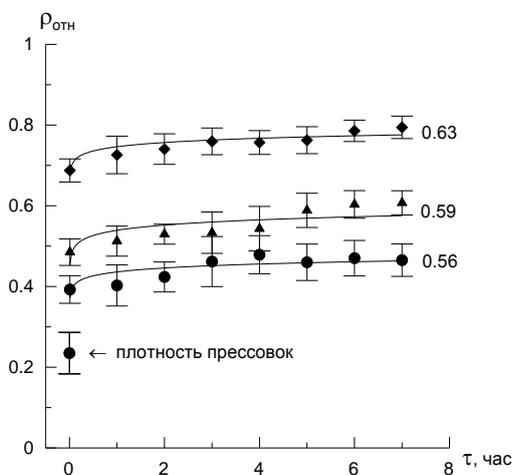


Рис. 2. Зависимость относительной плотности керамики  $ZrO_2(Y)$  из нанокристаллического порошка от продолжительности спекания

Данное обстоятельство может быть следствием того, что на стадии нагрева прессовок формируется прочный каркас, устойчивый к дальнейшему уплотнению при изотермической выдержке, при этом, чем выше температура спекания, тем более устойчив материал к уплотнению на стадии изотермической выдержки.

Технологические режимы формования и спекания нанокристаллического порошка частично стабилизированного диоксида циркония позволили получить керамику с пористостью от 2 до 60% и средним размером пор от 2 до 4,5 мкм. При этом, как показали керамографические исследования полированной поверхности образцов, в керамике с пористостью менее 30% поровая структура представлена изолированными порами и поровыми кластерами, в керамике с большим объемом порового пространства пористость – сообщающаяся. В распределениях пор по размерам во всем диапазоне порового пространства присутствует один максимум.

Анализ поверхности разрушения полученной керамики показал, что керамический каркас сформирован из линейных цепочек с количеством зерен в каждой из них от 3 до 9, а число соседей не превышает четырех. Средний размер зерна в керамике, спекаемой в интервале гомологических температур 0,56–0,63 составил соответственно 0,4 и 0,7 мкм. Размер кристаллитов тетрагональной фазы диоксида циркония, определенный по уширению рентгеновских рефлексов в полученной керамике, не превышает 50 нм.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 06-08-00903-а и 05-01-98008-объ-а, Минобразования и науки проект № РНП.2.2.2.3. 6967 и в рамках программы BRNE проект № Y3-E-16-01.

## **СТРУКТУРА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*С.П.Бужкова, С.Н.Кульков* (ИФПМ СО РАН, г.Томск, Россия)

Высокая поверхностная энергия наноразмерных порошков открывает возможности в получении материалов с принципиально новыми комплексами свойств. Однако направленное использование наноразмерных порошков на практике сталкивается с рядом трудностей, главной из которых является неоднородность гранулометрического состава, обусловленная склонностью высокодисперсных порошков к агломерированию. Неоднородность упаковки частиц агломерированных нанопорошков при формовании приводит к резкому снижению плотности спеченного материала, а соответственно и прочности, и тем самым в значительной степени нивелирует потенциальные возможности нанокристаллического состояния порошков в получении материалов с высокими прочностными свойствами. Избежать или, по крайней мере, значительно уменьшить неоднородность структуры материалов, получаемых из наноразмерных порошков, позволяет предварительная механическая обработка порошков, направленная на разрушение межчастичных агрегатов. При механической обработке в мельницах на фоне разрушения крупных структурных элементов порошка происходит его активация: образование высокодефектной структуры, новых поверхностей, очищение частиц от адсорбированных газов.

С целью активации и выравнивания по гранулометрическому составу высокодисперсный порошок  $ZrO_2$  (3 %вес. MgO) подвергался обработке в барабанной мельнице с мелющими телами из высокоплотной алюмооксидной керамики в режиме сухого помола (скорость вращения барабана составляла 70 об/мин). Порошок состоял в основном из высокотемпературной кубической модификации  $ZrO_2$ , средний размер кристаллитов которой составлял 25 нм.

Электронно-микроскопические исследования порошка  $ZrO_2$ (Mg) показали, что с началом механической обработки наметилась устойчивая тенденция к сокращению числа индивидуальных частиц и росту агрегатов. Порошок, подвергнутый механической обработке в течение пяти часов, состоял из агрегатов, средний размер которых в несколько раз превосходил средний размер частиц в исходном порошке.

Несмотря на наблюдаемое агрегирование порошка, дальнейшая обработка в мельнице привела к деструкции образовавшихся агрегатов и разделению порошковой системы на две фракции, формирующие самостоятельные максимумы в распределениях частиц по размерам. Заметное увеличение числа изолированных частиц в порошке наблюдалось к 10 часам механической обработки, а к 25 часам в порошке полностью отсутствовали сферические частицы и обломки сфер, присутствующие в исходном порошке – он состоял из индивидуальных частиц, средний размер которых  $\langle d \rangle = 0,14$  мкм, и незначительного количества агломератов с  $\langle d \rangle = 4,9$  мкм. Особого внимания заслуживает присутствие своеобразного “ореола” вокруг частиц на РЭМ снимках порошка после измельчения в течение 25 часов, что может являться свидетельством частичной аморфизации порошка в процессе механического воздействия. Дальнейшее увеличение продолжительности механической обработки не привело к заметному уменьшению среднего размера индивидуальных частиц, однако морфология порошка изменилась, частицы сгруппировались в крупные сферические образования. Порошок, подвергнутый механической обработке в течение 50 часов, состоит из полидисперсных гранул, средний размер которых около 100 мкм.

Наблюдаемые изменения в морфологии структурных элементов нанокристаллической порошковой системы  $ZrO_2$ , подвергаемой механической обработке, свидетельствуют, что для данной порошковой системы существует критическое состояние, с достижением которого происходит ее разделение на две самостоятельные подсистемы, принципиально отличающиеся по размерам, а сам процесс механической обработки разделяется на две стадии – стадию агрегирования и стадию разрушения агрегатов, рис. 1. При этом не менее важным процессом, происходящим на стадии агрегирования, является интенсивная генерация микроповреждений в структурных элементах порошка, что в последующем и приводит к их деструкции.

Изменения, происходящие в исследуемом нанокристаллическом порошке при механической обработке, отразились на кристаллической структуре  $ZrO_2$ . Прежде всего, с увеличением продолжительности мехобработки на рентгеновских дифрактограммах прослеживается увеличение интенсивности фона на малоугловых линиях рентгенограмм. Основным фактором, приводящим к увеличению фоновой интенсивности на малых углах дифракции, является присутствие в структуре материала областей с высокой дефектностью (рентгеноаморфные структуры). Расчет отношения интенсивности фоновой излучения  $I_f$  к интегральной интенсивности наиболее сильного рефлекса кубической фазы диоксида циркония

$I_{K(111)}$ , как  $\Delta I = \frac{I_{K(111)} - I_f}{I_f}$  показал, что  $\Delta I$  уменьшается с началом разделения порошка при

механической обработке на две самостоятельные подсистемы и появлением высокодисперсной составляющей с “ореолом”, окружающей частицы на снимках РЭМ.

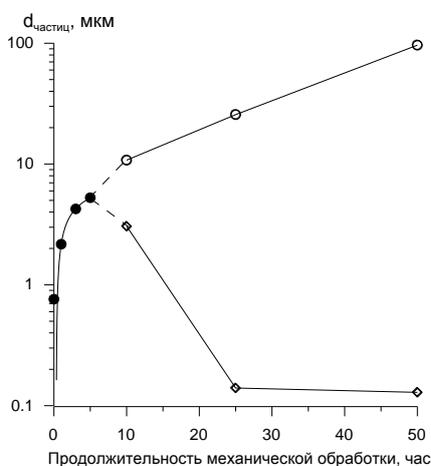


Рис.1. Изменение среднего размера частиц наноструктурного порошка  $ZrO_2(Mg)$  с увеличением продолжительности обработки в барабанной мельнице

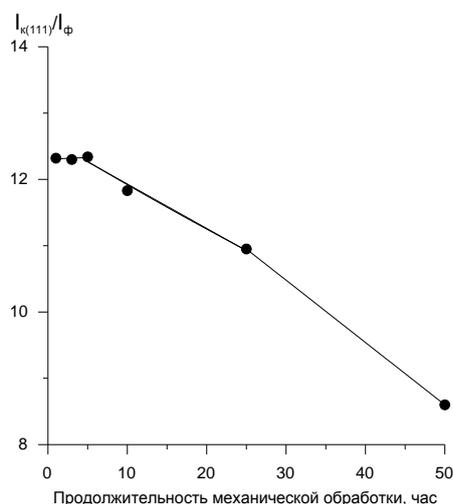


Рис.2. Отношение интенсивности фонового рентгеновского излучения к интенсивности рефлекса (111) K-ZrO<sub>2</sub> на рентгеновских дифрактограммах ультрадисперсного порошка ZrO<sub>2</sub>(Mg) после обработки в барабанной мельнице с разной продолжительностью

Изменения в морфологии частиц нанокристаллического порошка ZrO<sub>2</sub>, происходящие при механической обработке в мельнице, отразились на его физических и технологических свойствах. Согласно проведенным измерениям (метод БЭТ) удельная поверхность порошка возрастала с увеличением продолжительности механической обработки. Величина удельной поверхности порошка, подвергнутого механической обработке в течение 50 часов составила 19 м<sup>2</sup>/г. Превышение  $\rho_{нас}$  порошка, подвергнутого механической обработке, относительно исходного состояния наблюдалось при появлении второй, высокодисперсной составляющей в порошковой системе, к 50 часам обработки в барабанной мельнице насыпная плотность нанокристаллического порошка ZrO<sub>2</sub> увеличилась практически в пять раз – от 0,2 до 0,98 г/см<sup>3</sup>.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 06-08-00903-а и 05-01-98008-объ-а, Минобрнауки проект № РНП.2.2.2.3. 6967 и в рамках программы BRNE проект № Y3-E-16-01.

## ПОРИСТЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ГРАНУЛЫ ИЗ МАГНИЙЗАМЕЩЁННОГО ГИДРОКСИАПАТИТА ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ КОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ

*\*С.М.Баринов, \*\*Н.С.Сергеева, \*\*И.К.Свиридова, \*\*В.А.Кирсанова, \*\*С.А.Ахмедова, \*И.В.Фадеева, \*В.С.Комлев, \*\*\*Е.С.Ковалёва, \*Л.И.Шворнева, \*С.В.Куцев*  
 (\*ИФХП КМ РАН, г.Москва, \*\*ФГУ МНИОИ им.П.А.Герцена, г.Москва, \*\*\*Факультет наук о материалах МГУ, г.Москва, Россия)

Гидроксиапатит (ГА) является основной минеральной составляющей костной ткани человека. Однако костная ткань, кроме ГА, содержит определённое количество примесей, одной из которых является Mg<sup>2+</sup>, замещающий ион Ca<sup>2+</sup> в структуре соединения. Известно, что ион магния оказывает влияние на процессы, происходящие в организме, в частности, на процессы минерализации. Можно предположить, что введение Mg<sup>2+</sup> в синтетический ГА будет влиять на его биосовместимость при использовании в качестве материала для имплантации в ткани человека, увеличивая скорость резорбции ГА в них. Целью настоящего исследования являлось установление влияния частичного замещения ионов кальция на ионы магния на состав, структуру образующихся соединений, получение керамики из них, а также на поведение керамических материалов из магнийсодержащего ГА в живом организме.

В качестве исходных соединений для синтеза магнийсодержащих гидроксиапатитов использовали водные растворы нитратов кальция и магния, двухзамещенного фосфата аммония и аммиака.

Образовавшиеся в результате взаимодействия гели сушили при 120°C в сушильном шкафу, измельчали в планетарной мельнице и подвергали термической обработке при 700°C, после чего исследовали полученные порошки методами РФА, ИК-спектроскопии, электронной микроскопии. Установлено, что ионы магния изоморфно замещают ионы кальция в кристаллической решётке ГА, создавая в ней дефекты и напряжения, приводящие к снижению устойчивости образуемого соединения. Так, с увеличением количества вводимых ионов магния стабильность соединений уменьшается: введение более 5% ионов магния от общего содержания магния и кальция приводит к полной дестабилизации структуры и формированию структуры типа витлокита. Данные результаты подтверждаются ИК-спектроскопическими исследованиями. Размер частиц (агрегатов) магнийсодержащего ГА уменьшается по сравнению с чистым ГА от 500–800 до 70–80 нм.

Из порошков магнийсодержащего ГА были сформованы гранулы методом, основанном на эффекте сфероидизации частиц, формирующихся при смешении двух несмешивающихся жидкостей. Одной из жидкостей является водная суспензия магнийсодержащего ГА и желатина. Полученные таким способом гранулы спекали в печи с силитовыми нагревателями при температуре 1050°C. Размер гранул изменялся в интервале 50–1000 мкм.

Для проведения биомедицинских тестов использовали фракцию гранул размером 300–500 мкм. Замещение костного дефекта проводили *in vivo* на голени крысы. При заполнении области травмы данными материалами установлено, что пористые гранулы из магнийсодержащего ГА обладают большей скоростью биорезорбции по сравнению с чистым ГА и обладают osteoconductive потенциальными.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 06-03-32192.

## **МЕТОДИКИ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**С.А.Анучин** (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

При проектировании летательных аппаратов (ЛА) необходимо учитывать теплофизические свойства (ТФС) материалов. Одним из самых теплонагруженных элементов ЛА является головная (носовая) часть. Неопределённость данных о ТФС материала может привести к ошибке в проектировании носовой части ЛА, которая может привести к выходу за допустимые температурные пределы бортового оборудования. Оценки показывают, что погрешность значения коэффициента теплопроводности материала в 10% приводит к изменению температуры внутренней поверхности ЛА до 50 К.

Известные методы и средства теплофизических исследований не обладают достаточной точностью и производительностью в диапазоне температур до 1500 К. Как правило, паспортизация материала по ТФС требует от 50 до 100 человеко-часов рабочего времени коллектива испытательного подразделения. Максимальный уровень экспериментальных температур колеблется от 800 до 1200 К. Имеющиеся справочные данные не полны, устарели и не содержат сведений о новых материалах, а их точность при высоких температурах не превышает 20 %.

В этой связи актуальным представляется расширение температурного диапазона, уменьшение погрешности определения ТФС керамических материалов с одновременным увеличением производительности. Совокупная разработка методов и средств автоматизации теплофизических исследований представляет собой важную научно-техническую задачу.

Целью проведенной экспериментально-теоретической работы являлось повышение точности определений ТФС перспективных керамических материалов аэрокосмического назначения на 5 – 10 % с одновременным повышением производительности в 3 – 5 раз и расширение диапазона экспериментальных температур до уровня 1500 К за счёт внедрения новых методик, алгоритмов, программ, компьютерных и технических средств.

Разработаны методики проведения теплофизических испытаний образцов керамических материалов, обоснован выбор формы и размеров экспериментальных образцов, скоростей нагрева и продолжительности эксперимента, а также алгоритмы автоматизированных испытаний.

Для определения ТФС керамических материалов в составе автоматизированного комплекса (АКО ТФСМ) реализованы три независимые методики исследований: квазистационарного теплового режима, импульсного теплового потока и нестационарного теплового режима (одностороннего лучистого нагрева). Программа управления и аппаратно-техническое обеспечение АКО ТФСМ позволяют проводить исследования по этим методикам полностью в автоматическом режиме (в том числе настройка параметров эксперимента, задание тепловых режимов и определение ТФС материалов).

В работе представлены структура программного обеспечения и технические средства комплекса, а также результаты теплофизических исследований свойств ряда перспективных керамических материалов аэрокосмического назначения.

Проведена работа по поиску образцовых материалов с известными теплофизическими свойствами при высоких температурах, которые могут быть рекомендованы для проверки комплекса определения ТФС. В качестве таких материалов могут использоваться материалы, производимые в “ОНПП “Технология””: НИАСИТ-8ПП и ТЗМК-10 (ТЗМ-23М).

На рис. представлены зависимости коэффициента теплопроводности от температуры для материалов разной плотности.

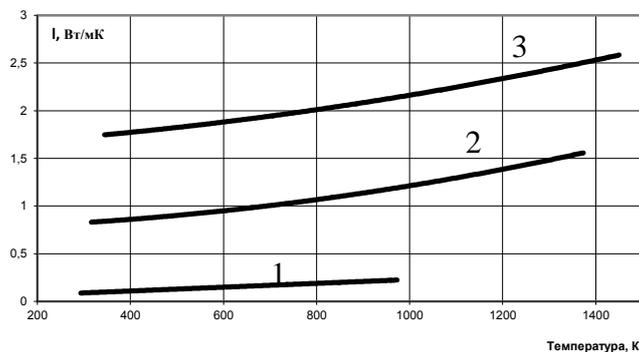


Рис. Зависимости коэффициента теплопроводности от температуры для:

- 1 – волокнистого высокопористого материала ТЗМ-23М (плотность 370 кг/м<sup>3</sup>);
- 2 – кварцевой керамики НИАСИТ - 8ПП (плотность 1960 кг/м<sup>3</sup>);
- 3 – стеклокерамики ОТМ-357 (плотность 2480 кг/м<sup>3</sup>)

В автоматизированном комплексе определения теплофизических свойств материалов реализованы преимущества использования современных программно-аппаратных средств и применения математического аппарата коэффициентных обратных задач теплопроводности.

Автоматизированный комплекс определения теплофизических свойств материалов позволяет проводить теплофизические исследования одновременно стационарными и нестационарными методами, что существенно повышает достоверность получаемых результатов.

Методики, автоматизированный комплекс АКО ТФСМ и результаты испытаний используются при исследовании ТФС керамических материалов в “ОНПП “Технология”.

## **СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ**

***В.С.Райлян, М.Ю.Русин, В.И.Фокин***  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Одним из узких мест в существующем технологическом процессе изготовления обтекателей является недостаточный контроль прочностных свойств конструкции изделия. Используемые в настоящее время методы (испытание на герметичность, испытание путем создания во внутренней полости избыточного давления) носят качественный характер и их результаты не могут быть использованы при определении надежности производимых изделий и при контроле стабильности технологического процесса сборки. Общий контроль прочности керамических изделий осуществляется разрушающими методами и имеет выборочный характер.

С повышением требований к новым изделиям ракетной техники и стремления соответствовать международным нормам качества использования выборочного контроля для определения общей конструктивной прочности производимых обтекателей уже недостаточно.

Выходом из этой ситуации является разработка системы диагностирования конструкции керамических обтекателей. Существующий уровень развития современных средств автоматизации управления, измерения, регистрации и обработки данных дает возможность создать автоматические методы контроля прочностных параметров конструкции.

К методам системы диагностирования предъявляются следующие основные требования:

- методы должны быть неразрушающими для возможности контроля всех производимых изделий;
- методы должны быть автоматическими для ускорения процесса диагностирования;
- методы должны быть направлены на контроль комплексных параметров конструкции, однозначно определяющих ее прочность;
- методы должны контролировать прочностные свойства конструкции по всей окружности изделия.

Указанным требованиям наиболее полно удовлетворяют методы контроля НДС конструкции при воздействии низких уровней нагружения, исключающих возникновение необратимых процессов в обтекателе.

В работе приведено обоснование структуры системы диагностирования керамических обтекателей. Показано место системы в технологическом процессе производства, наземной отработки и эксплуатации керамических обтекателей. Приведены разработанные автоматические системы и установки, реализующие методы диагностирования.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ДОБАВОК SiO<sub>2</sub> НА СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ЗАГОТОВОК**

***Е.И.Суздальцев, А.В.Дмитриев, Д.В.Харитонов***  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Многочисленные составные элементы летательных устройств со сверхзвуковой скоростью полета (как, например, головные радиопрозрачные антенные обтекатели ракет) изготавливаются, как правило, из огнеупорных, эрозионно- и термостойких материалов, требования к которым постоянно возрастают из-за совершенствования техники. В ряду наиболее перспективных материалов для изготовления антенных обтекателей скоростных ракет находятся кварцевая керамика, ситаллы и стеклокерамика, разработанная во ФГУП “ОНПП “Технология”. В последние годы ведутся работы по улучшению диэлектрических параметров стеклокерамики литийалюмосиликатного состава.

Одним из способов решения данной задачи является использование добавок другого материала, имеющего гораздо более низкое значение диэлектрической проницаемости. Так, известны несколько работ [1, 2, 3], в которых рассматривается идея введения добавок диоксида кремния в стеклокерамику литийалюмосиликатного состава. Несмотря на полученные в работах [1, 2] удовлетворительные по диэлектрическим характеристикам результаты, необходимы дальнейшие исследования в области влияния добавок на свойства материала.

В настоящей работе была предпринята попытка синтеза нового материала на основе стеклокерамики литийалюмосиликатного состава с добавками  $\text{SiO}_2$ . Основная цель исследования заключалась в том, чтобы показать характер влияния добавок кварцевого стекла с различной дисперсностью (тониной помола) на свойства полученного композиционного материала.

Выбор способа внесения добавок в исходный материал был сделан в пользу смешивания двух шликеров. Данный метод введения добавок способствует более равномерному распределению добавки по всему объему шликера. В случае же введения порошкообразных добавок могут образовываться комки и не происходить равномерного перемешивания. По своим параметрам используемые шликера достаточно схожи, что только улучшает литейные свойства конечного шликера.

В ходе исследований использовались добавки  $\text{SiO}_2$  с тониной помола 9,5 и 0%.

Экспериментально было установлено, что оптимальное количество добавок  $\text{SiO}_2$  в шликер составляет 40% по объему. При таком соотношении процесс формования идет быстрее, чем при введении другого количества добавок, а также наблюдается пониженная пористость сырых заготовок.

В работе использовался шликер литийалюмосиликатного состава с введением в него добавок шликера кварцевого стекла с тониной помола 9, 5 и 0%.

Важным показателем шликеров является характер их реологического поведения. Анализируя полученные данные по реологии шликеров с добавкой  $\text{SiO}_2$ , можно сделать вывод о том, что полученные шликеры обладают достаточными для формования керамических заготовок литейными свойствами.

Изучение зернового состава используемых шликеров проводилось методом седиментационного анализа. Для более детального изучения зернового состава используемых шликеров был проведен анализ с использованием лазерного анализатора размеров частиц LA 950 японской фирмы "HORIBA" (оборудование для проведения исследований предоставлено ООО "РВС", г. Санкт-Петербург). Современные технологии, реализованные в данном приборе, позволяют более детально изучить широкий диапазон частиц, содержащихся в шликере, что может существенно облегчить работы по синтезу новых керамических материалов.

Методом шликерного литья в гипсовые формы из полученного шликера с добавками  $\text{SiO}_2$  были отформованы керамические заготовки. Во время формования непрерывно снималась кинетика набора стенки заготовки. Анализ кинетики набора показал, что чем меньше тонина помола кварцевого шликера, тем медленнее идет набор заготовки. Это явление объясняется тем, что из мелких частиц в шликере на поверхности формы происходит образование тонкого (1,5-2,0 мм), уплотненного слоя заготовки, который затрудняет процесс фильтрации несвязанной воды через данный плотный слой черепка [4]. Дальнейший набор толщины стенки заготовки осуществляется за счет медленного удаления влаги с возрастанием вязкости суспензии в полости формы [5].

Таким образом, при литье заготовок из суспензий литийалюмосиликатного стекла целесообразно образовывать на поверхности формы достаточно пористый водонепроницаемый слой, который беспрепятственно пропускал бы влагу из удаленных от поверхности формы слоев. Поэтому по мере увеличения доли крупных частиц в суспензиях литийалюмосиликатного стекла отмечается ускорение процесса набора толщины стенки заготовки. Однако увеличение количества крупных частиц в суспензии, наряду с увеличением скорости формования, приводит к расслоению заготовки, то есть к появлению разноплотности по ее высоте из-за различной скорости осаждения крупных и мелких частиц.

Кроме того, установлено, что с уменьшением размера частиц в шликере, увеличивается брак заготовок. Это происходит из-за образования мелкими частицами агломератов, что приводит к разноплотности заготовки по объему, которая при сушке отформованной заготовки ведет к неравномерному высыханию, а следовательно, и к неравномерной усадке, вследствие чего заготовка растрескивается.

Был проведен анализ плотности и пористости полученных сырых заготовок. Заготовки, отформованные из шликера с добавкой  $\text{SiO}_2$  с тониной помола 5%, имеют наиболее плотную и наименее пористую структуру. Данное явление связано с тем, что перемешанные в шликере мелкие и крупные частицы при формовании образуют более плотную упаковку, чем в случае значений тонины 9 и 0%, где присутствуют в основном либо крупные, либо, соответственно, мелкие частицы, что отрицательно сказывается на свойствах полученных сырых заготовок.

Полученные результаты микроструктурного анализа показали, что заготовки, отформованные из шликера с тониной помола добавки 9%, имеют структуру с соизмеримыми размерами зерен. Структура заготовок, отформованных с тониной помола 5%, отличается тем, что мелкие зерна кварцевого стекла равномерно распределены между зернами стеклокерамики, что является достаточно хорошим показателем для образования плотной, низкопористой структуры заготовки после стадии термообработки. В заготовках с тониной помола добавки  $\text{SiO}_2$  0% не наблюдается равномерного распределения частиц по объему заготовки, а также в отдельных случаях встречаются агломераты частиц.

Целью дальнейших исследований является изучение влияния различных факторов и режимов спекания заготовок, отформованных из шликеров литийалюмосиликатного состава с добавлением шликера кварцевого стекла с различной тониной помола.

#### Литература

1. Суздальцев Е.И., Рожкова Т.И. Материалы с регулируемой диэлектрической проницаемостью на основе стеклокерамики литийалюмосиликатного состава // Огнеупоры и техническая керамика. 2003. № 5. С. 19-22.

2. Суздальцев Е.И. Исследования по получению стеклокерамики  $\beta$ -сподуменового состава с регулируемой диэлектрической проницаемостью // Огнеупоры и техническая керамика. 2002. № 5. С. 15-18.

3. Патент №2222504 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03 С 10/12, С 04 В 35/19. Способ получения изделий из стеклокерамического материала литийалюмосиликатного состава. Суздальцев Е.И., Харитонов Д.В. и др., заявл. 24.06.2002; опубл. 27.01.2004.–Бюл.–№ 3.–С. 7.

4. Пивинский Ю.Е., Ромашин А.Г. Кварцевая керамика.–М.: Металлургия, 1974.– 264 с.

5. Суздальцев Е.И. Синтез высокотермостойких, радиопрозрачных стеклокерамических материалов и разработка технологии изготовления на их основе обтекателей летательных аппаратов : дис. докт. техн. наук : 05.17.11 : Суздальцев Евгений Иванович. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2002.– 431с.

## РАЗРАБОТКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МОНОПАНЕЛИ ДЛЯ СИБ ИЗ ЛИТОГО САМОСВЯЗАННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

*В.В.Ленский, А.А.Чикина, М.В.Андреев, А.С.Анисимов, В.П.Параносенков, И.Ю.Келина*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В настоящее время наиболее высокий уровень защиты достигнут при использовании бронезащитной панели, склеенной из набора малогабаритных шлифованных пластин размером до 100 мм. Одновременно дороговизна и сложность технологии их изготовления заставляет отдавать предпочтение более дешевым и технологичным способам изготовления.

В отсутствие внешнего бронирования для индивидуальной защиты личного состава в открытых люках транспортных средств (вертолет, бронемашина, танк) используют монолитные криволинейные корундовые панели размером до 400 мм фирмы “Armor”. Для защиты боевой

техники и средств индивидуальной защиты личного состава назрела существенная потребность в крупногабаритных монопанелях различных размеров и степеней кривизны.

В работе приводятся результаты разработки крупногабаритных монопанелей размером 250x300x8 мм (рис.1) для бронежилетов из литого самосвязанного карбида кремния с максимальной живучестью.

Учитывая, что цельная монопанель должна иметь сложную форму, включая двойную кривизну, для решения задачи был выбран способ формования изделия в литевой оснастке из шликером на основе углеродсодержащей шихты, исключающий необходимость использования механической обработки за счет усадки не более 1 % на этапе высокотемпературного спекания.

На всех технологических операциях изготовления монопанелей отслеживалось качество заготовок на наличие дефектов, как внутренних, так и наружных. Показано, что наиболее характерными дефектами на стадии формования являются неслитины, утяжины и трещины по кромке; на этапах удаления технологической связки, пропитки заготовок бакелитовым лаком, полимеризации и пиролиза, силицирования и спекания являются трещины. Дефекты устранялись подборкой режимов на всех технологических операциях (изменение температуры, длительности, избыточного давления и т.д.).

Оценка воспроизводимости свойств материала в макетном и натурном изделиях на образцах, вырезанных из монопанели, и образцах-спутниках показала, что в изделиях реализуются более высокие характеристики керамики, чем на образцах-спутниках: плотность 3,00 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость не более 0,3–0,4 %, прочность при изгибе до 280 МПа, микротвердость 20 ГПа. Это, очевидно, связано с различием механизмов синтеза материала в заготовках и изделиях с большими поверхностными площадями по сравнению с малогабаритными образцами.

Измерения геометрических размеров монопанелей на соответствие чертежу ОТИ 1188 при помощи КИМ FARO показали, что отклонения от идеальной окружности достигают 0,2–0,3 мм в обе стороны. Таким образом, текущее состояние технологических разработок не позволяет получить изделия заданной геометрии, для устранения отклонений необходима специальная оснастка для силицирования и спекания заготовок.

Проведены баллистические испытания 3 монопанелей с габаритными размерами 160x190x10,5 и 250x300x8,7 мм с органопластиковой подложкой из арамидных тканей, пропитанных эпоксидным связующим по 5, 5а, 6 и 6 классам защиты ГОСТ Р 50744-95.

Образцы монопанелей размером 160x190 мм с поверхностной плотностью 37–40 кг/м<sup>2</sup> обстреливались с дистанции 5 м по нормали пулей типа Б-32 калибра 7,62 мм. Бронеэлементы выдержали 4 выстрела. В результате обстрела по имеющимся непробитиям (рис.2) можно предположить, что данная защитная структура сможет обеспечить защиту по ба классу защиты. Монопанели 250x300x8,7 мм также обеспечивают заявленную живучесть – три попадания с расстоянием 120 мм между входными отверстиями.



Рис.1. Внешний вид монопанели



Рис.2. Лицевая сторона монопанели после испытаний

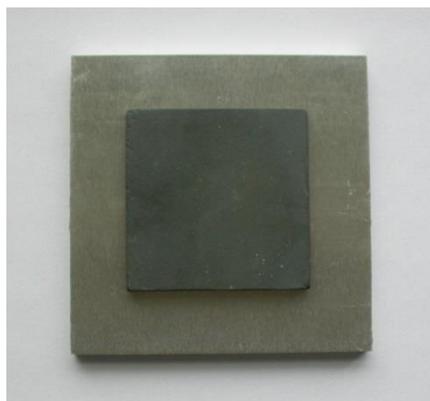
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В БРОНЕКОНСТРУКЦИЯХ

*В.В.Ленский, И.Ю.Келина* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия),  
*В.И.Баконин* (ОАО “МВЗ им.М.Л.Миля”, г.Москва, Россия),  
*Л.Н.Безруков* (ФГУП “ГосНИИАС”, г.Москва, Россия)

Проведены сравнительные баллистические испытания образцов комбинированной брони с фронтальным керамическим слоем из материалов на основе карбида кремния (ОТМ-923 и ОТМ-927), нитрида кремния (ОТМ-922) и оксида алюминия (ТСМ-303) производства ФГУП “ОНПП “Технология”. В качестве подложки использовались алюминиевый сплав и комбинации различных неметаллических материалов (полиэтилен, полипропилен и др.).

Исследуемые керамические материалы относятся к бронезащитным и отличаются друг от друга методами синтеза, физико-механическими и баллистическими свойствами, что обуславливает возможность их применения по разным классам защиты в различных бронеконструкциях. Для всех материалов исследованы физико-механические свойства, ответственные за баллистические свойства. Минимальная плотность ( $3 \text{ г/см}^3$ ), максимальная микротвердость (HV 20–27 ГПа) при умеренной прочности (250 МПа) характерны для самосвязанного карбида кремния и являются оптимальными для оказания эффективного сопротивления воздействию высокоскоростного ударника. Возможность получения материала методами полусухого прессования и шликерного литья обеспечивает возможность получения сложнопрофильных изделий.

Каждый образец брони подвергался обстрелу одиночной бронебойно-зажигательной пулей Б-32 калибра 7,62 мм по нормали к поверхности брони со скоростью соударения 800 – 850 м/с. Вид типового образца до и после испытаний показаны на рисунке.



а



б

Рис. Внешний вид образца до (а) и после – тыльная сторона (б) испытаний комбинированного образца

Результаты испытаний брони с металлической подложкой показали, что наилучшими весовыми характеристиками 43,2–43,6 кг/м<sup>2</sup> обладают образцы, состоящие из лицевых пластин из карбида кремния с толщиной керамических пластин 8 мм, а подложки 7 мм. Результаты испытаний с неметаллической подложкой показали возможность достижения значений удельной массы брони по ба классу защиты, равной 32,8–34,3 кг/м<sup>2</sup> при использовании в качестве лицевого слоя керамических пластин ОТМ-922 и ОТМ-923 и подложки на основе СВПЭ(Д). Однако живучесть комбинации не более 1 выстрела.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ШЛИКЕРНОГО ЛИТЬЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

*Ю.В.Липовцев* (ОГТУ АТЭ, г.Обнинск, Россия),

*В.И.Куракин, А.С.Хамицаев* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Разработана математическая модель процесса шликерного литья тонкостенных керамических оболочек в гипсовые формы с переменной толщиной стенки. Она представляет собой систему нестационарных дифференциальных уравнений, которые описывают весь процесс обезвоживания шликера по толщине набираемой заготовки одновременно во всех сечениях по высоте формового комплекта.

В основу математической модели положены следующие предпосылки:

- гипс – это тонкопористый материал, мелкие пустотные поры которого пронизаны тонкими сквозными открытыми каналами;
- тонкие каналы гипса обладают свойствами капилляров, и вода фильтруется по каналам с большой скоростью;
- пустотные поры только поглощают воду до полного их заполнения, но в соседние поры вода из них не передается.

Для описания процессов фильтрации воды по каналам и поглощения воды порами вводятся две функции: функция концентрации воды  $C(x,t)$  в каналах и функция концентрации воды  $C_p(x,t)$  в порах. Концентрация – это коэффициент заполнения жидкостью пустотных пор и тонких каналов.

В результате для описания процесса фильтрации и поглощения воды в гипсовой форме получены два дифференциальных уравнения, которые в криволинейной системе координат имеют вид:

$$D_f \Delta C - \alpha(1 - C_p)C \cdot p_k = p_k \frac{\partial C}{\partial t},$$

$$h \leq x \leq h + h_f,$$
(1)

$$\Delta C = \left\{ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} + \left( \frac{1}{R_1 + x} + \frac{1}{R_2 + x} \right) \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{R_2 + x} \left( 1 - \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{\partial C}{\partial s} \right\},$$

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{\alpha}{p_p} (1 - C_p)C \cdot p_k,$$
(2)

где  $x$  – координата по толщине гипсовой формы, направленная по нормали к внутренней поверхности заготовки и с началом отсчета на внутренней поверхности заготовки;  $s$  – координата по меридиану внутренней поверхности;  $\theta$  – угол между нормалью к внутренней поверхности и вертикальной осью  $z$ ;  $R_1, R_2$  – радиусы кривизны внутренней поверхности заготовки в меридиональном и окружном направлениях;  $h$  – толщина заготовки;  $h_f$  – толщина стенки гипсовой формы;  $D_f$  – коэффициент водопроводности каналов гипса;  $p_k$  – коэффициент пористости капилляров (каналов);  $p_p$  – коэффициент пустотной пористости;  $\alpha$  – коэффициент поглощения воды пустотными порами.

При записи уравнений учтено, что вода поглощается только незаполненной частью пустотных пор. При этом каналы работают в первую очередь на насыщение пустотных пор. Только после этого идет насыщение каналов.

Для решения (1,2) разработаны алгоритм и программное обеспечение. Расчеты по исследованию скорости поглощения воды образцами гипса при различных соотношениях пористости капиллярной и пустотной показали:

– чем *тоньше* сквозные каналы и меньше пористость капиллярная, тем *быстрее* заполняются пустотные поры;

– существует оптимум поглощательной способности гипса по капиллярной пористости. Наибольшая скорость поглощения воды получается при капиллярной пористости в диапазоне 5–20%, если общая пористость равна 50%.

Проведенные расчеты поглощения воды образцами гипса подтверждают возможность определения пористости капиллярной и пустотной по скорости распространения фронта насыщения пор. Предлагается конструкция установки для проведения таких опытов. Достоверность предложенной модели процесса поглощения воды гипсом подтверждается экспериментально.

Для описания процесса вытяжки воды из шликера в гипсовую форму через набранный слой заготовки, толщина которого непрерывно меняется, закон фильтрации воды можно применить ко всей массе шликера. Но условное разделение массы шликера на две части заменить переменным коэффициентом водопроводности и ввести его зависимость от концентрации воды в шликерной массе. Эта зависимость задавалась в следующем виде:

$$D_{sh} = D_f \cdot d \cdot (1 - C^m), \quad d = d_1 + d_2 \cos \theta(z).$$
(3)

Здесь множитель  $D_f$  – коэффициент водопроводности гипса; константы  $d_1, d_2, m$ , определяемые экспериментально, безразмерные и указывают на то, каков порядок  $D$ -шликера по сравнению с  $D$ -формы.

Полученные уравнения (1),(3) описывают процесс фильтрации воды в каждом окружном сечении формового комплекта и решаются при заданных граничных условиях на поверхности сердечника и внешней поверхности гипсовой формы, а граничные условия на внутренней поверхности формы соответствуют условиям капиллярной вытяжки воды из шликера в стенку гипсовой формы.

Практический интерес представляют расчеты, проведенные с целью исследования возможностей осуществить процесс обезвоживания шликерной массы с одинаковой скоростью во всех сечениях по высоте комплекта.

Проведенные расчеты позволили проанализировать процессы движения частиц в шликере, фильтрации воды в гипсовую форму, установить основные причины неравномерности набора заготовок по высоте формового комплекта и предложить способы их устранения.

В результате расчетов подтверждены экспериментальные наблюдения в том, что набор заготовки в носке оболочки происходит значительно быстрее, чем в юбочной её части. Происходит это за счет существенного проявления двух факторов. Во-первых, при уменьшении радиуса кривизны  $R_2$  в носке оболочки при постоянной толщине стенки гипсовой формы значительно увеличивается коэффициент запаса пор на единицу площади внутренней поверхности гипсовой формы, что можно назвать растровым эффектом. Кроме того, около наклонной стенки в носке оболочки скорость движения твердых частиц шликера по нормали к внутренней поверхности формы увеличивается за счет гравитационной составляющей сил, действующих на частицы шликера.

Для обеспечения одновременного набора толщины стенки заготовки во всех сечениях по высоте комплекта и однозначного соответствия результатов расчета и эксперимента предлагается изменить конструкцию гипсовой формы так, чтобы набор стенки заготовки во всех сечениях по высоте осуществлялся за одинаковое время. Поэтому основными элементами модернизации гипсовой формы являются переменная толщина стенки гипса, определяемая расчетным путем для каждого изделия, и тщательная гидроизоляция ее внешней поверхности. В таких формах можно значительно повысить качество керамических заготовок и уменьшить толщину стенки заготовок в носке оболочки.

## **НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР В СТЕКЛОПЛАВИЛЬНЫХ ТИГЛЯХ, ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ТИГЛЯ**

*Д.А.Рогов, И.Л.Шкаруна* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Стеклоплавильный тигель предназначен для расплавления стекла и формирования из данного расплава стекловолокна, вытягиваемого из нижней перфорированной части тигля. Общий вид тигля представлен на рис.

Основная проблема в процессе формирования волокна заключена в том, что днище тигля должно быть изотермическим для одинаковой скорости истечения стекломассы из каждой фильеры.

Поперечное сечение тигля может представлять собой круг, кольцо или прямоугольник. Основание тиглей может быть как керамическим, так и выполненным из платинового сплава. В расчетах материалом стенок тигля был или нитрид кремния ( $Si_3N_4$ ), или оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ), расплав – стекло типа “Е”.

Время прохождения горизонтального слоя стекла от поверхности расплава до дна тигля равно 3600 секундам, данное время принято в качестве лимитирующего для расчета температур при выборе конструкции самого тигля.

Граничными условиями по температуре являются: постоянное распределение температуры  $1350^{\circ}C$  на наружной поверхности тигля, температура поверхности расплава стекломассы равна  $600^{\circ}C$ .

С целью определения температурного состояния материалов при установившемся истечении стекла выполнен расчет нестационарных температурных полей для тиглей цилиндрической, кольцевой и прямоугольной геометрии. Прогрев расплава в тиглях данного типа зависит только от физико-механических свойств стенок.

Для цилиндрического тигля рассматривались 4 варианта конструкции:  
1 – с платиновой вставкой (основанием) диаметром 100 мм;

- 2 – со свободным основанием (теплопередача в стекломассе осуществляется только за счет нагрева боковых стенок тигля) диаметром 100 мм;
- 3 – диаметр дна варианта № 1 увеличен до 200 мм;
- 4 – диаметр дна варианта № 2 увеличен до 200 мм.

Также рассматривалась задача выбора расхода стекломассы (регулируется количеством фильер (отверстий) в основании тигля).

Расчет показывает, что в качестве материала необходимо использовать  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Разность температур центральной части и наружной стенки тигля варианта № 1 для данного материала составляет  $30^\circ\text{C}$  – в цилиндрическом и  $17^\circ\text{C}$  – в кольцевом. Для стенки из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  варианта № 1 соответствующая разность равна  $55^\circ\text{C}$  – для цилиндрического и  $44^\circ\text{C}$  – для кольцевого. Кольцевой тигель из любого материала пригоден к эксплуатации только при нагреве его внутренней поверхности.

Перепад температур для двух рядов отверстий в цилиндрическом тигле составляет  $3^\circ\text{C}$  – для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $8^\circ\text{C}$  – для  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

В вариантах конструкции цилиндрического тигля с основанием из платинового сплава максимальная разность температур достигает  $1,8^\circ\text{C}$  – для варианта № 1,  $70^\circ\text{C}$  – для варианта № 2,  $15^\circ\text{C}$  – для варианта № 3,  $480^\circ\text{C}$  – для варианта № 4.

В тигле варианта № 1 из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с платиновой вставкой (ее конструкция: 2 ряда отверстий на диаметрах 80 и 70 мм) максимальный перепад температур составляет  $0,5^\circ\text{C}$ .

Основанием тигля для снижения градиента температур должна служить платиновая вставка. Для цилиндрических тиглей с диаметром 200 мм керамическое дно дает падение температуры на  $50^\circ\text{C}$  на расстоянии 5 мм от края при установившемся расходе стекломассы 27 кг/сут. Для аналогичного тигля с основанием 100 мм падение температуры составляет  $8^\circ\text{C}$ .

Для платиновой же вставки соответствующие разности составляют 4 и  $0,3^\circ\text{C}$  для тиглей большого (200 мм) и малого (100 мм) диаметров, соответственно. Следовательно, керамическое основание применимо только для тиглей диаметром менее 100 мм.

В прямоугольном тигле с основанием 200 мм на 40 мм из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  разность температур между центром и наружной поверхностью составляет  $0,5^\circ\text{C}$ . При увеличении ширины основания до 80 мм эта разность достигнет  $30^\circ\text{C}$ .

При повышенных выработках стекловолокна материалом основания тигля диаметром 100 мм из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  должна быть только платиновая вставка, так как керамическое основание не обеспечивает достаточного выравнивания температур. При выработке стекловолокна в 54 кг/сут. максимальная разность температур для диаметра керамического основания 100 мм составляет  $3,5^\circ\text{C}$ , для диаметра основания 200 мм данная разность равна  $32^\circ\text{C}$ .

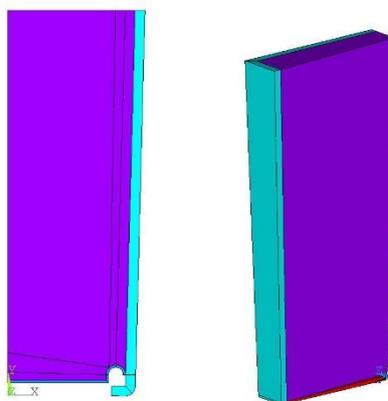


Рис. Цилиндрический тигель с платиновой вставкой (основанием) (продольное сечение) и прямоугольный тигель (общий вид)

## НАНОСТРУКТУРНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*О.В.Томчани, Г.Р.Арутюнян В.П.Павлова, С.А.Долматов, Г.С.Шуль*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Развитие экономики в современных условиях сопровождается значительным ростом цен на топливо и энергию, поэтому не вызывает сомнений актуальность вопросов энергосбережения и экономии энергоресурсов. Уровень эффективности энергоиспользования является своего рода индикатором научно-технического и экономического потенциала страны. В создании высокоэффективных в энергетическом отношении видов оборудования и технических средств, а также в экономии энергоресурсов особое место принадлежит высококачественным теплоизоляционным материалам.

Мировой рынок теплоизоляции, по данным маркетинговых исследований агентства DISCOVERY Research Group, оценивается в \$ 20–25 млрд. и, по мнению экспертов, уже в ближайшие 10–12 лет может удвоиться. Повышенный спрос на современные виды теплоизоляции позволяет ведущим зарубежным компаниям успешно продавать свою продукцию в России. По оценкам экспертов, европейские производители контролируют более 70 % отечественного рынка теплоизоляции, в то время как российские производители за два последние года потеряли в общей сложности около 20 % этого рынка.

Материалы с низкой теплопроводностью содержат пустоты, наполненные воздухом или другим газом. В традиционных теплоизоляционных материалах основным носителем изоляционных свойств является воздух, который и определяет предел их эксплуатационных характеристик (коэффициент теплопроводности  $\lambda$  воздуха равен 0,025 Вт/м·К). Существуют разного рода слоистые и пористые материалы, содержание воздуха в которых достаточно велико. К таким материалам относятся, например, волокнистые теплоизоляционные материалы на основе различных типов волокон ( $\lambda \approx 0,035–0,060$  Вт/м·К), полиэтиленовые пены ( $\lambda \approx 0,03–0,04$  Вт/м·К). В ряду традиционных теплоизоляционных материалов эти материалы обладают наиболее низкой теплопроводностью в нормальных условиях.

Для получения теплоизоляционных свойств выше, чем у воздуха, существует несколько способов. В настоящей работе рассматривается наиболее распространенный – использование наноструктурных материалов. Так как теплопроводность зависит не только от общей пористости материала, но и от размера пор, наноструктурные теплоизоляционные материалы с порами меньше 100 нм имеют теплопроводность ниже теплопроводности воздуха. Это объясняется тем, что в этом случае диаметр пор материала меньше средней длины свободного пробега молекулы газа (для воздуха – 60 нм при 0°C), его молекулы будут сталкиваться только со стенками пор без переноса энергии путем упругих ударов, что позволяет снизить теплопроводность до сверхнизких величин.

В последние годы за рубежом активно проводятся работы по использованию наносистем для создания теплоизоляционных материалов с теплопроводностью в диапазоне 0,020–0,025 Вт/м·К, что на 30 % ниже, чем у традиционных пено- и волокнистых материалов. Применение таких материалов благодаря их сверхнизкой теплопроводности позволяет существенно уменьшить толщину теплоизоляции. Для примера, в металлургической промышленности уменьшение толщины теплоизоляции стенки ковша емкостью 200 т на 10 мм позволяет увеличить его емкость на 2,5 т.

В настоящее время за рубежом нанопористые теплоизоляционные материалы выпускаются несколькими фирмами (“Microtherm”, США; “Porotherm”, Германия; “Promat”, Германия) и используются в различных отраслях промышленности для теплоизоляции:

- бортовых устройств регистрации полетных данных самолетов и вертолетов с целью сохранения их работоспособности в чрезвычайных ситуациях;
- двигателей в гражданской авиации и ракетостроении;
- сталеразливочных ковшей и прочих агрегатов для разлива металлов и сплавов;
- энергетического оборудования, промышленных печей и оборудования.

Эти материалы также лежат в основе высокоэффективных огнезащитных систем и вакуумной теплоизоляции – нового поколения теплоизоляционных материалов, широко применяемых за рубежом в гражданском строительстве.

Российские предприятия сегодня не выпускают ни одного из видов наноструктурной теплоизоляции, несмотря на то, что спрос на такие материалы на отечественном рынке обеспечивается динамическим развитием отраслей, в которых они широко применимы.

С химической точки зрения теплоизоляционные материалы со сверхнизкой теплопроводностью изготавливаются на основе наноструктурных оксидов металлов. В настоящее время нами ведутся исследования по созданию высококачественного теплоизоляционного материала на основе пирогенного диоксида кремния с модифицирующими добавками, придающими материалу повышенные прочностные характеристики и исключают лучевую составляющую теплопереноса. Технология его изготовления основана на сухом прессовании тщательно перемешанных компонентов. Линейная усадка материала при обжиге не превышает 1,0 %. Максимальная температура длительной эксплуатации полученного наноструктурного материала составляет 850°C.

Теплофизическая оценка опытных образцов исследуемого материала подтвердила правильность подхода к выбору состава и технологии изготовления нового теплоизоляционного материала (рис.). Как видно из рис., коэффициенты теплопроводности наноструктурного теплоизоляционного материала заметно меньше, чем у известных волокнистых материалов.

Таким образом, первые исследования показали, что полученные опытные образцы наноструктурных теплоизоляционных материалов имеют низкие значения коэффициента теплопроводности, позволяющие при одних и тех же условиях значительно уменьшить толщину слоя (вес) тепловой изоляции, и соответственно габариты и стоимость изделий. Это особенно важно при применении теплоизоляционных материалов в авиакосмической технике и приборостроении.

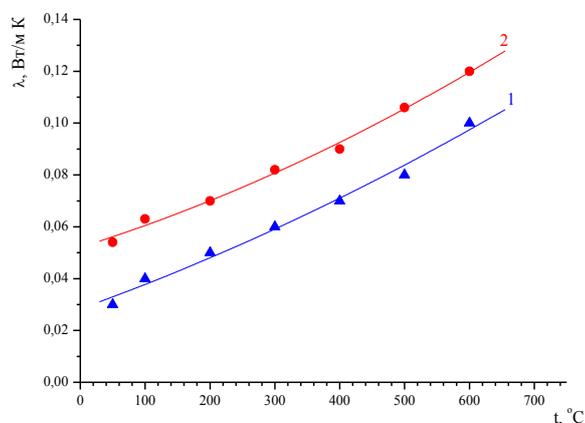


Рис. Зависимость коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) волокнистого (2) и наноструктурного (1) теплоизоляционных материалов от температуры ( $t$ )

Целесообразность самостоятельного проведения работ в сравнении с возможностью закупки таких материалов за рубежом связана с широким рынком потребления таких материалов в России, возможностью создания большого количества новых рабочих мест, усилением конкурентных позиций отечественных производителей, а также с потребностью в этих материалах в тех отраслях промышленности, которые обеспечивают обороноспособность страны.

## ТЕРМОСТОЙКИЙ ВОЛОКНИСТЫЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

*В.П.Павлова, Г.Р.Арутюнян, Е.М.Кашкарова, Л.А.Пляскина, Ю.М.Софейчук, О.В.Томчани*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Рост объема теплоэнергоемких производств в мире и запрет на применение в промышленности асбеста привели к разработке новых теплоизоляционных материалов на основе минеральных волокон и различных связующих.

Развитие работ в этой области на нашем предприятии связано с разработкой для космического корабля “Буран” теплозащитных материалов типа ТЗМК на основе супертонкого кварцевого волокна и кремнийорганического связующего. Однако эти материалы в настоящее время не находят широкого применения из-за высокой себестоимости, связанной в основном с высокой стоимостью кварцевого волокна. Кроме того, при термической обработке таких материалов выделяются токсичные газообразные продукты, негативно влияющие на экологию.

Цель настоящей работы состояла в разработке и исследовании нового теплоизоляционного материала ТЗМ-23М на основе более дешевого кремнеземного волокна со средним диаметром 9 мкм и безопасного в экологическом отношении связующего – водного раствора метилцеллюлозы или карбоксиметилцеллюлозы. В качестве спекающей добавки использовался бор или борсодержащее соединение. Следует отметить, что в процессе сушки и обжига материала ТЗМ-23М связующее, выполняющее одновременно и роль поверхностно-активного вещества, полностью выгорает. Таким образом, после обжига получается материал, который состоит из мелких частиц волокон, скрепленных между собой спекающей добавкой и образующих прочную высокопористую структуру с открытыми порами.

В процессе отработки технологии получения материала ТЗМ-23М исследовались зависимости отношения длины волокна к его диаметру от продолжительности диспергирования волокна, прочности материала от его плотности, коэффициента теплопроводности от температуры и плотности. Степень измельчения волокна в диспергаторе в зависимости от времени диспергирования определяли на металлографическом микроскопе “Neophot-30” после предварительного смачивания образцов в спирте.

Установлено, что при увеличении времени диспергирования от 5 до 15 минут средняя длина волокна уменьшается на 70 мкм, а от 15 до 40 минут – всего лишь на 14 мкм. Дальнейшее увеличение продолжительности диспергирования не приводит к существенному изменению длины волокон. Плотность материала при этом изменяется от 150 до 240 кг/м<sup>3</sup>. Для получения материала с плотностью выше 240 кг/м<sup>3</sup> необходимо отдиспергированное волокно дополнительно измельчить с помощью пресса или шаровой мельницы.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) от температуры ( $t$ ) и плотности ( $\rho$ ) материала в виде:

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt),$$

где  $\lambda_0 = 0,124\rho^{0,5}$ ;  $b = 2,6 \cdot 10^{-3}$ .

Максимальная погрешность между экспериментальными данными  $\lambda$  и данными, рассчитанными по вышеприведенной формуле, не превышает 7 %.

Результаты исследования зависимости предела прочности на сжатие материала ТЗМ-23М в сильном направлении ( $\sigma$ ) от его плотности представлены на рисунке. Из него следует, что прочность материала растет с увеличением его плотности, но при этом, как следует из таблицы, растет и коэффициент теплопроводности. Поэтому при выборе материала по плотности необходимо учитывать как величину нагрузки, действующей на него в процессе эксплуатации, так и допустимую температуру на внешней поверхности изоляции.

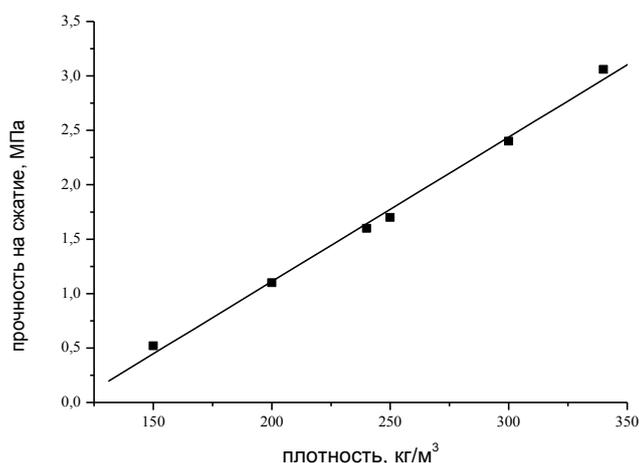


Рис. Зависимость предела прочности на сжатие ( $\sigma$ ) материала ТЗМ-23М в сильном направлении от плотности ( $\rho$ )

В таблице приведены физико-механические и теплофизические характеристики материала ТЗМ-23М. Для сравнения даны и характеристики материала ТЗМК-25.

| Характеристика   | ТЗМ-23М |       |       |       |       | ТЗМК-25 |
|--|---------|-------|-------|-------|-------|---------|
|  | 150     | 200   | 240   | 300   | 340   |         |
| Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>   | 150     | 200   | 240   | 300   | 340   | 250     |
| Предел прочности на сжатие, МПа  | 0,52    | 1,10  | 1,60  | 2,40  | 3,06  | 1,70    |
| Предел прочности на изгиб, МПа   | 1,20    | 2,00  | 2,50  | 3,00  | 4,20  | 2,60    |
| Коэффициент теплопроводности при 20 °С, Вт/м·К                                   | 0,050   | 0,056 | 0,066 | 0,072 | 0,078 | 0,066   |
| Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$ на частоте 10 <sup>10</sup> Гц         | 1,18    | 1,21  | 1,25  | 1,27  | 1,29  | 1,22    |
| Тангенс угла диэлектрических потерь $\times 10^4$ на частоте 10 <sup>10</sup> Гц | 40      | 21    | 18    | 16    | 17    | 36      |
| Пористость, %  | 95      | 94    | 93    | 91    | 90    | 94      |
| Максимальная температура эксплуатации, °С  | 1100    | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  | 1200    |

Из таблицы следует, что разработанный материал ТЗМ-23М по своим основным характеристикам практически не уступает материалам типа ТЗМК, но его себестоимость в 2 раза ниже.

Таким образом, хорошие теплоизоляционные и радиопрозрачные характеристики, достаточно высокая прочность и термостойкость дают возможность использовать материал ТЗМ-23М в авиакосмической и в других областях техники, а также для теплозащитных покрытий и экранов радиопрозрачных антенных обтекателей (РАО). В настоящее время потребителями теплоизоляционных материалов на основе неорганических волокон, выпускаемых нашим предприятием, являются более пятнадцати предприятий СНГ и России.

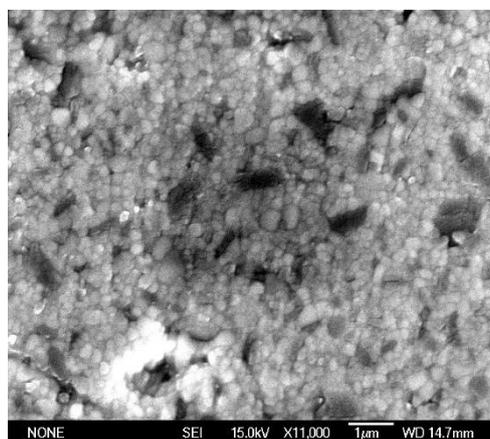
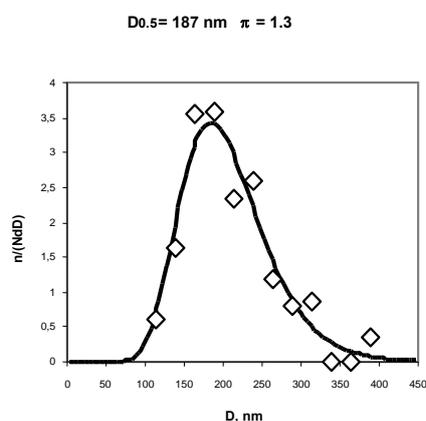
## НАНОКОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМЕ $ZrO_2 - \alpha-Al_2O_3$ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*Г.Р.Карагедов, А.Л.Мызь, Н.З.Ляхов* (ИХТТМ СО РАН, г.Новосибирск, Россия)

Большое внимание специалистов различных областей промышленности привлекают неожиданные и беспрецедентные свойства, достигаемые в наноструктурных композиционных материалах. Среди керамических материалов наиболее широкое распространение на практике

получили нанокomпозиты системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  благодаря замечательным механическим свойствам, включая прочность, износостойкость, а также термическую и химическую стабильность. Пример: значения прочности на изгиб, полученные при введении зерен  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в матрицу  $\text{ZrO}_2$ , достигают в ряде случаев величин более 2 ГПа. В то же время методы получения материалов с такими свойствами крайне неблагоприятны с экологической точки зрения, весьма дороги и вряд ли применимы для налаживания промышленного производства.

В работе путем механохимического твердофазного синтеза получены метастабильный, стабилизированный алюминием (5–10 вес.%), а также алюминием и иттрием (4–9%) тетрагональный диоксид циркония. Термическое разложение указанного твердого раствора приводит к образованию высокоомогенной смеси наноксидов  $\text{ZrO}_2$  и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Механическая обработка данной смеси в парах изопропилового спирта позволяет получить нанопорошок с размером частиц 20–25 нм, обладающий необходимыми для формования одноосным сухим прессованием однородных сырых заготовок плотностью 60% от теоретической. Спекание материала на воздухе при температурах 1250–1350°C обеспечивает достижение 96–100% плотности, соответственно с сохранением размера зерен в субмикронном диапазоне и высокой однородностью распределения фаз по образцу. На рисунках приведено логнормальное ( $R^2=0,997$ ) распределение по размерам зерен  $\text{ZrO}_2$  и SEM полированного шлифа. Определена зависимость механических свойств материала от параметров микроструктуры.



## СОПЛОВОЙ НАСАДОК ЖРД ИЗ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА C-SiC

*А.Н.Тимофеев, А.В.Ляхин, Е.А.Богачев, И.А.Тимофеев*  
(ОАО “Композит”, г.Королев, МО, Россия)

Значительно улучшить массово-энергетические характеристики, увеличить конкурентоспособность российской РКТ позволяет замена металлов на высокотемпературные, окислительно- и эрозионностойкие углерод-керамические композиционные материалы (УККМ) с карбидокремниевой матрицей в двигательных установках (ДУ) перспективных или модернизированных изделий. Особенно серьезный выигрыш в массовом совершенстве приносит применение новых КМ в крупногабаритных узлах – неохлаждаемых сопловых насадках ДУ, в том числе на нижних ступенях, включая первую, камерах сгорания ЖРД, теплонагруженных узлах гиперзвуковых летательных аппаратов.

Целью настоящей работы являлась разработка технологии изготовления крупногабаритного изделия (КИ) в виде соплового насадка из УККМ C-SiC с металлическим фланцем для обеспечения крепления насадка к металлической части ЖРД.

Для изготовления крупногабаритных C–SiC-изделий было предложено использовать способ получения прочного окислительностойкого композиционного материала с карбидокремниевой матрицей для термонагруженных изделий и ракетно-космической техники, разработанный в ОАО “Композит” (патент РФ №2130509), основанный на химическом осаждении карбида кремния из газовой фазы.

Основные преимущества новой технологии:

- низкая температура процесса (650–750°C);
- высокая экологичность, отсутствие вредных выбросов (продуктами реакции термического разложения сырья – метилсилана – являются только карбид кремния и водород).

Работам по изготовлению крупногабаритного соплового насадка из УККМ типа C–SiC, предшествовали важнейшие базовые работы по отработке технологий формирования карбидокремниевой матрицы и закреплению металлической части фланца на малоразмерных модельных насадках, предназначенных для проведения стендовых испытаний в ФГУП “Исследовательский центр им. М.В.Келдыша”. В качестве разработчика заготовки из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) выступал ФГУП “УНИИКМ” (г. Пермь), а металлической части металлокомпозитного перехода – ЗАО “НПЦ “ИНОР” (г. Королев).

В результате отработки технологии достигнуты удовлетворительные показатели плотности, пористости, однородности заполнения керамической матрицей пористой заготовки из УУКМ, а также физико-механические характеристики. Проведение стендовых испытаний по исследованию воздействия продуктов сгорания ЖРД на материал насадков показало его высокую теплоэрозионную стойкость в окислительных условиях.

Работы в направлении организации соединения разнородных материалов – керамоматричного композита и металла, показали принципиальную возможность организации подобного стыка на примере модельных сопловых насадков из композита C–SiC и сплавов титана с низким коэффициентом термического расширения на стадии формирования композита C–SiC. Технология ОАО “Композит” впервые позволила отработать технологию стыка прямо на стадии формирования композита C–SiC, проводимой при относительно невысокой температуре – около 700°C.

Переход от изготовления модельных образцов к изготовлению полномасштабных КИ из композита C–SiC на основе пористой крупногабаритной заготовки из УУКМ, а также изготовление металлокомпозитного перехода на диаметрах изделия совершенно другого масштабного диапазона (около 1000 мм) характеризуется очевидным масштабным фактором и потребовала комплексной опытно-экспериментальной отработки, на основе которой были определены режимы и условия получения КИ, обеспечена прочность, соосность, герметичность соединения “композит – металл”.



Модельный укороченный крупно-габаритный насадок ЖРД из УККМ с металлокомпозитным переходом

На экспериментальной базе ФГУП “УНИИКМ” с участием специалистов ОАО “Композит” изготовлена пористая заготовка КИ из УУКМ типа соплового насадка диаметром 850 мм,

плотностью  $1,3 \text{ г/см}^3$ . На производственной базе ЗАО “НПЦ “ИНОР” отработаны и изготовлены металлические закладные из прецизионного сплава ТВ-36 диаметром 850 мм, шириной 40 мм, толщиной 5 мм.

В результате проведенных работ был изготовлен опытный образец КИ типа соплового насадка состава C–SiC с металлоком-позитным переходом (диаметром 850 мм) плотностью  $1,7 \text{ г/см}^3$ , остаточной пористостью 1,5 %.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ПРОЦЕССОВ АЭРОГАЗОДИНАМИКИ И ДИНАМИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОБТЕКАТЕЛЯ РАКЕТЫ**

***В.В.Ветров, В.А.Дунаев, И.В.Дунаева, В.А.Никитин***  
(ТГУ, г.Тула, Россия)

Рассматриваются процессы динамики деформирования аэродинамического обтекателя ракеты под действием обтекающего потока газа, скачков уплотнений и ударных волн. Эти процессы сопряжены по границам раздела сред – поверхностям деформируемых деталей, и объединены граничными условиями в зоне их взаимодействия. Примером являются задачи о нагреве, термомодеформировании и изменении формы элементов обтекателя в полете, прохождении ракетой фронта ударной волны или скачков уплотнений. Значительные локальные изменения формы элементов конструкции в потоке газа могут являться причиной аномальной работы.

Проводится анализ особенностей газодинамических процессов и процессов деформирования, отмечены пути упрощения моделей, осуществляется сопряженная постановка указанных задач применительно к конструкциям ракет.

На основе построенного математического описания строится численная модель сопряженных процессов с изменяющейся геометрией области их протекания и границы взаимодействия. В ходе изложения численной постановки освещаются вопросы выбора элементов дискретизации и способов трансформации геометрии, наиболее пригодных для совместного моделирования процессов газодинамики, теплопроводности и механики деформирования. В рассматриваемой постановке задачи в области потока имеют место подвижные границы, обусловленные деформированием конструктивных элементов под воздействием потока газа. Движение таких границ определяется процессом деформирования, при этом координаты ее положения в текущий момент времени определяются в процессе решения деформационной задачи. Законы изменения параметров внешнего воздействия как во времени, так и в пространстве определяются в ходе решения газодинамической задачи, которая является зависимой от процессов деформирования.

Приводится общая схема численного решения и алгоритм расчета. Даются результаты решения практической задачи.

## ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СПЕКАЕМОСТЬ ШПИНЕЛЬНЫХ ПОРОШКОВ

*Н.Т. Андрианов, П.П. Файков* (РХТУ им.Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Большой интерес для современной техники представляют материалы на основе синтезированных смесей огнеупорных оксидов в двойных и тройных системах, кривые ликвидуса которых лежат в области весьма высоких температур. Особое место занимает керамика в бинарной системе  $MgO-Al_2O_3$  из синтетических продуктов, имеющих температуру плавления более  $2000^{\circ}C$ , а также высокие показатели химической чистоты, плотности, газонепроницаемости, термостойкости, химической стойкости и механической прочности при высоких температурах.

В качестве объектов исследования выбраны материалы в системе  $MgO-Al_2O_3$  стехиометрического состава, керамика на основе которого имеет высокие показатели физико-химических свойств, и эвтектического, позволяющего получать керамику при более низких температурах. Порошки получали по разработанной на кафедре керамики в РХТУ им.Д.И. Менделеева технологии, являющейся одним из вариантов золь-гель метода и основанной на распределении водорастворимых солей в матрице из геля поливинилового спирта [1].

Исходными компонентами являлись нитрат алюминия и хлорид магния, температура синтеза порошков соответствовала той минимальной, при которой образование шпинели достигало 100 %, и составляла  $800^{\circ}C$ . В качестве технологических факторов выбраны давление прессования как один из главных параметров технологии, влияющий на плотность полуфабриката и последующую спекаемость, и продолжительность обработки порошков в планетарной мельнице, необходимая для разрушения образующихся при синтезе агрегатов частиц и образования хорошо сыпучих гранул.

При изучении влияния давления прессования порошки спекали в диапазоне температур  $1530-1620^{\circ}C$ . Время дезагрегации выбрано постоянным и составляло 2 мин. Обнаружено, что при давлении прессования 200 МПа, например, открытая пористость достигала нулевого значения для эвтектического состава при  $1550^{\circ}C$ , для стехиометрического – при  $1600^{\circ}C$ .

Высокую прочность ( $>300$  МПа) имели образцы эвтектического состава при температурах обжига  $1560-1580^{\circ}C$ , в то время как стехиометрический состав для получения плотной керамики требовал температуры  $1600-1620^{\circ}C$ , при этом прочность была не столь высока. Уменьшение прочности керамики эвтектического состава после обжига при температурах выше  $1565^{\circ}C$  связано с начинающейся рекристаллизацией (табл.). Можно отметить, что стехиометрический состав по микроструктуре существенно проигрывает эвтектическому: закрытая пористость соответственно 10 и 1–1,5 %, размер кристаллов 10–12 и 5–6 мкм.

Таблица

Влияние технологических параметров на микроструктуру керамики

| Состав            | Температура обжига, $^{\circ}C$ | Давление прессования, МПа | Закрытая пористость, % | Размер, мкм |            |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------|------------|
|                   |                                 |                           |                        | пор         | кристаллов |
| Эвтектический     | 1550                            | 100                       | 1 – 1,5                | 2 – 3       | 5 – 6      |
|                   | 1580                            | 100                       | 0 – 0,3                | 4 – 5       | 7 – 8      |
|                   | 1580                            | 200                       | 0 – 0,3                | < 4         | 5 – 6      |
| Стехиометрический | 1600                            | 100                       | 10                     | 4 – 5<br>1* | 10 – 12    |

\*\_

внутрикристаллические поры

Установлено, что повышение давления прессования от 100 до 200 МПа способствует улучшению спекаемости порошков как стехиометрического, так и эвтектического состава. При

этом нулевая открытая пористость образцов достигается для стехиометрического состава при 1600°C, для эвтектического – при 1550°C.

Для изучения влияния продолжительности дезагрегации порошков на свойства керамики каждый из составов обжигали при температуре, соответствующей началу интенсивного спекания: эвтектический – при 1550°C, стехиометрический – при 1600°C.

Выявлено, что для достижения максимального уровня прочности и плотности эвтектический состав достаточно измельчать 1,5–2 мин, для стехиометрического состава необходимо 2–2,5 мин.

#### Литература

1. Андрианов Н. Т., Файков П. П. Спексаемость шпинельных порошков, полученных золь-гель методом // Тр. междунар. науч.-практич. конф. “Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее”. – СПб.: Центр профессионального обновления “Информатизация образования”, 2003. – Т. 2. – С. 119–124.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ДОСТУПЕ**

***В.П.Крылов, С.С.Никишов, В.Г.Ромашин***  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

На установке, разработанной в ОНПП “Технология”, проводятся измерения электрической толщины криволинейных диэлектрических изделий при одностороннем доступе.

Создание установки вызвано необходимостью повышения точности формирования задания на доработку сложных с точки зрения распределения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) по телу изделий. Применяемый способ измерения позволил получить реальные диэлектрические характеристики оболочки с оценкой её неоднородности без точного априорного знания геометрической толщины в отличие от косвенных методов, в которых оценки неоднородности связаны с контролем по скорости УЗК, или на основе фазовых методов измерения электрической толщины.

В докладе рассматриваются вопросы учета составляющих погрешности измерения  $\epsilon$ , возникающие из-за влияния толщины стенки изделия, кривизны поверхности, качества обработки поверхности, температурной нестабильности, а также других факторов.

Применение в установке цифровых методов обработки и методических приемов в измерительном процессе позволило производить измерения на осесимметричных оболочках с погрешностью определения  $\epsilon$  меньше 1 %.

Рассматривается возможность применения установки в процессе изготовления оболочек из неорганических (керамических) и органических (стеклопластиковых) материалов.

Измерения  $\epsilon$  по телу оболочек позволяют исследовать стабильность технологического процесса производства и использовать эти данные для поиска профиля при неоднородном распределении  $\epsilon$  и доводке радиотехнических характеристик (РТХ) изделия.

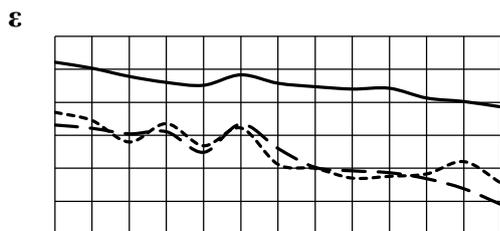


Рис.1 Зависимость  $\epsilon$  от высоты 3-х оболочек

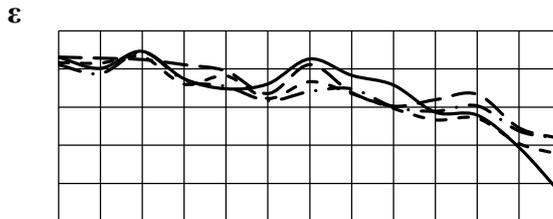


Рис.2 Распределение  $\epsilon$  по высоте для 4-х образующих оболочки

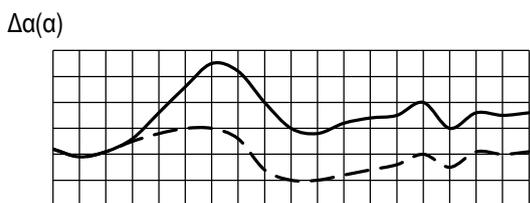


Рис.3. Изменение РТХ при развороте изделия на  $180^\circ$



Рис.4 Распределение  $\epsilon$  по толщине заготовки из ситалла

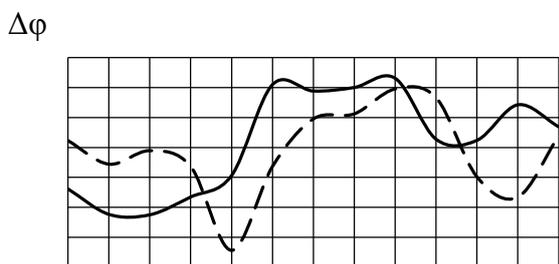


Рис.5. Примеры профилей электрической толщины ( $\Delta\phi$ )

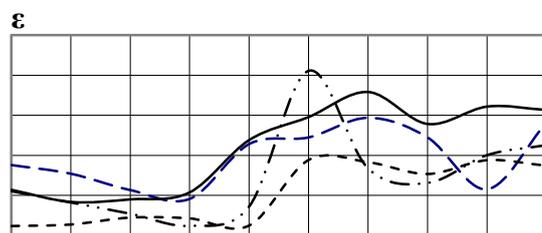


Рис.6. Распределение  $\epsilon$  по образующим оболочки из стеклопластика

На рис. 1 представлены типичные экспериментальные распределения  $\epsilon$  по высоте для нескольких оболочек. Из графика видно, что распределение  $\epsilon$  по телу изделий имеет различный уровень, градиент которого различен и может достигать 2–3%, и общую тенденцию уменьшения к носовой части.

По информации о  $\epsilon$  образца спутника из припуска заготовки можно сделать только грубую оценку профиля изделия, а использование априорных данных распределения  $\epsilon$  по телу позволяет сформировать более точное задание на механическую доработку изделия.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные распределения  $\epsilon$  по высоте изделия для четырех образующих типичной оболочки из ситалла. Различные распределения  $\epsilon$  по образующим приводят к дополнительной несимметрии характеристик  $\Delta\alpha(\alpha)$ , отражающейся на зависимостях, измеренных на радиотехническом стенде, а совпадение по телу оболочки экстремумов

геометрической толщины и  $\varepsilon$  приводит к результатам (рис.3), где разброс РТХ может достигать 300% и более.

Кроме того, для некоторых материалов экспериментально измеренные изменения  $\varepsilon$  по толщине заготовки (рис. 4) необходимо учитывать при радиотехнической доводке оболочек.

Радиотехническая доводка изделий при недостаточной точности механической обработки не позволяет устранить влияние неоднородности материала на РТХ изделия, что приводит к получению разных распределений толщины стенки по высоте, например, как на рис. 5, где представлены профили двух изделий, равных по предельным уровням РТХ.

Не имеет альтернативы применение установки для обнаружения изменения  $\varepsilon$  по телу оболочек из стеклопластиковых материалов, которые по сравнению с оболочками из керамических материалов обладают существенно более высокой локальной неоднородностью распределения  $\varepsilon$  по телу, что требует обязательного использования контроля на этапе подготовки оболочки в процессе производства. В отличие от рассматриваемой установки приборы ультразвукового контроля не позволяют проводить даже оценочных измерений на этом материале.

Пример распределения  $\varepsilon$  по телу стеклопластиковой оболочки представлен на рис.6. Наличие данных по изменению  $\varepsilon$  по телу оболочки позволяет выравнять электрический профиль изменением геометрической толщины стенки, используя стандартные приемы механической обработки и тем самым обеспечивая требования РТХ.

Таким образом, применение установки для контроля  $\varepsilon$  по телу оболочек из различных материалов позволяет учесть неоднородность и провести доводку РТХ стандартными приемами.

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ

*В.И.Куракин, А.Н.Прасолов* (ФГУП "ОНПП "Технология", г.Обнинск, Россия)

В настоящей работе предлагается метод решения нелинейных задач механики, разрешающее уравнение которых можно представить в операторном виде:

$$L(w) + \Phi(w) = f(x, y), \quad (1)$$

где  $L(w)$  – линейная часть общего оператора;  $\Phi(w)$  – остаток от полного оператора;  $w(x,y)$  – искомая функция;  $f(x,y)$  – известный вектор;  $x, y$  – координаты.

Краевые условия к задаче (1) на каждой из имеющихся границ условно запишем в виде:

$$R(w)|_{\Gamma} = \xi, \quad (2)$$

где  $\xi$  – задаваемый вектор граничных значений.

Введем в уравнение (1) искусственный параметр  $\varepsilon$  перед оператором  $\Phi(w)$ :

$$L(w) + \varepsilon \Phi(w) = f(x, y). \quad (3)$$

Разобьем введенный параметр на  $n$  шагов по  $\Delta\varepsilon$ . Предположим, что мы можем решить задачу (3) при любом допустимом значении  $\varepsilon$ . Тогда искомая функция  $w(x,y)$  будет зависеть и от значения параметра  $\varepsilon$ , т.е.  $w(x, y, \varepsilon)$ .

Введя в рассмотрение дополнительную функцию

$$V(x, y, \varepsilon) = \frac{\partial w(x, y, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} \quad (4)$$

и выполнив дифференцирование уравнения (3) и граничных условий (2) по параметру  $\varepsilon$ , получаем уравнение

$$L(V) + \Phi(w) + \varepsilon \frac{\partial \Phi}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (5)$$

и граничные условия

$$R(V_0)|_{\Gamma} = 0. \quad (6)$$

Если теперь применить метод пошагового движения по параметру  $\varepsilon$  к задачам (3)–(6), то можно предложить следующий алгоритм интегрирования нелинейной задачи:

– задаем начальное значение  $\varepsilon_0 = 0$ . Решая задачу (3) при этом значении параметра (любым способом), задача приобретает вид

$$L(w_0) = f(x, y), \quad (7)$$

с краевыми условиями (2) в форме

$$R(w_0)|_{\Gamma} = \xi \quad (8)$$

получим начальное приближение функции  $w_0$ ;

– из уравнения (5)

$$L(V_0) + \Phi(w_0) = 0, \quad (9)$$

с условиями (6) получаем начальное значение  $V_0$ ;

– даем приращение параметру  $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon$ . Используя явную разностную схему по параметру  $\varepsilon$ , с помощью уравнения (4) найдем первое приближение функции  $w_1$

$$w_1 = w_0 + \Delta\varepsilon \cdot V_0, \quad (10)$$

а последующие действия исполнения циклического процесса очевидны:

$$L(V_k) + \Phi(w_k) + \varepsilon_k \left( \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right)_k V_{k-1} = 0; \quad \varepsilon_{k+1} = \varepsilon_k + \Delta\varepsilon; \quad w_{k+1} = w_k + \Delta\varepsilon V_k. \quad (11)$$

Вычислительный процесс согласно (11) продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто значение  $\varepsilon_{n+1}$  и вычислено значение  $w_{n+1}$  (т.е. до значений  $k = n$ ,  $\varepsilon = 1$ ), которые и будут решением исходной задачи (1), (2).

Изложенным методом решена задача растяжения физически нелинейно-упругого стержня. Результаты достаточно хорошо совпадают с аналитическим решением. Отмечена быстрая сходимость метода решения. Так, при выполнении всего двух итераций решение по перемещениям отличается на 4,7%. Для получения такой же точности по напряжениям достаточно пяти итераций.

Рассмотрена задача изгиба сферической пологой панели в геометрически нелинейной постановке. Построен комбинированный итерационный процесс. При этом разделение операторов проводится в соответствии с (1).

Линейная часть оператора задачи решается экономичным двухступенчатым методом или методом конечных элементов. Влияние нелинейных добавок в разрешающих уравнениях исследуемой задачи учитывается в соответствии с алгоритмом (1) – (11).

Решен ряд задач нелинейного изгиба пологих панелей с произвольными граничными условиями и сложным контуром в плане. Полученные результаты соответствуют расчетам, полученным с использованием пакетов прикладных программ.

Сопоставлялись результаты решения задач, полученные по линейной и нелинейной теориям. Например, на рис. 1,2 представлены результаты расчета сферической панели с квадратным планом, полученные для задачи с большими прогибами. Представленные результаты показывают, что решения по величинам перемещений отличаются до 50% и имеют иной характер деформирования. Решения же по напряжениям не сходятся вообще. Поэтому для анализа напряженно-деформированного состояния тонкостенных оболочек с большими прогибами необходимо пользоваться нелинейными теориями.

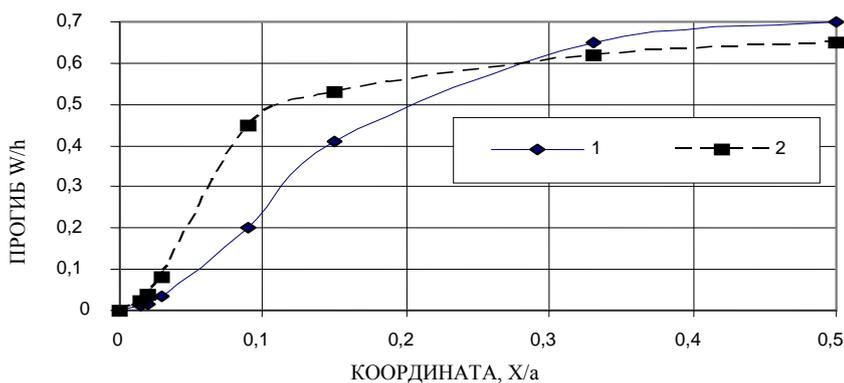


Рис.1. Прогибы: 1 – линейная теория, 2 – нелинейная теория

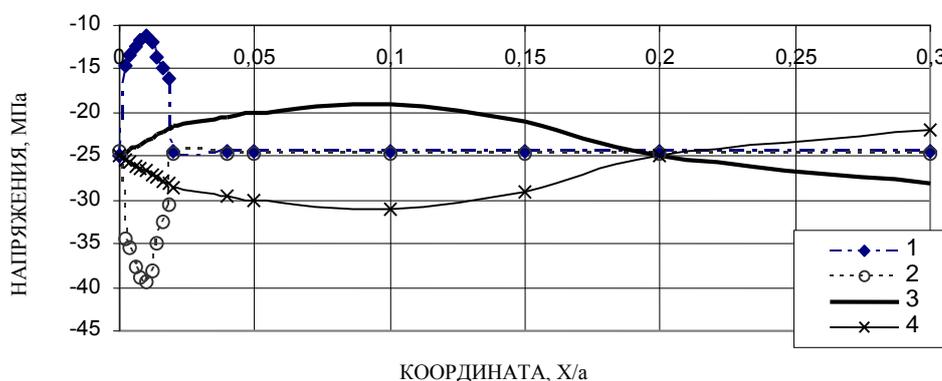


Рис.2. Напряжения: 1,2 – линейная теория; 3,4 – нелинейная теория

## ПОРОШКИ ВОЛЛАСТОНИТА РАЗЛИЧНЫХ МАРОК В ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ. ПРИМЕНИМОСТЬ И ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА КЕРАМИКИ

*Л.И.Горчакова, И.Н.Бизин, В.Ф.Кузнецова, А.А.Жуков*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Волластонит, или дощатый шпат, относится к цепочечным силикатам с кольцевым фрагментом структуры  $\text{Si}_3\text{O}_9$ . Он существует в двух модификациях:  $\alpha$  – псевдоволластонит и  $\beta$  – собственно волластонит. В природе встречаются обе модификации, но крупнейшие промышленно значимые месторождения представлены в основном  $\beta$ -формой. Порошкообразный волластонит Верхне-Бодамского месторождения имеет игольчатую структуру с соотношением длины частиц к диаметру от 3 до 20. Дисперсность порошков волластонита, соотношение длины и диаметра частиц, количество длинноигльчатых частиц, доля частиц минимального и максимального размера зависят от условий получения порошков из природного минерала. Фирма ООО “Геоком” разработала технологию получения фракционированных порошков микроволластонита серии “Супер” с заданным дисперсионным распределением частиц и высоким характеристическим соотношением длины и диаметра. Порошки различных марок содержат от 5 до 70 % масс. частиц размером менее 5 мкм и имеют насыпную плотность от 0,5 до 1,0 г/см<sup>3</sup>. Для сравнения, порошки производства ООО “Трансресурс” марки ВП-2, традиционно применяемые для производства керамических изделий,

характеризуются размерами частиц от 10 до 100 мкм, насыпная плотность их составляет около 1 г/см<sup>3</sup>.

Порошки волластонита серии “Супер” с высоким содержанием тонкодисперсной фракции и длинноугольчатых частиц более сложны в технологических переделах в сравнении с волластонитом марки ВП-2. Для их прессования требуется разработка специальных технологических приемов, спекание сопровождается заметной технологической усадкой – не менее 5%. Несмотря на эти сложности, представляется весьма перспективной разработка технологии изделий с применением таких порошков. Образцы керамики и изделия из этих порошков демонстрируют высокую термостойкость за счет самоармирования керамики длинноугольчатыми частицами. Высокая активность к спеканию тонкодисперсной фракции волластонита дает возможность повысить механическую прочность керамики, не повышая температуру спекания, и в некоторых изделиях – отказаться от спекающих добавок. Точный выбор соотношения количеств длинноугольчатых и тонкодисперсных частиц – путь к получению керамики с высокими эксплуатационными характеристиками.

Применение порошков волластонита с низкой кажущейся плотностью и высоким содержанием длинноугольчатых частиц позволяет снизить плотность и теплопроводность керамики, приблизиться в этих свойствах к керамике, получаемой гидротермальным методом, под свойства которой сконструированы узлы импортных литейных столов. Так, применение волластонита марки 05–97 в качестве основного компонента для тепловых насадок привело к увеличению ресурса работы изделия в два раза. Из волластонита марки 03–97 впервые методом прессования получена керамика с плотностью около 1 г/см<sup>3</sup>.

Добавки высокоугольчатого волластонита в количестве 5–15 % масс. в порошок ВП-2 способствуют повышению термостойкости и ресурса работы изделий.

Все порошки волластонита серии “Супер” за счет низкого содержания железа обеспечивают повышенную степень белизны керамики, привлекательный внешний вид изделий. Изделия из этих порошков имеют более низкую шероховатость, содержание в них тонкой фракции обеспечивает высокое качество поверхностей изделий.

## **СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ВОЛЛАСТОНИТА ДЛЯ ФУТЕРОВКИ АЛЮМОПРОВОДОВ С НИЗКОЙ УСАДКОЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Л.И.Горчакова, И.Н.Бизин, В.Ф.Кузнецова*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В установках литья алюминия широко используются огнеупорные плиты из волластонита для футеровки коробов, контейнеров, алюмопроводов. Важным показателем для этого применения является величина усадки в процессе длительной эксплуатации. Протечки расплава металла в первую очередь происходят по стыкам, приводя к разрушению всей конструкции. В плавильных агрегатах устанавливается регламент на величину зазора между элементами футеровки не более одного миллиметра. Важно, чтобы в процессе эксплуатации не происходило увеличения зазоров на стыках плит.

Из рекламных материалов фирмы “ПИРОТЕК” известно, что волластонитовая керамика плотностью ~0,9 г/см<sup>3</sup> имеет значения линейной усадки после 24 часов нагрева 0,15–0,50% по длине и 0,4–3,5% в интервале температур от 700 до 1000°С. Задачей данной разработки являлось создание материала, не уступающего по эксплуатационным показателям приведенному выше импортному аналогу.

Керамический материал на основе волластонита, разработанный для формообразующих элементов установок литья алюминия, по физико-механическим характеристикам подходит для изготовления футеровочных элементов. Для оценки практической пригодности этого материала в качестве футеровочных элементов в режиме длительной эксплуатации изготавливали плиты размером 200x200x20. Ими был зафутерован желоб в цехе легких сплавов “Ступинской 96

металлургической компании”. После 40 рабочих циклов усадка по длине плит составила 0,25%, такой результат признан удовлетворительным, но при длине плиты 500 мм линейная усадка достигнет величины 1,5 мм. Эту величину желательно снизить до уровня 1 мм.

Проведена экспериментальная работа по определению величины усадки в зависимости от плотности и по возможностям ее снижения. Установлено, что на изделиях плотностью 1,6 г/см<sup>3</sup> и выше при температуре 800°С усадка практически отсутствует, а на изделиях меньшей плотности линейная усадка составляет 0,2–0,3 %.

Известно, что уменьшение количества тонкой фракции в составе шихты – один из способов снижения технологической и эксплуатационной усадки.

Проверялась возможность снижения усадки в эксплуатации изделий за счет уменьшения содержания в шихте тонкодисперсных алюмосиликатных компонентов. Усадка определялась при циклическом нагреве при 950°С, суммарная выдержка при этой температуре составила 25 часов. Результаты определения усадки на керамике, полученной из шихты с содержанием алюмосиликатов 20 и 25% масс., представлены в таблице.

| Содержание пластифицирующих добавок, % масс. | Плотность, г/м <sup>3</sup> | 930°С – 5 часов    |                    | 930°С – 25 часов   |                    |
|--|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|  |                             | Усадка по длине, % | Усадка по толщ., % | Усадка по длине, % | Усадка по толщ., % |
| 25 %   | 1,5                         | 0,4                | 0,5                | 0,6                | 1,5                |
|  | 1,75                        | 0,3                | 0,4                | 0,5                | 1,1                |
|  | 1,85                        | 0,3                | 0,4                | 0,4                | 1,0                |
| 20 %   | 1,5                         | 0,1                | 0,4                | 0,1                | 0,5                |
|  | 1,6                         | 0                  | 0,3                | 0                  | 0,35               |
|  | 1,7                         | 0                  | 0,3                | 0                  | 0,3                |

В обоих случаях заметное уменьшение размеров происходит в первые часы нагрева, после 10 – 12 часов нагревания усадка практически прекращается.

За счет снижения содержания пластифицирующих добавок в шихте на 5% удается практически исключить линейную усадку и втрое снизить усадку по толщине изделия. Это означает, что в процессе эксплуатации не будет возникать дополнительных зазоров между элементами футеровки и сводится к минимуму вероятность образования неровностей по плоскостям.

Другой эффективный способ снижения эксплуатационной усадки – добавление в керамическую массу неорганических волокон. Экспериментально показано, что путем введения в керамику 5% волокна удается полностью исключить усадку по длине изделия, а усадка по толщине плиты не превышает 0,1%.

ФГУП “ОНПП ”Технология” освоило технологию изготовления плит размером 500x500 мм при толщине до 50 мм с низкими значениями эксплуатационной усадки для футеровки элементов алюмопроводов. Отработана технология формования – выбраны состав шихты, величина навески, нагрузка, позволяющие формовать изделия заданных размеров без механической обработки.

Разнотолщинность разработанных плит составляет не более 2% при разноплотности до 10%.

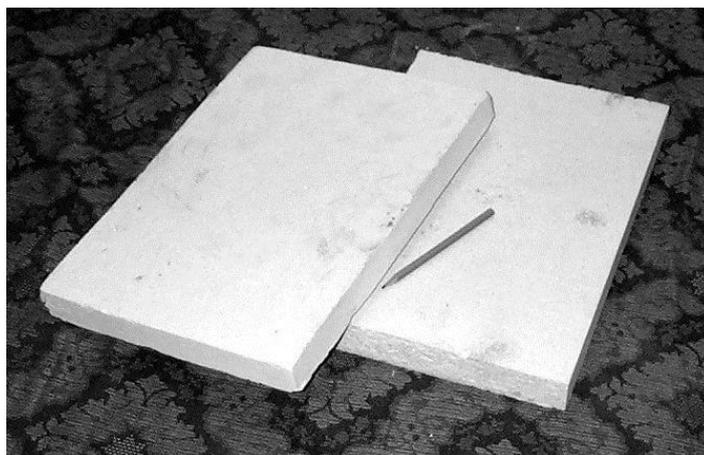


Рис. Волластонитовые огнеупорные плиты производства ФГУП «ОНПП «Технология»

## **УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНЕГО КОНТУРА И СНЯТИЯ ПРИПУСКА ПО ТОЛЩИНЕ СТЕНКИ ОБТЕКАТЕЛЯ**

*А.П.Шадрин, Б.Е.Николаев, О.В.Неповинных, А.В.Ромашин, М.В.Степанов*  
(ФГУП «ОНПП «Технология» г.Обнинск, Россия)

Увеличение объемов производства при широкой номенклатуре изделий с различными эксплуатационными характеристиками, с одной стороны, и необходимость повышения точности измерения и изготовления обтекателей, с другой стороны, выдвигают в число первоочередных задач работы по автоматизации процессов механической обработки оболочек.

В ОНПП «Технология» создается универсальный автоматизированный комплекс измерения внешнего контура и снятия припуска по толщине стенки обтекателя (АКИП). Основная задача, которую мы перед собой ставили – получение экономического эффекта за счет повышения производительности и точности обработки изделия, путем совершенствования предыдущей установки, минимизации человеческого фактора в производственном процессе и опираясь на существующий станочный парк предприятия.

Рассматриваемый комплекс можно разделить на две взаимосвязанные части – измерительная и исполнительная. При этом они могут рассматриваться как самостоятельные единицы по использованию в АКИП.

При автоматизации измерения наружного контура изделия (измерительная часть) были поставлены и решаются следующие основные задачи:

- создание алгоритмов юстировки, снятия и обработки информации;
- обеспечение точности измерения координат точек, лежащих на образующей обтекателя не хуже 5мкм, в системе координат станка;
- непрерывное измерение наружного контура изделия по образующей;
- возможность измерения по произвольной образующей;
- возможность производить за одну установку измерения стенки обтекателя и ее механическую доводку;
- возможность использования измерительных устройств, точностные характеристики которых в несколько раз выше погрешностей, задаваемых по ТЗ (а это не более 10 мкм), в цеховых условиях;
- минимизирование числа координат перемещений измерительных устройств и длин их направляющих;

- достаточно точная пространственная юстировка направляющих и измерительных устройств;
- возможность точного определения изделия в системе координат станка;
- создание программного обеспечения управлением необходимыми механизмами, а также обработки измерительной информации;
- жесткость конструкции при работе в цеховых условиях.

При автоматизации процесса снятия припуска по толщине стенки обтекателя (исполнительная часть), помимо задач создания алгоритмов, программного обеспечения и подбора исполнительных механизмов, необходимо обеспечить:

- точность и контроль перемещения инструмента как в направлении снимаемого припуска, так и вдоль образующей за счет обратной связи;
- возможность коррекции плотности материала по высоте изделия с помощью ультразвукового метода;
- ручную коррекцию программы управления инструментом;
- возможность учета нелинейности снимаемого припуска за счет износа и изменения формы режущей поверхности инструмента.

Важное внимание при создании АКПП уделено унификации и применению современных сервоприводов, датчиков перемещения и средствам вычислительной техники. При разработке программного обеспечения большое внимание уделено удобству и простоте использования в производственных условиях.

Универсальность комплекса заключается в возможности перенастраивания его на другое изделие, а также в возможности использования измерительной части как самостоятельное устройство.

АКПП может, что изначально закладывается при разработке, дорабатываться с расширением функциональных возможностей, таких как:

- снятие носовой неоднородности;
- изменение расположения инструмента;
- доводка заготовки с применением ультразвукового метода двух толщин;
- выравнивание контура по электрической толщине.

Создание АКПП дает представление о технических и технологических трудностях создания автоматизированного станка для обработки изделий, что ведет к выработке максимально правильного технического задания для станка с ЧПУ, приспособленного к специализированному производству обтекателей, а также для дальнейшего совершенствования существующего производственного парка.

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА (ПАК) ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РТХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ С ЕГО РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО СТРУКТУРЕ НА ДВА НЕЗАВИСИМЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЯ**

*О.В.Неповинных, А.П.Шадрин, Б.Е.Николаев*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В процессе доводки радиопрозрачных обтекателей производится неоднократный контроль РТХ на специализированных радиоизмерительных комплексах. Данные комплексы являются уникальными в большинстве случаев, в единичном исполнении – для каждого типа обтекателей со своей структурной схемой.

В связи с постоянным увеличением производства и номенклатуры обтекателей, возникла необходимость разработки универсальной модели построения ПАК с учётом современных средств автоматизации и управления, опыта их эксплуатации при измерениях РТХ изделий.

В результате проведённого анализа существующих структурных схем построения ПАК определилась оптимальная его модель. На сегодняшний день создана концептуальная модель

ПАК с функциональной возможностью модернизации в соответствии с современными требованиями к электронной аппаратуре. На ее основе создан и успешно работает ряд радиоизмерительных стендов.

Данная концептуальная модель построения ПАК основана на разделении по структуре на два независимых оптимальных направления:

- *управляющая система* позиционированием и перемещением высокой точности механических систем комплекса и съёма измерительной информации;

- *информационная система* обработки полученных данных с их регистрацией и обработкой, а также интеллектуальной базой данных для выдачи рекомендаций по доводке обтекателя.

Управляющая система представляет собой блок сопряжения, в состав которого входят:

- промышленный компьютер. Он предназначен для отработки полученных заданий по перемещению и позиционированию координат, управлению измерительными приборами и съёмом информации для расчёта РТХ изделий, а также оценки работоспособности и выдачи рекомендаций по устранению неисправностей комплекса с отображением на графическом дисплее состояния компонентов комплекса;

- модули аналоговых и дискретных входов. Они предназначены для съёма измерительной информации со стандартных измерительных приборов и управления ими;

- блок сервоусилителей и их импульсного управления от ЭВМ. Они предназначены для управления вращением и точным позиционированием устройств.

Информационная система основана на ЭВМ. Она предназначена для выдачи задания в управляющую систему по управлению измерительными приборами, механизмами позиционирования, а также для съёма и обработки измерительной информации согласно ТУ на изделие. Информационная система служит пультом управления стендом в ручном и автоматическом режимах. На сегодняшний день разрабатывается интеллектуальная модель базы данных по измерениям с выдачей рекомендаций по доводке изделий для информационной системы.

Главные достоинства данной модели над существующими в эксплуатации:

- физическое разделение управляющей и информационной систем, что позволяет исключить аварийные ситуации повреждения комплекса (в том числе и механические) из-за программного сбоя информационной ЭВМ и уменьшает требования к программному обеспечению по быстродействию и ресурсам ЭВМ;

- использование сервоприводов высокой мощности и точности позиционирования (до 9 угловых секунд по валу привода), а также стандартных (серийного производства) контроллеров и устройств, что позволяет значительно упростить программное обеспечение (вынести его на более высокий уровень) и, как следствие, повысить его надёжность и гибкость;

- программа для управляющей ЭВМ пишется на языке высокого уровня (например, Borland C++ Builder), так как в стандартных контроллерах и устройствах уже заложены все математические алгоритмы управления перемещением и съёмом информации и не требует ресурсов самой ЭВМ, что значительно повышает работоспособность ЭВМ, а также уменьшаются временные затраты на написание программ управления;

- программное обеспечение и системы управления ПАК получают настолько универсальными и гибкими, что позволяет выйти за рамки стандартных измерений и работать на перспективу;

- возможность разработки и внедрения интеллектуальной базы данных с накоплением статистической информации и выдачи рекомендаций по доводке обтекателей.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕКЛОСТОЙКОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*И.Л.Шкарупа, И.Ю.Келина, Н.Н.Саванина, И.Н.Курская, В.Н.Рудыкина, Л.И.Плясункова* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Целью настоящей работы являлось проведение исследований по оценке устойчивости в боросиликатном стекле, обычно используемом для получения стекловолокон (Е-стекле), керамических материалов, разработанных на нашем предприятии, и последующая оценка их возможной пригодности в качестве материала для стеклоплавильного аппарата. Это материалы на основе нитрида кремния, полученные по технологии реакционного спекания и спекания, а также материалы на основе карбида кремния, оксида алюминия, диоксида циркония.

Устойчивость керамических материалов проверялась в Е-стекле следующего состава: SiO<sub>2</sub> – 54,3%; CaO – 17,4%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14,8 %; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 8%; MgO – 4,9%; Na<sub>2</sub>O ≤0,5%. Эксперименты проводились в муфельной печи при температуре 1270°C, близкой к температуре выработки стекловолокна, на образцах в виде балочек 7x7x~70 мм, в некоторых случаях использовали образцы в виде трубочек.

Исследуемые образцы в количестве 1–4 шт. вместе с 4–8 шариками из Е-стекла помещались в корундовые тигли, которые загружались в печь, скорость подъема температуры до 1270°C составляла 200°C/час. Образцы выдерживались в расплаве стекла в течение 24, 96, 355–360 часов. После указанных выдержек образцы вынимались из расплава стекла. Оценивался внешний вид образцов, в некоторых случаях проводилась рентгеноскопия образцов, и анализировалась микроструктура образцов в трёх зонах: 1 – в части образца, погруженной в расплав стекла; 2 – в граничной зоне в условиях раздела трех фаз (керамика – расплав – газ); 3 – в части образца, находящейся над расплавом.

Результаты исследования стеклостойкости керамических материалов приведены в табл. 1,2.

Таблица 1

Внешний вид образцов после испытаний

| Материал   | Особенности технологии                | Внешний вид образцов и стекла при времени выдержки       |  |   |
|--|---------------------------------------|--|--|---|
|  |                                       | 24 ч   | 96 ч   | 355 ч   |
| 1  | 2                                     | 3  | 4  | 5   |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>                     | Реакционное спекание                  | Изменений нет. Потемнение и вспенивание стекла (п и в с) | Заметное утоньшение, ~1мм с каждой стороны образца (п и в с) | Сильное разъедание по линии раздела сред (п и в с)      |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>                     | Спекание после реакционного спекания. | Изменений нет (п и в с)                                  | Заметное утоньшение, ~1мм с каждой стороны образца (п и в с) | Образец сильно разъеден по линии раздела сред (п и в с) |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> – Si                | Спекание после реакционного спекания  | Изменений нет (п и в с)                                  | Заметное утоньшение, ~2мм с каждой стороны образца (п и в с) | Разъеден по линии раздела сред (п и в с)                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | Спекание (чистота 99%)                | Изменений нет.   | Изменений нет.   | Сильно разъеден по линии раздела сред.                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | Спекание (чистота 97%)                | Изменений нет.   | Изменений нет.   | Сильно разъеден по линии раздела сред                   |
| Сап-фир  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | Изменений нет. Растрескался на воздухе                   | Изменений нет. Растрескался на воздухе                       | Изменений нет. Растрескался на воздухе                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrSiO <sub>4</sub> | Зернистое строение                    | Изменений нет.   | Изменений нет.   | Изменений нет.  |

| Материал   | Особенности технологии | Внешний вид образцов и стекла при времени выдержки         |  |                          |
|--|------------------------|--|--|--------------------------|
|  |                        | 24 ч   | 96 ч                                   | 355 ч                    |
| 1  | 2                      | 3  | 4                                      | 5                        |
| ZrO <sub>2</sub> - Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Спекание               | Изменений нет. Растрескался на воздухе                     | Изменений нет. Растрескался на воздухе |                          |
| SiC  | Реакционное спекание   | Сильно разъеден на границе раздела сред, потемнение стекла | Испытания не проводились               | Испытания не проводились |

Таблица 2

## Исследование микроструктуры образцов после испытаний

| Материал   | Граница раздела стекло/керамика в зоне образца со стеклом | Граница раздела стекло/керамика в средней или утонченной части образца | Граница раздела стекло/керамика в краевой зоне образца без стекла |
|--|---|--|---|
| Уплотнённый Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - Si                | Изменений нет   | Изменений нет  | Изменение микроструктуры на глубину 150–200 мкм                   |
| SiC  | Изменений нет   | Изменение микроструктуры местами на глубину 20–40 мкм                  | Изменение микроструктуры на глубину до 30 мкм                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 97%                           | Изменений нет   | Изменений нет  | Изменение микроструктуры на глубину 100–300 мкм                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 99%                           | Изменений нет   | Изменений нет  | Изменений нет   |
| Реакционносвязанный Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>             | Изменение микроструктуры на глубину до 50 мкм             | Изменение микроструктуры на глубину до 60 мкм                          | Изменений нет   |
| Сапфир   | Изменений нет   | Изменений нет  | В отдельных местах изменение микроструктуры на глубину до 100 мкм |
| Реакционносвязанный уплотнённый Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | Изменения микроструктуры на глубину до 20 мкм             | Изменение микроструктуры на глубину до 40 мкм                          | Изменение микроструктуры на глубину до 30 мкм                     |

## РАЗРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЛЛАСТОНИТОВОЙ КЕРАМИКИ И ВНЕДРЕНИЕ ИХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Н.Н.Саванина, Л.Н.Русанова, Г.И.Куликова, Л.И.Горчакова, И.Н.Бизин, М.К.Алексеев, В.Ф.Кузнецова, А.Ю.Конанова*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Россия занимает второе место в мире по производству первичного алюминия и является экспортером этого продукта. Однако по вторичной переработке алюминия в готовые изделия наблюдается отставание от западных стран, хотя в последние годы этот разрыв сокращается за счет строительства заводов по новым западным технологиям.

Вместе с западными технологиями в Россию пришли новые огнеупоры, разработанные специально для литья алюминия. Это волластонитовая керамика, которая широко применяется в алюмопроводах как футеровочные элементы, а также в кристаллизаторах, дозаторах, переливных устройствах. Комплекс свойств волластонитовой керамики, таких, как несмачиваемость алюминием и химическая к нему инертность, термостойкость, удовлетворительная механическая прочность, низкая теплопроводность, нетоксичность обеспечил волластонитовым огнеупорам высокую конкурентоспособность и спрос на рынке.

За рубежом волластонитовая керамика преимущественно изготавливается так называемым автоклавным способом, предусматривающим получение изделий из смеси кремнеземного и известкового сырья различного состава с соотношением  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ , близким к 1, путем проведения химического взаимодействия компонентов в автоклаве при давлениях водяного пара 0,9–5,0 МПа в диапазоне температур 175–260°C. Как правило, изделия формируют из смеси компонентов прессованием или вакуум-формованием и затем подвергают запариванию в автоклаве прямо в форме. После проведения автоклавирования изделия подвергают термообработке с целью удаления воды при температуре не менее чем 700°C, а затем механически обрабатывают.

Отсутствие технических возможностей для применения автоклавной технологии в ОНПП “Технология” поставило разработчиков перед необходимостью доступными технологическими приемами изготовить изделия, аналогичные импортным по техническим характеристикам. Выбор был сделан в пользу технологии спекания природных волластонитовых порошков с добавками-активаторами, обуславливающими относительно низкую температуру обжига.

Ранее сообщалось [1], что первые отечественные разработки изделий из волластонитовой керамики были сделаны в ОНПП “Технология”, целью которых было получение тепловых насадок для кристаллизатора взамен импортных для установок горизонтального и вертикального литья алюминия западного производства. В результате этих разработок освоено промышленное производство тепловых насадок нескольких типоразмеров и переходных плит для ООО “Агрисовгаз”, а также верхних и нижних тепловых насадок для “Ступинской металлургической компании”.

Все вышеуказанные изделия были получены полусухим прессованием в металлических формах. В то же время становится все более насущным расширение ассортимента волластонитовой продукции, производство которой требует других методов формования. Это крупномасштабные футеровочные секции и блоки желобов алюмопроводов, длинномерные трубы, толстостенные тепловые насадки и целый ряд других изделий. Для разработки технологии изготовления таких изделий наиболее приемлемым является использование водного шликерного литья как способа формования, позволяющего получать сложнопрофильные и крупногабаритные изделия, в ряде случаев без механической обработки.

В установках литья алюминия широко используются керамические детали с низкой плотностью, такие, как стопорные устройства – дозаторы, поплавки, шиберные заслонки и другие. Для таких изделий требуются легкие термостойкие композиционные материалы на основе волластонита и неорганических волокон, получение которых возможно с применением и прессования, и шликерного литья, и вакуумного формования.

Способом шликерного литья из водных волластонитовых суспензий в гипсовые формы были изготовлены секции желобов различных конфигураций для футеровки алюмопроводов по заказам ООО “ИТЦ” компании “РУСАЛ”, “Ступинской металлургической компании” и ООО “Агрисовгаз”, для которого ОНПП “Технология” осуществляет серийные поставки.

Из композиционных материалов разработаны и поставляются на заводы “СМК”, г. Ступино, и “ВМС”, г. Подольск, втулки, дюзы и поплавки; на завод “Реалит” – втулки конические; на предприятие “Втормет”, г. Москва, – регулирующие стопорные стержни. В 2006 году для Саяногорского алюминиевого комбината была изготовлена крупная партия футеровочных волластонитовых плит.

В настоящее время продолжают исследования по разработке новых изделий для алюминиевой промышленности, в частности, для крупнейшей корпорации, возникшей на базе компаний “РУСАЛ” и ”СУАЛ”.

#### Литература

1. Русанова Л.Н., Куликова Г.И., Горчакова Л.И., Бизин И.Н., Алексеев М.К, Конанова А.Ю. Керамические изделия из волластонита производства ОНПП “Технология” и опыт их эксплуатации на заводах алюминиевой промышленности // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб. тез. докл. XVII научно-технич. конф. – Обнинск, 2004. – С.136–139.

## ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЛЕНОК $TiAl$ НА ПОДЛОЖКЕ СИТАЛЛА И ПОЛИКОРА

*А.А.Мамаева, Ж.Б.Сагдолдина, Е.В.Вдовиченко*  
(ФТИ КН МОН РК, г.Алматы, Казахстан)

Разрабатываются технологии получения защитных покрытий на основе алюминидов титана. Магнетронным распылением  $Ti-48\%Al$  сплава были получены пленки, состав которых соответствовал составу мишени. В качестве подложек были выбраны ситалл и поликор. Происходит перераспределение и выравнивание состава пленок по объему. После отжига пленка содержит повышенную концентрацию титана. В пленках формируется метастабильная фаза на основе соединения  $Ti_3Al$ . Эта фаза является основной в пленках и имеет различную морфологию на различных подложках. Она устойчива и не распадается при отжиге. Во время отжига также формируются новые промежуточные метастабильные фазы, которые устойчивы только в определенном температурном и концентрационном интервале.

На рис. 1 приведена микроструктура пленки, полученной на ситалловой подложке. Поверхность напыленного слоя в целом хорошо отражает структуру самой подложки. Пленка рыхлая и имеет поверхностные неоднородности, такие, как канонические образования, бугорки и полости. Встречаются также небольшие включения, имеющие гладкую и ровную поверхность. Поверхностные трещины на пленке не наблюдаются.

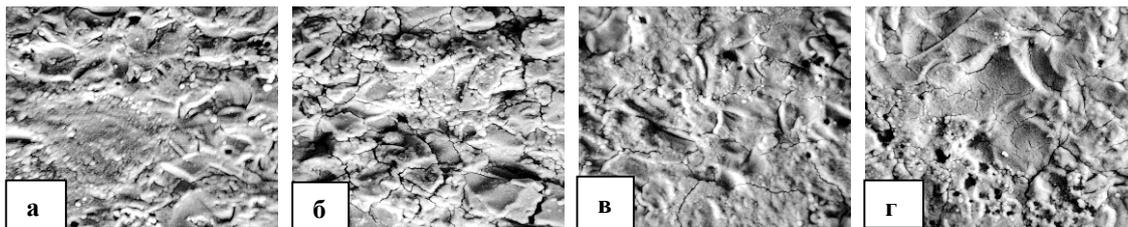


Рис. 1. Микроструктура  $Ti-Al$  пленки на ситалловой подложке:  
а – исходная; б – отжиг 0,5ч; в – отжиг 2ч; г – отжиг 6ч

На рис. 2 приведена микроструктура пленки, полученной на поликоре. В отличие от пленки на ситалловой подложке пленка на поликоре имеет более тонкодисперсное строение и состоит из отдельных рыхло расположенных зерен. Зерна не однородны по своим размерам и имеют сферическую форму. Одни зерна имеют гладкую и ровную поверхность, другие – шероховатые. Поверхностные трещины на пленке не наблюдаются.

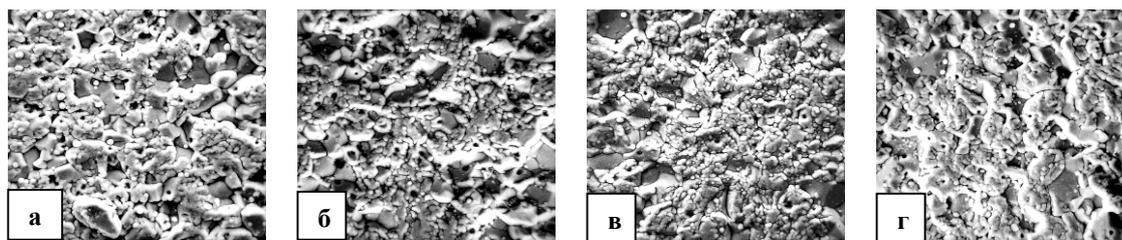


Рис. 2. Микроструктура Ti-Al пленки на полликоре:  
а – исходная; б – отжиг 0.5ч; в – отжиг 2ч; г – отжиг 6ч

Установлено, что при напылении в пленках формируется метастабильная фаза на основе соединения  $Ti_3Al$ .

Обнаружено, что структура, кинетика структурных превращений и эволюция микроструктуры пленок зависит от структуры и морфологии подложки.

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ

*В.С.Райлян, В.И.Фокин, В.В.Афтаев*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Клеевые соединения хорошо зарекомендовали себя при разработке многих конструкций с оболочками из хрупких материалов, когда неприемлемы традиционные способы соединения оболочек: фланцевые, сварные, болтовые и другие механического типа с возникновением значительных концентраций напряжений. При производстве керамических обтекателей оправдали себя эластичные герметики типа “Виксинт” [1]. Клеевое соединение в этом случае несет не только соединительные функции, но и функции важного конструктивного элемента, распределяющего напряжения в местах возможных концентраторов напряжений.

В настоящее время для контроля клеевых соединений широко используются ультразвуковые, радиационные, тепловые и прочие методы [2], которые направлены в основном на контроль качества склейки и не дают информации о механических свойствах соединения.

В данной работе предлагается тестовый метод диагностирования, направленный на определение комплексного параметра склейки. Максимальные напряжения в оболочке при прочих постоянных параметрах конструкции пропорциональны отношению  $\delta_{kl}/G_{kl}$ , где  $\delta_{kl}$  – толщина клея,  $G_{kl}$  – модуль сдвига клея.

В предлагаемом методе диагностирования данное отношение определяется экспериментально, воспроизводя испытание на сдвиг клеевого соединения на натурном обтекателе. В процессе испытаний во внутренней полости обтекателя создается избыточное давление и одновременно контролируется деформация сдвига клеевого соединения. Сдвиговые деформации контролируются по всей окружности изделия, что позволяет определить распределение сдвиговых свойств клеевого соединения.

Представлены перспективы использования такого метода в технологическом процессе производства, наземной отработки и эксплуатации керамических обтекателей ракет.

Описана автоматическая система силового нагружения и регистрации осевого сдвига торца керамической оболочки относительно шпангоута. Приведены результаты экспериментальных исследований узлов соединений различной конструкции.

Литература

1. Русин М.Ю., Мужанова Л.П., Дьяченко С.Н. Применение клеев и герметиков при сборке обтекателей // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 1. С. 30–33.
2. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 1. С. 21–27.

## **МЕТОДИКА ТЕПЛОПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПЕРФОРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ**

***В.С.Райлян, Д.В.Алексеев, В.И.Фокин***  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

К элементам летательных аппаратов (ЛА) с перфорированной стенкой относятся различные накладки, насадки и др. Они необходимы для управления параметрами воздушного потока на входах воздухозаборников двигателей. Важное место в отработке конструкций таких элементов отводится теплопрочностным наземным испытаниям.

Взаимодействие перфорированной стенки с воздушным потоком при сверхзвуковых скоростях и разных углах атаки достаточно сложный процесс, так как тепловое и силовое поля характеризуются анизотропией, которая зависит от схемы перфорации и от направления потока. При равномерном распределении ячеек тепловое и силовое поля могут быть представлены из элементарных зон, которые подобны друг другу и равномерно распределены в пространстве. Для того чтобы составить математическую модель всего теплового поля, необходимо описать область, охватывающую  $i$ -ую ячейку перфорации, потом согласовать ее с соседними. При этом процедура моделирования тепловых и силовых полей достаточно громоздка и требует определенного объема экспериментальных исследований.

В данной работе приводятся результаты экспериментального моделирования теплового и силового полей для перфорированных элементов ЛА из стеклопластиковых материалов. Рассмотрены варианты гибких контактных нагревателей из разных токопроводящих материалов. Экспериментально обоснована схема силового и теплового нагружения. Приводится описание конструкции испытательной установки и системы измерения. На основе результатов исследований была разработана методика теплопрочностных испытаний элементов ракеты X-31.

## **КОМБИНИРОВАННЫЕ ОБОЛОЧКИ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ И СТЕКЛОПЛАСТИКА ДЛЯ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ**

***Ф.Я.Бородай, Л.Г.Подобеда, В.В.Василенко***  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Наиболее универсальным и технологичным материалом для антенных обтекателей ЛА является стеклопластик – композиционный материал, состоящий из термореактивного полимерного связующего и стекловолоконного наполнителя. Связующее пропитывает стеклянный наполнитель и после отверждения склеивает между собой отдельные волокна и слои наполнителя, обеспечивает их совместную работу в материале или изделии.

Сложнопрофильные оболочки из стеклопластика в настоящее время формируют различными методами: прямым контактным прессованием пакета со связующим, набором пакета и пропиткой под давлением связующим, вакуумным или автоклавным прессованием пакета со связующим, намоткой оболочек на оправке из препрега стеклоленты. Применение высокомодульного и полого волокна полых микросфер и сотового наполнителя, а также новых высокотермостойких связующих позволяет расширить конструктивные возможности стеклопластиковых обтекателей. Однако проблема увеличения рабочих температур, повышения однородности и радиопрозрачности стеклопластиковых обтекателей остается.

Она может быть решена с разработкой композиционных или слоистых обтекателей с применением стеклопластика и керамических материалов.

В патенте США № 3336873, кл. 102–105 предложен способ изготовления обтекателей, при котором наружный слой из  $Al_2O_3$  формируют путем напыления на поверхность пресс-формы порошка глинозема, который скрепляется при пропитке стеклопакета связующим. Более перспективным по теплозащите и однородности диэлектрических свойств является разработанный нами состав покрытия из порошка кварцевого стекла на АФС. Для регулирования и подгонки диэлектрической проницаемости вводили порошок  $TiO_2$ , а увеличение излучательной способности достигали добавками 0,5–2,0%  $Cr_2O_3$ . Алюмофосфатная связка дополнительно упрочняет покрытие и сохраняет прочностные и другие характеристики покрытия до высоких температур (1200°C и более).

Лучшим неорганическим материалом для термозащиты стеклопластиковых обтекателей является кварцевая керамика. Она имеет самую низкую среди керамических материалов теплопроводность, хорошо согласуется по диэлектрическим свойствам со стеклопластиком. При этом керамический слой в зависимости от профиля изделия может быть выполнен как в виде цельковой оболочки, так и в виде отдельных кольцевых секций, торцевые поверхности которых изготовлены наклонными к вершине обтекателя. В связи с тем, что максимальные механические нагрузки в оболочке обтекателя приходятся на основание, силовую стеклопластиковую оболочку достаточно предусмотреть только в этой зоне.

Изучение слоистых структур “керамика – стеклопластик” показало, что наформовка на внутреннюю поверхность даже тонких стеклопластиковых слоев значительно повышает прочностные свойства керамических обтекателей. Эффективность упрочнения в общем виде зависит от модулей упругости керамики и стеклопластика, соотношения толщин слоев, технологии наформовки стеклопластикового слоя и др.:

$$\Delta P = k \frac{E_k y_1 + E_c y_2}{E_k f},$$

$$\text{где } y_1 = d_k \left[ (f - d_c)(f - d_k - d_c) + \frac{d_k^2}{3} \right]; \quad y_2 = d_c \left[ f(f - d_c) + \frac{d_c^2}{3} \right];$$

$$f = \frac{d_k^2 - \frac{E_c}{E_k} \cdot d_c^2}{2(d_k + \frac{E_c \cdot d_c}{E_k})};$$

$E_k, E_c$  – модуль упругости керамики, стеклопластика;

$d_k, d_c$  – толщина слоя керамики, стеклопластика;

$k$  – коэффициент, зависящий от технологии нанесения стеклопластикового слоя, пористости керамики и типа связующего.

Для кварцевой керамики с пористостью 7–11 % коэффициент  $k$  составляет 1,0–1,4 и определяется глубиной внедрения органополимера в поры керамики. Таким образом упрочнение керамической оболочки достигается и без наформовки стеклопластикового слоя, что и реализовано нами на обтекателях из кварцевой керамики путем пропитки оболочек кремнийорганическими и элементо-органическими полимерами на глубину 1–3 мм.

В ряде случаев, например, для улучшения РТХ целесообразными будут конструкции комбинированных обтекателей, у которых керамический слой размещен на внутренней стороне оболочки обтекателя или внутри стенки вместо сотопласта. В последнем случае применены высокопористые неорганические волокнистые материалы с  $\varepsilon = 1,2–1,4$  ед.

## ЦВЕТОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФАРФОРА, СОДЕРЖАЩЕГО ОКСИД НЕОДИМА

*А.С.Власов, Ю.Т.Платов, А.А.Кондрукевич*

(РХТУ им.Д.И.Менделеева, РЭА им.Г.В.Плеханова, ЗАО “Объединение Гжель”, ГГХПИ)

Применение оксидов редкоземельных металлов в качестве красителей бытового и художественного фарфора представляет большой практический интерес, учитывая их уникальные физические свойства, обусловленные особенностями их атомной структуры [1, 2, 3]. Хотя оксид неодима и относится к числу сравнительно слабых красителей, так для сравнения красящая сила (POW\_F) оксида неодима при 5 % содержании его в фарфоре составляет 149,4, а оксида кобальта 2612,2, но фарфор, содержащий  $Nd_2O_3$ , обладает возможностью менять цвет в зависимости от освещенности, т. е. при источнике света С (имитирующий средний дневной свет с цветовой температурой 6500 К) от фиолетового до голубого и при источнике света А (имитирующий средний свет электроламп с цветовой температурой 2850 К) от розового до сиреневого.

Спектрофотометрия фарфора (рис.1) показала сохранение основных электронных переходов в фарфоре, содержащем ион неодима, с электронными переходами в ионе неодима, за исключением того, что полосы поглощения иона в фарфоре более широкие (табл.1) [4]. В стеклофазе связь электронов с ядром в атомах ослаблена, энергии видимого света достаточно для перехода электронов с оболочки  $4f$  на оболочку  $5d$ .

Таблица 1

Квантовые переходы в ионе неодима в фарфоровой матрице

| Переходы в видимой области спектра        | Длина волны $\lambda$ , нм |                                |
|---|----------------------------|--------------------------------|
|   | Ион неодима                | Фарфор, содержащий ион неодима |
| $^4I_{9/2} \rightarrow ^2,^4G_{9/2, 7/2}$ | 512–522                    | 505–545                        |
| $^4I_{9/2} \rightarrow ^2,^4G_{7/2, 5/2}$ | 575,2–586                  | 568–618                        |

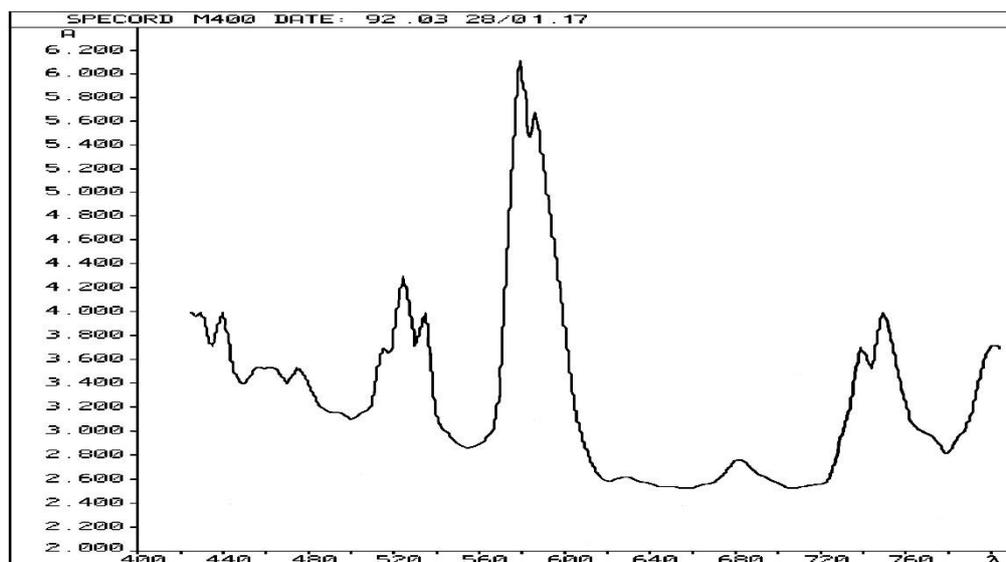


Рис. 1. Спектр поглощения фарфора, содержащего ион неодима  $Nd^{3+}$

Результаты цветовых характеристик фарфора, содержащего оксид неодима, представленные в табл. 2., показали, что при разных источниках света светлота почти остается постоянной, а изменение цвета происходит за счет смещения хроматической компоненты  $b$  по компоненте  $a$  (рис.2). Такое смещение происходит на 1,6–2,3 единицы, в зависимости от концентрации, в сторону красного цвета, что обуславливается природой источника света А, в котором преобладают ближние к инфракрасной области электромагнитные спектры с длиной волны больше 630 нм.

Таблица 2

Цветовые характеристики фарфора, содержащего оксид неодима, при разных источниках цвета

|                                     | Источник света С |       |        | Источник света А |      |        |
|-------------------------------------|------------------|-------|--------|------------------|------|--------|
|                                     | L                | a*    | b*     | L                | a*   | b*     |
| Эталон                              | 79,80            | -0,31 | 5,13   | 80,09            | 1,38 | 5,16   |
| 1 % Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 79,48            | -0,47 | 1,04   | 79,48            | 1,78 | 0,65   |
| 3 % Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 77,54            | 0,36  | -4,16  | 77,25            | 2,49 | -4,76  |
| 5 % Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 74,87            | 1,40  | -6,26  | 74,53            | 3,51 | -6,82  |
| 7 % Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 71,31            | 3,78  | -7,99  | 71,07            | 6,00 | -8,20  |
| 9 % Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 71,34            | 3,74  | -9,92  | 70,94            | 5,55 | -10,29 |
| 11 % Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 69,79            | 5,19  | -11,42 | 69,42            | 6,77 | -11,58 |

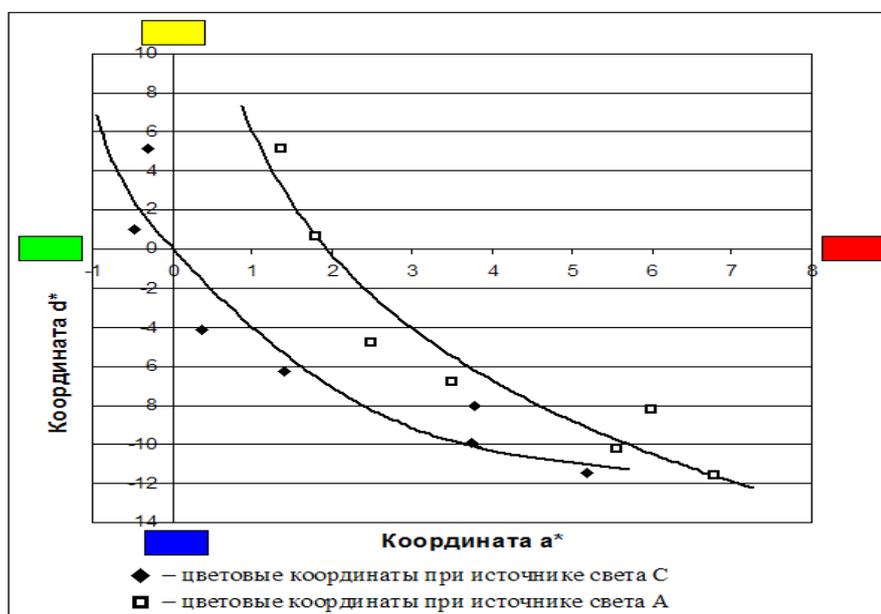


Рис. 2. Изменение координат цвета  $a$  и  $b$  твердого фарфора при разных источниках света

Зрительное цветоощущение изменяется не только в зависимости от освещения, но и от толщины фарфора. В тонких слоях или при незначительном содержании оксида неодима

фарфор имеет цвет от фиолетового до голубого, а в толстых слоях или при больших концентрациях оксида неодима – от розового до сиреневого.

Игра цветов вызывается селективным поглощением света узкой, но крутой и интенсивной полосой поглощения, которая находится в интервале длин волн 568–618 нм и разделяет видимый спектр на две части – синюю и красную. Для фарфора, содержащего оксид неодима, характерны две полосы поглощения в видимой части спектра. Для длин волн в спектре зеленых лучей – 505–545 нм и от желто-зеленых до оранжевых лучей – 568–618 нм (рис.1). В результате этого фарфор, окрашенный оксидом неодима, в видимой части спектра имеет фиолетовый и голубой цвета, образуемые фиолетовыми и голубыми лучами, и розовый и сиреневый, образуемые красными лучами [5]. Поэтому в фарфоре, содержащем оксид неодима, наблюдается явление двойственности цвета – дихроизм, т. е. “переливание цвета”. Поэтому зрительное цветоощущение, создаваемое фарфором, содержащим оксид неодима, сильно зависит от источника света, т.е при дневном свете преобладают сине-фиолетовые составляющие, при искусственном свете, который сравнительно беден коротковолновыми лучами, – красный цвет.

Опытно-промышленные испытания, проведенные в ЗАО “Объединение Гжель”, показали хорошее качество окраски изделий, что делает его, несмотря на относительно высокую стоимость, ценным красителем в производстве бытового и художественного фарфора.

#### Литература

1. Пищ И. В., Масленникова Г. Н. Керамические пигменты. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 132 с.
2. Михайличенко А.И., Михлис Е.Б., Патрикеев Ю.С. Редкоземельные металлы. – М.: Металлургия. 1987.– 287 с.
3. Портной К. И., Тимофеева Н. И. Кислородные соединения редкоземельных элементов: справ. изд. – М.: Металлургия, 1986.– 480 с.
4. Полуэктов Н. С., Кононенко Л. И. Спектрофотометрические методы определения индивидуальных редкоземельных элементов. – Киев: Наукова думка, 1968.
5. Ковчук С. Г., Федорова В. А., Гайдук А. П. Использование редкоземельных элементов для производства цветного стекла. – Минск: Вышэйшая школа, 1982.–172 с.

## **К ВОПРОСУ О КОНТРОЛЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НОСОВОЙ ЧАСТИ ОСТРОКОНЕЧНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РЕНТГЕНОВСКИМ МЕТОДОМ**

***В.И.Неповинных, В.Ф.Апощенко***

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

В настоящее время к радиопрозрачным обтекателям (РПО) предъявляются все более высокие требования по точности воспроизведения теоретического контура и обеспечения заданной толщины стенки, величина которой может изменяться по высоте для достижения заданных радиотехнических характеристик. Обтекатели представляют собой тела вращения, носовая часть которых может иметь различную форму – от остроконечной с радиусом кривизны, близким к нулю, до шарообразной поверхности. Технологический процесс изготовления обтекателей предусматривает раздельную механическую обработку внутренней и наружной поверхностей оболочки, вследствие чего неизбежно появление неэквидистантности этих поверхностей в носовой части остроконечных оболочек. Поэтому в условиях производства для оптимизации носовой части оболочек становится актуальной проблема контроля геометрических параметров.

В ОНПП “Технология” накоплен значительный опыт измерения толщины стенок оболочек из керамических материалов на установке с измерительной скобой УЗТС-1. Анализ конструкции и точностных параметров установки в целях использования ее для контроля малогабаритных

остроконечных оболочек показал, что наибольшая погрешность (до +0,1мм) возникает при измерениях в носовой части оболочки из-за неэквидистантности поверхностей, а измерение толщины стенки в области 20 мм от вершины носка вообще невозможно. Анализ ультразвуковых и магнитных методов с применением современных толщиномеров типа 25DL plus и Magna-Mike 8500 фирмы “PANAMETRICS” показал, что данные методы обеспечивают заданную точность измерений толщины (не более  $\pm 0,01$ мм) практически на всех участках оболочки [1]. Однако в ряде случаев применение данных методов оказывается недостаточным вследствие высокой погрешности измерений в области неэквидистантности образующих стенку поверхностей в носовой части остроконечных оболочек.

Проведенные исследования по поиску наиболее эффективных методов контроля геометрических параметров в носовой части остроконечных оболочек из неметаллических материалов показали, что самым оптимальным и информативным методом контроля качества изготовления носовой части оболочек является рентгеноскопический метод. В результате была разработана и внедрена методика рентгеноскопического контроля геометрических параметров носовой части керамических изделий.

Суть метода состоит в последовательном просвечивании наружного и внутреннего контуров с поворотом вокруг оси на  $90^\circ$ . Полученные рентгеновские снимки импортируются в программу AutoCAD, в которой с помощью графических инструментов обводятся внутренние и наружные контуры, которые в дальнейшем накладываются друг на друга и сопрягаются с теоретическим контуром оболочки (рис. 1, 2).

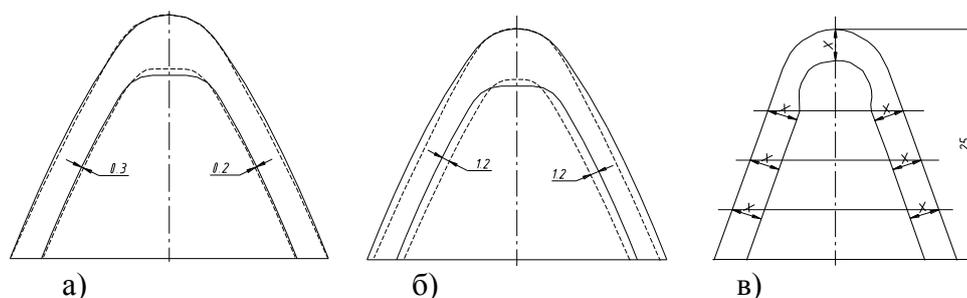


Рис. 1. Минимальное а) и максимальное б) отклонение реального контура (- -) от теоретического контура (-); в) – измерение толщины стенки и разновидность внутреннего контура

Рентгеноскопический метод позволяет измерять геометрические параметры носовой части изделия, такие, как толщина стенки, толщина носовой части вдоль оси и отклонение реального контура от теоретического с точностью 0,1 мм. Кроме того, с помощью данного метода можно измерять внутренние и наружные радиусы контуров с точностью 0,5 мм. Его отличительной чертой является графическое воспроизведение информации на экране монитора в виде продольного сечения (рис. 1, 2). Это позволяет визуально оценивать качество внутреннего и наружного контуров в совокупности (рис. 1 в).

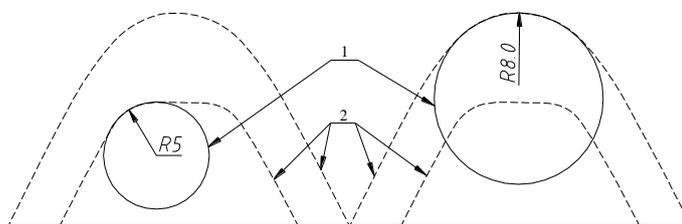


Рис. 2. Измерение внутреннего и наружного радиусов в носовой части изделий РПО-50 с помощью программы AutoCAD: 1 – шаблоны для определения радиуса; 2 – внутренний и наружный контуры

Литература

1. Неповинных В.И., Соколова З.Н. О методах измерений толщины стенки оболочек из композиционных материалов радиопрозрачных обтекателей: сб. мат. 24 Ежег. науч.-практ. конф. “Композиционные материалы в промышленности”. – Ялта, 2004. – С.192.

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ И СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЛЛАСТОНИТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБА ВОДНОГО ШЛИКЕРНОГО ЛИТЬЯ**

*Г.И.Куликова, М.М.Цветкова, А.Ю.Конанова, М.К.Алексеев, Т.И.Ева*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В последнее десятилетие в России наметилась устойчивая тенденция расширения внутреннего спроса на алюминиевую продукцию, вызванная общим ростом экономики. Дальнейшее экономическое развитие страны обусловит повышение потребления алюминия во всех отраслях промышленности, а особенно в транспортном машиностроении, строительстве и производстве упаковки.

По общему объему производства и экспорта алюминия Россия занимает второе место в мире после США. Несмотря на это, в нашей стране практически не производят специальных огнеупоров для цветной металлургии. Поэтому российские алюминиевые заводы или закупают за рубежом огнеупорную оснастку из волластонита, или используют асбестосодержащие материалы и огнеупоры, предназначенные для черной металлургии. В связи с этим, разработка отечественных волластонитовых огнеупоров является актуальной и коммерчески выгодной задачей.

Большой удельный вес в объеме огнеупоров литейного алюминиевого производства приходится на крупногабаритные секции и блоки, плиты и желоба для футеровки алюмопроводов. Применение, в частности, желобов упрощает футеровку металлического каркаса литейной оснастки и позволяет оперативно заменять поврежденные секции.

За рубежом изготовление крупногабаритных волластонитовых изделий базируется преимущественно на автоклавной технологии с использованием в качестве сырьевых компонентов молотого кремнеземного песка и извести или природных кальцийсиликатов.

В ОНПП “Технология” для получения волластонитовой керамики была реализована технология спекания природных порошков волластонита, а как наиболее рациональный способ формования крупногабаритных изделий был выбран метод водного шликерного литья в гипсовые формы.

Для формования желобов с точными геометрическими размерами без последующей механической обработки на станках была изготовлена гипсовая оснастка с учетом литейных свойств шликера и усадочных коэффициентов волластонитового материала на этапах отливки, сушки и обжига (суммарная усадка до 1,5% лин.).

В настоящей работе в качестве сырья для изготовления желобов был использован волластонит природный Верхнее-Бодамского месторождения – волластонитовый концентрат марки ВП-2. Содержание основного компонента – волластонита – в исходном сырье составляет ~ 80 %масс., который и обеспечивает химическую инертность к расплаву алюминия материалов на его основе.

Зерновой состав порошка ВП-2 был исследован методом седиментационного анализа, в соответствии с результатами которого весовая доля частиц размером от 10 до 50 мкм составляет ~ 65,3 % масс., от 50 мкм и выше – ~ 34,7 % масс., частиц размером менее 5 мкм не обнаружено. Удельная поверхность этого порошка, определенная пикнометрическим методом, – ~ 1,0 – 1,2 м<sup>2</sup>/г. Частицы волластонитового концентрата ВП-2 имеют игольчатую форму с соотношением длины к диаметру от 3:1 до 20:1.

Шликер на основе ВП-2 готовили мокрым помолом порошков в шаровой мельнице алундовыми шарами при соотношении компонентов ~ волластонит : пластифицирующие добавки ~ 75 : 25. Влажность шликера ~ 30% масс.

С целью повышения термостойкости керамического материала в состав шликера вводили неорганический волокнистый наполнитель в количестве до 5 % масс. Введение наполнителя осуществляли путем смешения шликера с наполнителем в лопастной механической мешалке в течение 10–15 минут до достижения равномерного распределения введенного компонента.

Литье желобов проводили в гипсовые формы, доливая шликер через литниковые отверстия в течение времени набора заготовки. Продолжительность этого процесса составляет не менее 15 часов. Время нахождения заготовки в гипсовой форме – не менее 24 часов и зависит от толщины стенок желоба.

После извлечения заготовок желобов из гипсовой оснастки их сушат сначала на воздухе в течение не менее двух суток. За время сушки на воздухе отливки приобретают прочность, что позволяет безопасно их транспортировать, зачищать, заглаживать неровности и дефекты с помощью скальпеля и увлажненной поролоновой губки и доводить габариты изделий до требуемых размеров вручную.

Затем изделия сушат при 100–120°C в течение 6–8 часов. Просушенные изделия обжигают в электропечи в воздушной среде при 850 – 900°C.

По разработанной технологии были изготовлены партии желобов различных форм, размеров и комплектаций в соответствии с особенностями металлопроводов установок литья алюминия, на которых они прошли производственные испытания (“Агрисовгаз”, г.Малоярославец; “СМК”, г.Ступино; “КрАЗ”, г.Красноярск). Испытания показали удовлетворительную работоспособность изделий в эксплуатационных условиях и ресурс работы на уровне импортных аналогов.

## **РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С АЛЮМО-ОКСИДНОЙ МАТРИЦЕЙ И ДИСПЕРСНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ**

*В.Ю.Евдокимов<sup>1</sup>, Н.А.Овсянников<sup>1</sup>, А.С.Чернявский, Ю.Б.Тюткова<sup>1</sup>, С.В.Гнидаш<sup>2</sup>, С.М.Барин<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup> ИФХП КМ РАН, г.Москва, <sup>2</sup> ФГУП ВНИИТС, г.Москва, Россия)

Введение дисперсных металлических частиц в хрупкую керамическую матрицу может привести к повышению прочности, и особенно трещиностойкости, в результате эффектов пластической релаксации напряжений и формирования полей остаточных напряжений в материале. Целью настоящей работы являлась разработка основ технологии материалов в системах  $Al_2O_3-Ni$ ,  $Al_2O_3-Ni-NiAl$  и  $Al_2O_3-TiAl$ . Дисперсное армирование  $Al_2O_3$ -матрицы частицами Ni достигали посредством следующих технологических операций:

– смешением исходной шихты алюмоаммиачных квасцов (ААК)  $Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$  с сульфатом никеля  $NiSO_4 \cdot 6 H_2O$ ;

– прокалкой шихты при 900–1200°C (4–6 часов) до получения смеси оксидов  $Al_2O_3$  и NiO в заданном соотношении;

– восстановлением оксидной системы  $Al_2O_3-NiO$  в водороде при 290–350°C до получения композита  $Al_2O_3-Ni$  (содержание Ni в композиционном материале 2,2 и 6,5об.%). Ультрадисперсные частицы интерметаллидов введены в систему  $Al_2O_3-Ni$  механохимическим методом. Смеси подвергали горячему прессованию в вакууме при температурах до 1450°C.

В качестве примера в системе  $Al_2O_3-TiAl$  получены высокопрочные материалы с дисперсными частицами TiAl 0,5–0,9 мкм при их объемном содержании до 20%, имеющие прочность при изгибе 690 МПа при температуре 800°C, что существенно (в 1,5–2 раза) превосходит прочность корундовой керамики. Материал обладает повышенной устойчивостью к износу и может быть использован в изделиях триботехнического назначения.

## **ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ И СТРУКТУРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМ СТЕНДОВ ИЗМЕРЕНИЯ РТХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ**

*А.П.Шадрин, Б.Е.Николаев, А.В.Ромашин*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В настоящее время возросли объём и номенклатура радиопрозрачных обтекателей. Учитывая, что практически каждый тип изделия требует создания отдельного комплекса измерения радиотехнических характеристик (РТХ), возникает необходимость оптимизации процессов разработки и изготовления измерительных стендов (ИС).

Принимая во внимание, что ИС по многим требованиям, в частности по осям и диапазонам перемещений, аппаратному комплексу, близки один к другому, возникают требования по оптимизации кинематической и структурной электрической схем, а также разработки обобщающих алгоритмов создания ИС. Это, в свою очередь, существенно повышает производительность работ по разработке и изготовлению ИС.

Отправным документом для разработки являются технические условия на радиопрозрачный обтекатель. В процессе разработки определяются оптимальные кинематические решения следующих электромеханических устройств стенда:

- количество и способ управления координатами перемещения передающей антенны, её тип и способ крепления;
- количество и способ управления координатами перемещения приёмной антенны и способ её крепления;
- количество и способ управления координатами перемещения обтекателя и способ его крепления на стенде.

Алгоритмы оптимизации структурной электрической схемы определяют следующие её параметры:

- количество уровней программно-аппаратного комплекса;
- состав и структуру радиоизмерительной части;
- тип приводов и датчиков перемещений;
- количество и тип источников питания и фильтров защиты от помех;
- количество нестандартных блоков и интерфейсов, подлежащих разработке;
- способы управления механизмами перемещения.

Особого внимания требует оптимизация, а соответственно унификация программного обеспечения ИС.

Параметры структурной электрической схемы, а также принятые решения по кинематике механических устройств определяют исходные данные для разработки конструкторской документации.

## **МОДЕЛЬ БАЗЫ ДАННЫХ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ РТХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ И ВЫРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ**

*И.В.Емельянов, М.В.Степанов, А.П.Шадрин*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Доводка дорогостоящих радиопрозрачных обтекателей (РО) представляет трудоемкую операцию, т.к. для обеспечения жестких требований по радиотехническим характеристикам (РТХ) изделия во избежание брака первоначально изготавливаются с припуском на механическую обработку. Поскольку большинство изделий для обеспечения РТХ и из-за

неоднородности материала по высоте РО имеет профилированный контур, необходимы промежуточные измерения РТХ РО.

Используемая методика анализа результатов измерений РТХ РО предназначена для подготовки рекомендаций по последующей механической обработке изделий, она устанавливает правила и порядок проведения контроля РТХ на стадии доводки до соответствия требованиям ТЗ. В основе методики лежит создание базы данных (БД), удобной для интеграции с существующими программными комплексами станков измерений РТХ, позволяющей накапливать знания и опыт в предыдущих аналогичных доводках РО и эффективно использовать результаты измерений и расчета параметров.

Сущность метода создания БД заключается в следующих операциях:

- измерение обтекателя после предварительной механической обработки и формирование исходной статистической модели изделия;
- формирование задания на механическую обработку с целью коррекции профиля толщины стенки по результатам измерения РТХ и формирование статистической модели воздействий;
- контроль доводки толщины стенки обтекателя после механической обработки;
- оценка влияния выработанной статистической модели воздействий на РТХ изделий;
- корректировка статистической модели профиля изделия в соответствии с выработанной статистической моделью воздействий.

Разработка заданий на механическую обработку изделий по данной методике обеспечивает снижение процента брака за счет минимизации человеческого фактора, повышение производительности труда при выдаче рекомендаций по доводке профиля толщины стенки обтекателя.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН**

*З.Н.Соколова, В.И.Неповинных*

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

Плотность является одним из основных параметров пористых конструкционных материалов. Многие свойства, в том числе и прочность, связаны с плотностью (пористостью). Для радиопрозрачных обтекателей из кварцевой керамики плотность задается техническими условиями в достаточно узком интервале и регулируется режимом обжига заготовок. Следовательно, определение плотности заготовки после обжига в оперативном режиме является актуальной задачей. Определение плотности методом гидростатического взвешивания на данном этапе невозможно, т.к. производится на образцах, вырезанных из припуска.

Ранее было установлено, что для кварцевой керамики существует достаточно тесная корреляционная зависимость между скоростью продольных ультразвуковых колебаний (УЗК) и плотностью [1, 2], которая лучше всего описывается уравнением второго порядка.

На основании полученной зависимости разработана методика, которая позволяет быстро определять плотность в любом месте обожженной заготовки после обжига. Это позволяет корректировать температуру в печи для обжига последующих заготовок или принимать решение о повторном обжиге. Метод не требует вырезки образцов, позволяет определять плотность практически в любом месте заготовки.

Одним из факторов, ограничивающих применение этого метода, является необходимость измерять толщину стенки заготовки. Существующий метод определения толщины стенки при помощи механической скобы достаточно трудоемкий и не всегда обеспечивает желаемую точность, а для некоторых типов изделий вообще неприменим.

В данной работе предпринята попытка использовать для оценки плотности скорость поверхностных (релеевских) и поперечных (сдвиговых) ультразвуковых волн. В первом случае

волна распространяется по поверхности на небольшую глубину, во втором – распространяется под углом к поверхности вглубь материала. Поверхностные и поперечные волны возникают при трансформации продольной волны, падающей под углом на границу раздела двух сред с разными скоростями. Оптимальные условия для трансформации поверхностной волны – второй критический угол, поперечной – между первым и вторым критическими углами. Углы рассчитываются на основании закона Снеллиуса.

Измерения проводились на фрагментах припусков, отрезанных от обожженных заготовок изделий из кварцевой керамики в количестве около 200 штук в широком диапазоне плотностей. Кажущаяся плотность определялась методом гидростатического взвешивания по существующей методике. Излучение и прием осуществлялись по отдельной схеме. В качестве генератора УЗК использовался УЗ-дефектоскоп УД2-12, а сигнал с приемного ПЭП поступал на многоканальный осциллограф Le Croy, с помощью которого определялось время между зондирующим и принятым сигналами (рис 1).

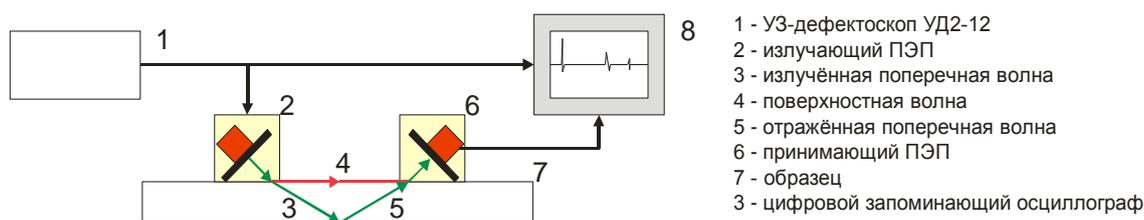


Рис.1. Схема измерения времени распространения поверхностных и поперечных УЗК

Если обеспечить фиксированную базу прозвучивания, то за информативный параметр целесообразно принять не скорость распространения УЗК в материале, а время прохождения УЗ-колебаний того или иного типа между излучателем и приемником.

Для возбуждения волн определенного типа использовались призмы с разными углами наклона. При этом на экране осциллографа фиксировались как импульсы релеевской волны, так и сдвиговой, причем соотношение их амплитуд в разных образцах сильно отличалось. Идентифицировать принятые сигналы несложно путем демпфирования внутренней или наружной поверхности образца.

Кроме этого, в каждом образце определялась средняя скорость продольных УЗК.

На рис. 2 и 3 представлены полученные зависимости времени прохождения релеевской и сдвиговой УЗК от плотности образцов.

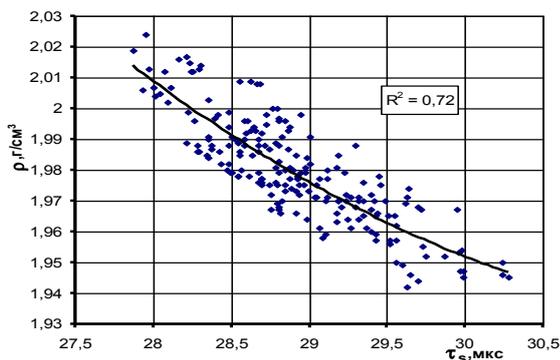


Рис.2. Зависимость времени распространения поверхностных УЗК от плотности

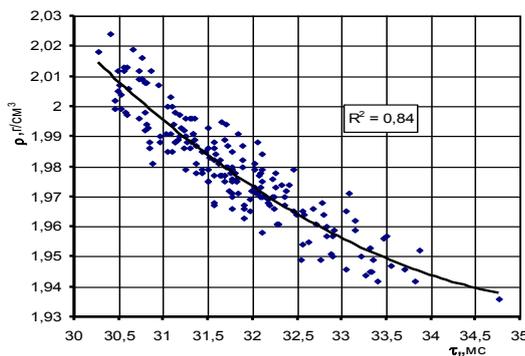


Рис.3. Зависимость времени распространения поперечных УЗК от плотности

Видно, что связь “Время распространения УЗК – плотность” для поверхностной волны более слабая. Это связано с неравномерностью распределения пор по толщине образца.

В результате проведенных ранее исследований на образцах из кварцевой керамики установлено, что между диэлектрической проницаемостью и скоростью УЗК существует достаточно хорошая корреляционная зависимость. Если эту зависимость “привязать” не к скорости продольных УЗК в определенной точке, а к времени пробега поверхностных или поперечных УЗК на определенной базе прозвучивания, то можно получить удобный инструмент для оценки диэлектрической проницаемости в различных участках оболочки.

#### Выводы

1. Проведенные исследования показали возможность оценки плотности в обожженных заготовках из кварцевой керамики с использованием поверхностных и поперечных УЗК.
2. Главные преимущества метода – отсутствие необходимости измерения толщины стенки и существенное сокращение времени контроля.
3. Изготовление или подбор преобразователей и аппаратуры с оптимальными параметрами для преобразования мод УЗК в кварцевой керамике позволит повысить точность измерений.

#### Литература

1. Соколова З.Н., Бандеров Г.П. Контроль прочности и пористости кварцевой керамики ультразвуковым методом //Стекло и керамика.1984. №4. С.27–28.
2. Фетисов В.С., Соколова З.Н., Корнуков Ю.П., Русин М.Ю. Ультразвуковой контроль изделий из кварцевой керамики: сб.науч.тр. 14-ой научно-технич. конф. “Ультразвуковой контроль и диагностика”.– М.,1996.– С.127.

### СОЕДИНЕНИЕ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИТА SiC–C<sub>f</sub>

*В.Н.Рудыкина, Л.А.Плясункова, М.А.Сидоренко, И.Ю.Келина, А.С.Шаталин*  
(ФГУП “ОНИИ “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В процессе изготовления изделий из керамических композитов SiC–C<sub>f</sub> возникает необходимость соединения элементов изделий или изделий между собой в одно целое.

Целью настоящей работы было проведение исследований по получению прочного шва между двумя образцами из композита SiC–C<sub>f</sub>, соединёнными между собой в виде буквы Т.

Соединение осуществляли путём склеивания с помощью метода низкотемпературного силицирования при максимальной температуре 1500°С. Образцы для склейки размером 35x20x9 и 20x20x9 мм вырезались из углепластиковой заготовки C–C<sub>f</sub>. Для получения углепластиковой заготовки использовали при выкладке двунаправленное расположение с углом 90 градусов углеродных волокон УКН-П/5000, связующим служил бакелитовый лак ЛБС-1. Заготовка имела следующие характеристики: объёмное содержание волокна – 53,8%; объёмное содержание связующего – 30,7%; плотность – 1,28 г/см<sup>3</sup>; пористость – 15,5%.

Варианты силицирования склеенных образцов C–C<sub>f</sub> приведены в таблице.

| Вариант | Состояние образцов перед соединением   |
|---------|--|
| 1       | Образцы 1, 2 – после предварительного пиролиза   |
| 2       | Образец 1 – после предварительного пиролиза<br>Образец 2 – без предварительного пиролиза |
| 3       | Образцы 1, 2 – без предварительного пиролиза   |
| 4       | Образцы 1, 2 – после предварительного силицирования                                      |

Для склеивания на поверхность образцов наносили бакелитовый лак с небольшим количеством наполнителя, затем перед силицированием проводили термообработку с целью полимеризации связующего.

Максимальная прочность при сдвиге получена на образцах, соединённых по вариантам 1 (после предварительного пиролиза) –  $\tau_{сдв} = 15$  МПа, 3 (без предварительного пиролиза) –  $\tau_{сдв} = 19$  МПа. В обоих случаях разрушение происходило по шву. При испытании образцов, соединённых по варианту 4 (после предварительного силицирования), разрушение произошло не по шву, а по материалу большего из образцов, что в данном случае свидетельствовало о недостаточной прочности самого образца, что связано с неоднородной структурой исходной углепластиковой заготовки. При соединении образцов по варианту 2 прочность при сдвиге не превысила 3,9 МПа.

Таким образом, в результате работы показано, что возможно получение прочных соединений между образцами композита SiC-C<sub>f</sub> как в процессе силицирования самих образцов с одновременным склеиванием, так и соединения или склеивания уже просилицированных деталей, но при этом необходимо вести контроль за получением качественных исходных углепластиковых заготовок и образцов после силицирования.

## **СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ**

*С.Н.Кульков* (ИФПМ СО РАН, г.Томск, Россия)

Исследованы структура, фазовый состав наносистем на основе диоксида циркония, полученных методом плазмохимической денитрации водных растворов солей в плазме высокочастотного разряда. Изучено морфологическое строение ультрадисперсного порошка ZrO<sub>2</sub>, его изменение при механической активации, прессовании, отжиге. Показано, что в процессе мехактивации данная наносистема разделяется на две подсистемы с отличающимися на два порядка средним размером структурных элементов. При этом возрастает доля квазиаморфной (рентгеноаморфной) фазы. Такое состояние наносистемы позволяет направленно изменять характеристики спеченных материалов. Показано, что при прессовании в ней наблюдаются три области с разными преобладающими механизмами уплотнения при прессовании (компактирования порошка): перемещение частиц, фазовый переход, разрушение.

Обнаружено, что существует критическое состояние, с достижением которого происходит ее разделение на две самостоятельные подсистемы, принципиально отличающиеся по размерам. При этом на начальной стадии обработки наблюдается рост среднего размера частиц порошка, обусловленный увеличением количества и размеров агрегатов, но сохраняются структурные элементы, наблюдаемые в исходном порошке. Интенсивное накопление микроповреждений структурными элементами порошка, реализующееся на этой стадии, с увеличением продолжительности механического воздействия приводит к его деструктуризации, позволившее уменьшить средний размер частиц более чем в шесть раз относительно среднего размера частиц в исходном порошке.

Показано, что, изменяя скорость нагрева при спекании такой наносистемы, можно направленно варьировать ее усадку на стадии изотермического спекания. При этом, чем выше температура спекания, тем медленнее происходит уплотнение на изотермической стадии. Это позволяет получать материалы с разными значениями пористости, но высокими значениями прочности спеченного материала вследствие формирования стержневых (иногда пластинчатых) структур, обладающих высокой прочностью каркаса вследствие высокой прочности сформированной связи между наночастицами. В силу малых размеров самих зерен и значительных размеров площади контакта по отношению к размерам кристаллитов возникающие после потери устойчивости изгибные напряжения не превосходят предела прочности материала керамики (практически бездефектного в пределах нанозерна диоксида циркония).

Получены керамические материалы со средним размером пор от 1 до 1000 мкм и высокими прочностными свойствами. Материалы с такими характеристиками весьма перспективны для

изготовления рабочих элементов фильтров, носителей катализаторов и лекарств, эндопротезов костной ткани.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 06-08-00903-а и 05-01-98008-объ-а.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЙ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕКЛОПЛАВИЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*И.Л.Шкарупа, В.В.Викулин, М.Ю.Русин, И.Н.Курская, В.Н.Рудыкина, Н.Н.Саванина* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В настоящее время в качестве материалов для стеклоплавильных аппаратов используют сплавы платины с родием и палладием, т.к. они остаются химически инертными при высокой температуре эксплуатации (до 1500°C) и могут эксплуатироваться в окислительной атмосфере. Известно, что металлы, нагретые до 0,9  $T_{пл}$ , практически полностью теряют свою прочность, а керамические материалы при нагревании до гораздо более высоких температур практически не разупрочняются. Поэтому в качестве замены деталей из платиновых сплавов предлагаются конструкционные керамические материалы на основе оксида алюминия, оксида циркония, нитрида кремния, карбида кремния.

Для проверки работоспособности материала на основе нитрида кремния были изготовлены изделия, заменяющие верхнюю часть обычного стеклоплавильного платинородиевого аппарата (СПА) (рис.1). Без изменения системы нагрева в течение 9 месяцев были проведены испытания такой конструкции (рис.2). Результаты испытаний показали, что керамика стойка как к расплаву стекла, так и к окислению, что за счёт лучшей теплоизоляции расход электроэнергии уменьшился на 2% и что сэкономлено 100 г платинородиевого сплава для 100-фильерной конструкции.

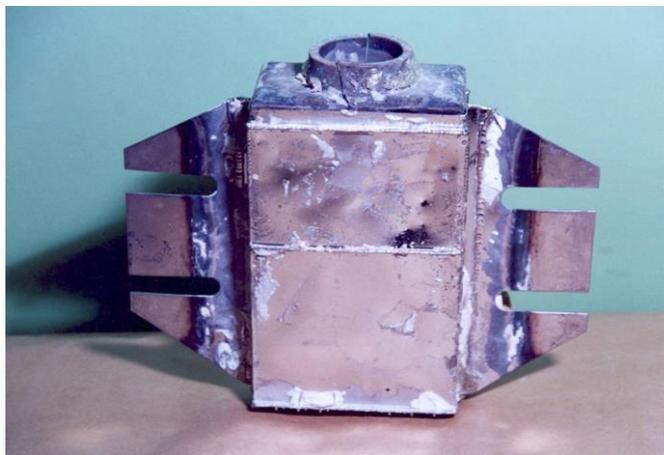


Рис.1. Платинородиевый стеклоплавильный аппарат с керамической крышкой

Для полной замены платинового сплава на керамику была разработана печь, нагревание в которой осуществляется при помощи керамических нагревателей, установленных по окружности. В результате размещённый по центру печи керамический тигель также разогревается (рис.1). В нём происходит расплавление стекла и доведение его до необходимой температуры (около 1400°C). Расплав стекла вытекает из керамических фильер и, проходя через вытягивающее устройство, наматывается на бобину.

Из-за недостаточной длины фильер в процессе эксплуатации происходило заливание керамической фильерной пластины (рис.2). Температура отдельных керамических фильер была

различная, что приводило к невозможности получения качественного стекловолокна при необходимой производительности.



Рис.2. Керамическая фильерная пластина, залитая стеклом после испытаний

Было принято решение перейти к гибридной конструкции. Днище тигля изготовлялось из платиновой пластины с фильерами, которое герметизировалось с керамическим тиглем. По весу получалась экономия сплава более 90 % от массы СПА.

Эксплуатация гибридного СПА показала, что при намотке нити на вал раскладчика “зарухание” фильер не наблюдается, стекло прозрачное, однородное, температура фильерной пластины близка к изотермической, цвет волокна белый. Получен текс 2,8 на вал раскладчика.

При намотке на бобинодержатель Nэл.двиг. =1450 об./мин., N бабинодер. = 2000 об./мин., D шкива на эл. двиг. = 90 мм. происходит обрыв нити из-за малого количества волокон – 48 шт. Получена нить 1,0 текс, d нити порядка 1 мкр.

После эксплуатации тигля в течение месяца он был разрушен для изучения в лабораторных условиях. Выявлено что взаимодействие стекломассы с керамической стенкой не произошло. На наружной поверхности тигля изменения не обнаружены. Из тигля вырезаны балочки, которые испытывались на изгиб и микротвёрдость – деградация материала не произошла, значения до и после испытаний без изменения.

$\sigma_{изг.} = 295$  МПа, микротвёрдость = 14 ГПа. Изменения фазового состава не зафиксировано.

В настоящее время изготовлен керамический тигель, в который будет установлена платиновая пластина с 300 фильерами. Испытания этого гибридного СПА пройдут в ближайшее время.

## **КОНТРОЛЬ ОТКЛОНЕНИЙ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБТЕКАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ**

*Н.В.Дзема, А.Г.Эпов, Г.А.Харахонов, Д.А.Королёв*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

При исследовании точности обработки несложных деталей используются методы математической статистики с построением, по результатам замеров многих деталей, кривых распределения и точечных диаграмм. Однако эти методы анализа из-за сложной конфигурации обтекателей не дают полной информации о точности обработки. Наиболее приемлемым является метод исследования точности обработки путем изучения профилограмм, снятых с обработанных поверхностей. С помощью профилограмм можно определить вид и величину погрешности в каждом конкретном месте обрабатываемой поверхности.

На рис.1 представлена разработанная установка, необходимая для контроля отклонений формы поверхности обтекателя в процессе обработки.

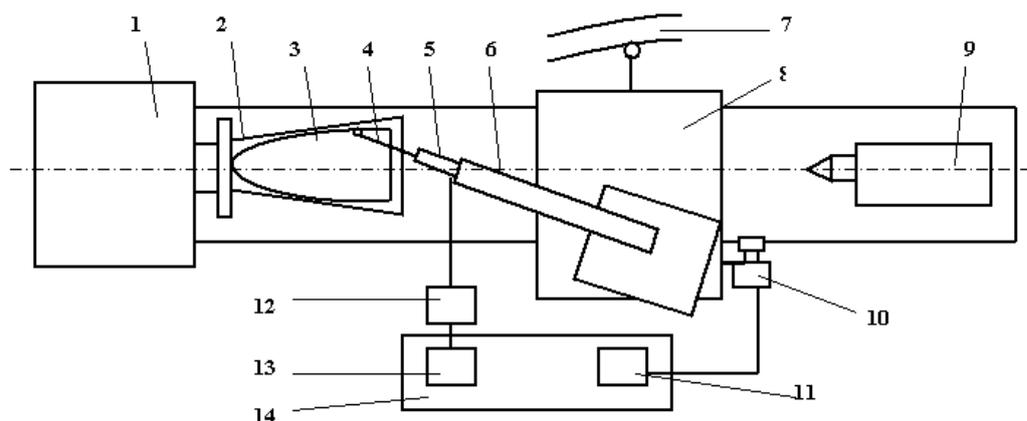


Рис.1. Блок-схема установки: 1 – передняя бабка станка; 2 – барабан; 3 – заготовка; 4 – щуп датчика; 5 – датчик; 6 – шлифовальная головка; 7 – копир; 8 – суппорт; 9 – задняя бабка станка; 10 – преобразователь угловых перемещений ЛИР-137А; 11 – интерфейсная плата; 12 – блок управления БВ-4310; 13 – АЦП; 14 – промышленный компьютер

Метод основан на измерении щупом датчика, при нулевых нагрузках станка, величин отклонений обработанной поверхности при движении самого датчика по копиру (программе).

Измерение отклонений формы производится следующим образом. После механической обработки поверхности заготовки (3) по копиру (программе) (7) на шпиндель шлифовальной головки (6) вместо алмазного круга устанавливается индуктивный датчик прибора БВ-4310 (5) вместе со щупом (4). Индуктивный датчик (5) через блок управления БВ-4310 (12) и плату (13) типа АЦП РСІ-1710 соединен с компьютером (14). Продольное перемещение суппорта (8) отслеживается преобразователем угловых перемещений (10) модели ЛИР-137А через специальную шестерню и рейку станка.

ЛИР-137А электрически связан с компьютером посредством интерфейсной платы (11) типа ЛИР-940-Р (РСІ). Щуп датчика подводится к торцу заготовки обтекателя (3). Настраивается копировальная система с копиром (7) на “нуль”. С помощью продольной подачи щуп с датчиком перемещается по копиру (программе) по неподвижной измеряемой поверхности и измеряет отклонения формы обработанной поверхности от копира (программы). Данные от замеров датчиков блока управления БВ-4310 и продольных перемещений ЛИР-137А передаются в компьютер (передача происходит в режиме реального времени), где они обрабатываются. Величины отклонений выдаются в виде таблиц или графиков.

На рис.2 представлен пример профилограммы внутреннего контура обтекателя, после проведения механической обработки поверхности. Данная профилограмма иллюстрирует зависимость отклонения профиля обрабатываемой поверхности обтекателя (Н, мкм) от продольного перемещения (L, мм).

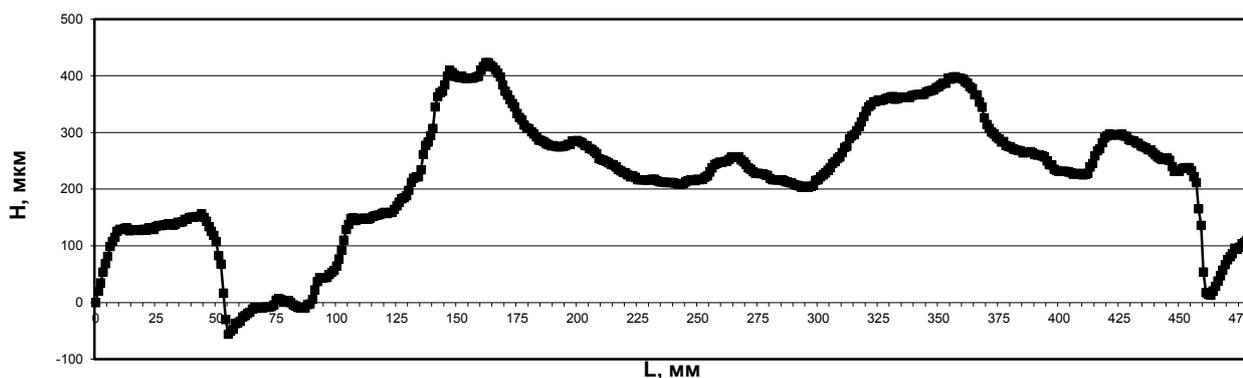


Рис.2. Профилограмма внутреннего контура обтекателя

Следует заметить, что для повышения точности измерений по данному методу к форме и размерам щупа предъявляются высокие требования. В данном случае, при копировальной обработке на станке в расчете координат копира заложен алмазный круг с рабочей радиусной поверхностью  $R$ . Следовательно, у щупа должна быть рабочая поверхность с тем же радиусом  $R$ . Чем меньше отклонение рабочей поверхности щупа от теоретической  $R$  инструмента и точнее статическая настройка системы “копир – копировальное устройство – щуп – заготовка”, тем точнее будут произведены измерения.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ – ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ**

*Б.Л.Красный, В.П.Тарасовский, А.Б.Красный*  
(ЗАО “НТЦ Бакор”, г.Щербинка, МО, Россия)

ЗАО “НТЦ Бакор” в настоящее время является ведущей организацией России по разработке и производству изделий из высокопористой проницаемой керамики для фильтрации растворов, суспензий и расплавов. По ряду изделий, в частности по секторным фильтрующим элементам для вакуумных дисковых фильтровальных установок, предприятие является мировым лидером, осуществляя поставки таких изделий в 17 стран мира. Общий объём производства изделий из пористой проницаемой керамики составляет 200,0 тыс. шт./год.

Среди множества проблем, стоящих перед человечеством, в качестве критических можно назвать две: энергетическая и экологическая. Эти две проблемы тесно взаимосвязаны. Рост энергопотребления, наблюдаемый в России в последние несколько лет, привёл к возрастанию вредного воздействия на окружающую среду. В связи с истощением природных источников энергии (нефть, газ, уголь) необходимо сокращать нерациональное использование энергетических ресурсов. Разработка, организация производства и широкое применение новых материалов взамен традиционно используемых в нашей промышленности должны стать магистральным путём для решения этих задач. Один из таких материалов – керамика со сквозной, проницаемой пористостью.

Создание пористых проницаемых керамических материалов (ППКМ) различной микроструктуры с регулируемым размером пор от нано- до микроразмера, по своим характеристикам намного превосходящим традиционно используемые в нашей промышленности материалы, и организация производства изделий из них уже сегодня позволяет получить потребителю этих материалов большой экономический и экологический эффекты.

Изделия из пористых проницаемых материалов уже нашли или еще могут найти широкое применение в различных технологических этапах производства при: 1 – обезвоживании флотационных концентратов и фильтровании электролитных растворов; 2 – продувке расплавов металлов инертным газом с целью его перемешивания; 3 – фильтрации расплавов черных и

цветных металлов с целью их очистки от примесей; 4 – очистке отходящих горячих дымовых газов от пыли и примесей вредных газов; 5 – флотации, аэрации, озонировании водных систем в мелкопузырчатых системах распределения газов; 6 – пневмотранспорте и перемешивании пылевидных материалов и высокодисперсных порошков; 7 – очистке воды в системах оборотного водоснабжения; 8 – очистке горячих газов от радиоактивной пыли и радиоактивного йода; 9 – очистке пигментов для производства различных красок; 10 – получении концентратов высокочистого кварцевого песка.

Применение фильтрующих элементов из ППКМ для очистки пульп в гидрометаллургическом производстве взамен фильтроэлементов из тканей позволяет увеличить производительность фильтровальных установок в 1,5–2 раза, снизить расход электроэнергии в 10–15 раз, а влажность кека на 2–3%.

Использование фильтрующих элементов из ППКМ для очистки расплавов черных и цветных металлов от твердых примесей включений оксидов, боридов и нитридов уменьшает количество брака при отливке заготовок и их мехобработке на 15–25%, увеличивает выход металла и способствует экономии энергии, повышает производительность литья с единицы площади формы, улучшает свойства и повышает качество металла.

Очистка горячих дымовых газов от пыли без их охлаждения фильтрующими элементами из ППКМ позволяет решить экологическую задачу – предотвратить выброс вредных веществ в атмосферу, а также энергетическую – получить дополнительную электроэнергию при подаче горячих очищенных дымовых газов в газотурбинную установку или паровую турбину, т.е. вернуть часть энергии сгоревшего топлива, которая раньше терялась безвозвратно.

Применение изделий из ППКМ в мелкопузырчатых системах при флотации, аэрации или озонировании водных систем позволяет получить на 10% больший коэффициент использования кислорода и снизить расход электроэнергии на 15–20%.

## **ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ИЗОЛЯЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*Г.Р.Арутюнян, Л.А.Пляскина, Е.М.Кашкарова, В.П.Павлова*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Одной из задач при проектировании систем космических летательных аппаратов, авиационных двигателей и другой техники является расчет толщины слоя тепловой изоляции для защиты корпуса аппаратов от высоких температур и уменьшения потерь тепла в окружающую среду.

В литературе [1] приведены номограммы для определения толщины слоя каолиновой и базальтовой теплоизоляции для плоской стенки. Представляет практический интерес получение номограммы для определения толщины слоя изоляции цилиндрических поверхностей, когда значения удельных тепловых потоков через слой изоляции в радиальном направлении непостоянны.

Ранее [2], используя уравнение температурной кривой относительно наружной поверхности тепловой изоляции [3] и с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры  $\lambda = \lambda_0(1 + bt)$ , нами была получена следующая формула для расчета толщины слоя изоляции:

$$\lg \frac{d_2}{d_1} = \frac{\left(\frac{1}{b} + t_1\right)^2 - \left(\frac{1}{b} + t_2\right)^2}{2,3d_2 \cdot q_2} \cdot b \cdot \lambda_0, \quad (1)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно внутренний и внешний диаметры изоляции, м;

$t_1$  и  $t_2$  – соответственно температуры горячей и холодной сторон изоляции, °С;

$\lambda_0$  и  $b$  – постоянные величины для каждого теплоизоляционного материала;

$q_2$  – удельные потери тепла в окружающую среду, Вт/м<sup>2</sup>.

$$q_2 = \alpha(t_2 - t_n). \quad (2)$$

Для приближенного расчета удельных тепловых потерь аппаратов, находящихся в закрытых помещениях при температуре поверхности аппарата, не превышающей 150°C, величина  $\alpha$  может быть определена из следующей эмпирической формулы, приведенной в литературе [4]:

$$\alpha = 9,74 + 0,07(t_2 - t_n), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К);  $t_n$  – температура помещения, °С.

Формулы (1)–(3) дают возможность при известных значениях  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_n$ ,  $d_1$ ,  $b$ , и  $\lambda_o$  определить значения наружного диаметра тепловой изоляции  $d_2$  и, следовательно, толщину слоя изоляции  $h = (d_2 - d_1)/2$ . В связи с тем, что в уравнении (1)  $d_2$  находится в обеих частях, причем в левой части под знаком логарифма, то расчет  $d_2$  проводится методом последовательных приближений, задаваясь значениями  $d_2$ , до удовлетворения равенства между его обеими частями.

Результаты расчета толщины слоя тепловой изоляции цилиндрической поверхности диаметром  $d_1 = 200$  мм по приведенной выше методике при  $t_n = 25^\circ\text{C}$ ,  $b = 2,6 \cdot 10^{-3}$  и  $\lambda_o = 0,048$  представлены на рисунке в виде зависимостей от температуры холодной и горячей сторон изоляции (номограмма).

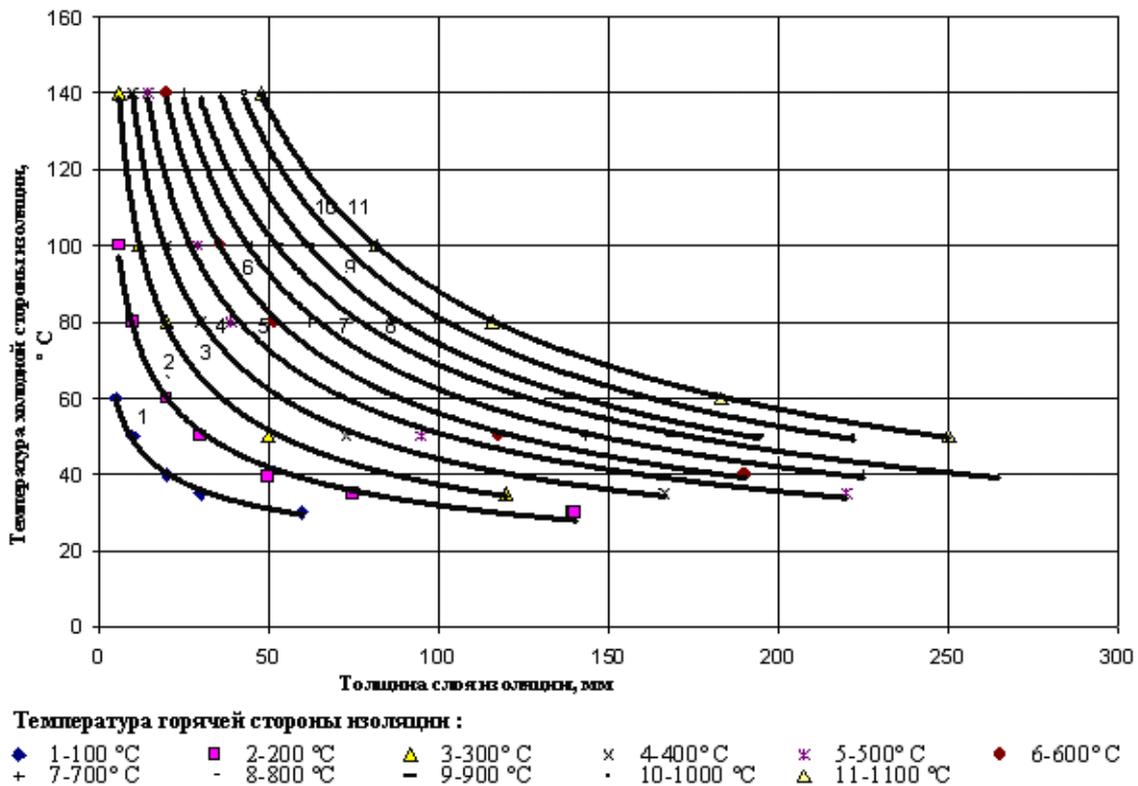


Рис. Номограмма для определения толщины слоя изоляции цилиндрической поверхности в зависимости от температур холодной и горячей сторон изоляции

Расчеты  $h$  при различных значениях  $d_1$  показали, что толщина слоя изоляции при заданных значениях  $t_1$  и  $t_2$  растет с ростом  $d_1$ , причем наибольший рост толщины слоя изоляции (более чем в два раза) происходит до значения внутреннего диаметра  $d_1$  1000 мм. При дальнейшем увеличении значения  $d_1$  от 1000 до 4000 мм рост необходимой толщины слоя изоляции не превышает 12 %. Такое поведение зависимости  $h$  от  $d_1$  связано с тем, что при малых диаметрах даже незначительное увеличение толщины слоя изоляции приводит к существенному росту поверхности теплоотдачи и, следовательно, к росту тепловых потерь, в то время как при больших диаметрах рост толщины слоя изоляции существенного влияния на поверхность теплоотдачи не оказывает.

## Литература

1. Шабуров Т.А., Итяксов Н.Н., Трепалин С.В. Изоляционные материалы, производимые ООО “НПФ ”Изомат” для применения в термическом оборудовании// Огнеупоры и техническая керамика. 2003. №3.
2. Аругюнян Г.Р., Яковенко Е.И., Пляскина Л.А. Волокнистые теплоизоляционные материалы и методика расчета толщины слоя изоляции: сб. тез. докл. XVI научно-техн. конф. Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. Ч.2. – Обнинск, 2001.– С.150–151.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи.– М.:Энергия.– 1973.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии.– Л.:Химия.– 1981.

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ КАПИТАЛ КАК ФАКТОР АКТИВИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С НАУКОЕМКИМ ПРОИЗВОДСТВОМ**

*О.В.Александрова* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В условиях “Новой экономики” инновации и инновационная деятельность являются важнейшим элементом приобретения и сохранения конкурентных преимуществ. Наличие инноваций обеспечивает стратегическое преимущество предприятию в современных условиях быстроменяющейся деловой среды и жесткой конкуренции среди производителей. Новые знания превращаются в главный компонент потребительской ценности. При этом человек рассматривается как форма существования интеллектуального капитала. На предприятиях с наукоемким производством акцент должен переноситься на оптимальное использование интеллектуального потенциала индивидуума. Для анализа состояния отечественной инновационной промышленности проведено исследование показателей деятельности инновационных предприятий. Для этой цели автором в 2005 – 2006 годах методом анкетного опроса исследовано 32 промышленных инновационных предприятия, выполняющие научные исследования и разработки в области технических и (или) естественных наук. В ходе данного исследования выяснилось, что в отношении наличия, структуры и качества персонала для инновационных предприятий характерны следующие особенности. На подавляющем числе предприятий (59 %) показатель доли исследователей в общей численности научного персонала находится в диапазоне от 40 до 60 % (рис.). На 19 % предприятий доля исследователей составляет свыше 60 %. Значение данного показателя в интервале менее 20 % имеют лишь 6 % опрошенных предприятий.

Доля техников в численности научного персонала на большинстве предприятий (69 %) не превышает 20 %. Доля вспомогательного персонала в основном не более 40 %, однако у 3 % предприятий этот показатель находится в диапазоне от 40 до 60 %, и у 3 % предприятий он выше 60 %.

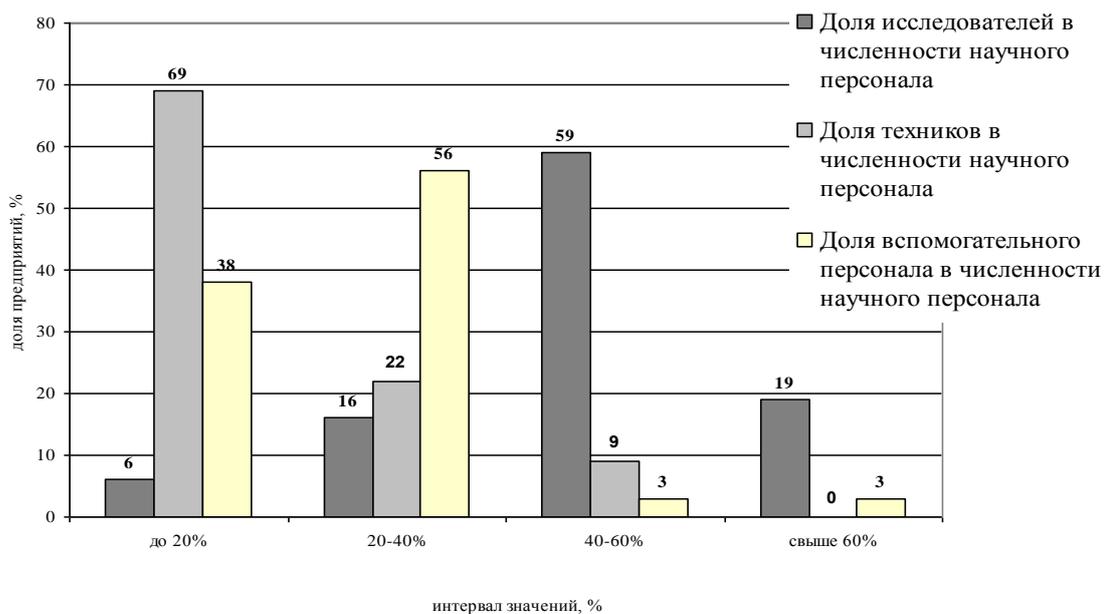


Рис. Структура персонала, занятого исследованиями и разработками

Как показал опрос, доля докторов наук в численности научного персонала на большинстве предприятий (56 %) не превышает 1 %, а на 16 % предприятий вообще нет работников с такой ученой степенью. Доля кандидатов наук несколько выше – на 47 % предприятий этот показатель находится в диапазоне от 1 до 3 %, а на 34 % предприятий он выше 3 %. На большинстве предприятий (47 %) нет аспирантов, докторантов и соискателей, т.е. полностью отсутствует подготовка кадров высшей квалификации. Только на 3 % предприятий этот показатель выше 3 %.

Коэффициент персонала, занятого в НИР и ОКР, характеризует профессионально-кадровый состав предприятия. Он показывает долю персонала, занимающегося непосредственно разработкой новой продукции и технологий, производственным и инженерным проектированием, другими видами технологической подготовки производства для выпуска новых продуктов или внедрения новых услуг, по отношению к среднесписочному составу всех постоянных и временных работников, числящихся на предприятии. Данный коэффициент определяется по формуле

$$K_{\text{пр}} = \frac{П_{\text{н}}}{Ч_{\text{р}}},$$

где  $П_{\text{н}}$  – число занятых в сфере НИР и ОКР, чел.;

$Ч_{\text{р}}$  – средняя численность работников предприятия, чел.

Подавляющее число предприятий (63 %) имеют значение коэффициента персонала, занятого в НИР и ОКР в диапазоне от 0,2 до 0,6. Доля предприятий, у которых значение данного коэффициента находится в диапазоне 0,6 – 0,9, составляет 16 %, более того, среди опрошенных есть предприятия (6 %), у которых этот коэффициент выше 0,9. Лишь у 16 % предприятий коэффициент персонала, занятого в НИР и ОКР, менее 0,2. Таким образом, большая часть исследованных предприятий имеют в своем составе сравнительно большую долю персонала, способного разрабатывать улучшающие и новые технологии.

В ходе исследования методом расчета линейного коэффициента корреляции ( $r$ ) была выявлена умеренная прямая связь между численностью научного персонала и годовым объемом выручки предприятия ( $r = 0,61$ ). Связь между численностью научного персонала и количеством поданных заявок на получение патентов на изобретения так же умеренная ( $r = 0,62$ ). А вот связь между численностью научного персонала и количеством действующих патентов на изобретения слабая ( $r = 0,47$ ).

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что для предприятий, производящих наукоемкую, высокотехнологичную продукцию, наличие квалифицированного научного персонала – один из важнейших факторов, определяющих восприимчивость экономического

субъекта к базисным и улучшающим инновациям. Без кадрово-профессиональных ресурсов невозможно осуществлять разработку и реализацию новых технологий. Инновационному предприятию необходим персонал, заинтересованный в инновациях и обладающий специальным образованием и опытом работы. Важно уделять особое внимание подготовке научных кадров высшей квалификации и обеспечивать преемственность поколений. В условиях перехода к “Новой экономике” предприятиям с наукоемким производством необходимо акцентировать внимание на формировании интеллектуального капитала как комплексной системы взаимодействующих элементов: человеческих активов, профессионального уровня, квалификации работников, новых знаний, а также объектов интеллектуальной собственности, что позволит активизировать инновационные процессы на предприятии и серьезным образом повысить его конкурентоспособность.

# СТЕКЛООБРАЗНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННОГО ОСТЕКЛЕНИЯ

*В.И.Самсонов, А.Н.Ромакин, О.Ф.Просовский*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Эффективность функционирования и летно-технические характеристики современных самолетов во многом зависят от технического уровня применяемого для них остекления, которое на сегодняшний день не в полной мере отвечает необходимым требованиям.

Существующие конструкции остекления гражданской и военной авиации в основном представляют собой моноблоки из силикатного или органического стекла. Силикатное остекление при высокой абразивостойкости и прочности имеет большой вес, что вызывает дополнительный расход топлива. Органические стекла значительно легче силикатных, но имеют меньший ресурс из-за низкой абразивостойкости и склонности к “серебрению” (возникновению поверхностных микротрещин под воздействием внешних факторов).

В боевых самолетах и вертолетах, остекление которых выполнено в основном из органического стекла, летный персонал подвергается мощному воздействию электромагнитного излучения, превышающему допустимые санитарные нормы, остекление не обеспечивает защиту от проникновения тепловой составляющей солнечной радиации. В сложных метеоусловиях (пасмурная, дождливая погода) на стекле может возникать двоение изображения, мешающее оперативной и точной ориентации самолета относительно взлетно-посадочной полосы в процессе посадки.

Выполнение комплекса требований привело к необходимости создания новых композиций авиационного остекления:

- остекление со специальными многофункциональными покрытиями, обеспечивающими защиту экипажа от воздействия внешних факторов;
- гетерогенное (органосиликатное) электрообогреваемое остекление с низкими весовыми характеристиками и высокой стойкостью к воздействию внешних факторов;
- птицестойкие облегченные электрообогреваемые триплексы из органического стекла для вертолетного остекления.

В ФГУП “ОНПП “Технология” активно ведутся работы во всех трех вышеперечисленных направлениях.

В настоящее время созданы композиции тонкопленочных наноразмерных металлооптических и кремнийорганических многофункциональных покрытий, создан специальный участок с вакуумной техникой и чистым помещением, разработана технология нанесения покрытий. Начата серийная поставка изделий остекления с покрытиями на боевые самолеты типа МиГ-29К/КУБ, Су-35, Су-30МКМ.

В части органосиликатных и органоорганических триплексов ведутся НИР и НИОКР для самолетов типа Т-50, вертолетов “Ансат”, Ка-62 и др.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВОЕ СТЕКЛО

*М.А.Семин, Е.А.Кулабухова* (РХТУ им. Д.И.Менделеева, Москва, Россия),  
*Н.В.Петровых* (НИИЭС, Москва, Россия)

Развитие физики элементарных частиц, ядерной физики и астрофизики невозможно без создания новых детекторов для регистрации конечных состояний в различных типах взаимодействий элементарных частиц и ядер.

Чрезвычайно важным при больших площадях измерительных элементов детекторов является вопрос конструктивной простоты и невысокой стоимости системы. Использование для этих целей сцинтилляционных счетчиков затруднено из-за сильных магнитных полей и высокой стоимости такой системы. Следовательно, наиболее перспективным представляется применение многоазорной резистивной плоской камеры (МРПК). В качестве материала для МРПК могут быть использованы полупроводниковые стекла.

К свойствам стекла предъявляется ряд требований:

- удельное сопротивление должно находиться в интервале  $10^8 - 10^9$  Ом·см;
- стекло должно выдерживать действие электрического поля напряжением 6000 В в течение длительного времени, не разрушаясь и не изменяя своих свойств;
- стекло должно быть однородным, т.е. не содержать свилей, пузырей, непроваров и т.д.

С целью достижения требуемых параметров было исследовано боросиликатное стекло с  $\Sigma$  ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ) = 26,1 % вес.

Стекло синтезируется из традиционных материалов, а именно, солей и оксидов входящих в его состав компонентов при температуре 1300 – 1400°C. Стекло вырабатывается путем отливки. Отжиг осуществляется при температуре 580 – 600°C в течение 40 мин.

Описываемое стекло имеет следующие физико-химические свойства:

- удельное электросопротивление при 20°C  $(3 - 5) \cdot 10^8 - (1 - 3,25)10^9$  Ом·см;
- коэффициент термического расширения  $(85 - 97) \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>;
- температуру размягчения 570 – 600°C;
- микротвердость 5400 – 6000 МПа;
- плотность 4400 – 4500 кг/см<sup>3</sup>;
- кристаллизации стекла при данном температурно-временном режиме отжига не наблюдается;
- стекло хорошо подвергается обработке на шлифовальном круге;
- химическая устойчивость соответствует 3 гидrolитическому классу.

Весьма перспективным представляется конструктивное исполнение электрода МРПК в виде металлической подложки с напыленным стеклянным слоем. Такое исполнение электрода значительно снижает стоимость всей МРПК.

## **СИНТЕЗ СИТАЛЛОВ С КОМПЛЕКСОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, ТЕРМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В БЕСЩЕЛОЧНОЙ МАГНИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СИСТЕМЕ**

*Л.А.Алексеева, Р.П.Келина* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Среди обширного класса стеклокристаллических материалов большой интерес для материаловедов и конструкторов представляют кордиеритовые ситаллы, характеризующиеся низкими диэлектрическими потерями, стабильной диэлектрической постоянной и высокой механической прочностью.

Однако стеклам этой системы свойственна высокая агрессивность по отношению к огнеупорам, расслоение на стадиях формования и отжига и сложные фазовые превращения в процессе термообработки, что создает определенные трудности в технологии их производства.

Настоящие исследования посвящены синтезу ситаллов с кордиеритом в качестве основной кристаллической фазы с целью научно-технического задела перспективных стеклокристаллических материалов радиотехнического назначения.

В качестве наиболее эффективного катализатора был выбран оксид титана. Немаловажное значение имеет тот факт, что  $\text{TiO}_2$  характеризуется отрицательным температурным коэффициентом  $\epsilon$ , что способствует повышению термостабильности ситалла.

Были проведены исследования:

– по синтезу ситаллообразующего магнийалюмосиликатного стекла с различными модификаторами. Установлено, что наиболее благоприятное действие на технологические свойства оказывают добавки оксидов цинка, церия и фторопола, в состав которого входят окислы редкоземельных металлов;

– по стеклоустойчивости материалов стекловаренных сосудов. Наибольшей устойчивостью к расплавам исследуемых стекол обладает электроплавленный корунд, наименьшей – шамот;

– по закономерностям формирования мелкодисперсной структуры и выпадения кристаллических фаз в зависимости от температурно-временных условий термообработки. Установлены температурно-временные параметры ситаллизации.

Стекла магнийалюмосиликатной системы характеризуются многофазностью в процессе термообработки, что приводит к растрескиванию из-за напряжений, возникающих при твердофазных реакциях перекристаллизации, проходящих с изменением ТКЛР и плотности.

В качестве основных кристаллических фаз присутствуют кордиерит и рутил, сопутствующих – индиалит, силлиманит и алюмотитанаты магния.

В результате исследований получены опытные образцы радиопрозрачных стеклокристаллических материалов с высокой термостабильностью диэлектрических параметров (в температурном интервале 20 – 1200°C) и следующими свойствами:

|   |   |
|---|---|
| – $\epsilon$ при 20°C и частоте $10^{10}$ Гц          | – 6,5 – 8,0;                              |
| – $\text{tg } \delta$ при 20°C и частоте $10^{10}$ Гц | – $8 - 20 \cdot 10^{-4}$ ;                |
| – механическая прочность при изгибе                   | – 120 – 200 МПа;                          |
| – ТКЛР 20-300°C                                       | – $(5-15) \cdot 10^{-7}, \text{K}^{-1}$ . |

## **К ВОПРОСУ ОБ ИОНООБМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ЛИТИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОГО СОСТАВА**

*Л.А.Трушкова* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Проведены исследования по обработке стеклокерамического материала в расплавах солей щелочных металлов:  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ , 20%  $\text{K}_2\text{SO}_4$  + 80%  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ , 85%  $\text{NaNO}_3$  + 15%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Отмечен различный характер влияния солевого расплава, температуры и времени обработки в расплаве на качество поверхности. Определена величина предела прочности при статическом изгибе на образцах, обработанных в различных солях, проведен расчет по определению величины остаточных напряжений сжатия на поверхности образца.

Получены эпюры напряжений сжатия по глубине сжатого слоя и приведена сравнительная эпюра напряжений для ситалла, полученного по стекольной технологии и обработанного в расплаве соли  $\text{NaNO}_3$ .

Даны рекомендации по получению стеклокерамического материала.

## **К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛИКАТНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ**

*А.Н.Ромакин* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Технические требования по обеспечению надежности и безопасности изделий конструкционной оптики (ИКО) при одновременном снижении удельных весовых характеристик приводят к необходимости поиска оптимальных композиций ИКО на основе силикатных и органических стекол. В связи с этим сравнение прочностных характеристик силикатного и органического стекла является актуальной задачей, однако в настоящее время единой методики оценки прочностных свойств этих стекол не существует.

В работе проанализированы существующие методики определения прочностных характеристик силикатных и органических стекол, методы упрочнения стекол, приведены значения достигаемой прочности для исходных и упрочненных стекол. Отмечены особенности деформационных свойств органического стекла.

Для оценки прочностных характеристик силикатных и органических стекол предложен метод испытания по схеме центрального изгиба. На разрывной машине ИР5047-50 получены экспериментальные данные для исходных и упрочненных стекол в температурном диапазоне их эксплуатации.

Проведен сравнительный анализ полученных прочностных характеристик силикатных и органических стекол с помощью различных критериев. В качестве единого критерия оценки прочностных характеристик предлагается использовать работу разрушения, отнесенную к единице объема стекла. С помощью этого критерия можно также проводить сравнительный анализ данных, полученных при статических испытаниях по схеме центрального изгиба и при динамических испытаниях методом падающего шара.

## **ПРОБЛЕМЫ ШЛИКЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ СТЕКЛА**

*М.А.Семин, А.А.Егоров, Н.Н.Козлова*  
(РХТУ им.Д.И.Менделеева, г.Москва, Россия)

Данная работа посвящена изучению реологических свойств шликерной суспензии, используемой для получения высокопористых ячеистых материалов из Al–B–Si стекла. Были определены свойства стекла и ВПЯМ; затронут вопрос о проблемах, возникающих на стадии подготовки шликера.

Разработка высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ) на основе стекла в настоящее время является актуальным направлением развития низкотемпературной химической технологии (хроматография, массообмен, носители катализаторов), так как повышенный спрос на данные материалы обуславливается очевидным снижением их себестоимости по отношению к подобным керамическим материалам.

Для производства ВПЯМ выбрано алюмоборосиликатное стекло со следующими свойствами: КТЛР  $80 - 85 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ ;  $T_g = 600 - 620^\circ\text{C}$ ; плотность  $2,3 - 2,4 \text{ г/см}^3$ .

Сущность получения ВПЯМ заключается в нанесении слоя стекла алюмоборосиликатного состава в виде шликерной массы на поверхность органической структурообразующей матрицы с последующим спеканием этого слоя и удалением матрицы путем термодеструкции. Преимуществом такого способа является возможность получения образцов предположительно любой конфигурации.

Синтез стекла проводился в газовой печи при  $1480 - 1520^\circ\text{C}$ . Полученный гранулят измельчали мокрым способом в шаровой мельнице в порошок до размера частиц  $<20 \text{ мкм}$ . Далее готовили шликерную суспензию, состоящую из порошка стекла определенной дисперсности и поливинилового спирта, для пропитки пенополиуретановой заготовки.

Свойства шликера:

При получении высокопористых ячеистых материалов из стекла методом дублирования полимерной матрицы [1] использовали шликерную технологию нанесения материала на полимерную заготовку. В состав суспензии входят порошок стекла (именуемый дисперсной фазой) и поливиниловый спирт (дисперсионная среда). Согласно требованиям к таким системам [2] шликер должен быть тиксотропным, т.е. вязкость его в спокойном состоянии должна превышать таковую при встряхивании. Известно, что для получения тиксотропной системы размер частиц не должен превышать  $5 \text{ мкм}$  [3], однако при исследовании полидисперсной

системы порошка стекла со средним размером частиц 12–14 мкм также наблюдали образование тиксотропного шликера. Это подтверждает нижеприведенная графическая зависимость.

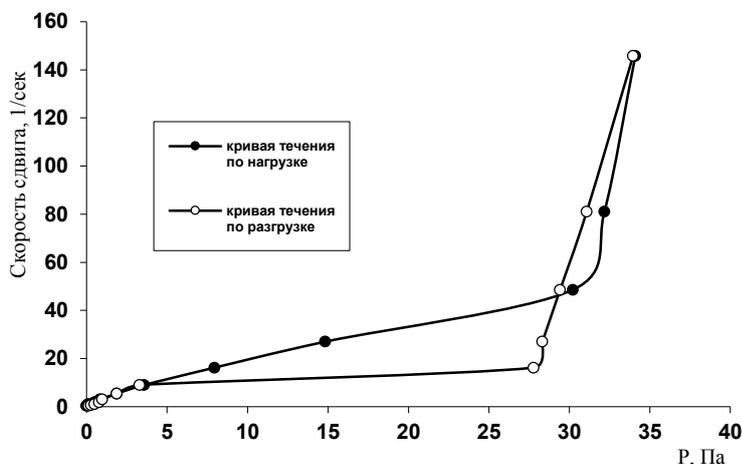


Рис. 1. Зависимость скорости сдвига от напряжения сдвига

Расстояние между двумя кривыми по оси напряжений, или площадь петли, характеризует степень тиксотропности.

Для данной системы осуществлялся подбор оптимального соотношения дисперсной фазы и дисперсионной среды ( $\tau/\eta = 2,2 - 2,4$ ).

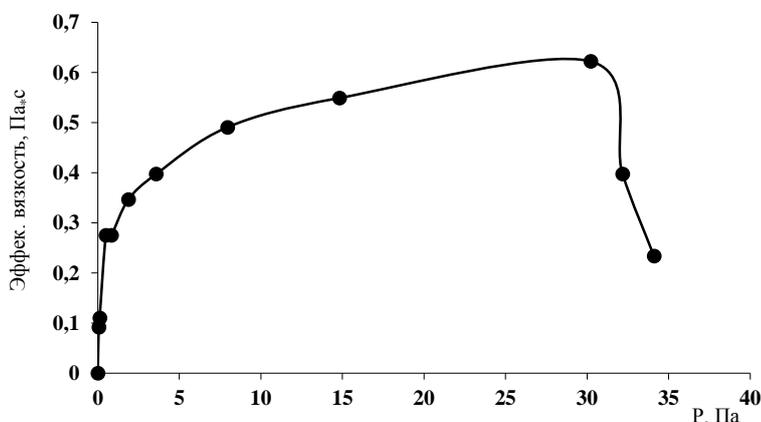


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости от напряжения сдвига

Увеличение вязкости при нарастании напряжения говорит о дилатантной жидкости, однако резкое её снижение свидетельствует о переходе системы в псевдопластическую [4]. Такое поведение кривой, видимо, связано с полидисперсностью системы и с взаимодействием компонентов шликера при длительном контакте, с образованием сложного эфира, который выпадает в качестве сгустка.

По результатам исследования реологических свойств определили:

– минимальное допустимое значение предельного напряжения сдвига тиксотропной суспензии – 25–33 Па;

– оптимальное значение пластической вязкости – 0,25–0,5 Па·с.

Свойства ВПЯМ из стекла Al–B–Si состава:

- пористость – 70–83%;
- водоустойчивость – 0,7% потери массы при кипячении;
- кислотоустойчивость (при выдержке в течение 24 часов) в конц. HCl – 1,16 %, в конц. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 1,65 %;
- термоустойчивость – не ниже 600°C;
- механическая прочность (предел прочности при сжатии) – 0,5–0,8 МПа;
- объемная усадка – 7–8%.

#### Литература

1. Анциферов В.Н., Беклемышев А.М. и др. Проблемы порошкового материаловедения. Ч.2. Высокпористые проницаемые материалы. – Екатеринбург: Уро РАН, 2002. – 262 с.
2. Патент 4803025 США. МКИ<sup>4</sup> С 04 В 35/00, С 04 В 35/10. Ceramic foam/ J.W. Brockmeyer; Swiss Aluminium Ltd. Оpubл. 07.02.89.
3. Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.В. Реология тиксотропных систем. – Киев: Наук.Думка, 1972. – 120 с.
4. Фролов Ю.Г. Поверхностные явления и дисперсные системы. Курс коллоидной химии. – М.: Альянс, 2004. – 464 с.

### **РАЗРАБОТКА СОСТАВА ТЕРМОСТОЙКОГО ЖЕЛТОГО СТЕКЛА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЛИНЗОВОГО ТИПА**

*А.М.Каплунова, Н.В.Глазкова, Р.П.Келина*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Проведены исследования по синтезу термостойкого селенокадмиевого желтого стекла с заданными светотехническими характеристиками для изделий линзового типа.

Исследован широкий круг факторов, влияющих на спектральное пропускание стекла (концентрация стеклообразующих оксидов, условия синтеза, концентрация красящих комплексов, ускорители варки). Установлено, что интенсивность окраски стекла молекулярными красителями CdS·CdSe возрастает при введении в матрицу углекислого кадмия. Определены оптимальные концентрации красящих соединений, обеспечивающих требуемые светотехнические характеристики.

Установлена связь между содержанием оксида натрия в стекле и выработочными свойствами и показано, что заменой калия на натрий можно повысить выход годных изделий.

Изучены особенности условий варки, влияющие на улетучивание красителей (температура и время загрузок шихты, температура и продолжительность осветления, скорость снижения температуры).

Установлено, что сокращение времени на стадии силикато- и стеклообразования также приводит к снижению улетучивания селена и серы и стабилизирует светотехнические характеристики.

Отработаны температурно-временные параметры варки стекла в горшковой печи (длительность осветления, режимы бурления, атмосфера печи и т.д.)

Разработан новый состав желтого стекла, отвечающий требованиям, предъявляемым к светотехническим изделиям для аэродромных комплексов.

## **ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СИНЕ-ЗЕЛЕННОГО СТЕКЛА, ОКРАШЕННОГО МЕДЬЮ, В АЛЮМОБОРОСИЛИКАТНОЙ И АЛЮМОСИЛИКОФOSФАТНОЙ СИСТЕМАХ**

*А.М.Каплунова* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Проведены исследования по получению синие-зеленого стекла с заданным светопропусканием и координатами цветности в термостойкой алюмоборосиликатной и алюмосиликофосфатной системах.

Показано, что требуемые светотехнические параметры достигаются в силикатной матрице, содержащей не более 7 мас.% оксида бора и не более 15 мас.% оксида алюминия. В фосфатной системе содержание оксида алюминия может достигать 13–17 мас.%, при этом коэффициент светопропускания составляет  $\tau \geq 24$  %, а координаты цветности соответствуют цветовому графику.

Изучено влияние концентрации красителей (медь-хром и медь-церий) на спектр пропускания силикатного и фосфатного стекол. Найдено оптимальное соотношение красителей  $\text{CuO/Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO/CeO}_2$ , обеспечивающее высокий коэффициент пропускания стекла (не менее 20 %).

Изучено влияние стеклообразователей ( $\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и модификаторов на спектральные характеристики выбранных стекол и их кристаллизационную способность.

Рассмотрены закономерности изменения спектральных характеристик от условий синтеза и основности матрицы стекла.

Проведена работа по повышению термостойкости выбранной алюмоборосиликатной системы с помощью метода ионного обмена. Предложены температурно-временные режимы ионно-обменного упрочнения.

Даны рекомендации по получению цветных стекол, окрашенных ионными красителями, в силикатной и фосфатной системах с высоким содержанием тугоплавких оксидов.

## **ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СТЕКЛЯННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*В.К.Сысоев, П.А.Вятлев, А.В.Захарченко, Ю.Н.Булкин*  
(ФГУП “НПО им.С.А.Лавочкина”, г.Химки, МО, Россия)

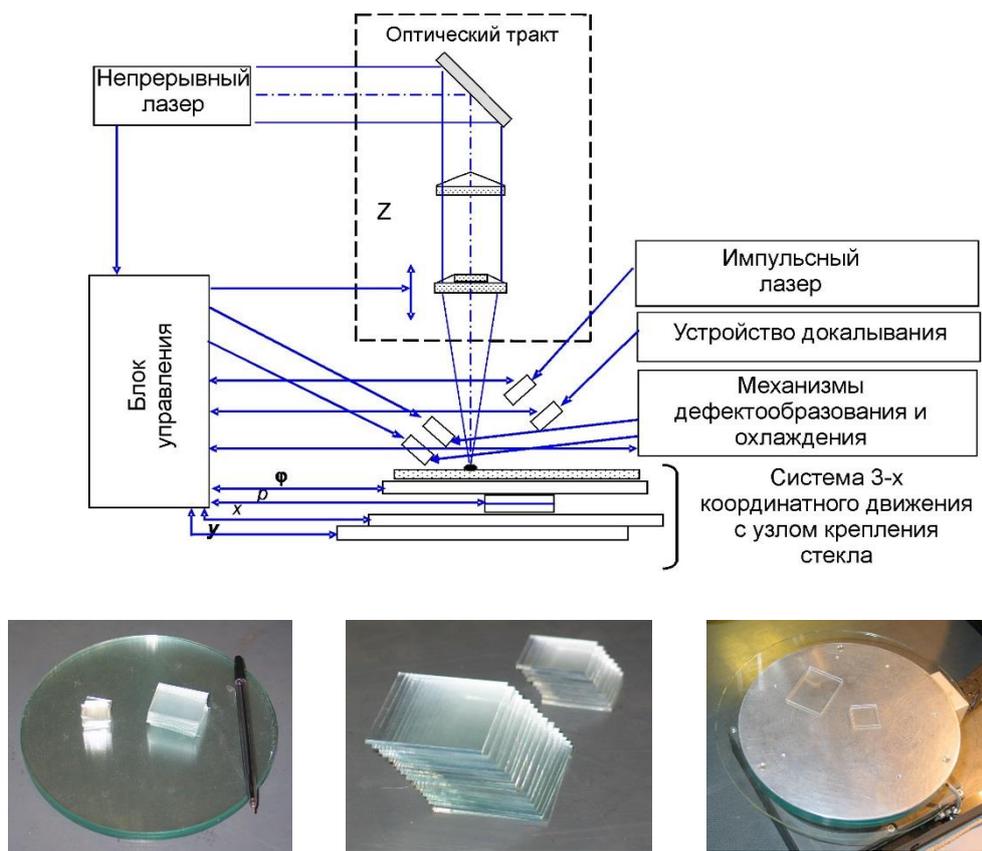
Метод управляемого лазерного термораскалывания – один из наиболее перспективных методов в обработке стекла.

К преимуществам указанного метода деления следует отнести: высокую точность при размерной обработке; наиболее низкую энергоемкость процесса по сравнению с известными способами резки; высокую чистоту процесса, основанную на безотходности процесса деления; нулевую ширину реза; повышение в несколько раз механической прочности получаемых изделий по сравнению с другими традиционными способами резки.

Существующие технологии основаны на применении излучения  $\text{CO}_2$  (10,6 мкм) и Nd (1,06 мкм) лазеров и позволяют проводить термораскалывание как очень тонких стекол (менее 50 мкм), так и очень толстых (более 20 мм).

Метод лазерного термораскалывания обеспечивает эффективную прецизионную резку многих материалов: стекло; кварц; сапфир.

Рис.1. Схема установки для управляемого лазерного



термораскальвания стекла, фото образцов

Авторами развит ряд способов повышения качества технологии лазерного термораскальвания. Они основаны на применении: новых типов лазеров (оптимизированных под спектр пропускания стекла); дулучевых схем (два типа различных лазеров: оптимизированные для линейного входа управляемой трещины в стеклянные образцы и для сквозного разделения стекла); специальной оптики; технологических режимов, обеспечивающих высокое качество изделий с большой скоростью обработки.

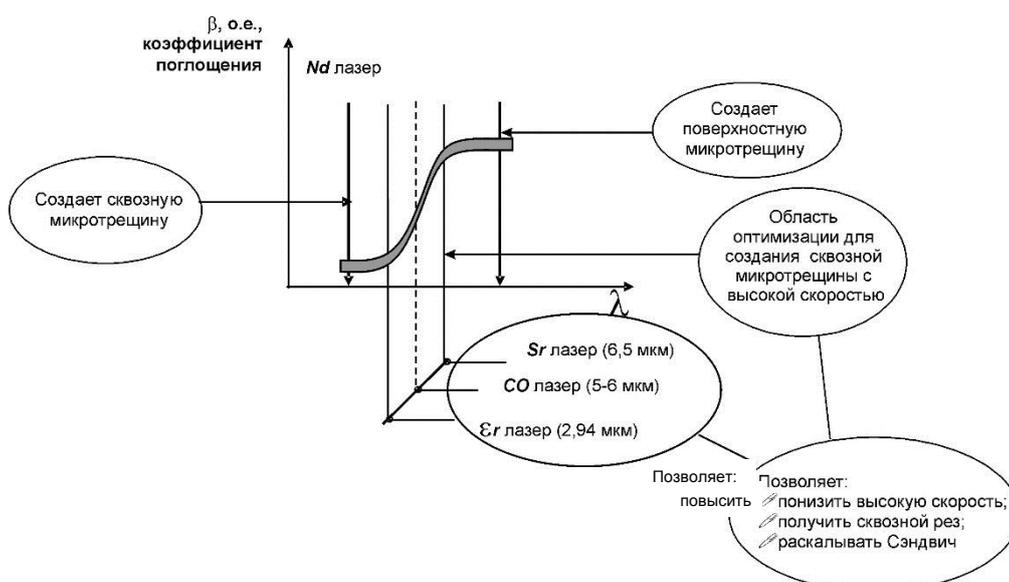
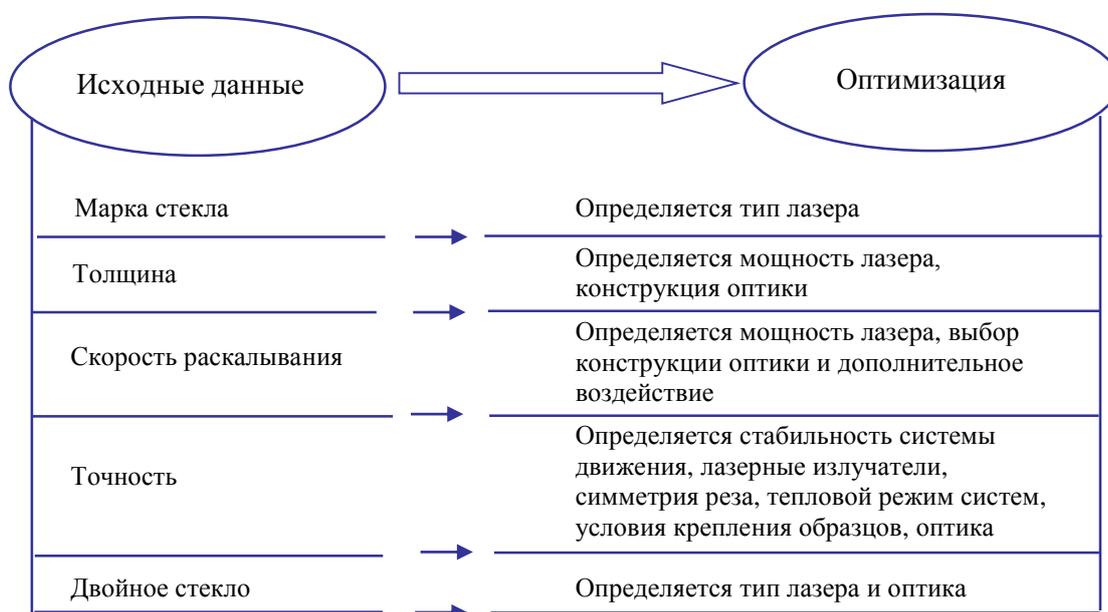


Рис.2. Применение оптимального по спектру излучения лазера

Внедрение в промышленность этих методов требует проведения работ по оптимизации этой технологии как для каждого типа стекла, так и для различных типов изделий.

#### Методика обеспечения оптимального режима управляемого лазерного термораскалывания стекол



#### Литература

1. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. – М.: Радио и связь, 1979. – 136 с.
2. Sysoev V.K., Zakharchenko A.V., Vyatlev P.A., Papchenko B.P. Increasing the efficiency of controllable laser thermal cleavage of insulating materials // J. Opt. Technol. 2004. V.71, № 2. PP. 117–120.
3. Юдин С. Сенсорные экраны. // СНР. 2004. № 6. С. 68–71.

### ЛАЗЕРНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ШТРИХ-ГРАВИРОВКА ОКСИДНЫХ СТЕКОЛ

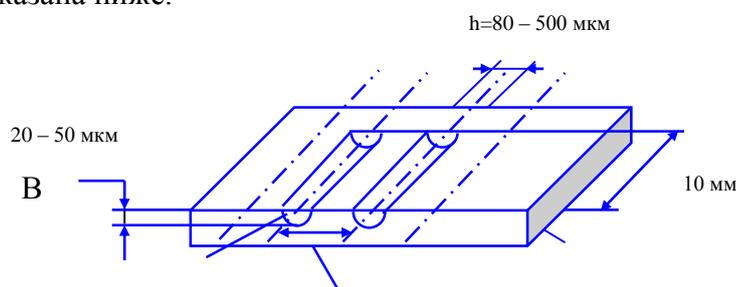
**В.К.Сысоев, П.А.Вятлев, А.В.Захарченко**

(ФГУП “НПО им.С.А.Лавочкина”, г.Химки, МО, Россия),

**В.Н.Сигаев** (РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Целью работы является описание поверхностной гравировки оксидных стекол лазерным излучением различного спектрального диапазона и длительности импульсов для изготовления элементов сенсорных дисплеев с поверхностными акустическими волнами.

В качестве объекта обработки лазерной технологии штрих-гравировки служила схема, которая показана ниже.



N штук

L=0,5-1,5мм

Боросиликатное  
стекло

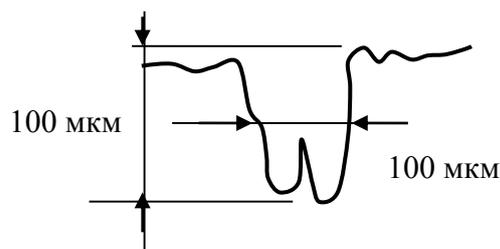
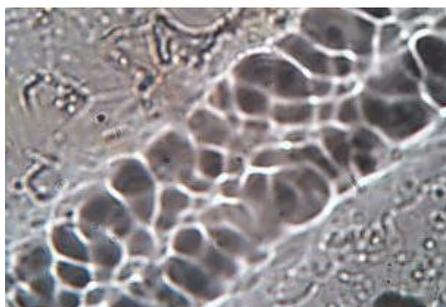
### Схема изделия

Формирование штрих-канавок в стекле можно выполнить двумя приемами: последовательностью сверления ряда отверстий с помощью импульсного лазерного излучения (испарительно-абляционные процессы); скрайбированием полосок стекла с помощью непрерывного лазерного излучения (термомеханический процесс).

Для импульсной обработки использовались следующие типы лазеров:

| № | Тип             | Длина волны излучения, мкм | Энергия импульса, Дж | Длительность импульса, мксек | Частота повторения импульсов |
|---|-----------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | Nd              | 1,06                       | ~ 0,1                | 0,1                          | 1000                         |
| 2 | er              | 2,94                       | 1                    | 250                          | 3                            |
| 3 | CO <sub>2</sub> | 10,6                       | 0,001                | 1                            | 10000                        |

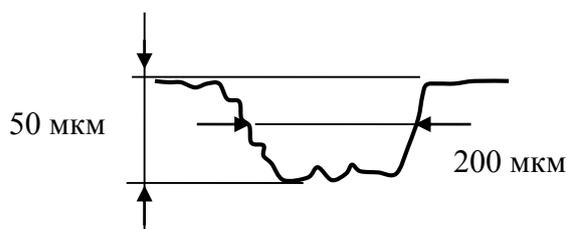
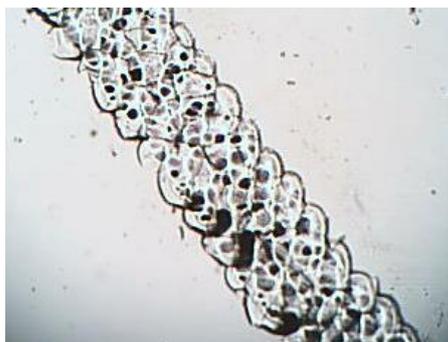
Так, излучение Nd лазера мало поглощается стеклом. Оно покрывалось поглощающей краской. Эта краска, поглощая излучение Nd лазера, нагревала стеклянную подложку до абляции стекла, образуя, таким образом, штрих-канавку, как показано ниже.



### Штрих-канавки в стекле, полученные излучением Nd лазера

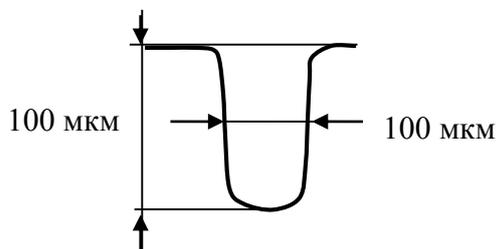
Излучение er лазера значительно поглощается стеклом. Взаимодействие излучения этого лазера со стеклом из-за длительности импульса несет смесь двух процессов плавления и абляции. Это позволяет получать штрих-канавки в стекле в широком диапазоне параметров: глубина и ширина этой канавки.

Излучение CO<sub>2</sub> лазера с модуляцией добротности обладает маленькой энергией, небольшой длительностью импульса и неглубоко проникает в стеклянную подложку (~ 50 мкм). Проведенные эксперименты показали, что излучением этого типа лазера успешно реализуются штрих-канавки с высокой скоростью.



### Штрих-канавки на стекле, полученные с помощью импульсного CO<sub>2</sub> лазера

Для создания полосок использовался непрерывный CO<sub>2</sub> лазер (10,6 мкм) с мощностью 30 Вт в режиме скрайбирования, т.е. снятия стружки. Здесь обработка стекла производится в режиме термораскалывания, которая отличается высокой скоростью и стабильностью размерных параметров штрих-канавки. Форма канавок наиболее геометрически ровная.



### Штрих-канавки на стекле, полученные с помощью CW CO<sub>2</sub> лазера

Таким образом, процесс получения канавок импульсным лазерным излучением весьма энергоемкий, но более управляемый, ему присуща сравнительно небольшая скорость обработки – до 50 мм/сек; процессы скрайбирования CO<sub>2</sub> лазером обладают большой скоростью обработки, при скоростях более 150 мм/сек процесс весьма устойчив (и в том числе геометрические параметры стружки).

#### Литература

1. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. – М.: Радио и связь, 1979. – 136 с.
2. Sysoev V.K., Zakharchenko A.V., Vyatlev P.A., Papchenko B.P. Increasing the efficiency of controllable laser thermal cleavage of insulating materials // J.Opt.Technol. 2004. V.71, № 2. PP. 117–120.
3. Юдин С. Сенсорные экраны. // СНР. 2004. № 6. С. 68–71.

## ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА АКРИЛОВЫХ ДИФФУЗНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ LCD ДИСПЛЕЕВ

**В.К.Сысоев, П.А.Вятлев, П.И.Капустин**

(ФГУП “НПО им.С.А.Лавочкина”, г.Химки, МО, Россия)

Полимерные материалы обладают весьма разнообразными свойствами и широко применяются в современной технике, в том числе в авиакосмической и электронной промышленности.

В данной работе представлены результаты оптимизации лазерной резки полимерных диффузных экранов для LCD дисплеев на основе материала (Kolon EverRay®DP).

К параметрам резки экранов предъявляются следующие требования: точность 0,5 мм; скорость 0,5–3 м/сек и главное, чтобы при лазерной обработке сохранились оптические свойства материала, особенно в зоне воздействия лазерного излучения.

Эффективность лазерной резки полимеров зависит от коэффициента поглощения излучения лазерных излучателей.

Из измеренного спектра пропускания используемого материала видно, что данный материал имеет коэффициент поглощения для широко используемых типов лазеров, среднего ИК-диапазона (CO<sub>2</sub> (10,6 мкм) и СО (5–6 мкм)) величину порядка 50–100 см<sup>-1</sup>. Это позволяет осуществлять локальное объемное термическое воздействие на данный материал.

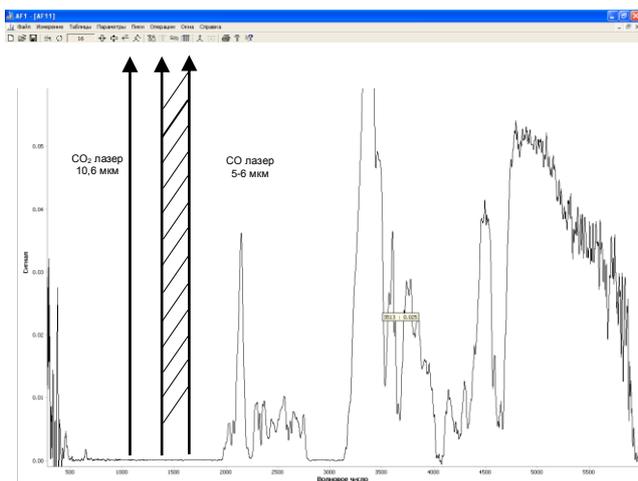


Рис.1. Спектр пропускания полимера

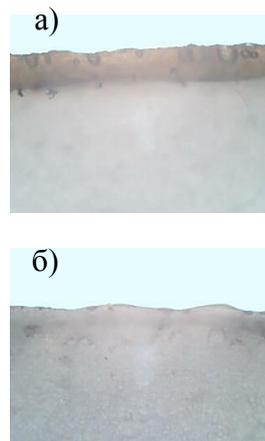


Рис.2. Фото краев образцов экранов:

а) – поддув воздухом; б) – азотом

Для осуществления резки данного материала использовалась экспериментальная установка с использованием непрерывных CO<sub>2</sub> и CO лазеров с мощностью 10-30 Вт с двухкоординатным столом, работающих в диапазоне скорости 0,1–2 м/сек.

Главной особенностью данной установки является возможность подачи в зону лазерного воздействия различных сжатых газов (воздух, азот, аргон).

Оптимизация технологии резки в параметрах “плотность мощности – тип газа и скорость” позволили получить высококачественные образцы диффузных экранов.

Полученные образцы при поддуве азотом имеют полированный край, и испытания показали, что механическая прочность и оптические свойства незначительно отличаются от исходного материала.

Таким образом, лазерная резка позволяет получать высококачественные полимерные диффузные экраны.

#### Литература

1. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. – М.: Радио и связь, 1979. –136 с.
2. Sysoev V.K., Zakharchenko A.V., Vyatlev P.A., Papchenko B.P. Increasing the efficiency of controllable laser thermal cleavage of insulating materials// J. Opt. Technol. 2004. V.71, № 2. PP. 117–120.
3. Юдин С. Сенсорные экраны. // СНР. 2004. №6. С. 68–71.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ HF-СЕКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТЕКОЛ

**В.А.Шарагов, О.В.Азаренко, Г.А.Лысенко**

(БГУ им. “А.Руссо”, г.Бельцы, Республика Молдова)

Промышленные стекла характеризуются неоднородной структурой. Разработаны различные методы для определения показателя неоднородности стекла. Однако все эти методы позволяют установить степень неоднородности стекла для всего объема образца. В то же время во многих случаях важно знать характер неоднородной структуры поверхностных слоев стекла. Установить характер и параметры слоистой структуры промышленных стекол является задачей важной и сложной одновременно.

Цель проведенных экспериментов заключалась в оптимизации режимов HF-секционирования промышленных стекол.

Объектами исследований являлись образцы листового стекла, стеклянная тара (бутылки,

банки, флаконы), изделия из светотехнического, сортового, медицинского и химико-лабораторного стекла. Химические составы листового и тарного стекла близкие между собой, в то время как медицинское, химико-лабораторное, сортовое и светотехническое стекла имеют существенно иные составы. Условия варки стекломассы и формования стеклоизделий разного назначения сильно отличаются друг от друга.

Метод HF-секционирования разработан в Будапештском университете им. Л. Этвеша и нашел применение для анализа модельных стекол простых составов. Сущность метода заключается в послойном растворении стекла в растворе HF с последующим анализом вытяжек.

Нами установлено, что скорость растворения стекла зависит от многих факторов: состава и структуры стекла, однородности образцов, концентрации, объема и температуры раствора HF, гидродинамических условий и др. При разработке методики секционирования поверхностных слоев стекла раствором HF принималось во внимание то, чтобы толщина растворенного слоя за одно травление могла изменяться от сотых долей до нескольких мкм. Методика эксперимента следующая. Образцы стекла промываются дистиллированной водой и сушатся, а затем опускаются в раствор HF слабой концентрации. Время травления подбирается с учетом требуемой толщины растворяемого слоя стекла. Одновременно подвергались травлению по 3 образца одного и того же вида стекла. По потерям массы образца до и после травления рассчитываются толщина травленного слоя стекла и скорость его растворения. Затем строится график зависимости скорости растворения стекла от толщины травленного слоя. В вытяжках после травления анализируются компоненты стекла ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и др.). Максимальная относительная погрешность определения толщины растворенного слоя не превышала  $\pm 5\%$ , а скорости травления –  $\pm 4\%$ .

В данной работе при анализе поверхностных слоев стекла за одно травление растворялся слой толщиной от 0,1 до 1,0 мкм. Толщина растворенного слоя стекла регулировалась путем изменения только одного параметра, а именно, продолжительности травления. Все другие параметры (объем, концентрация и температура раствора, гидродинамические условия и др.) оставались при этом неизменными. Продолжительность одного травления варьировалась в ходе эксперимента и составляла от 5 до 60 мин. Образцы травилась в стационарном положении.

При расчете толщины растворенного слоя и скорости его растворения делались следующие допущения: все поверхности образца растворяются с одинаковой скоростью, плотность образца во всем его объеме одинакова.

Полученные данные свидетельствуют о следующем.

1. Графики скоростей растворения двух серий образцов, вырезанных из одного изделия, имеют нестабильный характер, хотя в целом зависимости подобные. Так, например, образцы стекла из бутылки и банки одного и того же химического состава имеют примерно одинаковую структуру поверхностных слоев. Более того, общий характер растворения пластинок листового стекла такой же, как и для образцов тарного обесцвеченного стекла.

2. Средние скорости растворения листового стекла и образцов тарного стекла находятся на одном и том же уровне.

Многочисленное травление образцов тарных изделий (бутылок и банок), отобранных как в одно и то же время, так и в разные дни, подтвердило нестабильный характер скорости растворения стекла. Такая закономерность наблюдалась при травлении промышленных стекол на глубину до 10 мкм. Следовательно, значительный разброс данных для скорости растворения поверхностных слоев промышленных стекол можно объяснить только его неоднородной структурой.

С увеличением продолжительности одного травления в два раза толщина растворенного слоя также возросла примерно в два раза. Однако разброс данных для скорости растворения стекла при большей длительности одного травления существенно уменьшился. По данным разброса скорости растворения образцов можно ориентировочно оценить степень неоднородности промышленных стекол разного назначения.

Полученные данные позволяют утверждать, что листовое и тарное стекло имеют близкие

средние скорости растворения. Следовательно, сходство химических составов стекол является более важным фактором, чем различия в условиях варки стекломассы и способах формования стеклоизделий.

Скорости растворения сортового, медицинского, химико-лабораторного и светотехнического стекол примерно в четыре раза меньше скоростей растворения листового и тарного стекол. Высокая химическая стойкость химико-лабораторного и медицинского стекла обеспечивается наличием в его составе  $V_2O_5$ , повышенным содержанием  $Al_2O_3$  и пониженным содержанием щелочных оксидов. Менее очевидным является влияние химического состава на скорость растворения сортового и светотехнического стекол.

Эксперименты показали, что разная степень охлаждения свежотформованных банок (на стадии транспортирования их на отжиг) практически не влияет на процесс формирования структуры поверхностных слоев тарного стекла.

Анализ вытяжек после травления показал, что тесная корреляция между скоростью растворения поверхностных слоев стекла и концентрацией в них щелочных катионов отсутствует.

Таким образом, эксперименты показали, что скорость растворения промышленных стекол не является величиной стабильной. Это связано со слоистой структурой стекла. Чем выше однородность стекломассы, тем меньше толщина отдельных слоев.

## **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГНУТЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ С ОТВЕРСТИЕМ МЕТОДОМ МОЛЛИРОВАНИЯ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА**

*А.В.Пестов* (ФГУП «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия)

Для остекления верхней части бытовых электрогрилей используется так называемая «крышка», которая представляет собой круглое гнутое стеклоизделие со сферической кривизной поверхности, имеющее в своей центральной части круглое отверстие для размещения в нем нагревательного элемента и вентилятора.

Были опробованы традиционные способы получения отверстия в крышке электрогрилей, которые оказались или очень трудоемкими, или не давали положительного эффекта. Так, например, если путем сверления получить отверстие в плоской стеклозаготовке, то ее практически невозможно смоллировать, так как для получения стеклозаготовки со сферической кривизной поверхности необходимо использовать вакуум, что в данном случае не представляется возможным. В случае сверления отверстия в гнутой стеклозаготовке необходим ее тонкий отжиг, что значительно снижает производительность процесса моллирования. Кроме того, сам процесс сверления достаточно трудоемок.

В связи с вышеизложенным, была разработана принципиально новая технология изготовления гнутых стеклоизделий с отверстием, предназначенных для использования в качестве крышек для электрогрилей.

Сущность новой технологии заключается в следующем. На поверхности плоской стеклозаготовки с заданными геометрическими размерами осуществляют надрез по контуру удаляемой центральной части стеклозаготовки, то есть по контуру отверстия, с помощью алмазного стеклореза. После этого стеклозаготовку размещают на форме с заданной кривизной формирующей поверхности, расположенной в печи, нагретой до температуры моллирования. Нагревают стеклозаготовку до температуры размягчения стекла из расчета 1 мин на 1 мм ее толщины. Выдерживают печь при температуре размягчения стекла в течение 10–12 мин для моллирования стеклозаготовки под действием собственного веса. Затем проводят окончательное моллирование стеклозаготовки под действием вакуума. Гнутую стеклозаготовку извлекают из формы с помощью теплоизолированной вакуумной удочки и размещают на металлическом столе, теплоизолированном асбестом или стеклотканью. После этого оказывают механическое воздействие по контуру удаляемой центральной части стеклозаготовки путем постукивания

керамическим или металлическим стержнем по линии надреза. После отделения от стеклозаготовки удаляемой центральной части ее перемещают на керамическую подставку для охлаждения до комнатной температуры.

Разработанная технология позволяет получать гнутые стеклоизделия с отверстием в их центральной части. Это объясняется тем, что при извлечении горячей гнутой стеклозаготовки из формы она охлаждается в условиях естественной воздушной конвекции, при этом краевая зона охлаждается быстрее, чем центральная. В связи с этим, в надрезаемой линии по контуру удаляемой центральной части стеклозаготовки создаются напряжения растяжения, которые при незначительном механическом воздействии по контуру отверстия приводят к отделению от стеклозаготовки ее центральной части. Полученные гнутые стеклоизделия с отверстием в их центральной части имеют большую прочность по сравнению с плоским листовым стеклом, используемым для моллирования. Это объясняется тем, что при охлаждении стеклозаготовки в условиях естественной воздушной конвекции с момента извлечения ее из формы на ее поверхности создаются сжимающие напряжения, обуславливающие повышение прочности стеклоизделий.

По рассматриваемой технологии было организовано мелкосерийное производство крышек для электрогрилей с поставкой их на Малоярославецкий приборный завод с объемом производства 6000 шт. в год. При этом использовалась только одна печь моллирования, которая имела соединение с вакуумной системой и вертикально подвижный под, так как один технологический цикл изготовления составлял 18-20 мин. Выпускаемое стеклоизделие имело кольцеобразную форму со сферической кривизной поверхности ( $R=245$  мм), длиной образующей 82 мм, внешним диаметром 314 мм, внутренним диаметром 190 мм и толщиной 5 мм [1]. Использовали листовое стекло промышленного состава (ГОСТ 111-2001) толщиной 5 мм с температурой размягчения  $600\pm 5^\circ\text{C}$ . Плоская стеклозаготовка имела диаметр 325 мм. На поверхности плоской стеклозаготовки в ее центральной части производили надрез с помощью алмазного стеклореза по окружности с радиусом 95 мм относительно геометрического центра стеклозаготовки. При мелкосерийном производстве крышек для электрогрилей коэффициент запуска составил 1,1, то есть выход годных изделий – 90%.

#### Литература

1. Пестов А.В. Моллирование листового стекла и технология получения криволинейных изделий // Наука производству. – 1999. – №9 (22). – С.33–36.

## МОЛЛИРОВАНИЕ СТЕКЛОЗАГОТОВОК ДЛЯ ОСТЕКЛЕНИЯ ШКАЛ ПРИБОРОВ САМОЛЕТОВ

*А.В.Пестов, Л.И.Максимова* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Для остекления шкал приборов самолетов обычно используется тонкое листовое стекло толщиной 1,2 мм, при этом большая часть остекления имеет криволинейную поверхность, чаще всего одинарную, то есть цилиндрическую. Основными требованиями к такого рода изделиям являются: соответствие заданной кривизне поверхности, высокие оптические показатели, отсутствие дефектов (отлипы) и прочность.

При разработке технологии были опробованы формы, изготовленные из чугуна, нержавеющей стали и керамики. Наилучшие результаты моллирования были достигнуты на форме, изготовленной из кварцевой керамики, содержащей 99,9  $\text{SiO}_2$ , с теплопроводностью  $0,5\text{--}1,0 \text{ Вт/м}^2 \times ^\circ\text{C}$  в интервале температур  $50\text{--}1000^\circ\text{C}$  и с коэффициентом термического расширения  $0\text{--}6 \times 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ . В одном из конкретных примеров использовалась форма моллирования с одинарным радиусом кривизны формирующей поверхности 58 мм, длиной образующей 250 мм и стрелой прогиба 10 мм. Стеклозаготовки в плоском виде имели размеры  $48 \times 60 \times 1,2$  мм и после моллирования уже не подвергались холодной обработке.

Технология моллирования включает следующие операции. Из нагретой до температуры моллирования печи выводят находящуюся в ней форму и размещают на ее формующую поверхность 3 плоских стеклозаготовки и вводят форму в печь. Нагревают печь до температуры моллирования и выдерживают в течение 11–12 мин для принятия стеклозаготовками заданной кривизны формующей поверхности формы под действием собственного веса. Выводят форму из печи и извлекают из нее гнутые стеклозаготовки путем переворачивания формы на металлический стол, теплоизолированный несколькими слоями стеклоткани КТ–11. В целом полный цикл моллирования осуществляется в течение 20–21 мин, то есть на одну стеклозаготовку уходит приблизительно 7 мин. После охлаждения до комнатной температуры гнутые стеклозаготовки передаются на участок покрытий для нанесения просветляющего покрытия.

Разработанная технология позволила получить гнутые малогабаритные стеклозаготовки из тонкого листового стекла с высокими геометрическими и оптическими показателями, соответствующими требованиям, предъявляемым к изделиям остекления шкал приборов самолетов. При этом обеспечивается получение стеклозаготовок с высокими показателями по прочности за счет того, что полузакалка гнутых стеклозаготовок осуществляется вне формы на теплоизолированной подложке. Для сравнения была получена партия гнутых стеклозаготовок с теми же геометрическими параметрами по классическому способу моллирования. Сравнительные данные полученных результатов приведены в таблице.

Таблица

Сравнительные данные результатов моллирования

| № п/п | Наименование параметров  | Полученные результаты    |                         |
|-------|--|--------------------------|-------------------------|
|       |  | Разработанная технология | Классическая технология |
| 1     | Минимальная прочность, кгс/мм <sup>2</sup>                       | 8,2                      | 5,1                     |
| 2     | Средняя прочность, кгс/мм <sup>2</sup>                           | 12,2                     | 8,4                     |
| 3     | Закалочные напряжения в краевой области стеклоизделий, нм/см     | 130–150                  | 40–50                   |
| 4     | Закалочные напряжения в центральной области стеклоизделий, нм/см | 80–90                    | 10–15                   |

Из приведенных данных видно, что разработанная технология позволяет получить гнутые малогабаритные заготовки из тонкого листового стекла с более высокими прочностными показателями, при этом обеспечивается получение стеклоизделий с высокими геометрическими и оптическими показателями, соответствующими требованиям, предъявляемым к изделиям остекления шкал приборов самолетов. Следует отметить также, что технология отличается большой производительностью и воспроизводимостью результатов.

## **ПИРОКСЕНОВЫЕ СИТАЛЛЫ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВЫХ ПОРОД КОЙТАШСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ**

*Г.Т.Адылов, М.Х.Руми, Ш.А.Файзиев, М.С.Пайзуллаханов, Э.З.Нодирматов*  
(Институт материаловедения НПО “Физика–Солнце” АН РУз, г.Ташкент, Узбекистан)

Для проектирования пироксеновых ситаллов исследована возможность использования промышленных пироксеновых отходов Койташского рудного поля в качестве исходного сырья. Их усредненный химический состав (вес.%): SiO<sub>2</sub>–35,25; TiO<sub>2</sub>–0,6; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–8,62; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–5,48; MnO–0,38; MgO–2,18; CaO–41,5; S–0,75; K<sub>2</sub>O–1,1; FeO–4,14.

С целью получения в продуктах кристаллизации стекол мономинерального пироксена рассчитывали сырье на пироксеновый состав, используя различные сочетания нормативных

исходных групп. Согласно расчетам, количество свободного  $\text{SiO}_2$  составляло в зависимости от варианта расчета 1,2–17,16 вес.%. Для связывания диоксида кремния необходимо было добавить соответствующие количества оксидов кальция и магния. Это осуществили за счет доломита  $\text{CaMg}[(\text{CO})]_3$  – природного сырья, содержащего  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  в отношении, близком к требуемому, так как в этой породе отношение оксида кальция и оксида магния близко к требуемому. Для различных вариантов расчета составов сложного пироксена количество вводимого доломита составило от 1,84 до 11,1 вес.%, соответственно.

Пироксеновый модуль  $M_{\text{Py}}$  рассчитывали с учетом роли катионов щелочных и трехвалентных металлов при формировании пироксеновых образований  $M_{\text{Py}}=2 + \sum I_{R2+}/(\sum I_{R4+} - 2\sum I_{R+})$ , где  $I_{R2+}$ ,  $I_{R4+}$ ,  $I_{R+}$  – молекулярные количества двух-, четырех- и одновалентных элементов в расплаве, соответственно. Пироксеновый модуль для усредненного химического состава исходного сырья составлял 3,54. Как известно, для мономинерального пироксенового состава данный параметр должен быть не более 3, что свидетельствует о необходимости корректировки исходной шихты, но уже в сторону увеличения содержания диоксида кремния.

При пересчете исходного состава на структурные группировки было установлено, что его положение на диаграмме Ниггли находится в поле совместной кристаллизации пироксенов и оливинов, а после подшихтовки состав еще больше смещается от линии мономинерального пироксенообразования  $P-T_{\text{sch}}$ . Сопоставление полученных результатов показало наличие значительных расхождений. Поэтому мы решили проверить достоверность проведенных расчетов путем синтеза соответствующих составов и их последующего анализа.

Расплавы охлаждались путем слива в воду. Рентгенофазовый анализ показал, что полученные прозрачные отливки были рентгеноаморфны.

Дифференциально-термический анализ проводили как на порошках стекла (размер частиц 40–80 мкм), так и на осколках гранул (размер около 2–3 мм). Вес исследуемых образцов был постоянным. Исследование склонности составов стекол к кристаллизации проводилось методом отжига в воздушной атмосфере в интервале температур от 700 до 1150°C в течение 1–3 ч с последующим рентгенофазовым анализом отожженных образцов. Анализ дериватограмм показал следующее. На кривых ДТА, полученных на дробленных гранулированных образцах стехиометрического состава отмечено наличие плохо разрешенных экзотермических эффектов при температуре около 1070 и 1130°C различной интенсивности. По данным рентгенофазового анализа это связано с процессами кристаллизации фаялита  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  ( $d=3,17; 2,87; 2,53; 2,47 \text{ \AA}$ ) и диопсида-геденбергита  $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_8$  ( $d=2,99; 3,24; 2,96; 2,57; 2,52; 1,62 \text{ \AA}$ ). Эти данные согласуются с результатами расчета пироксена на структурные группировки, согласно которым исходный состав находится на диаграмме Ниггли в поле совместной кристаллизации пироксена и оливинов, к которым относится фаялит. Экзотермические эффекты при 475–575 и 800–880°C в зависимости от состава могут быть связаны с кристаллизацией шпинелидов, в частности, выделением магнетита. Очевидно, его количество невелико, так как на рентгенограммах соответствующие рефлексы не наблюдались.

При отжиге стекол было установлено, что процесс кристаллизации начинался только при 900°C, усиливаясь при повышении температуры. При этом происходил распад твердого раствора на основе диопсида-геденбергита с выделением свободного фаялита.

Добавка доломита приводила к дополнительному выделению фаялита, о чем свидетельствовало усиление экзотермического эффекта при 1070°C на термограмме, а также увеличении интенсивности соответствующих рефлексов на дифрактограммах.

С увеличением количества доломита наблюдался рост температуры экзотермического эффекта, соответствующего кристаллизации пироксена (от 1130°C в исходном образце до 1160°C в образце с 10 вес.% доломитом), в то время как температура экзотермического эффекта (1070°C), соответствующего кристаллизации фаялита, оставалась постоянной.

При переходе к порошкообразным образцам происходило смещение экзотермического пика, соответствующего кристаллизации пироксена на 20°C. При этом количество кристаллизующегося пироксена возрастало, о чем свидетельствовало увеличение площади (в 1,4

раза) и более крутой подъем ветви экзотермического эффекта. Такое смещение свидетельствовало о наличии поверхностной кристаллизации пироксена. Однако учитывая его незначительную величину, а также присутствие примесей в исходном сырье, можно предположить, что для достижения объемной кристаллизации при синтезе ситаллов, потребуется незначительное количество катализатора.

Принимая во внимание полученные результаты, был произведен расчет пироксена с учетом кристаллизации фаялита, согласно которому для получения мономинерального пироксенового состава к исходной шихте было необходимо добавить  $\text{SiO}_2$  в количестве 12,72 вес.%. Полученное стекло после кристаллизации при температуре 1150°C по своему фазовому составу соответствовало пироксену, без присутствия посторонних соединений.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НАНОРАЗМЕРНОЙ ТОЛЩИНЫ**

*О.Ф.Просовский, Г.Н.Горюнов* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В работе рассматривается применение математического моделирования для синтеза оптических конструкций тонкопленочных многофункциональных покрытий наноразмерной толщины для авиационного остекления.

Показаны возможности синтеза различных оптических светофильтров с использованием программного продукта OPTYLAYER, основанного на принципе неравнотолщинного моделирования конструкций слоистых сред. Отражены преимущества оптических конструкций, полученных нетрадиционным способом неравнотолщинного моделирования. Рассмотрены особенности технологии получения неравнотолщинных покрытий, их мониторинга в процессе нанесения. Показан принцип построения оптической конструкции покрытия, начиная с анализа одиночных слоев, составляющих элементы конструкции.

На примере создания многофункционального тонкопленочного покрытия для авиационного остекления показано практическое применение математического моделирования в конкретной технологической цепи, отражены особенности мониторинга системы контроля промышленного оборудования, отражен механизм ре-анализа получаемых покрытий с целью снижения коэффициента запуска при серийном производстве.

## **ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА КРУПНОГАБАРИТНЫЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО РАСТВОРА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

*А.В.Пестов, А.Е.Пигалев, Д.Н.Петрачков, В.И.Темных, В.И.Самсонов, Б.А.Кауппонен, П.Я.Ткаченко, И.Ю.Овсянникова, В.В.Поминов*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В настоящее время многие авиационные КБ ставят задачу модификации поверхности крупногабаритных сложнопрофильных изделий остекления самолетов и вертолетов из органического стекла. Модифицируют поверхность органического стекла с различными целями, например, для повышения абразивостойкости и серебростойкости, а также с целью нанесения подслоя под функциональные покрытия.

Известно много способов и устройств для нанесения покрытий на различного рода изделия с использованием многокомпонентного раствора жидких пленок. Анализ литературных источников показал, что известные технологии и устройства не обеспечивают получения

покрытий, отвечающих современным требованиям к авиационному остеклению по их разнотолщинности и оптическим показателям.

Авторы разработали новую технологию нанесения покрытий на крупногабаритные сложнопрофильные изделия с использованием многокомпонентного раствора жидких пленок, а также устройство для ее осуществления.

В данном случае рассматривается пример нанесения покрытий на обе поверхности изделия остекления откидной части фонаря (ОЧФ) самолета. Следует отметить, что по разработанным технологии и устройству возможно нанесение покрытия только на одну вогнутую или выпуклую поверхность ОЧФ. Изделие представляет собой крупногабаритное (490×840×1600 мм) сложнопрофильное (с бочкообразной незамкнутой кривизной поверхности) остекление из ориентированного органического стекла АО-120 толщиной  $8 \pm 0,5$  мм. Площадь покрываемой поверхности 5,1 м<sup>2</sup>. В качестве раствора жидкой пленки использовали бесцветный лак полиметилфенилсилсесквиоксан (ПМФСО), привитый к наноразмерным глобулам SiO<sub>2</sub>.

Технологические операции выполняются в следующей последовательности (рис.).

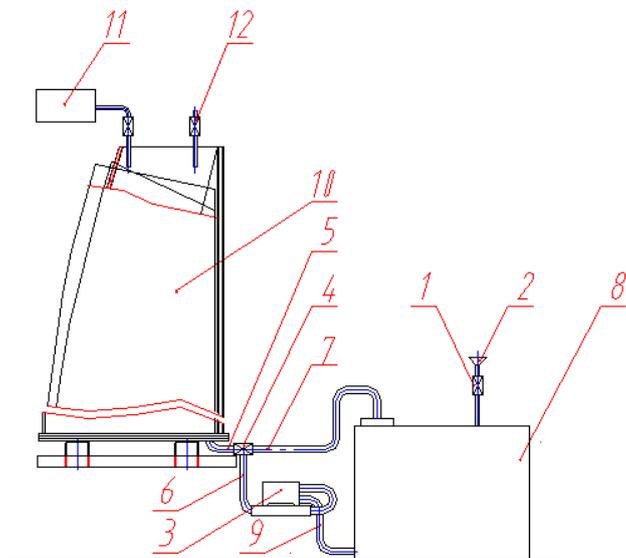


Рис. Устройство для нанесения покрытий на крупногабаритные сложнопрофильные изделия с использованием многокомпонентного раствора жидких пленок

Открывают кран 1 и в воронку 2 заливают компоненты лака в следующем соотношении: основной компонент 12,6 л, отвердитель 6,4 л, растворитель 38 л. Перемешивают полученный раствор в течение 2,1 часа с помощью гидронасоса 3, при этом трехходовой кран 4 поворачивают в положение, когда трубопровод 5 закрыт, а трубопроводы 6 и 7 открыты. Общее количество многокомпонентного раствора 57 л вязкостью 16 – 18 сек. DIN4/20°C.

Затем в герметичной камере 10 с кривизной поверхности стенок, соответствующей кривизне изделия, которое расположено в этой камере (на рис. не показано), создают разрежение 0,06–0,15 атм с помощью вакуумного насоса 11, а клапаном 12 герметично закрывают камеру 10. Далее трехходовой кран 4 поворачивают в положение, когда трубопровод 7 закрыт, а трубопроводы 5 и 6 открыты. Осуществляют подачу многокомпонентного раствора из емкости 8 в герметичную камеру 10 с помощью гидронасоса 3 по трубопроводам 5, 6, 9 и вакуумного насоса 11 со скоростью 2–3 мм/сек. После заполнения камеры 10 раствором, гидронасос 3 выключают, трехходовой кран 4 поворачивают в положение, когда трубопровод 6 закрыт, а трубопроводы 5 и 7 открыты. Осуществляют слив раствора из камеры 10 со скоростью 0,5–0,8 мм/сек, при этом стравливают разрежение в камере 10 с помощью клапана 12. Далее камеру 10 демонтируют, извлекают из нее изделие с полученной на его поверхностях жидкой пленкой и помещают в термостат с последующей сушкой при температуре  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение 6 час. Твердое полимерное

покрытие, полученное на обеих поверхностях остекления ОЧФ, значительно повысило абразивостойкость остекления за счет образования тонкой (5–8 мкм) полимерной пленки, содержащей твердые частицы SiO<sub>2</sub>.

Полученные по разработанной технологии с использованием нового устройства крупногабаритные сложнопрофильные изделия остекления ОЧФ самолетов МиГ-29К, Су-30МКМ и Су-35 с полученными абразивостойкими покрытиями отличаются высокими оптическими показателями, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к изделиям остекления самолетов и вертолетов. Кроме этого, при использовании новых технологии и устройства для ее реализации потребность объема многокомпонентного раствора для нанесения покрытий практически в 25 раз меньше, чем эта потребность при использовании, например, метода окунания [1, 2] изделия в емкость с раствором жидкой пленки.

#### Литература

1. Хасс Г., Тун Р.Э. Физика тонких пленок.– М.: Мир, 1972.– 87–90 с.
2. Патент 2267362 Российской Федерации, МПК<sup>7</sup> В05С 3/09, 2006.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ЭЛЛИПСОИДНОЙ ФОРМЫ С БОЛЬШОЙ СТРЕЛОЙ ПРОГИБА

*А.В.Пестов, И.Г.Чашников, Б.А.Кауппонен*  
(ФГУП “ОНПП ”Технология”, г.Обнинск, Россия)

В 2006 г. на предприятие поступил заказ на изготовление 10 комплектов отражателей эллипсоидной формы (Институт физики твердого тела, г. Дрезден, Германия). Наибольшую сложность получения представлял эллипсоид, образующая которого задана по формуле:

$$\frac{X^2}{\left(\frac{a}{2}\right)^2} + \frac{Y^2}{\left(\frac{b}{2}\right)^2} = 1,$$

где a=516 мм, b=950 мм.

При этом диаметр эллипсоида задан 416 мм, а стрела прогиба – 190 мм. Получить такое изделие методом моллирования практически невозможно из-за большой стрелы прогиба. В данном случае был использован способ переформования листового стекла в эллипсоидную форму под действием вакуума при жесткой фиксации краевой части стеклозаготовки на форме моллирования. Таким образом, фактически осуществлялся процесс растяжения листового стекла до заданной эллипсоидной кривизны формующей поверхности формы моллирования.

Использовали форму, изготовленную из чугуна с заданной для эллипсоида кривизной формующей поверхности, шириной торцевой поверхности 100 мм и внешним диаметром 650 мм. Заготовки из плоского листового стекла промышленного состава (ГОСТ 111-2001) имели диаметр 650 мм, толщину 8 мм и температуру размягчения 600±5°C.

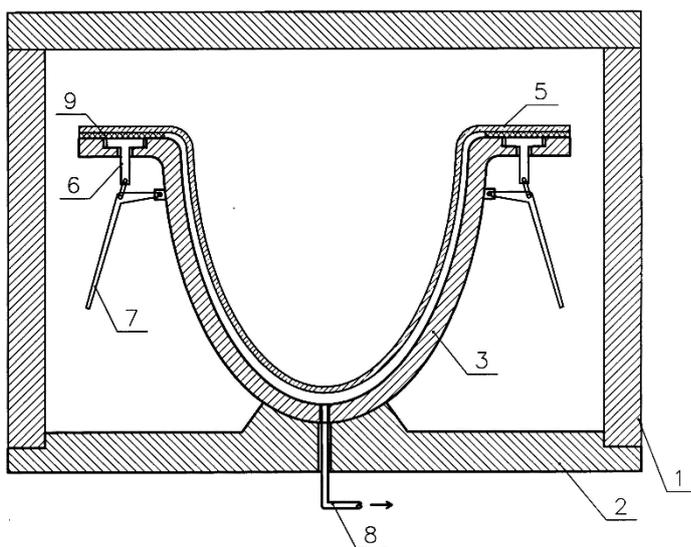


Рис.2 Положение стеклозаготовки на форме при ее отжиге

мм в краевой области заготовки, где она контактирует с торцевой частью формы 3. При этом металлическое кольцо 4 предварительно нагревается до температуры  $620 \pm 5^\circ\text{C}$ , имеет высоту 18 мм и вес 11,5 кг. Далее под 2 поднимают в верхнее положение, выдерживают печь 1 при указанной температуре в течение 20 мин. Изгибают заготовку путем вакуумирования пространства между заготовкой 5 и формующей поверхностью формы 3 с помощью вакуумной системы (не показана), соединенной с трубопроводом 8 и отверстием в форме 3. После достижения величины вакуума в 1 атм. вакуумирование прекращают, под 2 опускают в нижнее положение и удаляют металлическое кольцо 4 с поверхности заготовки 5. Затем приподнимают гнутую заготовку 5 над формующей поверхностью формы 3 путем поворота рычагов 7 в направлении

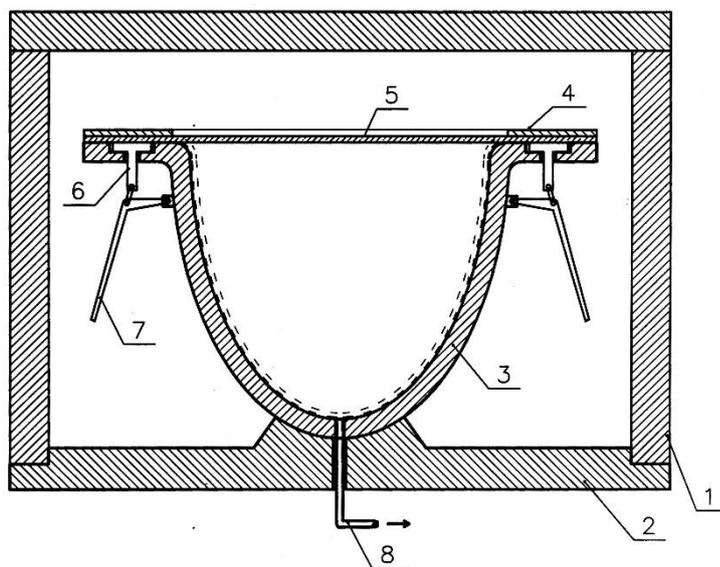


Рис.1 Начальное положение стеклозаготовки на форме

от формы, при этом шарнирно связанные с ними толкатели 6 приподнимают гнутую заготовку 5. В образовавшийся зазор между торцевой поверхностью формы 3 и гнутой заготовкой 5 размещают полоски асбеста 9 толщиной 10 мм, шириной 40 мм и длиной 100 мм. Для симметричной фиксации гнутой заготовки в приподнятом положении полоски асбеста 9 размещают в трех местах торцевой поверхности формы 3 под углом  $120^\circ$ . Рычаги 7 поворачивают в исходное положение, а под 2 поднимают в верхнее положение. Далее температуру в печи снижают до  $590 \pm 5^\circ\text{C}$ , выдерживают в течение 20 мин и выключают, осуществляя отжиг гнутой заготовки 5 при инерционном охлаждении печи 1 до температуры  $40^\circ\text{C}$ . Затем под 2 опускают в нижнее положение, гнутую заготовку извлекают из формы 3, обрезают до заданных геометрических размеров и обрабатывают ее края с помощью алмазного инструмента. Стеклозаготовку с заданной эллипсоидной формой передают на участок нанесения покрытий для изготовления отражателя. Полученные изделия эллипсоидной формы имели высокие оптические показатели, которые полностью отвечали требованиям вышеуказанного заказчика.

## ТЕХНОЛОГИЯ И ФОРМА МОЛЛИРОВАНИЯ СТЕКЛОЗАГОТОВОК ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ АЭРОДРОМНЫХ ПРОЖЕКТОРНЫХ ОГНЕЙ ПРИБЛИЖЕНИЯ

*А.В.Пестов, И.В.Антонов, Б.А.Кауппонен, Н.А.Силенок*  
(ФГУП “ОНПП ”Технология”, г.Обнинск, Россия)

Известно, что при посадке самолетов необходимо максимально увеличить угол рассеяния отражателя аэродромного прожекторного огня приближения по горизонтали. Ранее отражатели моллировали на форме с параболической кривизной поверхности, образующая которой соответствует формуле:

$$y^2=4FX,$$

где  $F=26$  мм.

Толщина отражателя –  $4\pm 0,5$  мм, диаметр – 155 мм. Угол рассеяния таких отражателей по горизонтали по уровню 0,05 составил  $11,5^\circ$ . По международному стандарту “Аэродромы” необходимо иметь угол рассеяния по горизонтали не менее  $15^\circ$ .

С целью достижения международного уровня отечественных параболических отражателей авторы разработали новую технологию и форму моллирования.

Как показано на рис.1,2, форма 1 моллирования с параболической кривизной поверхности имеет углубления 3, выполненные в двух диаметрально расположенных секторах 4 формующей 2 поверхности в нижней части формы 1 в области контактирования гнутой 5 стеклозаготовки с формующей 2 поверхностью. В данном случае эта область распространяется на величину диаметра получаемого отражателя и равна 155 мм. Углубления 3 выполнены путем фрезерования формующей 2 поверхности формы 1. Рабочие 6 грани шириной 5–10 мм ориентированы таким образом, что лучи, отраженные от излучения из точки фокуса, равного 26 мм, имеют угол отклонения от осевой линии формующей 2 поверхности формы 1, равный  $14^\circ$ . Сектора 4 выполнены с углом развертки  $15^\circ$  от центра формующей 2 поверхности.

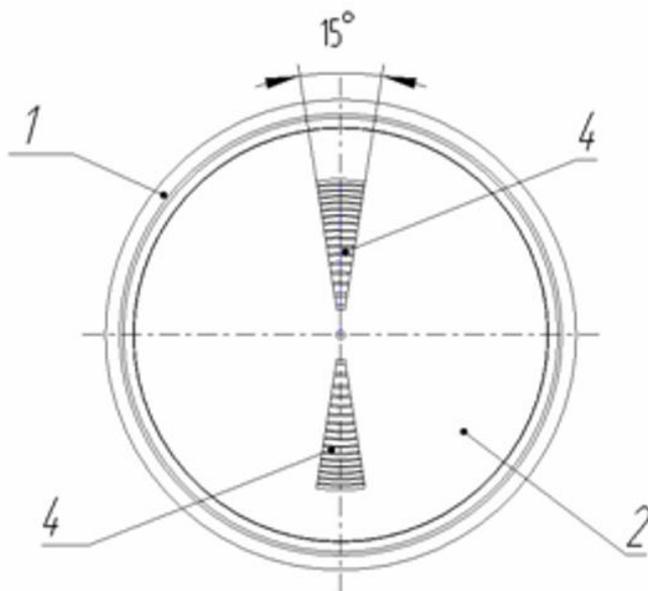


Рис. 1. Форма моллирования, вид сверху

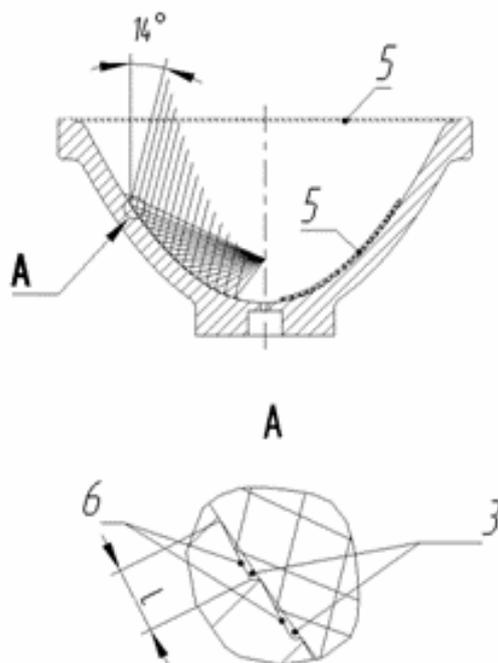


Рис. 2. Форма моллирования, разрез

Стеклозаготовку 5 размещают на нагретую до температуры моллирования форму 1, расположенную в печи (на рис. не показана). Печь нагревают до температуры на  $140\text{--}160^\circ\text{C}$  выше температуры размягчения стекла и моллируют стеклозаготовку 5 до заданной кривизны формующей 2 поверхности формы 1 под действием вакуума. При вышеуказанном диапазоне температур при моллировании стеклозаготовки под действием вакуума стекло в секторах 4 принимает форму углублений. Далее охлаждают гнутую стеклозаготовку 5 в форме 1 до температуры  $540\pm 5^\circ\text{C}$  и с помощью вакуумной удочки перемещают ее в печь отжига. После чего цикл моллирования проводится в описанной последовательности. Отожженные гнутые стеклозаготовки обрезаются до заданного диаметра, обрабатываются и передаются на участок вакуумных покрытий для получения изделия.

На рассматриваемой форме по разработанной технологии была получена опытная партия изделий в количестве 80 штук. Полученные отражатели для аэродромных прожекторных огней приближения имели угол рассеяния по горизонтали  $15^\circ\text{C}$ , что соответствует требованиям международного стандарта “Аэродромы”. В настоящее время полученные отражатели установлены в прожекторных огнях приближения на аэродроме г. Красноярска.

# ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, НАНОВОЛОКОН И КОМПОЗИТОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ И НАНОВОЛОКНАМИ

*Э.Г.Раков<sup>1</sup>, И.В.Аношкин<sup>1</sup>, С.В.Кондрашов<sup>2</sup>, В.П.Грачев<sup>3</sup>, И.В.Баронин<sup>4</sup>, М.Л.Кербер<sup>1</sup>,  
С.П.Сивков<sup>2</sup>, И.Ю.Горбунова<sup>1</sup>, А.В.Малых<sup>1</sup>, А.Л.Тренисова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>РХТУ им.Д.И.Менделеева, г.Москва, <sup>2</sup>ФГУП “ВИАМ”, г.Москва,

<sup>3</sup>ИПХФ РАН, г.Черноголовка, МО, <sup>4</sup>ООО НТЦ ГраНаТ, г.Электросталь, МО, Россия)

Создана и испытана пилотная установка, позволяющая реализовать разработанный ранее непрерывный способ получения углеродных нанотрубок [1, 2] и нановолокон [3] путем каталитического пиролиза метана. Показана возможность варьирования диаметра получаемых продуктов. В частности, выделены нанотрубки со средним диаметром 3,5, 4,5, 13, 17 нм (удельная поверхность от ~400 до ~1000 м<sup>2</sup>/г) и нановолокна со средним диаметром 21, ~28, 35 и 40 нм (удельная поверхность от ~70 до ~100 м<sup>2</sup>/г). Испытаны методы активирования (развития удельной поверхности) углеродных нанотрубок и нановолокон [4]. Показано, что для образцов нановолокон удельная поверхность может быть увеличена от 74 и 86 до соответственно 236 и 267 м<sup>2</sup>/г, для образцов нанотрубок – от 694 до 861 м<sup>2</sup>/г.

Испытаны методы химической функционализации углеродных наноматериалов с прививкой гидроксильных, карбоксильных и амидных групп, что позволило получать устойчивые дисперсии в воде и органических растворителях. С использованием ПАВ получены водные дисперсии наноматериалов. Для нанотрубок в водной дисперсии, стабилизированной тритоном X-100, найдена функциональная связь диаметра и длины: наиболее толстые трубки имеют малую длину, наиболее тонкие – большую длину.

Из углеродных нановолокон получены электропроводные мембраны с пористостью ~80% и хорошей газопроницаемостью. Выделены гели нанотрубок и электропроводные пленки с хорошей адгезией к силикатному стеклу.

Разработан метод получения композитов ПММА с тонкими углеродными нанотрубками и показано, что введение нанотрубок существенно улучшает механические свойства. Получены композиты с поливиниловым спиртом, эпоксидной смолой, гипсом и другими матрицами.

### Литература

1. Раков Э.Г., Гришин Д.А., Гаврилов Ю.В. Морфология пиролитических углеродных нанотрубок с малым числом слоев // Журнал физической химии. 2004. Т. 78, № 2. С. 2204.
2. Юферев Н.Н., Блинов С.Н., Заварухин С.Г. Синтез многослойных углеродных нанотрубок на кобальтсодержащих катализаторах // Химическая технология. 2007. Т.8, № 4. С. 168.
3. Раков Э.Г., Блинов С.Н., Иванов И.Г. Непрерывный способ получения углеродных нановолокон // Журнал прикладной химии. 2004. Т.77, № 2. С. 193.
4. Нгуен Чан Хунг, Аношкин И.В., Раков Э.Г.. Химическое активирование углеродных нановолокон и нанотрубок // Журнал прикладной химии. 2007. Т. 80, № 3. С. 445.

## **НОВОЕ ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ ДЛЯ ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНТЕРЬЕРА ПАССАЖИРСКИХ САМОЛЕТОВ**

*О.Б.Застрогина, Н.И.Швец, В.И.Петухов, С.Л.Барботько*  
(ФГУП “ВИАМ”, г.Москва, Россия)

Разработан состав и условия отверждения нового фенолоформальдегидного связующего РС-Н (ТУ 1-595-12-896-2006) с комплексом физико-химических и технологических свойств на уровне зарубежных аналогов для самозатухающих, слабодымящих деталей интерьера.

Исследованы физико-механические свойства, горючесть, дымообразование и тепловыделение стеклотекстолита и трехслойной панели с обшивками из него на основе связующего РС-Н.

Предел прочности стеклотекстолита (ткань Т-15(П)-76) при 3-точечном изгибе – 530 МПа, при растяжении – 300 МПа, при сжатии – 260 МПа.

Трехслойная сотовая панель (соты ССП-1-3,5 h=10) имеет прочность при отдири обшивки от сот 13,0 Н·м/м, при отрыве – 3,4 МПа, при 4-точечном изгибе – 160 МПа.

Стеклотекстолит на основе связующего РС-Н имеет максимальную скорость выделения тепла при горении 38 кВт/м<sup>2</sup> и общее количество выделившегося тепла за первые две минуты 20 кВт·мин/м<sup>2</sup>. Материал является самозатухающим и практически не выделяющим дыма. Образцы трехслойной сотовой панели на основе связующего РС-Н, стеклоткани Т-15(П)-76 и стеклосотопласта ССП-1-3,5 имеют тепловыделение соответственно 10 кВт/м<sup>2</sup> / 4 кВт·мин/м<sup>2</sup>.

На основе связующего РС-Н разработан технологический процесс изготовления трехслойных сотовых панелей в едином технологическом цикле: получение препрега, изготовление полимерного заполнителя-сферопласта, формование трехслойной сотовой панели, заделка торцевых поверхностей панели полимерным заполнителем-сферопластом, прессование заготовки при температуре 90–150°С.

Разработанное связующее рекомендуется для изготовления деталей (перегородок, багажных полок и т.д.) интерьера изделий гражданской авиации.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО РС-Н**

*В.И.Постнов, Н.И.Швец, В.И.Петухов, О.Б.Застрогина, К.В.Макрушин*  
(ФГУП “ВИАМ”, г.Москва, Россия)

В ВИАМе разработано новое фенолоформальдегидное связующее РС-Н, предназначенное для изготовления пожаробезопасных материалов интерьера – стеклотекстолита, заполнителя-сферопластика и трехслойных сотовых панелей с тепловыделением при горении 10–38 кВт/м<sup>2</sup>.

Целью данной работы было исследование технологических свойств связующего РС-Н и препрега на его основе, а также технологического процесса изготовления и эксплуатационных свойств получаемых стеклотекстолита и трехслойной сотовой панели.

Для исследований были использованы партии связующего РС-Н с разной концентрацией.

Исследовалось изменение технологических свойств (вязкости, липкости, содержания летучих продуктов и растворимого полимера) связующих и препрегов на их основе в процессе хранения в течение 6–10 месяцев.

Установлено, что в течение шести месяцев хранения при комнатной температуре связующее сохраняет свои технологические свойства и пригодно для пропитки армированных тканых наполнителей на установке УПР-3.

Содержание летучих продуктов и растворимой смолы в препрегах за весь период хранения снижается незначительно, всего на 8 и 2 %, соответственно, что говорит о высокой стабильности

препрега и его способности к переработке в пластик даже после шести–десятимесячном хранении.

Кривые зависимости технологического показателя препрега – липкости от времени хранения, имеют экстремальный характер и к концу шестого месяца хранения достигают максимума.

Процесс отверждения препрега исследовался на установке ИПФ-2002, принцип действия которой основан на измерении амплитуды затухания ультразвукового сигнала, величина которой зависит от вязкости связующего в образце.

Проведенные исследования процесса отверждения на нескольких образцах препрега из стеклоткани Т-15(П)-76 и связующего РС-Н показали высокую повторяемость происходящих при этом процессов по всему температурному диапазону (рис.).

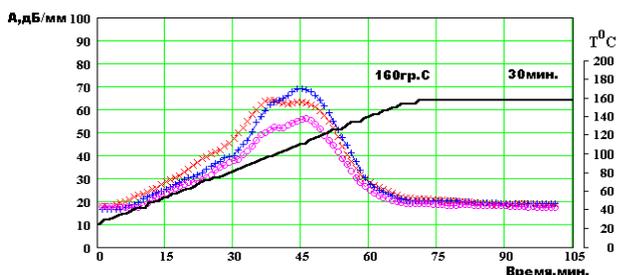


Рис. Изменение амплитуды ультразвукового сигнала от времени и температуры отверждения стеклопластика

Определение механических характеристик стеклопластиков, изготовленных из препрегов после различных сроков их хранения, показали, что стеклопластики, изготовленные из препрега после длительного хранения, имеют прочностные характеристики на уровне исходных (табл. 1) и не уступают свойствам стеклопластика на связующем СУСОМ-799НЕ.

Испытания прочностных характеристик трехслойных сотовых панелей, изготовленных из препрега стеклоткани Т-15(П)-76 на высококонцентрированном связующем РС-Н и связующем СУСОМ-799НЕ, показали, что стеклопластик на связующем РС-Н имеет более высокие прочностные показатели (табл. 2).

Таблица 1  
Физико-механические характеристики стеклопластиков

| Время хранения, мес. | Марка связующего | Предел прочности при растяжении, МПа | Предел прочности при 3-точечном изгибе, МПа | Предел прочности при сжатии, МПа | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Пористость, % (объем) |
|----------------------|------------------|--------------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 0                    | РС-Н (п.1)       | –                                    | 521   | 271                              | 1,38                         | 19,3                  |
|                      | РС-Н (п.2)       | –                                    | 557   | 236                              | 1,54                         | 7,8                   |
| 10                   | РС-Н (п.1)       | –                                    | 628   | 325                              | 1,47                         | 13,9                  |
|                      | РС-Н (п.2)       | –                                    | 573   | 250                              | 1,52                         | 8,7                   |
| 0                    | СУСОМ-799НЕ      | 306                                  | 476   | 315                              | 1,46                         | 11,6                  |

Таблица 2  
Механические характеристики трехслойных сотовых панелей

| Марка связующего | Усилие отдира обшивки от сот, Н·м/м | Предел прочности при отрыве, МПа | Предел прочности при 4-точечном изгибе, МПа |
|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| РС-Н             | 13,0                                | 3,4                              | 158,3                                       |
| СУСОМ-799НЕ      | 9,4                                 | 1,5                              | 153,7                                       |

Таким образом, связующее РС-Н обладает технологическими свойствами, позволяющими использовать его после длительного хранения (до 6–10 месяцев) в условиях цеха для

изготовления препрегов, которые после хранения в тех же условиях до 7–8 месяцев сохраняют свои характеристики полностью и обеспечивают формирование качественных конструктивных элементов интерьера.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОСТОЙКИХ СВЯЗУЮЩИХ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

*Г.С.Шуль, О.В.Томчани, Н.С.Обухова, С.В.Ворвуль, М.А.Сидоренко, И.А.Матухина* (ФГУП «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия)

Полимерные композитные материалы (ПКМ) применяются в изделиях авиационной и ракетно-космической техники уже более 50 лет. Уникальный комплекс свойств ПКМ, совершенствование и расширение методов формования изделий из композитов определили существенное повышение эффективности конструкций летательных аппаратов, увеличение их надежности и ресурса эксплуатации.

Эпоксидные смолы являются наиболее распространенными термореактивными материалами для полимерных связующих. Эксплуатационные свойства композитов на их основе в значительной мере зависят от химического строения смол, плотности сшивки и упаковки макромолекулярных цепей. Благодаря обширной номенклатуре олигомеров, активных разбавителей, модифицирующих добавок и отвердителей, которые обуславливают возможность варьирования состава, структуры и свойств эпоксидных композиций, созданы теплостойкие промышленно выпускаемые отечественные эпоксидные связующие ЭНФБ, ЭНФБ-2М, УП-2227. Одним из путей повышения теплостойкости эпоксидных материалов в настоящее время является создание систем, способных к образованию взаимопроникающих сеток. Этот подход использован в ОНПП «Технология» при разработке расплавных эпоксиимидных связующих, одним из первых вариантов которого является ТЭИС-27.

В настоящей работе исследовались вышеупомянутые связующие и стекло-, углепластики на их основе. Эти связующие обладают хорошими технологическими свойствами, по данным динамического механического анализа область их вязкотекучего состояния лежит в достаточно широком интервале температур, который для связующих ЭНФБ и ЭНФБ-2М сужается за счет начала реакции отверждения при более низких температурах.

Исследования зависимости динамических механических характеристик стеклопластиков от температуры показали, что более высокой теплостойкостью обладают материалы на основе связующих УП-2227 и ТЭИС-27, снижение модуля упругости этих материалов происходит выше 220°C. Следует отметить, что эпоксиимидное связующее ТЭИС-27 – единственное безрастворное среди исследуемых материалов. Низкая вязкость при отсутствии летучих компонентов открывает возможность его использования для тех технологий изготовления композитных материалов, которые исключают стадию изготовления препрегов и позволяют удешевить массовое производство изделий из ПКМ, сделав их доступными для более широкого спектра гражданских отраслей промышленности – железнодорожного и автомобильного транспорта, судостроения и др.

Полученные результаты показывают возможность использования композитных материалов на основе исследованных связующих для изготовления изделий из ПКМ с более высоким ресурсом эксплуатации при повышенных температурах, а также для изготовления композитной оснастки.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ PLEXIGLAS И ROHACELL В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*О.В. Чумин, Д.В. Павловский* (ООО Дегусса Химия, г. Москва, Россия)

Компания Дегусса предлагает широкую гамму полимерных материалов для авиакосмической промышленности. В перечень предлагаемых материалов входят, в частности, полиметилметакрилат Plexiglas, применяемый для остекления самолетов и вертолетов, и полиметакрилимидный пенопласт Rohacell, используемый как альтернатива сотовым заполнителям в конструкциях лопастей винтов вертолетов и элементов крыла самолетов, носовых обтекателей и элементов корпуса ракет-носителей.

Полимерные конструкционные материалы находят широкое применение в современной авиации благодаря своим высоким технологическим и эксплуатационным свойствам. К достоинствам такого материала, как Rohacell следует отнести хорошие усталостные характеристики, высокую прочность, температурную стойкость, отличное соотношение прочности и веса, химическую стойкость, возможность термоформования, легкость механической обработки, низкое дымовыделение и отсутствие выделения токсичных веществ в ходе горения. К достоинствам Plexiglas следует отнести, в первую очередь, высокие характеристики по светопропусканию, высокую прочность, всепогодность, продолжительное время жизни (материал не становится хрупким и не меняет свой цвет с течением времени), возможность получения материала различных цветов.

В настоящее время материалы широко используются в конструкциях таких летательных аппаратов, как вертолеты Eurocopter Tiger, Eurocopter EC 135 и Eurocopter EC 120 Ecureuil; Westland EH101 и Westland Lynx, Comanche, самолеты MD-11, Gulfstream IV, V, Airbus A300, 310-380 для остекления кабин экипажа и пассажирских салонов, изготовления лонжеронов, внешних и внутренних закрылков, элементов фюзеляжа и хвостового оперения, капотов двигателя, лопастей несущих и рулевых винтов и т.д. В ракетах-носителях Delta II – IV Rohacell используется для изготовления носовых обтекателей, элементов корпуса, тепловой защиты и т.д. Кроме того, некоторые марки Rohacell используются для изготовления элементов антенн различных спутников.

Материалы сертифицированы. Их применение при производстве авиационной техники на территории РФ разрешено в соответствии с существующими требованиями.

Как Plexiglas, так и Rohacell производятся и поставляются в виде листов определенного размера.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕКЛОСОТОПАСТОВ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОСТОЙКИХ СВЯЗУЮЩИХ**

*В.С. Волков, Г.С. Шуль, Е.В. Денисова, А.М. Крюков*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г. Обнинск, Россия)

Известно, что химическая природа полимерной матрицы определяет рабочие температуры полимерных композиционных материалов. Стеклопластиковые сотовые заполнители на основе фенолоформальдегидного связующего, разработанные и выпускаемые в ФГУП “ОНПП “Технология”, работают при температурах не выше 160°C. В данной работе представлены результаты исследований, направленные на повышение температуры эксплуатации стеклосотопластов.

Для исследований были выбраны две марки полиимидных связующих, наиболее термостойких среди терморезистивных полимеров: связующее СП-97С, полученное на основе двух имидообразующих компонентов – кислого диэфира тетракарбоновой кислоты и ароматического диамина (1 : 1), и связующее АПИ-3, представляющее собой спиртовой раствор

трех имидообразующих компонентов – кислого диэфира тетракарбоновой кислоты, ароматического диамина и кислого моноэфира алифатической дикарбоновой кислоты.

Связующее СП-97С изготавливается в условиях опытного производства, однако наличие амидных растворителей, малое время жизнеспособности в исходном состоянии и выделяющиеся низкомолекулярные продукты на конечной стадии отверждения полимера затрудняют широкое применение его в промышленности. Полиимидное связующее АПИ-3 изготавливается в настоящее время в лабораторных условиях, однако в этом варианте связующего не только исключается применение амидных растворителей, но и существенно улучшаются его технологические свойства. Кроме того, применение третьего компонента позволяет исключить выделение низкомолекулярных продуктов на стадии отверждения, а применение фурилового спирта в качестве “активного” растворителя позволяет повысить вязкость связующего на стадии пропитки армирующих наполнителей и снизить температуру на стадии олигомеризации связующего. При этом жизнеспособность связующего при 20°С сохраняется в течение 6 месяцев.

В настоящей работе представлены результаты исследований технологии получения и свойств стеклопластиковых сотовых заполнителей на основе указанных полиимидных связующих. Сформированную по клеевой технологии сотовую структуру в виде сотоблоков пропитывали исследуемым полиимидным связующим и отверждали по заданному режиму. Основная трудность такой технологии заключается в том, что теплостойкость клея БФ-2, используемого для получения сотовой структуры, составляет 160–180°С, в то время как режим отверждения связующего проводится при температурах от 160 до 280°С.

В результате проведенных исследований были подобраны режимы отверждения и изготовлены опытные образцы полиимидных стеклосотопластов на основе связующего СП-97С и АПИ-3. Было установлено, что соты с размером ячеек 3,5 мм на основе стеклоткани Э1/1-100 и связующего АПИ-3 имеют прочность при сжатии  $2,2 \pm 0,2$  МПа при плотности  $75 \pm 10$  кг/м<sup>3</sup>, а соты на основе стеклоткани Э4-80 и связующего СП-97С –  $1,8 \pm 0,3$  МПа при плотности  $65 \pm 10$  кг/м<sup>3</sup>, т.е. полученные значения прочности полиимидных стеклосот сопоставимы с прочностными показателями аналогичных фенолоформальдегидных. При воздействии повышенных температур показано, что падение значений прочности при сжатии на 50% для стеклосотопластов на основе СП-97С и АПИ-3 наблюдается при температурах 320 и 400°С, соответственно.

Таким образом, в результате комплексных исследований (ДМА, ДТА, ДСК) теплостойкости полиимидных стеклосотопластов показано преимущество сот на основе связующего АПИ-3.

## **СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ СОТОВЫЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ АВИАЦИИ**

***В.С.Волков, Г.С.Шуль, А.М.Крюков, Н.А.Садикова, С.И.Борисова, В.А.Разумовский,  
Е.В.Денисова, И.В.Кулагина, М.В.Гриценко***  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Высокие удельные прочностные и жесткостные характеристики сотовых заполнителей обеспечили их широкое применение в авиационных конструкциях. В настоящей работе приведены результаты многолетних исследований по созданию широкого спектра стеклопластиковых сотовых заполнителей (ССП) различного назначения с размером граней шестигранных ячеек от 2,5 до 10 мм.

Стеклопластиковые соты имеют высокие упруго-прочностные показатели, низкое водопоглощение, относятся к классу труднообрабатываемых материалов, что обусловило их преимущественное применение в наружных конструкциях самолетов.

Свойства разработанных стеклопластиковых сотовых заполнителей представлены в таблице.

Свойства стеклопластиковых сотовых заполнителей

| Марка сот    | Номер технических условий | Размер граней ячеек, мм | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Прочность при сжатии, МПа (без обшивок) | Прочность при сжатии, МПа (с обшивками) |
|--------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|---|---|
| ССП-1-2,5    | ТУ 1-596-395-98           | 2,5                     | 90 – 110                     | 3,5 – 5,7                               | 5,5 – 7,2                               |
| ССП-1-3,5    | " – "                     | 3,5                     | 74 – 90                      | 3,0 – 4,0                               | 4,5 – 5,5                               |
| ССП-1-4,2    | " – "                     | 4,2                     | 65 – 80                      | 2,0 – 3,3                               | 3,0 – 4,5                               |
| ССП-1П-2,5   | ТУ 1-596-391-96           | 2,5                     | 70 – 90                      | 2,5 – 4,0                               | 3,5 – 6,0                               |
| ССП-1П-3,5   | " – "                     | 3,5                     | 60 – 75                      | 2,2 – 3,5                               | 4,0 – 4,6                               |
| ССП-1П-4,2   | " – "                     | 4,2                     | 50 – 65                      | 1,5 – 2,5                               | 2,8 – 4,1                               |
| ССП-1-2,5-А5 | ТУ 1-596-414-01           | 2,5                     | 55 – 65                      | 2,5 – 3,2                               | 3,1 – 4,4                               |
| ССП-1-2,5-С  | ТУ 1-596-422-2002         | 2,5                     | 120 – 140                    | 7,0 – 8,0                               | 10,0 – 12,6                             |
| ССП-1-2,5У   | " – "                     | 2,5                     | 140 – 152                    | 10,6 – 13,2                             | 15,0 – 16,0                             |
| ССП-1-8Э     | ТУ 1-596-452-2005         | 8,0                     | 45 – 55                      | 1,8 – 2,2                               | 2,1 – 3,6                               |
| ССП-1-8Т     | ТУ 1-596-413-01           | 8,0                     | 70 – 80                      | 4,0 – 5,3                               | 5,1 – 6,5                               |
| ССП-1-10Т    | ТУ 1-596-413-01           | 10,0                    | 60 – 70                      | 2,2 – 3,0                               | 3,5 – 4,2                               |

Стеклопластиковые соты с размером граней ячеек от 2,5 до 4,2 мм применяются в авиационной технике в качестве заполнителей в панелях пола, крыла и киля, агрегатах механизации крыла и лобовых обтекателях и внедрены в самолетах Ту-204, Ту-334, Су-30МК, а соты с размером граней ячеек 8 и 10 мм – в качестве заполнителей в современных звукопоглощающих конструкциях резонансного типа.

Стеклопластиковые соты изготавливаются по блочной технологии, сущность которой заключается в том, что сначала изготавливается сотоблок, структуру которого образует стеклоткань, затем он пропитывается связующим. Технология производства стеклопластиковых сот представляет собой сложный многостадийный процесс, включающий в себя следующие операции: нанесение клеевых полос на стеклоткань, раскрой стеклоткани на заготовки, сборку и прессование сотопакета, растяжение сотопакета в сотоблок, пропитку сотоблока раствором связующего, термообработку пропитанного сотоблока и порезку стеклосотопласта на панели заданной высоты.

Были проведены комплексные исследования по отработке технологических режимов на всех этапах многостадийного процесса получения стеклопластиковых сотовых заполнителей для каждой марки сот. За счет применения различных стеклотканей и технологических особенностей изготовления были получены стеклопластиковые соты с особыми свойствами. Так, применение тонких стеклотканей толщиной 50–60 мкм с увеличенной плотностью нитей по основе и утку обеспечило изготовление легких сот типа ССП-1-2,5-А5 с прочностью при сжатии до 4,4 МПа, которые были использованы в панелях киля самолета Ту-334, а применение электроизоляционных стеклотканей с повышенной плотностью и изменение условий пропитки сотоблоков обеспечили изготовление силовых стеклосот типа ССП-1-2,5-С и ССП-1-2,5У с прочностью при сжатии до 16 МПа.

Стеклосоты типа ССП-1-8Т и ССП-1-10Т, изготовленные на основе конструкционной стеклоткани Т-10, обладают высокими прочностными характеристиками при большом размере граней ячеек. Это позволило использовать их в многослойных композитных звукопоглощающих конструкциях, обладающих повышенной акустической эффективностью, которые применяются в силовых установках самолетов Як-42 и Ил-96-300.

Все разработанные технологические процессы реализованы при организации производства стеклопластиковых сот в объеме 150 м<sup>3</sup>/год. По результатам разработок получены два патента РФ и поданы 2 заявки на получение патентов.

## **ЭПОКСИУРЕТАНОВЫЙ КОМПАУНД С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ТЕРМОУДАРУ**

*А.В.Хабенко, Л.В.Юдина, Л.И.Бойко, С.А.Долматов, О.В.Томчани*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Высоковольтные модули системы зажигания современных автомобилей с инжекторным впрыском топлива имеют более сложную конструкцию, чем у карбюраторных двигателей. Вместо одной высоковольтной катушки такой модуль содержит две, что значительно увеличивает его габариты и, соответственно, объем, заливаемый компаундом. В корпус модуля устанавливается также гибридный коммутатор, который заливается как одно целое с элементами модуля. Поэтому требования к герметизирующему компаунду существенно ужесточились. Наиболее существенным оказалось требование по устойчивости компаунда к циклическим изменениям температур. Компаунд должен выдерживать не менее 10 циклов:  $-40^{\circ}\text{C} - 2$  часа,  $+140^{\circ}\text{C} - 2$  часа, без растрескиваний и отслоений от стенок корпуса и других элементов модуля. Из-за значительных размеров модуля и разнородных материалов его элементов (сталь, медь, алюминий, полиамид и др.) выполнить это требование весьма трудно. Кроме того, компаунд должен обеспечивать хорошую адгезию ко всем элементам модуля и надежно защищать их от пыли, влаги, бензина, масел и соляного раствора.

Анализ литературы и собственные исследования показали, что удовлетворить вышеизложенным требованиям могут композиции на основе эпоксиуретанов, сочетающие хорошие электроизоляционные характеристики с эластичностью, прочностью и хорошей адгезией к разнородным материалам. Эти композиции могут быть получены на основе отечественного промышленно выпускаемого сырья и являются сравнительно недорогими.

В процессе работы над созданием компаунда было опробовано свыше 140 композиций, проведены исследования их свойств методами ИК-спектроскопии, дифференциально-термического, термогравиметрического и термомеханического анализов, определены электрофизические характеристики: удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость в широком диапазоне температур и частот, электрическая прочность в исходном состоянии и после воздействия температуры и влаги. Установлена высокая влаго- и термостойкость разработанного компаунда, которые существенно превышают аналогичные свойства импортного компаунда фирмы “Сибя”. Разработаны экспресс-методы оценки трещиностойкости компаундов и их адгезионных свойств.

Полный цикл заводских испытаний в лаборатории ЗАО “Завод автотракторной электроаппаратуры” показал, что разработанный эпоксиуретановый компаунд КЭУ-1 удовлетворяет их техническому заданию по основным эксплуатационным и технологическим характеристикам. Он поставляется в виде двух компонентов: смолы и отвердителя, которые при использовании тщательно перемешиваются в соотношении 5:1. Время гелеобразования компаунда при температуре 20<sup>o</sup>C составляет 2 часа, время отверждения – 24 часа. Компоненты компаунда боятся влаги, но в герметичной упаковке могут храниться без потери свойств до 12 месяцев.

В настоящее время компаунд КЭУ-1 поставляется для заливки электро-технических изделий на Калужский завод автомобильного электрооборудования, Обнинское предприятие ЗАО “Энергоэлектрика”, Московское предприятие ООО “СтандартМаркет”, Омское НПО “МИР” и другие предприятия России. Объем поставок компаунда в 2006 году по сравнению с 2005 вырос в 1,7 раза, а за первое полугодие 2007 г. превысил годовую поставку 2006 года.

## **ЭПОКСИДНЫЙ КОМПАУНД ДЛЯ ЗАЛИВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ**

*А.В.Хабенко, Л.В.Юдина, А.М.Котухова, С.А.Долматов*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Постоянное повышение требований к надежности автомобиля, его агрегатам, узлам и системам ведет к ужесточению требований к компаундам, используемым для герметизации элементов электрооборудования. Полимерные композиции, применяемые для компаундирования датчиков положения коленвала, должны быть устойчивыми к влаге, бензину, маслам, соляному раствору, выдерживать вибрацию и удары, обладать хорошими электроизоляционными свойствами после вышперечисленных воздействий. Они должны выдерживать циклические изменения температур от минус 40 до плюс 140 °С, что является наиболее жестким требованием. Кроме этого компаунды должны обладать набором технологических свойств, обусловленных их использованием в конкретном изделии при наличии определенного оборудования.

С помощью методов ИК-спектроскопии, дифференциально-термического и термогравиметрического анализов были проанализированы состав и свойства компаундов, применяемых в отечественной промышленности для герметизации датчиков положения коленвала автомобиля. На основе проведенных исследований и проработки литературных данных нами был разработан ряд композиций на основе различных эпоксидных смол и их отвердителей, исследованы их технологические и электрофизические характеристики (удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, электрическая прочность) в широком диапазоне частот и температур.

Так как объем заливаемого датчика небольшой (1см<sup>3</sup>), удовлетворить эксплуатационным требованиям было несложно. Более трудная задача состояла в получении заданных технологических характеристик: низкой вязкости при температуре заливки (70°С) и одновременно достаточной тиксотропии, которая не позволяла бы тяжелому наполнителю, входящему в состав компаунда с целью понижения коэффициента линейного температурного расширения и его стоимости, выпадать в осадок в процессе отверждения и при хранении. Подбор типа и концентрации тиксотропной добавки решил эту проблему.

В связи с тем, что разработанный компаунд в поставке представляет собой однокомпонентную систему, важным показателем является срок его хранения при комнатной температуре, который удалось увеличить до четырех месяцев путем подбора концентрации катализатора реакции отверждения. По результатам лабораторного тестирования лучший вариант компаунда под торговой маркой КЭУ-1 был испытан заказчиком по стандартной программе заводских испытаний.

Компаунд КЭУ-1 представляет собой густую массу черного цвета. При температуре 70°С он становится высокотекучим и сохраняет вязкость для заливки в течение 8 часов. Оптимальный режим отверждения компаунда: 120°С – 4 часа. КЭУ-1 поставляется в металлических банках емкостью 1 л.

Компаунд КЭУ-1 внедрен на Калужском заводе “Автоэлектроника”, в настоящее время также поставляется на Старооскольский завод автотракторного электрооборудования.

# ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА

Д.Н.Садовничий, Ю.М.Милёхин, А.П.Тютнев

(ФГУП “Федеральный центр двойных технологий “Союз”, г.Дзержинский, Россия)

Облучение электронами вызывает накопление объемных электрических зарядов ( $\rho$ ), причем напряженность электрического поля может достигать уровня электрической прочности. Возникновение электрического пробоя является весьма вредным и опасным явлением, способным вызвать потерю эксплуатационной пригодности диэлектрического компаунда. В настоящей работе в рамках метода нестационарных токов [1] проведено теоретическое и экспериментальное изучение закономерностей электризации эпоксидного компаунда (отвержденный аминотитанатом эпоксидный компаунд ЭДТ [2] с абсолютной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon\varepsilon_0=4,4\times 10^{-11}$  Ф/м) при его облучении в вакууме. Схема эксперимента заключается в воздействии на поверхность короткозамкнутого образца коллимированного потока моноэнергетических электронов с постоянной плотностью потока. Об электризации судили по кинетике спада тока с тыльного электрода  $I_h(t)$ . Обозначим через  $I_0$  плотность тока инжекции, которая равна алгебраической сумме плотности токов пучка и обратно рассеянных электронов, а мощность дозы на поверхности образца обозначим  $P_0$ . Максимальный пробег электронов  $L$  был меньше толщины образца  $h$ . Отличительной особенностью предложенного подхода является использование реальных распределений по глубине образца мощности поглощенной дозы  $g(x)$  и тока падающих электронов  $f(x)$ , для расчета которых использовали программный комплекс XRAY [3].

Для получения достоверных результатов разыгрывали  $10^6$  историй первичных частиц с прослеживанием электронов всех поколений вплоть до энергии 1 кэВ. Точно рассчитаны функции  $g(x)$  и объемной скорости термализации электронов  $-df(x)/dx$  при  $E_e = 0,04-2$  МэВ [4]. Показано, что зависимость  $L$  от  $E_e$  весьма точно дается следующей формулой:

$$L = \exp \left[ -0,913 + 1,248 \ln E_e - 0,093 (\ln E_e)^2 \right].$$

Здесь  $E_e$  и  $L$  имеют размерности соответственно МэВ и см. Для описания электризации использовали совместное решение уравнений непрерывности токов и Пуассона, где зависимость РЭ по глубине образца связана с мощностью поглощенной дозы степенной функцией [5]:

$$\gamma_r(x) = A_r \cdot P^\Delta(x).$$

Величина  $\Delta$  изменяется от 0,5 до 1. Параметры РЭ ЭДТ были измерены независимо по методике [6] и равны  $A_r=(1,8\pm 0,5)\times 10^{-14}$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>(Гр<sup>-1</sup> с) <sup>$\Delta$</sup>  при  $\Delta=0,8\pm 0,03$ . Результаты расчета распределения объемного заряда в безразмерной форме  $\Omega(\xi, \tau) = \gamma_r L \rho(x, t) / I_0 \varepsilon_0$  от пространственной координаты  $\xi = x/L$  представлены на рис. 1.

Величина нестационарного тока в начальный момент облучения  $I_h(0)$  равна

$$I_h(0) = \frac{I_0}{h} \cdot \int_0^L f(x) dx.$$

Далее происходит спад тока. Установлено, что в асимптотической области он зависит от величины  $\Delta$  простым соотношением

$$I_h \sim t^{-1/\Delta}.$$

То есть определяется показателем степени в зависимости РЭ от мощности дозы. Источником облучения служили электростатический генератор ЭСГ-2,5 с энергией электронов 1 МэВ, электронный ускоритель ИК-400 с энергией электронов 60–120 кэВ и электронный микроскоп УЭМВ-100К с энергией 75 кэВ [4,5]. Экспериментально обнаруженный закон спада  $I_h$  в

асимптотической области соответствует  $\sim t^{-1,24-1,28}$ , что хорошо согласуется с развитыми представлениями (рис. 2).

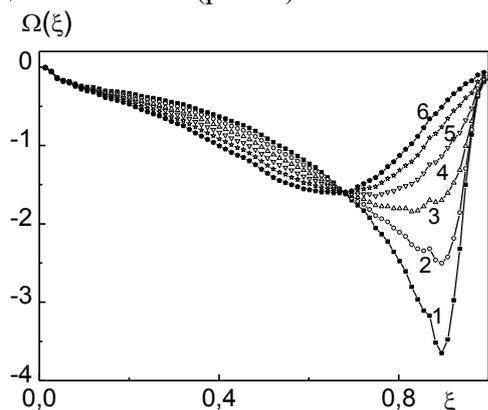


Рис.1. Распределение плотности заряда для  $t\gamma_{\Gamma}/\epsilon\epsilon_0 = 188,3$ ,  $h = 2L$ ,  $E_e = 0,12$  МэВ и  $\gamma_{\Gamma}/\epsilon\epsilon_0 = 0,01883$  с $^{-1}$ .  $\Delta = 1$  (1); 0,9 (2); 0,8 (3); 0,7 (4); 0,6 (5) и 0,5 (6)

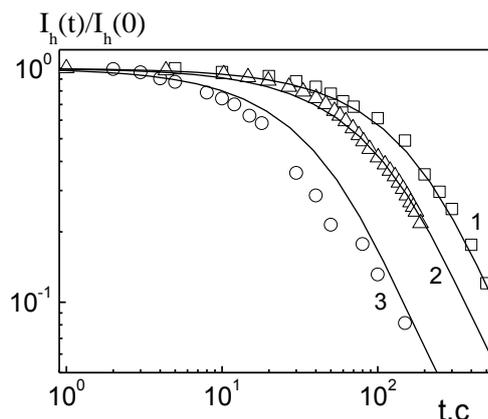


Рис.2. Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных (сплошные кривые) значений.  $E_e = 0,12$  (1), 1 (2) и 0,06 МэВ (3).  $P_0 = 17$  (1), 14 (2) и 64 (3) Гр/с (5).  $h = 365$  мкм (1, 3) и 4,95 мм (2)

Таким образом, на примере эпоксидного компаунда показано, что корректный учет распределений по глубине образца мощности дозы и скорости термализации быстрых электронов, наряду с особенностями РЭ, позволяет однозначно описать электризацию полимерных диэлектриков при облучении электронами в вакууме. Обсуждаются общие закономерности влияния свойств РЭ на кинетику нестационарных токов, накопление объемных зарядов и генерацию электрического поля.

#### Литература

1. Gross B., Sessler G.M., West J.E. Charge dynamics for electron-irradiated polymer-foil electrets // J. Appl. Phys. 1974. V. 45, № 3. P.2841.
2. Сидоров О.И., Юсуфов М.А. Теплостойкое эпоксидное связующее для полимерных композиционных материалов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России.– 2000.– № 4.– С.126.
3. Лаппа А.В., Бурмистров Д.С., Васильев О.Н. Расчет микродозиметрических характеристик в воде, облучаемой электронами и гамма-квантами // Известия ВУЗ'ов. Физика. 1988. № 2. С.77.
4. Садовничий Д.Н., Тютнев А.П., Хатипов С.А., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д. Накопление объемных электрических зарядов при облучении эпоксидного компаунда электронами в вакууме // Высокомолекулярные соединения. А. 2003. Т.45, № 2. С.250.
5. Sadovnichii D.N., Tyutnev A.P., Milekhin Yu.M. Bulk charging of polymer films under electron irradiation // Proc. 9-th International symposium on "Materials in space environment", Noordwijk, 2003.– P. 727.
6. Садовничий Д.Н., Тютнев А.П., Хатипов С.А., Милицын Ю.А. Радиационная электропроводность резин и метод ее прогнозирования // Химия высоких энергий. 1998. Т. 32, № 1. С.7.

## **КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ В КАЧЕСТВЕ ИНДИКАТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ**

*М.А.Кулманов, Г.А.Кальменова, А.С.Мусина*

(Институт химических наук им.А.Б.Бектурова МОН РК, г.Алматы, Казахстан)

Процесс получения имидопластов включает, как правило, двухстадийную схему синтеза полиимидов, состоящую в получении на первой стадии перерабатываемого (растворимого и плавкого) форполимера, который на стадии прессования отверждается, превращаясь в полиимид. Растворы связующих должны отвечать требованиям, предъявляемым к пропиточным компаундам, важнейшими из которых являются стабильность, высокая концентрация связующего при сравнительно невысокой вязкости пропитывающих растворов. Полиамидокислоты на основе диангидридов тетракарбоновых кислот и диаминов не удовлетворяют этим требованиям. В связи с этим синтез олигобисмалеимидов (ОМБИ) осуществляли по измененной методике Серли через стадию олигоамидокислоты в ДМФ с последующей химической имидизацией её в олигобисмалеимид. В качестве связующих были испытаны также реакционные растворы олигоимидоаминов (ОИА) с диаминодифенилоксидбисмалеимидами (БМИДФО), смеси его с малеиновым ангидридом (МА) и МА.

Переработка ароматических полиимидных связующих, в качестве которых обычно используют полностью циклизованные полиимиды или промежуточные продукты их синтеза – полиамидокислоты, связана с определенными технологическими трудностями.

Более перспективным способом получения полиимидных связующих является использование плавких олигомеров, содержащих имидные циклы и реакционноспособные группы, за счет которых при отверждении изделий образуется полимер сшитой структуры.

В сообщении приведены результаты исследований степени отверждения углепластиков, полученных с использованием в качестве связующего олигоимида на основе диангидридов алициклических тетракарбоновых кислот, ароматических диаминов и малеинового ангидрида.

Исследован процесс термоотверждения полиимидных связующих методами электропроводности, ИК-спектроскопии и по изменению физико-механических свойств определены основные факторы, влияющие на процесс термической полимеризации, найдены оптимальные режимы переработки их в углепластики.

Методом регрессионного анализа рассчитаны кинетические параметры процесса термоотверждения полиимидных связующих в интервале температур 453–523 К и установлено, что реакция термической полимеризации олигоимида протекает по первому порядку, с высокими значениями энергии активации.

Синтезированные полиимидные связующие использованы при создании углеродсодержащих индикаторных электродов.

## **О ПРОБЛЕМАХ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ НА ОСНОВЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*А.И.Быков, С.Н.Шестухина, Д.В.Моторин*

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

Рассмотрены проблемы, возникающие при изготовлении препрегов на основе однонаправленных углеродных материалов, и конструктивные решения этих проблем на примерах изготовления препрегов из углеродного жгута и однонаправленных тканей импортного производства.

Пропитка тканей производится в ванне на установке горизонтального вида эпоксифенольным связующим растворного типа. Ткань, поступая в ванну со связующим,

пропитывается, проходит сушку, а затем, проходя через систему каландров, раскатывается и наматывается на приемную катушку.

При данном способе пропитки возникает проблема, связанная с оптимизацией содержания связующего в препреге. Углеродные волокна, из которых состоит ткань, набирают небольшое количество связующего. Кроме того, при прохождении пропитанной ткани через систему каландров связующее частично отжимается из ткани.

Данная проблема была решена с помощью ультразвукового устройства, установленного в пропиточную ванну. Ультразвук удаляет из ткани микропузырьки воздуха, которые находятся между моноволокнами жгута, и в то же время как бы “вбивает” на освободившиеся места связующее. Далее, проходя между валами каландров, излишек связующего отжимается из ткани, а ткань раскатывается в сплошное полотно. Подобрать зазоры между валами каландров можно добиться требуемого нанесения связующего.

При пропитке ровинга данным способом наблюдаются те же проблемы, но помимо вышеописанных трудностей стоит задача предварительно распределить жгуты так, чтобы он раскатался в сплошное полотно, т.е. между волокнами не оставалось зазоров, а также получить препрег заданной толщины.

Для решения данной проблемы была разработана и изготовлена оригинальная гребенка, с помощью которой можно регулировать расстояния между жгутами в зависимости от требуемой толщины препрега.

Таким образом, в ФГУП “ОНИИ “Технология” создана установка, на которой можно изготавливать препреги как из однонаправленных тканей, так и из углеродного жгута. Кроме того, на данной установке возможно изготовление не только однонаправленных препрегов, но и препрегов на основе тканей с саржевым переплетением из стеклянных и углеродных нитей. Причем при смене пропитываемых материалов установка не требует какой-либо доработки или модернизации.

## **ТЕРМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КЛЕЕВОГО ПРЕПРЕГА ВК-36РД**

***В.В.Соколов, А.П.Богданов, В.В.Фоменко***  
(ФГУП “ОНИИ “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Клеевой препрег ВК-36РД является относительно новым, недостаточно исследованным, перспективным для применения композиционным материалом. В частности, в литературе отсутствуют данные по коэффициенту линейного термического расширения (КЛТР) и его температурной зависимости. Эта информация необходима при проектировании оснастки для формования изделий из этого материала и расчета конструкций, работающих в широком диапазоне температур.

В настоящей работе представлены данные по температурной зависимости КЛТР стеклопластика на основе клеевого препрега ВК-36РД ТУ 1-596-389-96 и стеклоткани Т-10-14 ТУ 6-48-118, клеевой пленки ВК-36Р и трехслойной панели с обшивками из препрега ВК-36РД и сотового заполнителя ССП-1-3,5 ТУ1-596-395-98.

Измерения выполнены на дилатометрическом устройстве с цифровым измерителем удлинения фирмы “Mitutoyo”, терморегулирование осуществлялось программным терморегулятором Термодат-15. Информация об удлинении и температуре поступала на компьютер и обрабатывалась по заданной программе. Образцы стеклопластика с различным направлением армирования длиной 50 мм формовали вакуумным и прессовым методами, образец из клеевой пленки ВК-36Р получен нагревом необходимого количества слоев в форме по стандартному режиму.

В таблице представлены данные, полученные из второго цикла измерений. Направление выкладки образцов, указанное в таблице, – по длине образца.

| Схема выкладки                                | (0) <sub>14</sub> | (90) <sub>14</sub> | (0;90) <sub>7</sub> | (0;90) <sub>6</sub> | панель | стекло-волокно | клей                |                     |
|---|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------|----------------|---------------------|---------------------|
| Способ формования                             | вакуум            | вакуум             | вакуум              | пресс               | вакуум |                | $\alpha_{СТ}$ 100°C | $\alpha_{ВЭ}$ 150°C |
| $\alpha_{20-100^\circ\text{C}} \cdot 10^{-5}$ | 1,52              | 2,06               | 1,74                | 1,48                | 1,55   | 0,5[1]         | 5.43                | 13,3                |
| Толщина монослоя, мм                          | 0,38              | 0,374              | 0,381               | 0,283               |        |                |                     |                     |

Как следует из таблицы, самым высоким значением КЛТР обладает отвержденная клеевая пленка, как в стеклообразном ( $\alpha_{СТ}$ ), так и в высокоэластическом ( $\alpha_{ВЭ}$ ) состояниях. Температура перехода ( $T_{СТ}$ ) из стеклообразного (СТ) состояния в высокоэластическое (ВЭ), определенная из температурной зависимости КЛТР, составляет 138°C. Значения КЛТР в ВЭ и СТ состоянии отличаются только в два раза, что, по-видимому, связано с сильным межмолекулярным взаимодействием в ВЭ состоянии, обуславливающим хорошие клеящие свойства при высоких температурах. Это подтверждается и низким значением константы Симхи-Бойлера [2].  $K_{с-6} = (\alpha_{ВЭ} - \alpha_{СТ}) \cdot T_{СТ}$  равно в данном случае  $1,1 \times 10^{-2}$ . КЛТР стекловолокна на порядок ниже, чем у клея, поэтому для стеклопластиков на основе этих материалов КЛТР может значительно меняться в зависимости от ориентации волокон, содержания клея и способа формования, что подтверждается данными таблицы. Для сотовой панели значения КЛТР во всем диапазоне температур близки к таковым для стеклопластика ориентации (0)<sub>14</sub>.

#### Литература

1. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков/И.В. Гуртовник, В.И. Соколов, Н.Н. Трофимов, С.Г. Шалгунов— М.: Мир, 2002.— 368с.
2. Takashi Kamon, Hitoshi Furukawa. Curing Mechanisms and Mechanical Properties of Cured Epoxy Resins // Advances in Polymer Science. 1986. V.80. PP. 173–202.

## ВАКУУМ-АВТОКЛАВНОЕ ФОРМОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ КОНТУРОМ

*А.В.Клопота, В.С.Петропольский, В.П.Валко*  
(АНТК им.О.К.Антонова, г.Киев, Украина)

Изготовление интегральных конструкций с аэродинамическим контуром создает ряд дополнительных трудностей. Среди них такие, как:

- в аэродинамический поток выходит две и более наружных поверхностей агрегата;
- наличие повышенных требований к качеству выполнения наружных поверхностей агрегата;
- наличие единичных или многочисленных конструктивных элементов подкрепляющего усиливающего набора и необходимость их точной взаимной увязки.

В авиации, как правило, такие конструкции относятся к силовым и ответственным, состояние которых оказывает существенное влияние на жизнеспособность всего летательного аппарата в целом.

Вакуум-автоклавный метод формования деталей из полимерных композиционных материалов продолжает оставаться основным методом изготовления деталей, узлов и агрегатов аэрокосмического назначения и обеспечивает высокие значения прочностных и весовых характеристик изготавливаемых изделий.

На основании имеющегося опыта изготовления авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов в АНТК им. О.К. Антонова разработан технологический процесс вакуум-автоклавного формования интегральных конструкций, позволяющий разрешить все

возникающие в процессе изготовления проблемы и в том числе получение точного теоретического контура, качественной пропрессовки всех собранных элементов интегральных конструкций, точной установки нервюр.

В разработанном технологическом процессе точность и качество аэродинамических поверхностей обеспечивается путем создания контакта в процессе формования с рабочими поверхностями оснастки. Создание вакуумного и избыточного давлений в процессе формования производится посредством объединенной системы вакуумных мешков. Предусматриваются меры по выравниванию значений давлений в вакуумных мешках

Технологический процесс изготовления интегральной конструкции в этом случае состоит из следующих основных операций:

- приготовление связующего;
- изготовление препрега;
- подготовка и контроль элементов оснастки;
- изготовление заполнителей подкрепляющего набора;
- изготовление стенок нервюр;
- выклейка вакуумных мешков;
- проверка герметичности вакуумных мешков;
- выкладка деталей внутренних контуров на оправки;
- выкладка обшивок и других деталей наружных контуров;
- сборка деталей внутреннего и наружного контуров;
- формирование общей системы вакуумных мешков;
- вакуумно-автоклавное формование;
- механическая обработка;
- контроль качества и свойства отформованного пластика.

На всех этапах технологического процесса обеспечивается контроль качества изготавливаемой конструкции. С целью получения большей достоверности результатов контроля вырезка образцов-свидетелей производится непосредственно из специально предназначенных для этого припусков изготавливаемой конструкции.

С использованием разработанного технологического процесса изготавливались конструкции, относящиеся к механизации крыла самолета Ан-148, рулевых поверхностей хвостового оперения.

Регулярно проводимый неразрушающий контроль изготавливаемых конструкций, как правило, показывает отсутствие непроформовок, непроклеев и других подобного рода дефектов. Это дает основание сделать заключение об устойчивости и эффективности разработанного технологического процесса.

## **ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИОПРОЗРАЧНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ САМОЛЕТА**

*Н.А.Лавро, С.А.Гежа, А.В.Горянов*

(ОАО “ТАНТК им. Г.М.Бериева”, г.Таганрог, Россия)

Создание радиопрозрачного обтекателя всегда сопряжено с поиском конструктивно-технологического решения, одновременно удовлетворяющего условиям, по крайней мере, двух противоречащих друг другу требований – несущей способности и радиопрозрачности. Наиболее полно указанное противоречие проявляется с возрастанием рабочей частоты приемопередающего устройства (антенны).

Показатели физико-механических, радиотехнических и эксплуатационных свойств радиопрозрачных обтекателей сотовой конструкции существенно зависят от параметров технологического процесса изготовления.

Предварительные радиотехнические и прочностные расчеты показали, что стенка поля обтекателя должна иметь следующие конструктивные параметры: толщину монослоя обшивки

0,25 мм; высоту стенки 4,75 мм; высоту сотового заполнителя  $3 \pm 0,15$  мм; западание обшивки в соты 0–0,05 мм; прочность при равномерном отрыве обшивок от сот не менее 40 кг/см<sup>2</sup>.

Обтекатель должен быть выполнен из препрега КМКС 2.120.Т10.37(55), сотового заполнителя ССП-1-4,2, клеевой пленки ВК-36Р.

В целях определения возможности изготовления стенки обтекателя с заданными конструктивными параметрами были опробованы два способа изготовления обтекателя: за один технологический переход (или способ совмещенного формования); за несколько переходов (или способ раздельного формования).

Исследования проводились на плоских образцах с моделированием условий изготовления натурального обтекателя.

В связи с повышенными требованиями к аэродинамической форме было сразу принято решение об изготовлении обтекателя от наружного теоретического контура, то есть в матрице.

На рис.1 показано сечение образца стенки обтекателя, выполненной за один переход.



Рис. 1. Сечение стенки обтекателя, выполненной за один переход

В центре ячеек сот толщина монослоя обшивки составляла от 0,40 до 0,45 мм. К тому же отмечались потеки клея по стенкам сотового заполнителя, что с радиотехнической точки зрения вело к существенному ухудшению проницаемости сот.

Сечение образца стенки обтекателя, полученное способом раздельного формования (предварительно подформовываются слои из КМКС 2.120.Т10.37, а склейка с сотами производится через КМКС 2.120.Т10.55), показано на рис.2.



Рис.2. Сечение стенки обтекателя с предварительно подформованными слоями

В данном способе толщина монослоя предварительно отформованных обшивок составила 0,28 мм, толщина монослоя обшивки после приклейки к сотам составила 0,38 мм.

После изменения двух конструктивно-технологических параметров раздельного способа формования (1 – технологического пакета (разделительный слой, впитывающий слой, дренаж) для подформовки слоев обшивки, 2 – соединение предварительно подформованных обшивок с сотами производить через клеевую пленку ВК-36Р, предварительно осажденную на соты) удалось удовлетворить требованиям к обтекателю.

В результате проведенных исследований определена следующая последовательность и соответственно количество переходов изготовления обтекателя с заданными требованиями:

1. В матрице производится набор всех слоев наружной обшивки из клеепрепрега КМКС 2.120.Т10.37 и через технологический пакет (разделительная перфорированная пленка,

впитывающий слой, полиэфирный дренаж) производится предварительная вакуумная подформовка пакета по неполному режиму;

2. На наружную обшивку устанавливается имитатор толщины сотового заполнителя и по нему предварительно формируется один слой внутренней обшивки;

3. К внутренней обшивке приформовывается сотовый заполнитель с предварительно осажденной клеевой пленкой ВК-36Р;

4. На сотовый заполнитель осаждается клеевая пленка ВК-36Р и приформовывается один слой предварительно отформованной внутренней обшивки;

5. Набираются недостающие слои внутренней обшивки, слои усиления по контуру обтекателя и производится окончательное вакуумное термостатирование обтекателя.

По приведенной технологии изготовлена серия радиопрозрачных обтекателей антенн гигагерцевого диапазона частот с повышенными требованиями по диэлектрической проницаемости и однородности поля оболочки. Натурные статические и радиотехнические испытания обтекателя подтвердили правильность принятых технологических решений.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЯТИСЛОЙНЫХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ УКРЫТИЙ СОТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ**

*Е.Р.Леникаш, Н.С.Обухова, Г.С.Шуль, И.Н.Добрецова*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Теоретические расчеты показывают, что при прохождении радиоволны через сложные многослойные конструкции (пяти-; семислойные и т.д.) возможны такие комбинации толщин слоев, которые обеспечивают минимальные отражения электромагнитной энергии при нескольких углах падения радиоволны. Пятислойные конструкции включают в себя 3 стеклопластиковых обшивки и два слоя стеклопластикового заполнителя. В отличие от однослойных и трехслойных стенок радиопрозрачных укрытий (РПУ), в которых можно варьировать только одним параметром, в пятислойных стенках имеется возможность варьировать двумя параметрами: значениями толщин стенок и высот заполнителя. Это существенно расширяет диапазон рабочих углов падения радиоволны с приемлемой радиопрозрачностью РПУ.

Важным моментом технологической реализации многослойных конструкций является необходимость обеспечения заданного уровня прочностных характеристик конструкции при сохранении расчетных значений радиопрозрачности.

В связи с отсутствием литературных данных экспериментально исследован ряд вариантов технологии изготовления многослойных конструкций. Показано существенное влияние способа соединения между обшивкой и сотопластом на прочность при отрыве. Обшивки в многослойной конструкции могут быть предварительно сформованы и далее соединяться с сотами с помощью пленочного полимерного клея. Обшивка может также соединяться с сотами за счет связующего при совмещенном формовании обшивки и её склеивания с сотами. Прочность при отрыве пятислойных образцов в зависимости от технологии сборки изменяется от 0,6 до 15 кг/см<sup>2</sup>.

Выбор технологической схемы изготовления РПУ многослойной конструкции должен определяться, с одной стороны, прочностными и радиотехническими свойствами получаемых изделий, а, с другой стороны, минимизацией количества необходимых единиц формообразующей оснастки и соответственно снижением затрат на подготовку производства и технологии изготовления.

На основе проведенных исследований выбрана технологическая схема изготовления многослойного РПУ, разработаны и изготовлены мастер-модель и формообразующая оснастка для крупногабаритного РПУ многослойной конструкции.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ ОБОЛОЧЕК КОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ДАВЛЕНИЯ**

*А.А.Смердов, Л.П.Таурова, С.В.Цветков, Г.Г.Кулиш, В.А.Селезнев, О.В.Лебедева*  
(Институт композитных технологий, МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия)

Современные композитные сосуды давления, как правило, имеют специальную герметизирующую оболочку – лайнер, поскольку в абсолютном большинстве случаев композит не может обеспечить выполнение требований по герметичности. Металлические лайнеры обладают высокой герметичностью, но их использование приводит к увеличению веса баллона по сравнению с баллоном, имеющим полимерный лайнер. Цельнолитые полимерные лайнеры требуют применения специального дорогостоящего оборудования, обеспечивающего высокое качество лайнера (отсутствие пористости и разнотолщинности). Лайнеры, получаемые намоткой из полимерных лент, могут быть изготовлены на том же оборудовании, что и силовая композитная оболочка. Такая технология позволяет варьировать схему укладки лент, размещать внутри полимерной оболочки слои металлической фольги, увеличивающие герметичность, т.е. дает богатые возможности для оптимизации лайнера. Исследованию возможностей изготовления таких лайнеров и посвящена настоящая работа.

Основными проблемами при создании намотанных полимерных лайнеров являются обеспечение высокого качества спекания или склеивания лент между собой и, при необходимости, с фольгой, обеспечение герметичности соединения оболочки лайнера с закладными элементами и наличие хорошего отделения лайнера от оправки. В настоящей работе представлены некоторые результаты исследования этих проблем для лайнеров из полиимидной пленки со слоями из алюминиевой фольги, а также для лайнеров из металлизированной пленки на основе лавсана и полиимида. Исследования проводились как на специальных образцах, так и на различных лайнерах.

Первым объектом исследования был лайнер для шар-баллона разгонного блока “Фрегат” (НПО им.С.А.Лавочкина), изготовленный зонной намоткой на металлическую оправку из полиимидной ленты шириной 15 мм, покрытой фторопластом Ф4МД. При изготовлении лайнера между вторым и третьим и между третьим и четвертым слоями укладывались по всей поверхности лепестки из алюминиевой фольги толщиной 20 мкм, предварительно покрытые фторопластом Ф4МД. В качестве антиадгезионного слоя на оправку укладывался либо слой фторопластовой пленки Ф4, либо слой алюминиевой фольги.

Рабочей средой шар-баллона является гелий под давлением 360 атм. Качество лайнера оценивалось визуальным осмотром и испытаниями на газопроницаемость гелием после изготовления силовой оболочки. В работе приведены результаты испытаний на газопроницаемость лайнеров, полученные в процессе отработки баллона, и дан анализ влияния отдельных технологических и конструктивных особенностей изготовления лайнера на газопроницаемость.

На трубчатых образцах с различным чередованием слоев полиимидной пленки, фольги и фторопластовой пленки проведены исследования по оценке влияния температуры термообработки на качество спекания и на состояние отдельных слоев после спекания.

Для оценки газопроницаемости по гелию других перспективных материалов были изготовлены плоские образцы на основе лент из лавсана и полиимида с клеящим (термосвариваемым) слоем, с металлизацией или без нее, а также из сополимера полиэтилена – сэвилена. Образцы выполнялись ручной намоткой ленты на квадратную металлическую пластинку. Лента наматывалась с нахлестом в половину ее ширины. При намотке последующего слоя направление намотки ленты в нем было перпендикулярно по отношению к направлению расположения ленты в предыдущем слое. После намотки в специальной оснастке в условиях сжимающего давления производилась термообработка при рабочей температуре клеящего слоя.

В работе приведены результаты испытаний всех образцов на газопроницаемость по гелию при избыточном давлении 3 атм.

На следующем этапе работы металлизированные пленки из лавсана и полиимида и клеящим слоем из смолы ТФ-60, показавшие наименьшую газопроницаемость при испытаниях образцов, были использованы для изготовления экспериментальных образцов намоточных полимерных лейнеров емкостью 50 л. Лейнеры наматывались на оправку, имевшую форму цилиндра с двумя сферическими днищами. Поверх лейнера наматывался слой силовой оболочки из стекловолокна минимальной толщины, достаточной для того, чтобы обеспечить прочность лейнера при проведении испытаний при внутреннем давлении 3 атм. В работе приведены результаты испытаний трех таких лейнеров.

Проведенные исследования позволили подтвердить целесообразность использования намоточных полимерных лейнеров для герметизации композитных баллонов давления и определить пути дальнейшего совершенствования таких лейнеров.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СОТОВЫХ ЗПК ИЗ ПКМ**

*В.С.Волков, Г.С.Шуль, Е.В.Денисова, Н.В.Выморков, А.В.Осауленко*  
(ФГУП «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия)

В связи с ужесточением международных требований по шуму самолетов на местности большую актуальность приобретают вопросы создания современных звукопоглощающих конструкций (ЗПК), которые устанавливаются в канале воздухозаборника и наружном контуре реактивного двигателя. В настоящее время в отечественных самолетах применяются ЗПК резонансного типа, представляющие собой трехслойные конструкции, в которых обшивка, обращенная к потоку воздуха, перфорирована, противоположная обшивка – сплошной жесткий слой, а в качестве заполнителя используется воздухопроницаемый слой, в основном соты. Такие трехслойные конструкции (однослойные по числу резонансных слоев) на основе металлических или тканых стеклопластиковых сот типа ТССП-Ф-10П или ТССП-Ф-8П применяются в системах шумоглушения силовых установок самолетов Ил-76, Ту-204 и др., однако акустическая эффективность их невысока и не позволяет обеспечить современные международные требования по шуму самолетов на местности.

Целью настоящей работы являются исследования по разработке технологии изготовления высокоэффективных многослойных сотовых ЗПК из ПКМ для силовых установок самолетов.

Технологическая схема, принятая нами при изготовлении многослойных ЗПК, предусматривает следующие основные стадии: изготовление и перфорирование стеклопластиковых обшивок; изготовление стеклопластиковых сотовых панелей; склеивание пятислойной конструкции.

Отличительная особенность перспективных пятислойных сотовых ЗПК из ПКМ от обычных трехслойных конструкций – наличие трех стеклопластиковых обшивок в пятислойной композитной конструкции, две из которых перфорированы. Наличие перфорированных обшивок требует особых технологических приемов и материалов, чтобы обеспечить не только прочное соединение слоев сотового заполнителя с обшивками, но и максимально сохранить акустическую эффективность ЗПК за счет минимального количества заполненных клеем перфорационных отверстий.

В результате проведенных исследований:

– выбран состав стеклопластиков для обшивок ЗПК и клеевые композиции, обеспечивающие высокие прочностные характеристики ЗПК при минимальном количестве закрытых неработающих перфорационных отверстий;

– специально для ЗПК разработаны две новые марки стеклопластиковых сотовых заполнителей ССП-1-8Т и ССП-1-10Т с размером граней ячеек 8 и 10 мм;

– разработана технология соединения элементов пятислойной композитной сотовой ЗПК;  
– показано, что акустическая эффективность сотовых ЗПК определяется в основном геометрическими параметрами образцов и мало зависит от химической природы используемых материалов, в то время как прочностные характеристики ЗПК существенно зависят от выбранных материалов;

– установлено, что двуслойные сотовые ЗПК из ПКМ имеют широкий диапазон звукопоглощения (500 – 8000 Гц) и превосходят серийно выпускаемые однослойные ЗПК по акустической эффективности.

По результатам акустических и механических испытаний в филиале ФГУП “ЦАГИ” и ФГУП “ЦИАМ” установлено, что исследованные элементы ЗПК могут быть использованы в каналах наружного контура реактивных двигателей в качестве навесных панелей шумоглушения. Результаты, полученные на опытных образцах ЗПК, будут использованы при изготовлении натуральных ЗПК для двигателей Д-30 КП-3 “Бурлак”.

## **СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАТРИЦЫ ТЕПЛООБМЕННОЙ**

*А.И.Быков, С.Н.Шестухина, В.А.Литицкая, И.Н.Комиссарова*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Описаны два способа изготовления матрицы теплообменной из композиционных материалов, обеспечивающих технические требования, предъявляемые к матрице в процессе эксплуатации.

Первый способ заключается в пропитке гофрированного бумажного материала эпоксидным связующим с одновременной намоткой на металлический вал до диаметра 600 мм и последующей термообработкой конструкции.

Второй способ заключается в намотке бумажного гофрированного материала на металлический вал с одновременным нанесением клеевой композиции на вершины гофр с последующей пропиткой эпоксидным связующим и термообработкой конструкции.

В процессе термообработки матрицы возникает ряд технологических особенностей, обусловленных многослойной конструкцией. Равномерный прогрев по всему объему материала (около 200 метров гофро материала с высотой гофры 1,6 мм) при обычной термообработке невозможен из-за высокой теплоемкости конструкции. Эта задача решена при помощи спроектированного в ФГУП “ОНПП “Технология” специального устройства для термообработки матрицы.

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ МАСТЕР-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ОСНАСТКИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*В.П.Валко, А.Н.Данильченко, В.С.Петропольский*  
(АНТК им.О.К.Антонова, г.Киев, Украина)

В настоящее время среди материалов мастер-моделей для изготовления оснастки из композиционных материалов (КМ) на связующем горячего отверждения дерево продолжает быть одним из наиболее применяемых.

Типовая крупногабаритная мастер-модель, выполняемая в виде рамы, каркаса и клепки, имеет существенные недостатки:

1. В связи с наличием отдельных трещин и пористости древесины мастер-модели невозможно установить вакуумный мешок с герметизацией на ее поверхность. Всю мастер-

модель брать в вакуумный мешок затруднительно, так как в зоне сложного контура каркаса возможен порыв вакуумного мешка;

2. Усушка древесины в процессе формования снижает точность оснастки;

3. Наличие влаги, сучьев, смолы в хвойных породах древесины проявляется в виде трещин и других дефектов на поверхности мастер-модели в процессе формования оснастки при температуре более 120°C;

4. Проникновение паров влаги из древесины в структуру формуемого пакета оснастки нарушает процесс полимеризации связующего, способствует образованию высокой пористости и локальных непроклеев между слоями пластика.

Для определения конструкции мастер-модели, обеспечивающей формирование крупногабаритной оснастки с герметизацией вакуумного мешка на стол автоклава, был проведен расчет на прочность мастер-модели и листа стола автоклава толщиной 8 мм при давлении 4 атм. и температуре 150°C.

Исходя из результатов расчета, разработана конструкция мастер-модели, содержащая каркас с продольным и поперечным набором ребер, дно со стороны стола автоклава и клепку, определен оптимальный шаг ребер и толщина клепки.

Для устранения недостатков по п.п.2,3,4 в технологию изготовления мастер-модели введены:

– предварительная обработка рабочей поверхности мастер-модели с припуском 5–10 мм (в зависимости от ее габаритов);

– сушка при температуре 125–150°C под вакуумным мешком;

– контроль, обнаружение пороков (живица, сучки, засмолы, косослои), проявившихся после предварительной обработки и сушки, ремонт их путем замены на здоровую древесину;

– окончательная обработка рабочей поверхности мастер-модели.

Опыт изготовления крупногабаритной оснастки из КМ для элементов конструкции изделий Ан-140, Ан-148, Ан-74-ТК300 на ХГАПП и АНТК им. Антонова показал правильность выбора конструкции мастер-модели.

## **ОБЪЕМНАЯ ФОРМОВОЧНАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*В.С.Петропольский, В.П.Валко, А.В.Клопота*

(АНТК им.О.К.Антонова, г.Киев, Украина)

Известно, что качество конструкций, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов во многом зависит от оснастки.

При проектировании оснастки, предназначенной для изготовления интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов, требуется решить целый ряд сложных проблем из-за:

– наличия нескольких рабочих поверхностей, обеспечивающих качество поверхности изготавливаемого агрегата, выходящей в аэродинамический воздушный поток;

– необходимости увязки всех рабочих поверхностей между собой;

– необходимости обеспечения бездефектной выемки окончательно сформированного агрегата из оснастки, что приводит, как правило, к появлению в конструкции оснастки дополнительных разъемов;

– необходимости обеспечения во время процесса формования фиксации положения подкрепляющего набора;

– необходимости обеспечения сочетания надежной фиксации входящих в конструкцию элементов с наличием элементов, компенсирующих взаимное перемещение элементов оснастки, и изготавливаемого в ней агрегата в процессе термической обработки.

На основе имеющегося многолетнего опыта на АНТК им О.К. Антонова разработаны различные типы конструкций оснастки, позволяющие решать все перечисленные трудности и обеспечивать хорошее качество изготовления интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов с аэродинамическим контуром.

Разработанные типы конструкции оснастки позволяют воспроизводить поверхности аэродинамического контура с заданной точностью.

Предложенное сочетание жестких и эластичных компонентов оснастки позволяет обеспечить требуемую точность расположения элементов усиливающего набора с одновременной компенсацией допусков на толщину углеволокнистых материалов, различия в значении коэффициентов термического расширения материала оснастки и изготавливаемой конструкции.

С применением разработанных конструкций оснастки изготовлено несколько комплектов интегральных конструкций рулевых поверхностей хвостового оперения и механизации крыла самолета Ан-148. Получено подтверждение, что с применением разработанной конструкции оснастки можно изготавливать интегральные конструкции, полностью удовлетворяющие задаваемым требованиям. На основании полученных результатов отработанные конструктивно-технологические решения создания оснастки, предназначенной для изготовления интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов, реализованы в условиях серийного производства.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ МАСТЕР–МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ УКРЫТИЙ**

*Е.Р.Лепикаш, Н.С.Обухова, Г.С.Шуль, Л.М.Шкиркова, А.А.Баранов, Е.А.Сорочинская*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Радиопрозрачные укрытия (РПУ) на основе стеклопластиков и стеклосотовых наполнителей различной конструкции широко используются для защиты приемопередающих антенных устройств радиотехнических комплексов от внешнего воздействия: влаги, солнечной радиации, ветровых, динамических, температурных и других нагрузок. При этом конструкция радиопрозрачной стенки, состав и структура стеклопластика, свойства стеклосотопласта должны обеспечивать максимальную радиопрозрачность изделия при определенных частоте и угле падения радиоволны и, вместе с тем, прочность и надежность РПУ при эксплуатации.

Увеличение габаритных размеров укрытий в соответствии с требованиями разработчиков антенных систем определяет необходимость решения ряда конструкторско-технологических проблем:

- обеспечение жёсткости конструкции РПУ при заданном уровне радиотехнических характеристик;

- получение изделия заданной размерной точности при минимуме остаточных напряжений и искажений его геометрического контура, что требует учета термдеформационных свойств материалов мастер-модели, формообразующей оснастки и собственно РПУ.

При изготовлении крупногабаритных укрытий сложной коробчатой формы исходным носителем размеров и геометрии является мастер-модель. Как правило, последующее формование композитной оснастки на мастер-модели происходит при повышенных температурах и давлении. Различия в термдеформационном поведении материалов мастер-модели и оснастки, в том числе в значениях коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР), являются причиной несоответствия размеров и геометрии полученной оснастки требованиям чертежей.

Круг отечественных материалов для изготовления мастер-моделей, выдерживающих формование при повышенных температурах, крайне ограничен. Среди рекомендуемых материалов представляют интерес полимерные дисперсно-наполненные композиции типа

“Владисинт”, ЭДС и др., выпускаемые ЗАО НПП “Аквасинт”, которые имеют достаточно высокие механические характеристики, хорошую обрабатываемость на станках с ЧПУ и ручную. Однако значения КЛТР у этих материалов значительно выше, чем у стеклопластиков, из которых изготавливается композитная оснастка.

При исследовании термодформационного поведения указанных материалов установлено, что у них значения КЛТР в интервале температур (20–150)°С в 4–10 раз выше, чем у стеклопластиков. При длине изделия порядка 4 м такое различие КЛТР может привести к превышению размеров сформованной на мастер-модели из “Владисинта” стеклопластиковой оснастки на 15–25 мм по отношению к заданным значениям.

Экспериментально показано, что введением волокнистых наполнителей в виде ленты или ткани можно направленно снизить тепловое расширение дисперсно-наполненной полимерной системы. Исследовано влияние стеклоткани, стеклопрепрега и углеродной ленты на термодформационные, а также статические и динамические свойства при изгибе материала “Владисинт”.

Установлено, что при определенном соотношении компонентов можно получить материал со значениями КЛТР, близкими к значениям аналогичной характеристики стеклопластика. Введение волокнистых наполнителей в полимерную композицию “Владисинт” приводит также к повышению механических характеристик и температуры стеклования материала.

Полученные результаты исследования использованы при изготовлении мастер-моделей и композитной оснастки для формования крупногабаритных РПУ коробчатой формы с различной конструкцией радиопрозрачной стенки. РПУ, имеющие длину 4 м и изготовленные с использованием композитной оснастки, сформованной на мастер-модели из материалов с регулируемым КЛТР, имеют заданные размеры и геометрию.

## **НЕСУЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ СЪЕМОЧНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

*В.А.Целиков* (НТЦ ОАО “Красногорский завод им.С.А.Зверева”, г.Красногорск, МО, Россия)

В рамках создания целевой оптико-электронной аппаратуры на базе зеркально-линзовых объективов для малых космических аппаратов предложено несколько вариантов построения несущей конструкции с высокими размеростабильными характеристиками и минимальной массой.

В докладе рассмотрены вопросы создания несущей конструкции съемочной аппаратуры для малых космических аппаратов, обладающей повышенной стойкостью к радиации, глубокому вакууму, прочной, жесткой и размеростабильной при циклическом изменении температуры. Сложность создания такой конструкции заключается в нахождении оптимального сочетания минимальной массы конструкции, ее прочности, жесткости и размерной стабильности в условиях эксплуатации. При разработке конструкции с такими характеристиками важную роль играет правильный выбор материала. В докладе рассмотрены сравнительные характеристики композиционных материалов на полимерной и металлической основе для несущей конструкции, имеющие плотность от 1,3 до 2,0 г/см<sup>3</sup> и коэффициент линейного температурного расширения от  $0,3 \times 10^{-6}$  до  $1,6 \times 10^{-6}$  1/°С. Приводится перечень предприятий-разработчиков и изготовителей изделий из композиционных материалов для космической и авиационной промышленности, чьи разработки на сегодняшний день наиболее полно отвечают предъявляемым к материалам требованиям. Рассмотрены различные варианты конструктивного исполнения несущего корпуса. Основное внимание уделено ферменной и оболочковой конструкциям. Подробно изложены принципы построения конструкции, технология сборки и закрепления несущих деталей.

Большое внимание уделено унификации основных узлов (модулей) конструкции, рассмотрены проблемные вопросы.

Данная работа проводится в рамках ОКР “Прибор–ОЭЖ” для аппаратуры высокого разрешения.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Л.А.Климакова, А.О.Половый, П.А.Степанов*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

К современным прецизионным конструкциям космического и наземного назначения, наряду с основными требованиями по размерной точности и стабильности, определяемыми термоупругими свойствами материала, предъявляется ряд дополнительных специальных требований, одним из которых является обеспечение заданного уровня теплопроводности конструкции в целях отвода тепла от источников теплового излучения и снижения степени неоднородности температурных полей.

Необходимость повышения жесткости и минимизации температурных деформаций таких конструкций обуславливает применение в них конструкционных углепластиков, для которых характерны рост коэффициента теплопроводности (КТ) и падение термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с увеличением модуля упругости (рис.).

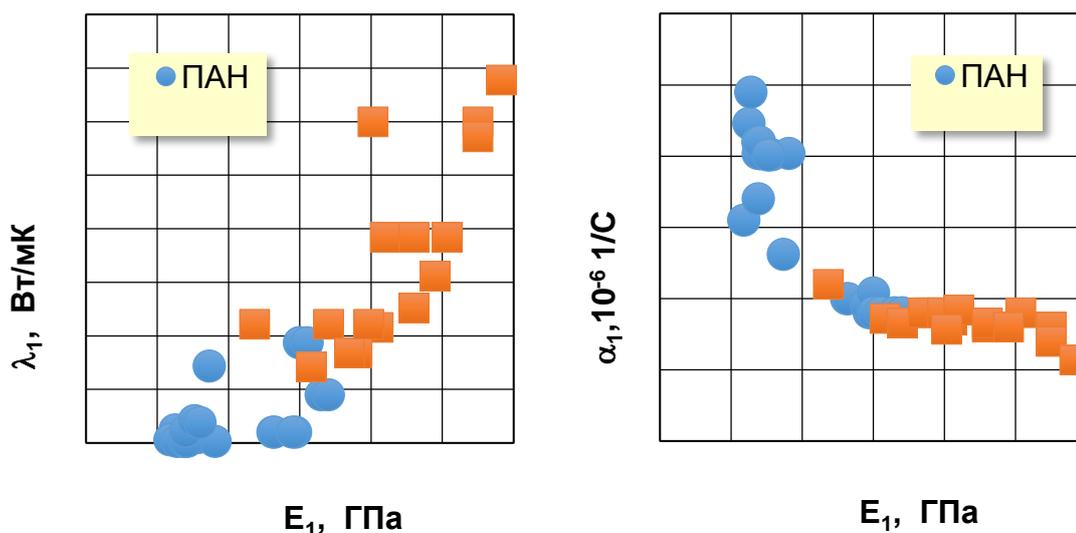


Рис. Теплофизические свойства однонаправленных углепластиков на основе ПАН и пековых волокон

Сравнение теплофизических характеристик эпоксидных углепластиков на основе ПАН и пековых волокон показывает, что высокомодульные пеки обладают наибольшей теплопроводностью. Однако при этом чрезмерно низкие значения ТКЛР однонаправленного пластика усложняют или даже делают невозможным получение одно- и двухсототерморазмеростабильных армированных структур.

Возможными путями удовлетворения комплексного требования по терморазмеростабильности и теплопроводности конструкции являются:

- использование высокотеплопроводного поверхностного слоя;

– применение комбинированной структуры, выполненной на основе высоко- и низкотеплопроводных волокон.

Оба подхода имеют как преимущества, так и недостатки, их практическая реализация зависит от габаритов конструкции, условий эксплуатации и других факторов и требует дальнейших исследований.

## **КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОТРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ НИЖНЕГО ОТСЕКА ТРЕТЬЕЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ “ПРОТОН-М” ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*В.Н.Зельнев, А.В.Буш, Н.В.Выморков, Д.А.Волков, А.Г.Попов*

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

*И.Г.Оленин, А.С.Гаврилов, А.Г.Бахтин, А.В.Севальнев*

(ГКНПЦ им.М.В.Хруничева, г.Москва, Россия)

Увеличение массы выводимой полезной нагрузки является одной из причин модернизации ракеты-носителя “Протон-М” для повышения её энергомассовых характеристик.

Одним из решений этой задачи является внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных волокон в высоконагруженные отсеки ракеты-носителя и разработка технологий их изготовления.

В работе представлен опыт ФГУП “ОНПП “Технология” по конструкторско-технологической отработке и изготовлению секций нижнего отсека третьей ступени ракеты-носителя “Протон-М” из ПКМ разработки ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. Отсек является высоконагруженным элементом ракеты-носителя и представляет собой цилиндрическую конструкцию диаметром 4,1 м и высотой 0,522 м, состоящую из четырёх секций.

Конструктивно каждая секция (рис.) состоит из верхнего и нижнего шпангоутов, соединенных обшивкой, подкрепленной стрингерами. Секция изготавливается методом совмещенного формования в автоклаве за один технологический процесс с образованием интегральной конструкции, обеспечивающей отсутствие механических и клеевых соединений.



Рис. Секция нижнего отсека третьей ступени ракеты-носителя “Протон-М”

В ходе работы была проведена отработка конструктивно-технологических решений элементов конструкции секций, разработаны схемы армирования конструктивных элементов, проведены прочностные испытания фрагментов конструкции при нормальной, повышенной температурах. Разработана конструкция и изготовлена специализированная неметаллическая оснастка для изготовления секций отсека.

Проведенные работы позволили изготовить и поставить в ГКНПЦ им.М.В.Хруничева несколько комплектов оболочек нижнего отсека третьей ступени. Результаты статических и динамических испытаний, а также натурные испытания при пуске РН “Протон” с КА “Дирек ТВ10” полностью подтвердили соответствие изготовленных оболочек прочностным требованиям.

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ КРЫЛА САМОЛЕТА С ПОМОЩЬЮ MSC NASTRAN**

*Л.А.Климакова, Е.С.Лавыгин* (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В работе представлены результаты инженерного проектирования и массово-силовой оптимизации в программной среде MSC NASTRAN углепластиковых подкрепленных панелей интегрального типа для крыла перспективного самолета.

С учетом конструктивно-технологических ограничений разработаны конструкции углепластиковых монолитных панелей с элементами продольного и поперечного силового набора в виде стрингеров (ребер) штырькового типа и трапецевидных усилений (рис.1).

Выполнено моделирование поведения панелей при силовом нагружении в среде MSC NASTRAN с использованием четырехугольных плоских конечных элементов. Определены рациональные физико-механические и геометрические параметры конструктивных элементов панелей, исследовано напряженно-деформированное состояние конструкции при различных видах нагружения: двухосное растяжение, одноосное сжатие, сдвиг в плоскости обшивки (рис.2).

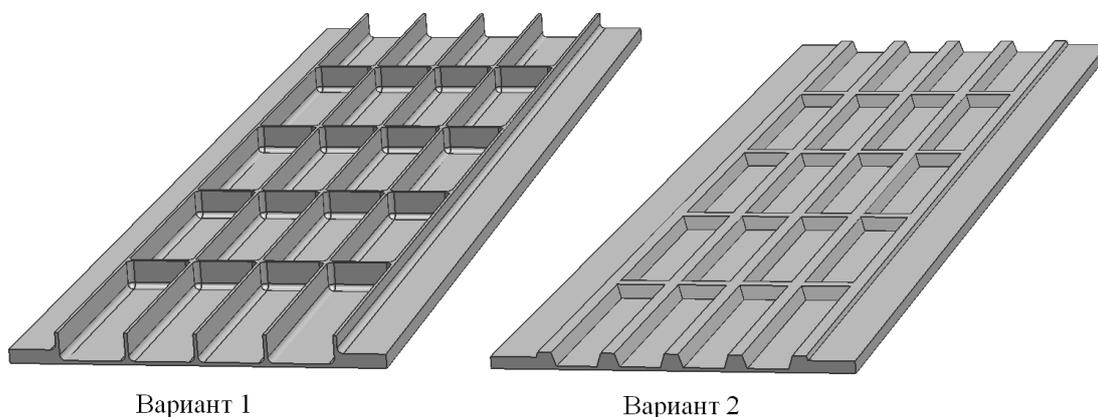


Рис.1. Конструкции углепластиковых монолитных панелей

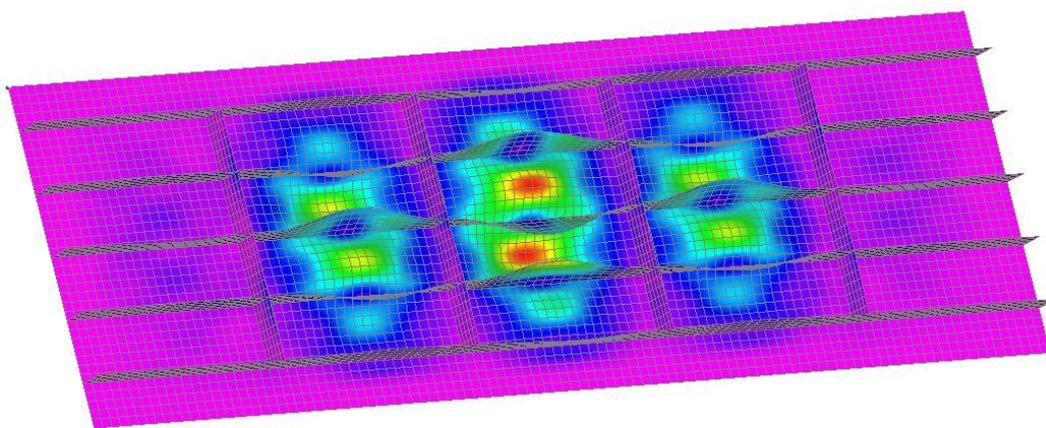


Рис.2. Напряженно-деформированное состояние конструкции

Согласно полученным результатам, массовая эффективность при сжатии панели с продольно-поперечным подкреплением (вариант 1) на 20% выше по отношению к панели с продольно-поперечным усилением (вариант 2).

Эффективность разработанных конструкций по критерию “несущая способность–масса” сопоставима с аналогичными показателями подкрепленных углепластиковых панелей СЧК изделия 10КУ (Су-33), определенными в ходе наземных испытаний (рис. 3).

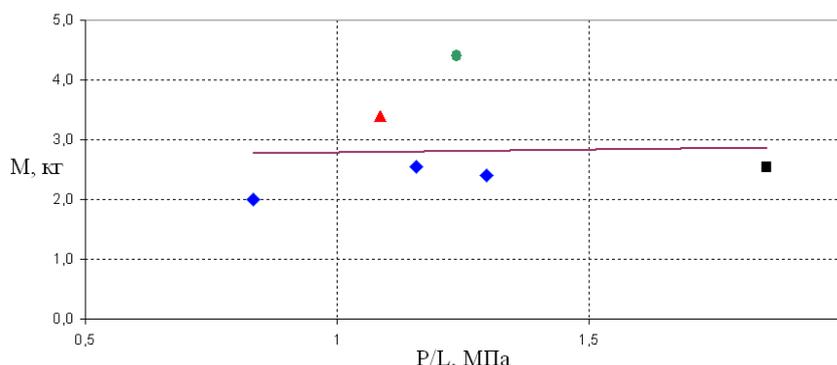


Рис. 3. Сравнительная эффективность подкрепленных панелей, где М – масса, Р – погонная нагрузка потери устойчивости, L – длина:

- ◆ – однострингерные панели изделия 10КУ;
- – двухстрингерные панели изделия 10КУ;
- ▲ – панель с продольно-поперечным подкреплением (расчет);
- – панель с продольно-поперечным усилением (расчет)

## КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА ТРЕХСЛОЙНОГО УГЛЕПЛАСТИКОВОГО ОТСЕКА С АЛЮМИНИЕВЫМ СОТОЗАПОЛНИТЕЛЕМ

*Н.В.Выморков, А.К.Хмельницкий, Л.А.Мартынова, Е.В.Беляков*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Представлен опыт изготовления конструкции замкнутого контура (цилиндр-конус) трехслойного углепластикового отсека с алюминиевым сотовым наполнителем.

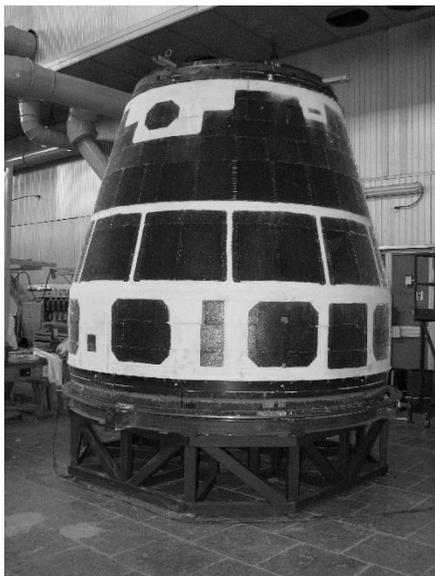
Отсек представляет собой конструкцию замкнутого контура цилиндр-конус высотой 2,5 м. Диаметр цилиндрической части составляет около 3 м, конической – около 2 м. Особенностью данной

конструкции является наличие внутреннего силового набора, а также наружного и внутреннего усиления в зоне перехода цилиндр-конус.

Впервые в России при изготовлении отсека были применены импортные высокомодульные и высокопрочные углеродные однонаправленные и армированные наполнители. Для изготовления изделия использовалась неметаллическая оснастка для формования, имеющая коэффициент линейного термического расширения (КЛТР), близкий к КЛТР отсека.

В результате решения ряда конструкторских и технологических задач были обеспечены:

- изготовление конструкции с заданным наружным теоретическим контуром;
- требуемые толщины обшивок, внутренние и наружные усиления;
- высокие прочностные и жесткостные свойства конструкции;
- минимизация веса конструкции.



В результате проведенной работы были изготовлены и поставлены в адрес заказчика (ГКНПЦ им.М.В.Хруничева) экспериментальные и летные экземпляры изделия.

## **КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ФРАГМЕНТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*А.В.Буш, Н.В.Выморков, В.Н.Зельнев, Н.Б.Волбуева*  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают рядом преимуществ перед традиционными материалами. При этом им присущи и недостатки, основными из которых являются низкая прочность в направлении, перпендикулярном расположению армирующих волокон, прочность при межслоевом сдвиге и прочность при сжатии. Для повышения прочностных свойств возможны различные конструктивные и технологические решения, включая применение новых материалов и технологий изготовления.

Целью работы являлась разработка фрагмента цилиндрического стержня длиной 400–500 мм и диаметром около 130 мм, материал которого при высоких прочностных и жесткостных характеристиках в продольном направлении должен обладать высокими сдвиговыми характеристиками в радиальном направлении. Это требование ограничивало использование таких способов изготовления фрагмента, как пултрузия, послойная намотка и послойная выкладка. При этом, так как изделие относится к толстостенным, основной технологической трудностью являлось обеспечение однородности материала фрагмента по толщине изделия.

В результате работы были определены материалы, разработаны схемы армирования и конструктивно-технологические решения, разработана и изготовлена оснастка для изготовления фрагмента цилиндрического стержня, позволившие изготовить фрагмент стержня из ПКМ с требуемыми механическими характеристиками.

## **ПАНЕЛИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ФГУП “ОНПП “ТЕХНОЛОГИЯ”**

*А.К.Хмельницкий, Н.В.Выморков, А.В.Попова*

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

*К.А.Гончаров, О.А.Головин* (НПО им.С.А.Лавочкина, г.Химки, МО, Россия)

За последние три года в России отмечается всплеск активности в производстве космических аппаратов коммерческого и военного назначения. В условиях жесткой конкуренции повысились требования к качеству выпускаемых продуктов и их эффективности.

Сейчас уже невозможно представить Россию без средств коммуникации и связи. Повышаются требования к скорости и качеству передачи данных, соответственно повышается потребность в космических аппаратах.

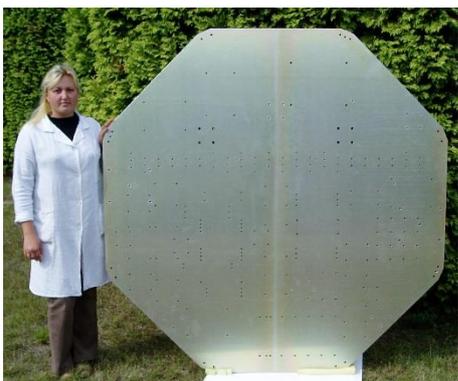
Ни один космический аппарат, находящийся на орбите Земли, не может эксплуатироваться без надежных систем обеспечения терморегулирования (СОТР). В Обнинском НПП “Технология” совместно с НПО им.С.А.Лавочкина и НПП “ТАИС”, разработали технологию изготовления панелей СОТР, которыми уже оснащены и оснащаются российские спутники “Кондор”, “71Х6”, “КазСат”, “Электро”, “Спектр-Р”, “Экспресс-МД”, “Фобос-Грунт”, а также космические аппараты производителей Германии, Франции, Италии и Израиля.

Система обеспечения теплового режима космического аппарата предназначена для поддержания температур во всех элементах конструкции аппарата, приборах и агрегатах в допустимых диапазонах на всех этапах штатного функционирования. Возможность отводить избыточное тепло считается характеристикой, лимитирующей мощность спутника, так как именно радиаторы занимают большую часть места и массы спутника, которые, в свою очередь, лимитированы характеристиками носителя.

В космосе теплопередача происходит главным образом в результате излучения в вакуум. Для приборов космического аппарата она происходит через их конструктивную связь с внешними излучающими радиаторами, постоянная освещенность которых сильно ограничивает емкость теплопередачи. Внешние источники тепловой энергии, воздействующие на космический аппарат, – это тепловые излучения Солнца и Земли, а также отраженная от освещенной части Земли солнечная энергия. Эти воздействия имеют различные спектральные характеристики и поэтому неодинаково воздействуют на поверхность спутника. Современные системы терморегулирования на космических аппаратах используют жесткозакрепленные оптические солнечные отражатели (терморегулирующие покрытия – ТРП), специальные материалы для создания легких поверхностей с высокой теплопроводностью и методы специального теплового кондиционирования. Таким образом, в случае использования панелей СОТР с прикрепленным ТРП, происходит калиброванный сброс избыточного количества тепла в окружающее пространство и уменьшение некалиброванного доступа тепла на космический аппарат.

При разработке технологии изготовления панелей СОТР был применен ряд новых конструкторско-технологических решений:

- разработан и запатентован опорный узел, позволяющий увеличить несущую способность панели СОТР, при этом значительно сокращая технологический цикл сборки панели;
- использованы облегченные клеевые пленки отечественного и импортного производства;
- применены легкие вспенивающие композиции;
- производится позиционирование закладных элементов с заданной точностью бесстапельным методом.



В ОНПП “Технология” разработан способ приклейки ТРП с заданным зазором за единый технологический цикл. Разработан способ контроля качества приклейки ТРП.

В настоящее время на одном из отечественных космических аппаратов ведутся работы по замене обшивок из алюминиевых сплавов на обшивки из высокомодульного углепластика с большим коэффициентом теплопроводности.



## **СОТОВЫЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ И КОНСТРУКЦИИ В ИЗДЕЛИЯХ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И КОНВЕРСИИ**

***В.И.Сливинский, М.В.Сливинский***

(ОАО “УкрНИИТМ”, г.Днепропетровск, Украина)

Развитие ракетно-космической техники, особенно последнего десятилетия, востребовало ряд новых конструктивно-технологических решений, в которых по эффективности чаще всего преобладают сотовые конструкции.

Выигрыш в массе при замене монолитных конструкций на сотовые составляет 10 – 40 %.

В ракетно-космической технике можно выделить три направления использования сотовых конструкций:

1) теплозащитного и теплоизоляционного назначения (аэродинамические экраны, лобовые щиты, спускаемые аппараты);

2) конструкционного назначения (головные обтекатели ракет-носителей, переходные адаптерные отсеки, гаргроты);

3) конструкции, длительно работающие в условиях открытого космоса (панели негерметичных космических аппаратов, панели солнечных батарей, размеростабильные платформы).

Разработаны и освоены в производстве модификации головных обтекателей сотовой конструкции диаметром от 4100 до 4350 мм ракеты-носителя “Протон”.

Рассмотрена возможность создания нового поколения головных обтекателей трехслойной сотовой конструкции для ракет-носителей “Зенит” и “Циклон”.

Определены пути снижения массы космических аппаратов “Микроспутник” на 30–40% по сравнению с существующим аналогом за счет изготовления силовой конструкции платформы с использованием сотовых панелей.

Примером эффективного использования сотовых конструкций являются разработки предприятий: ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, РКК “Энергия” им. С.П. Королева, НПО ПМ им. М.Ф. Решетнева, ГKB “Южное” им. М.К. Янгеля.

Перспективными потребителями СЗ и СК конверсионного назначения являются химическая промышленность, судостроение, транспорт, стройиндустрия, мебельная промышленность и др.

Некоторые примеры использования СЗ в этих отраслях:

– емкости (стеклопластиковые трехслойные оболочки) в системе очистных сооружений, эксплуатируемых в грунте;

– перегородки, подвесные потолки и пространственные конструкции для малоэтажного строительства, в мансардных этажах, плоские энергоэкономичные стеновые ограждения, панели сдвижных стен, откатывающиеся перегородки, раздвижные двери, используемые как в строительстве, так и в производстве мебели;

– энергопоглощающие элементы для днищ вагонов-цистерн при аварийных ударах, а также для сбрасывания различных изделий с самолета на парашютах;

– спортивный инвентарь, доски для лечебной физкультуры;

– ворота ангаров для авиационной техники;

– двери железнодорожного вагона, а также межкомнатные двери;

– тара, упаковка.

СЗ могут применяться в любых других конструкциях, где актуально снижение веса изделия и придание специальных качеств.

Для обеспечения предприятий ракетно-космического комплекса России и Украины в ОАО “УкрНИИТМ” создано производство сотовых заполнителей из различных материалов: алюминиевой фольги, полимерной бумаги “Номекс”, стеклоткани. Производятся более 60 типоразмеров сотовых заполнителей.

Показана возможность дополнительного снижения массы изделия сотовой конструкции (на 10 – 13%) за счет использования эксклюзивного сотового заполнителя.

По требованию заказчика разрабатывается и поставляется эксклюзивный СЗ. Имеются производственные возможности разработки и изготовления опытных СК. Разработаны и апробированы методики оптимизации по массе СК различного назначения.

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОПОРНЫХ УЗЛОВ В ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

***Н.В. Степанов*** (ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

Высокие требования к точности взаимного расположения элементов оборудования на таких конструкциях, как платформа космического аппарата (КА) накладывают ряд ограничений на опорные узлы (рис.1), одно из которых не допускает остаточных перемещений точек крепления оборудования после прекращения максимальной нагрузки (возникающей при запуске КА). В связи с этим при проектировании опорных узлов следует учитывать максимальный уровень нагрузки на узел, при котором не возникает остаточных деформаций.

Для определения несущей способности опорного узла была разработана следующая

расчетная модель. Трехслойная конструкция в зоне опорного узла рассматривалась как круглая пластина (рис. 2), опертая по контуру с использованием шарнирного закрепления.

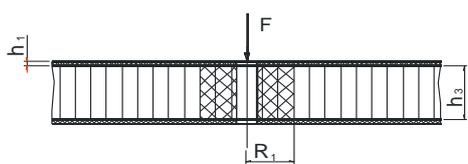


Рис. 1. Продольное сечение опорного узла

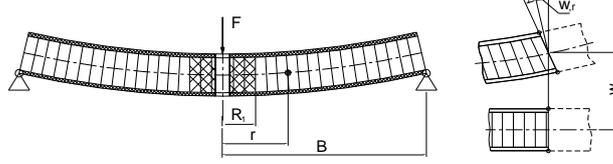


Рис. 2. Схема деформирования круглой пластины

При разработке модели принимались следующие допущения: несущие слои работают только на растяжение–сжатие; сотовый наполнитель работает на сдвиг (гипотеза Тимошенко). С учетом этих допущений для данной системы (рис.2) было составлено уравнение полной потенциальной энергии. Приравнявая к нулю первую вариацию полной потенциальной энергии и решая полученные дифференциальные уравнения, была получена аналитическая зависимость для расчета кривой прогиба круглой пластины на участке от  $R_1$  до  $B$ .

$$w(r) = \frac{F}{8\pi D} \left[ r^2 \ln \frac{B}{r} - \frac{(3 + \mu_1)}{2(1 + \mu_1)} (B^2 - r^2) + \frac{4}{\kappa^{(2)}} \ln \frac{r}{B} \right].$$

Далее задача сводилась к рассмотрению стенки сотового наполнителя, примыкающей к зоне усиления сотовой структуры (ограниченной радиусом  $R_1$ ). Основываясь на предположении, что в области наполнителя, ограниченного контурами 1 и 2 (рис. 3), искривление круглой пластины происходит за счет сдвига граней сотовой структуры, были определены сдвиговые деформации стенок наполнителя. Через деформации рассчитывались действующие напряжения в гранях наполнителя, которые не должны превышать критических значений для двойных стенок сотовой структуры.

В ходе разработки расчетно-экспериментальной методики учитывались особенности сотовой структуры. Для чего на базе статистической обработки данных по более чем 650 испытаниям была построена экспериментальная зависимость модуля сдвига от высоты наполнителя (рис. 4), значения которой использовались в расчетной методике. На основании экспериментальных исследований и результатов, полученных при расчетах прочности опорных узлов методами конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса MSC/Nastran, в расчетные зависимости были введены соответствующие поправочные коэффициенты. В результате зависимость для определения действующих сдвиговых напряжений в стенке сотового наполнителя равна

$$\tau = \left( \frac{1,5t_3(1+t_3)}{1+t_3+t_3^2} \right)^2 \frac{(w(r_{k1}) - w(r_{k2}))}{a_3} G_M,$$

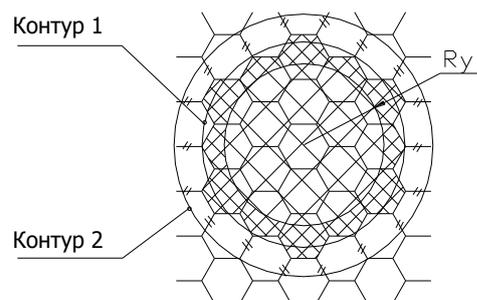


Рис.3. Схема опорного узла

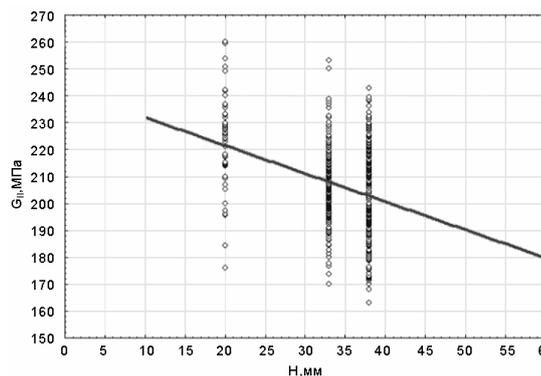


Рис.4. Зависимость модуля сдвига от высоты сотового наполнителя

где:  $t_3 = \frac{h_3}{2h_1 + h_3}$  – относительная толщина сотового заполнителя ( $h_1$  и  $h_3$ , рис. 1);

$w(r_{k1})$  – вертикальное перемещение круглой пластины по контуру 1 (рис. 3);

$w(r_{k2})$  – вертикальное перемещение круглой пластины по контуру 2 (рис. 3);

$a_3$  – размер ячейки;

$G_M$  – модуль сдвига фольги сотового заполнителя.

Расчеты несущей способности опорных узлов по разработанной методике сравнивались с результатами экспериментов. Следует отметить, что на малых высотах трехслойных панелей погрешность достигает 15% (рис. 5). Однако с увеличением высоты погрешность снижается до 5% (рис. 6).

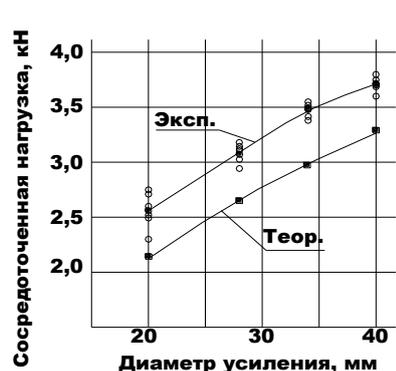


Рис. 5. Несущая способность узлов в зависимости от диаметра усиления при  $h_3=20$  мм

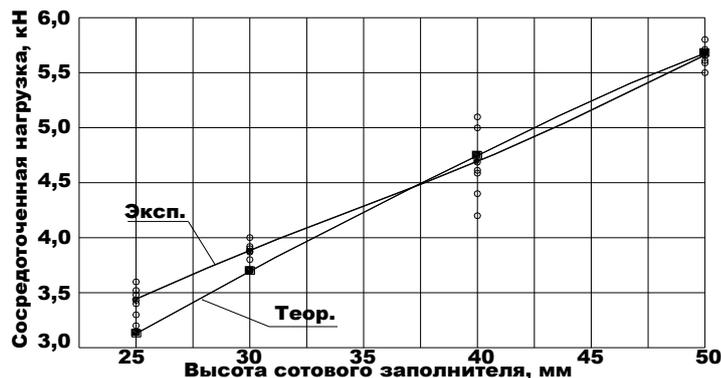


Рис. 6. Несущая способность узлов в зависимости от высоты заполнителя при  $R_y=14$  мм

По результатам, полученным в ходе данной работы, можно сделать следующие выводы: разработанная методика является работоспособной в выбранном диапазоне трехслойных конструкций; анизотропия свойств несущих слоев сказывается на прочности опорных узлов, но с увеличением высоты сотового заполнителя ее влияние падает.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОЧНОСТНЫХ И УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ АМг2-Н-2,5-30п НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАССИВОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

*А.Г.Попов, О.Л.Петрова, Д.И.Савельев, Н.В.Степанов*  
(ФГУП «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия)

Сотовые заполнители являются составным элементом трехслойных (сэндвичевых) конструкций. Материал заполнителя должен иметь по возможности низкую плотность, ничтожную жесткость в плоскости, параллельной граням ячейки, но большую жесткость в плоскости, перпендикулярной граням ячеек.

В большинстве конструкций авиационного и космического назначения используются алюминиевые сотовые заполнители различных марок. В данном докладе изучались упругие и прочностные характеристики сотового заполнителя АМг2-Н-2,5-30п, изготовленного из алюминиевой фольги толщиной 0,03 мм из сплава АМг2-Н с ячейкой, имеющей форму правильного шестигранника с размером стороны ячейки 2,5 мм.

Прочностные и упругие характеристики заполнителя при сдвиге характеризуются значениями разрушающего напряжения и модуля упругости сдвига при растяжении образца, представляющего собой четыре одинаковых блока сотового заполнителя размерами 80x80 мм, склеенных с четырьмя стальными пластинами в плоскости, перпендикулярной граням ячеек. Массив экспериментальных данных был получен по результатам входного и производственного

контроля сотового заполнителя АМг2-Н-2,5-30п и содержит порядка 3000 значений.

Статистическая обработка результатов испытаний включала нахождение закона распределения, построение эмпирических кривых регрессии средних значений разрушающего напряжения и модуля упругости сотового заполнителя при сдвиге по высоте сотового заполнителя и подбор по их виду ближайших теоретических кривых и математических выражений этих кривых, прогнозирование прочностных и упругих характеристик для различных высот сотового заполнителя.

В работе проведен анализ распределений эмпирических данных (рис.1), приведены экспериментальные зависимости разрушающего напряжения и модуля сдвига сотовых заполнителей от высоты, полученные на основе статистической обработки данных результатов испытаний, составлен прогноз свойств сотовых заполнителей в диапазоне высот сотовой структуры от 10 до 60 мм (рис.2).

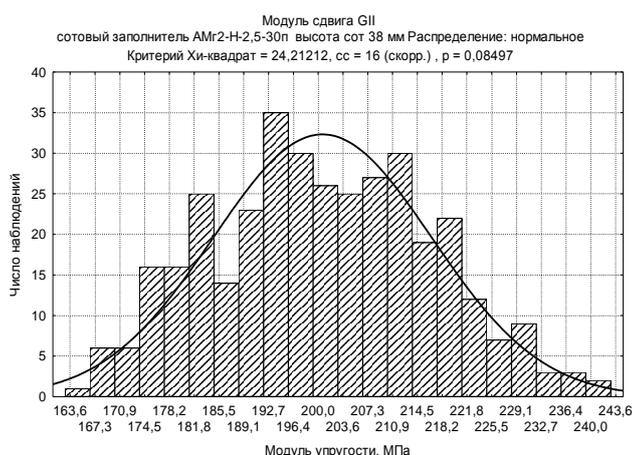


Рис.1. Гистограмма вариационного ряда и график закона распределения модуля упругости сотового заполнителя при сдвиге

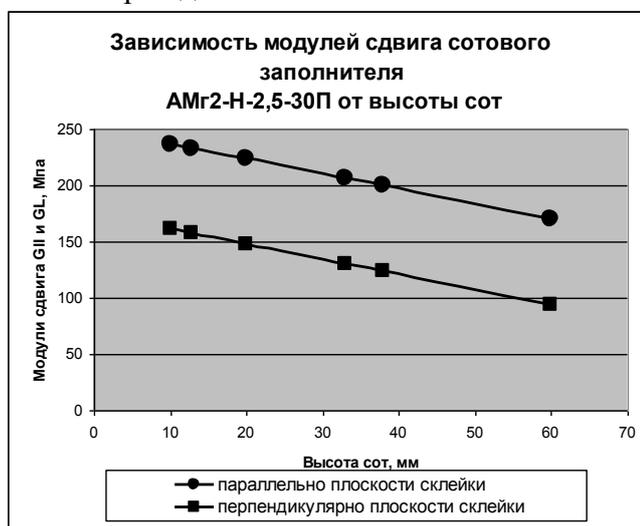


Рис. 2. Зависимости модуля упругости сотового заполнителя при сдвиге от высоты заполнителя

Статистическая обработка результатов испытаний проводилась с помощью программного продукта “STATISTICA”.

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ПРИ КОНТРОЛЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ**

*Г.П.Стариковский, П.Б.Жовнер*

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

Наибольшее распространение в авиационной и космической промышленности получили трехслойные клеевые конструкции с тонкими обшивками и усилениями из полимерного композиционного материала (ПКМ) и металлическим или композиционным сотовым наполнителем, которые позволяют значительно уменьшить общую массу силовых элементов конструкции при сохранении прочностных характеристик.

Наиболее характерными дефектами таких многослойных конструкций из ПКМ являются нарушение жесткости сотового наполнителя, непроклей и расслоения в обшивках.

Для неразрушающего контроля таких трехслойных конструкций наибольшее распространение получил акустический импедансный метод благодаря простоте настройки дефектоскопов и простоте процесса регистрации внутренних дефектов. Применяемые у нас дефектоскопы ИД-91М и ДАМИ-С надежно выявляют характерные дефекты трехслойных конструкций, но не позволяют определять тип дефекта, что часто требуется для определения технологии ремонта изделия.

Для классификации наиболее характерных дефектов трехслойных сотовых конструкций из ПКМ, таких как непроклеи и расслоения в обшивках и усилениях, нами были проведены исследования на образцах с искусственными дефектами по возможности использования для этой цели метода свободных колебаний (МСК) и импедансного метода с спектральной обработкой сигнала.

МСК изначально основан на спектральном анализе возбуждаемых в изделии колебаний, а для импедансного метода АО “Votum” совместно с ФГУП “ОНПП “Технология” в дефектоскопе ДАМИ-С реализовали спектральный метод контроля, который позволяет регистрировать изменения частотного состава сигнала и распределения амплитуд его спектральных составляющих, информативным параметром является изменение спектра на дефектном участке по сравнению с бездефектным.

Применение спектрального метода позволит повысить информативность неразрушающего контроля трехслойных сотовых конструкций из ПКМ и производить классификацию обнаруженных дефектов.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО СПОСОБА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ**

*Г.П.Стариковский, Д.С.Стрельцов*

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

Необходимость неразрушающего контроля (НК) изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) вызвана все более обширным их применением в авиационной, космической и других отраслях промышленности. Потому что ПКМ отвечают повышенным требованиям современной техники, которым не отвечают даже новейшие металлические сплавы.

Специфика технологии изготовления композиционных материалов приводит к ряду сложностей при неразрушающем контроле изделий из ПКМ. Трудности связаны не только со сложной геометрической формой изделий. Технология изготовления изделий из композитов позволяет получить изделие практически любой формы. Трудности связаны еще и с поверхностью композиционного материала, которая в большинстве случаев не подвергается механической обработке и потому имеет большие шероховатости, что составляет большую сложность для ввода УЗ в изделие широко распространенными контактными методами контроля. Так же иммерсионную жидкость, используемую при контактных способах контроля, нельзя

наносить на поверхность изделий из-за нарушения адгезионной пригодности поверхности изделия при его смачивании. В связи с этим возникает проблема адаптации стандартных датчиков, входящих в комплект поставки прибора к неразрушающему контролю изделий из композитов.

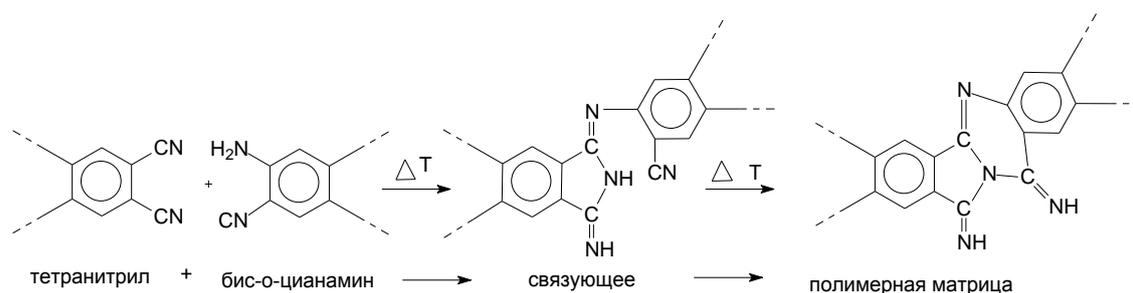
В работе даны материалы по влиянию шероховатости поверхности композиционного материала на амплитуду ультразвукового импульса, вводимого в изделие. Приведены результаты исследования по подборке материала, который мог бы заменить иммерсионную жидкость, используемую при контактных методах контроля, а также по разработке и изготовлению насадок на датчики для практичного крепления материала на датчик. Эти исследования были проведены для контроля изделий с небольшой площадью поверхности, которые можно контролировать вручную.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ КМ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Р.Р.Мухаметов, В.Т.Минаков, Л.В.Чурсова, К.Р.Ахмадиева*  
(ФГУП “ВИАМ”, г. Москва, Россия)

Создание нового поколения высокопрочных тепло- и термостойких полимерных композиционных материалов (ПКМ), способных практически полностью сохранять свои эксплуатационные характеристики в окислительной среде вплоть до температур 400–450°C, требует разработки уникальных полимерных матриц, сочетающих высокие физико-механические свойства с тепло- и термостойкостью, находящимися на уровне, предельном для любых органических полимеров.

В результате проведенных исследований в ФГУП “ВИАМ” разработан полифункциональный олигомер, отверждение которого при повышенных температурах протекает без образования летучих продуктов и приводит к образованию полулестничной структуры. Взаимодействие полифункциональных мономеров (тетранитрил и бис-о-цианамин) протекает как ступенчатое полиприсоединение с образованием низкоплавкого, растворимого олигомера (связующее), содержащего в своей структуре нитрильные N≡C-группы, о чем свидетельствует полоса поглощения в ИК-спектре при 2200 см<sup>-1</sup>. Наличие именно этих функциональных групп обуславливает способность олигомера подвергаться при термообработке изомеризационной циклизации с образованием полимера, содержащего изоиндольный и хиназолиновый циклы.



Олигомер представляет собой мелкодисперсный порошок кремового цвета, хорошо растворимый во многих известных растворителях и имеющий приведенную вязкость в N-метилпирролидоне 0,2–0,3 дл/г. При температуре 80–120°C олигомер образует низковязкий подвижный расплав, переработка которого может осуществляться по экологически безопасной и безотходной технологии получения полуфабрикатов и композиционных материалов на их основе. В процессе отверждения связующего по ступенчатому режиму в интервале температур

формируется плотно упакованная, сверхжесткая полулестничная структура, состоящая из регулярно чередующихся ароматических и гетероциклических фрагментов с высоким уровнем межмолекулярного взаимодействия. Разработанное связующее имеет физико-механические показатели на уровне высокопрочных эпоксидных составов ( $\sigma_{\text{вн}}=140$  МПа,  $E_{\text{вн}}=565$  МПа,  $\sigma_{\text{в}}=320$  МПа,  $\sigma_{\text{с}}=70$  МПа,  $\varepsilon=1,5$  %) и превосходит последние по теплостойкости (выше  $400^{\circ}\text{C}$ ).

В связи с тем, что разработанное связующее должно обеспечить работоспособность ПКМ на его основе при температурах  $350\text{--}400^{\circ}\text{C}$ , отвержденная полимерная матрица должна обладать не только деформационной теплостойкостью при указанных температурах, но и высокой термоокислительной устойчивостью. Термостабилизация связующего и полимерной матрицы на его основе реализована путем введения на стадии синтеза в состав мономеров полифункционального элементоорганического карборансодержащего динитрила, участвующего в реакциях образования и отверждения связующего.

Результаты изотермического теплового старения полимерных матриц при  $400^{\circ}\text{C}$  приведены на рис.

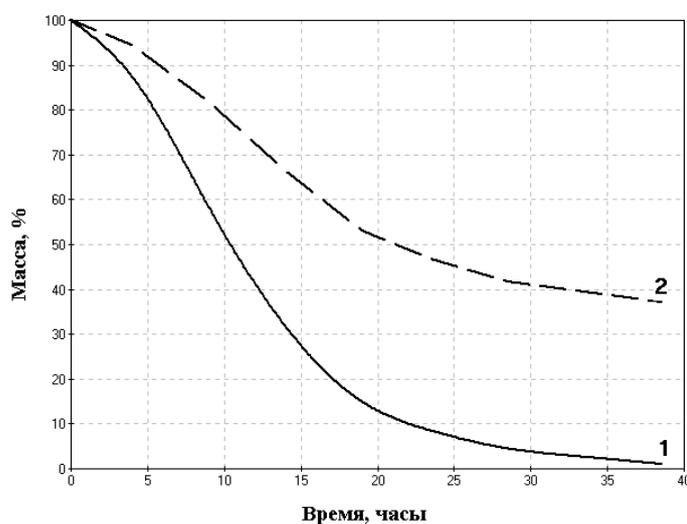


Рис. Кривые ИТГА ( $400^{\circ}\text{C}$ ) отвержденной полимерной матрицы на основе термостабилизированного (2) и исходного связующего (1)

Для изготовления препрега угле- и стеклопластика на основе разработанного связующего была выбрана технология напыления связующего в электростатическом поле на движущуюся углеродную ленту или стеклоткань с последующим оплавлением. На основе связующего разработан и паспортизован стеклопластик марки ВПС-36 и углепластик марки ВКУ-14. Исследованы упруго-прочностные свойства стеклопластика в исходном состоянии и при кратковременном воздействии температур (табл.).

Сочетание теплостойкости, прочности и жесткости полученных композиционных материалов (угле- и стеклопластики) на основе разработанного связующего делает их перспективными для изготовления высокотемпературных деталей двигателей самолетов.

Таблица

Упруго-прочностные характеристики угле- и стеклопластика

| Характеристики                  | Стеклопластик ВПС-36 | Углепластик ВКУ-14 |
|---------------------------------|----------------------|--------------------|
| Предел прочности не менее, МПа: |                      |                    |
| <i>при растяжении</i>           | $\frac{610}{484}$    | $\frac{1100}{990}$ |
| <i>при сжатии</i>               | $\frac{398}{369}$    | $\frac{540}{420}$  |
| <i>при межслоевом сдвиге</i>    | $\frac{49}{32}$      | $\frac{17}{17}$    |
| Модуль упругости не менее, ГПа  |                      |                    |
| <i>при растяжении</i>           | $\frac{37}{25}$      | 220                |

Числитель – испытание при 20°C, знаменатель – при 400°C.

Изготовление и исследование свойств угле- и стеклопластиков выполнены Раскутиным А. Е. и Давыдовой И. Ф.

## РАЗРАБОТКА ТЕРМОРЕАКТИВНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ RTM

***Р.Р.Мухаметов, В.Т.Минаков, Л.В.Чурсова, Е.Е.Шмойлов***  
(ФГУП “ВИАМ”, г.Москва, Россия)

В настоящее время наряду с традиционными методами производства изделий из композиционных материалов (КМ): пултрузия, намотка, формование под давлением SMC (Sheet Moulding Compound), BMC (Bulk Moulding Compound), открытое формование (контактное формование и напыление), широкое применение находит технология RTM (Resin Transfer Moulding). В этом процессе связующие инжектируются в закрытую форму, уже содержащую армирующий материал. Изделия, отформованные методом RTM, имеют две гладкие стороны и точно выдержанную форму и размер.

В ФГУП “ВИАМ” проводятся исследования по разработке расплавного связующего, перерабатываемого по RTM-технологии. В результате этих исследований разработан и оптимизирован метод синтеза термореактивного поли-1,3,5-триазинсодержащего связующего. Определены оптимальные температурно-временные параметры синтеза, позволяющие получать на основе арилдицианата смолообразный форконденсат – связующее оптимального состава для полимерных композиционных материалов с рабочей температурой 180°C. Осуществлена модификация связующего с целью повышения его технологических свойств (фазовой устойчивости, вязкости, смачиваемости углеродного наполнителя). Связующее обладает оптимальной вязкостью 150–400 мПа×с (рис.), что в свою очередь позволяет инжектировать расплав смолы в формы сложной геометрии.

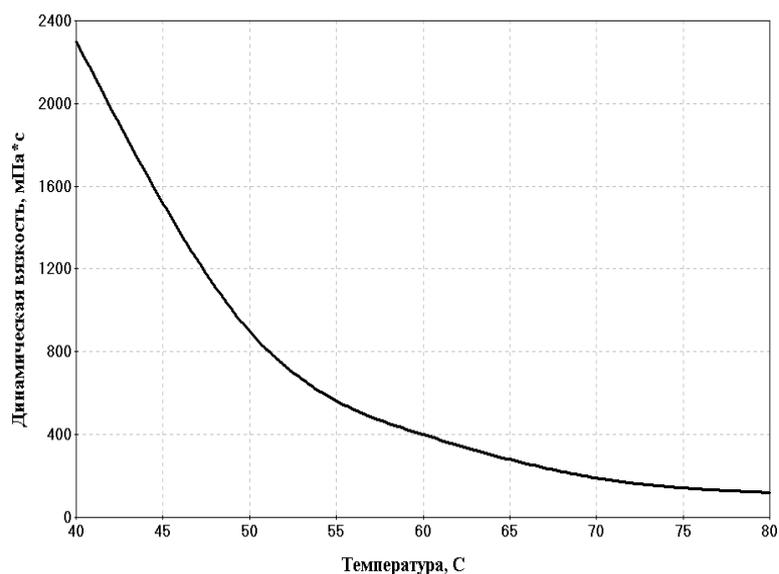


Рис. Зависимость вязкости связующего от температуры

Исследован процесс смачивания связующим углеродных армирующих наполнителей различной структуры и определен тип поверхностно-активного вещества, позволивший уменьшить контактный угол смачивания до 15–20% в сравнении с исходной композицией.

Калориметрическим и реологическим методами исследован процесс отверждения модифицированного связующего и определены условия формирования полимерной матрицы, теплостойкость которой по данным ТМА составляет 220–235°С.

Методом ДСК исследован процесс отверждения связующего и препрега на основе наполнителя ЭЛУР-П<sup>1</sup>. Установлено, что кинетические параметры реакции отверждения “чистого” связующего и препрега на его основе практически одинаковы (температура начала отверждения составляет 147°С для связующего и 140°С для препрега; максимальный тепловой эффект регистрируется при 274°С для связующего и 253°С для препрега). Полученные результаты свидетельствуют о практически полном отсутствии негативного влияния наполнителя на кинетику и механизм отверждения связующего в составе препрега на основе ЭЛУР-П. Результаты физико-механических испытаний лабораторных образцов углепластиков на основе связующего и ленты ЭЛУР-П<sup>2</sup> представлены в табл.

Таблица

Свойства углепластика на основе ленты ЭЛУР-П и связующего

| Характеристика   | Температура испытания, °С | Значение  | Процент сохранения |
|--|---------------------------|-----------|--------------------|
| Содержание связующего, %                                     | –                         | 37,4      | –                  |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                 | –                         | 1,53-1,54 | –                  |
| Толщина монослоя   | –                         | 0,116     | –                  |
| Предел прочности при статическом изгибе, $\sigma_{ви}$ , МПа | 20                        | 1183      | –                  |
|  | 200                       | 1120      | 95                 |
|  | 220                       | 1004      | 85                 |
| Модуль упругости при статическом изгибе, $E_{ви}$ , ГПа      | 20                        | 114       | –                  |
|  | 200                       | 112       | 98                 |
|  | 220                       | 109       | 95                 |

Очевидная экономичность процесса, экологическая чистота, высокое качество продукции могут расширить рамки применения метода RTM для изготовления изделий сложной конструкции, применяемых в различных агрегатах авиационных деталей.

<sup>1</sup> Исследования проведены Алексашиным В. М.

<sup>2</sup> Изготовление и исследование свойств углепластика выполнены Раскутиным А.Е.

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА, НАПОЛНЕННОГО БРОНЗОВОЙ ПУДРОЙ**

*А.А.Дорофеев<sup>1</sup>, С.Д.Калошкин<sup>2</sup>, В.В.Чердынцев<sup>2</sup>, А.И.Коршунов<sup>1</sup>, В.С.Кравченко<sup>1</sup>, Н.В.Юрьева<sup>1</sup>*

(<sup>1</sup>ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, г.Саров, Нижегородская обл., <sup>2</sup>МИСиС, г.Москва, Россия)

Рассматриваются особенности технологии получения и свойства композиционного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), прошедшего совместную механоактивацию с бронзовой пудрой. Образцы пресс-композиции на основе СВМПЭ, содержащей от 10 до 90 % бронзовой пудры, готовились при совместной механоактивации сверхвысокомолекулярного полимера и бронзовой пудры с использованием планетарного механоактиватора МПФ-1 и тороидального вибрационного механоактиватора МВ-0,05.

Проведена оценка зависимости насыпной плотности пресс-композиции от рецептуры и способа механоактивации компонентов. Установлено, что при содержании бронзовой пудры до 50% масс. насыпная плотность практически не зависит от способа механоактивации. С увеличением содержания бронзовой пудры более 50% пресс-композиция, полученная на вибрационном механоактиваторе, имеет более высокую насыпную плотность, чем композиция, полученная на планетарном механоактиваторе. С увеличением времени механоактивации насыпная плотность материала снижается до определенного предела.

Объемные образцы получали методом прямого прессования на гидравлических прессах. Технология получения композиционного материала для получения образцов базировалась на традиционной для переработки СВМПЭ – температура прессования составляла 150–160°C, давление прессования составляло 120–140 кгс/см<sup>2</sup>.

Исследовались свойства образцов из полученного материала. Приведены зависимости, связывающие плотность материала, физико-механические, теплофизические характеристики с концентрацией бронзовой пудры в материале, с продолжительностью смешения материала в механоактиваторах различного типа. Оценивалось влияние способа механоактивации на различных механоактиваторах на свойства готового материала.

Работа выполнена при поддержке проекта МНТЦ № 3414-2007.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ЗАЩИТНЫХ СТРУКТУР**

*С.Б.Сапожников, М.В.Форенталь*

(Южно-Уральский государственный университет, г.Челябинск, Россия)

В данной работе объектом исследования является композитная защитная структура, составляющая основу средства индивидуального бронирования человека (бронезилет). Эта структура составлена из нескольких слоев: наружный слой – пробиваемая высокопрочная стальная или керамическая бронепанель; внутренний слой – тканевый пакет, который останавливает вылетающие из бронепанели осколки и части пули на пути, ограниченном

требованиями ГОСТа Р50744–95, обеспечивая условия для локализации области травмирования тела. За критерий оптимизации принята масса 1 кв.м бронезилета. Соображения эргономики заставляют ограничивать суммарную толщину бронезилета, требуя также обеспечения гибкости. Воздействие – удар пули со стальным высокопрочным длинным сердечником (пример: пуля 7Н10 автомата АК-74). Особенностью таких сердечников является высокая твердость, малая пластичность, высокая прочность на сжатие и меньшая прочность на растяжение и изгиб. В качестве варьируемых параметров приняты толщины металлической и тканевой частей.

При численном моделировании в пакете LS-DYNA процесса ударного взаимодействия и разрушения всех контактирующих элементов важнейшим является вопрос адекватного моделирования механизма разрушения. Для его решения были проведены предварительные огневые эксперименты, в которых было показано, что для исследованных материалов и толщин металлические бронепанели разрушаются по механизму выбивания пробки, а сердечники “срабатываются” на 30–60% длины.

В пакете LS-DYNA [1] при решении задач деформирования и разрушения традиционно используют две формулировки: МКЭ в форме Лагранжа (Л) с удалением из сетки разрушенных конечных элементов или МКЭ в форме Эйлера (Э) с учетом движения материалов через неподвижную сетку. Л-формулировка с удалением элементов характеризуется появлением “дефекта массы” и нарушением физики контактного взаимодействия.

В данной работе для учета “срабатывания” как пули, так и верхних слоев пластины без дефекта массы с сохранением физического контакта тел предложен гибридный вариант, когда ударная сторона бронепанели рассмотрена в Э-формулировке, а тыльная – в Л-формулировке, пуля – полностью в Э-формулировке. Доля толщины панели в Э-формулировке возрастает с увеличением скорости соударения.

Для адекватного моделирования механизма разрушения панели по типу выбивания пробки в работе использована идея [2], где конечно-элементная модель бронепанели содержала тонкие прослойки материала, имеющие возможность разрушаться, в первую очередь обеспечивая минимальный дефект массы. При обстреле бронепластин наблюдалось разрушение по типу выбивания пробки с образованием узкой полосы сдвига (ширина порядка 0,02–0,05 мм). Поэтому в модель пластины введены цилиндрические прослойки из конечных элементов, имеющих линейный размер 0,02 мм в направлении радиуса от оси удара, линейный размер остальных элементов в зоне контакта пластины и пули составлял 0,2 мм.

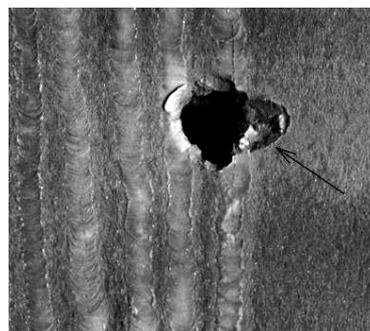
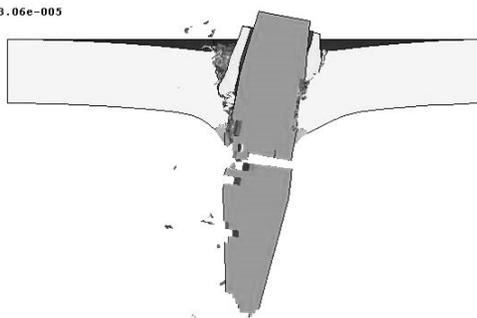
Тканевый пакет бронезилета моделировали двумя эквивалентными по массе слоями с целью учета возможного разрушения части пакета (пробой тканей). Ткани составлены из переплетающихся нитей, которые моделируются оболочечными элементами из ортотропного упругого материала с одной точкой интегрирования по толщине.

В соответствии с ГОСТ Р50744–95, для измерения запреградной травмы тканевый пакет контактирует с блоком из пластилина толщиной 100 мм, оставляя на нем след (вмятину) после удара. Пластилин в расчетах принят упругопластическим с зависимостью предела текучести от скорости деформирования. Параметры этого материала были определены из независимых экспериментов [3].

Расчеты показали, что оптимальным вариантом композитной металлотканевой брони для остановки пули 7Н10 со скоростью удара 900 м/с является проект с толщиной стали 5 мм и тканевого пакета 15 мм с удельной массой 48 кг/кв.м. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [3] на бронезилетах фирмы “ФОРТ Технология” (г.Москва).

В работе рассмотрены способы зонированной обработки стали [4] для повышения сопротивления металлических бронепанелей ударам пуль с длинными термоупрочненными сердечниками за счет создания условий для изгиба и разрушения сердечника даже при самом опасном нормальном ударе (рис., стрелкой показан след сердечника при его повороте).

3.06e-005



Зонированная обработка поверхности стали (за счет локального термического воздействия с подплавлением и быстрой кристаллизацией) позволяет создать зоны с повышенной твердостью и прочностью и не приводит к увеличению массы и толщины бронезилета, поэтому может рассматриваться как наиболее эффективный способ.

В работе также изучены возможности применения полимеркерамики (корунд в эластомерной матрице) в виде дополнительного наружного слоя. В расчетах покрытие из полимеркерамики смоделировано двумя слоями лежащих с перекрытием прямоугольных параллелепипедов. Эластомер не включен в численную модель в связи с его низкой прочностью и жесткостью для уменьшения общей размерности задачи и времени расчета.

Экспериментально и расчетом показано, что применение полимеркерамики на броневой стали слоем в диапазоне 1–3 мм эффективнее прямого увеличения толщины стали.

#### Литература

1. LS-DYNA Keyword user's manual. LSTC, 2003. V.970. 1564p.
2. Форенталь М.В., Сапожников С.Б. Моделирование откольного разрушения материала при локальном высокоскоростном ударе в пакете LS-DYNA // Вестник УГТУ–УПИ. Компьютерный инженерный анализ: сб. тр. II Росс. межвуз. конф. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005.– С.97–102.
3. Сапожников С.Б., Долганина Н.Ю., Сахаров С.А. Моделирование динамики взаимодействия ударника и многослойного тканевого пакета // Вопросы оборонной техники: сер. 15. Композиционные и неметаллические материалы в машиностроении.– М.: МНЦ “Информтехника”, 2005. Вып.3–4. С.38–41.
4. Сапожников С.Б., Сахаров С.А., Форенталь М.В. Бронезилет. Патент на полезную модель № 49968, приоритет от 14.12.2004, зарегистрирован 10.12.2005.

Работа выполнена в рамках гранта при финансовой поддержке Правительства Челябинской области, 2007 г.

## **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПОЛА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

***С.С.Серезин, Н.С.Смирнов, С.Н.Шестухина, О.В.Маркин, А.И.Быков***  
(ФГУП “ОНПП “Технология”, г.Обнинск, Россия)

В настоящее время в отечественном вагоностроении для изготовления панелей пола и межкупейных перегородок как конструктивный материал применяется фанера. Этому материалу присущи такие недостатки, как низкое акустическое сопротивление, высокое влагопоглощение и ограниченный срок службы.

Альтернативой фанере могут служить трехслойные композиционные панели с сотовым или гофрированным наполнителем из полимерных материалов.

При разработке панелей решались следующие задачи:

– повышение комфортности пассажирских вагонов за счет снижения уровня шума и обеспечение климатического режима;

– снижение массы вагонов и как результат экономия энергоносителей и продление срока службы колесных пар;

– увеличение срока службы панелей пола и вследствие этого снижение затрат на ремонт вагонов.

При рассмотрении различных вариантов конструкций панелей пола учитывалась специфика предъявленных требований заказчиком: наличие дополнительного верхнего слоя для последующей механической обработки и наличие окантовки периметра панелей и отверстий.

В ходе работы:

- определены конструктивные параметры панели;
- проведены исследования свойств гофровых заполнителей и обшивок;
- определены основные конструкционные материалы;
- проведены испытания конструктивных образцов панелей.

На основании полученных данных была разработана конструкция и технология изготовления трехслойных панелей пола из композиционных материалов.

В настоящее время панели пола из композиционных материалов изготавливаются для опытной эксплуатации в составе экспериментальных вагонов.

## **ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ ПКМ**

*А.Г.Попов, В.В.Волошин* (ФГУП "ОНПП "Технология", г.Обнинск, Россия)

Испытания полимерных композиционных материалов (ПКМ) на сдвиг, особенно в плоскости укладки слоев, являются одними из основных видов испытания. Сдвиг в слоистых анизотропных материалах – распространенный вид деформации и для ряда конструкций касательные напряжения, несмотря на их относительно небольшие значения, могут быть причиной потери несущей способности.

Одна из главных трудностей в разработке методов испытаний армированных пластиков на сдвиг – обеспечение в образцах состояния чистого сдвига.

Трудности создания в образце состояния чистого сдвига возрастают с увеличением степени анизотропии и неоднородности исследуемого материала. Рост этих характеристик приводит к увеличению зон краевого эффекта, и в практике испытаний высокомодульных и высокопрочных армированных пластиков могут быть случаи, когда получение в образце достаточной для измерений зоны с однородным напряженным состоянием невозможно [1]. Поэтому испытания высокомодульных и высокопрочных армированных пластиков на сдвиг требуют особого внимания.

В работе приводятся результаты экспериментального определения прочности и модуля упругости при сдвиге в плоскости укладки слоев (в плоскости листа) однонаправленных и армированных углепластиков. Испытания выполнялись различными методами на основе известных отечественных и зарубежных стандартов. Результаты испытаний сравнивались с расчетными значениями и паспортными характеристиками на материал.

Проведен расчетный анализ напряженно-деформированного состояния в процессе нагружения различных образцов. Выявлены переходные участки, зоны краевого эффекта и степень неравномерности распределения НДС в рабочей зоне образца.

Показано, что хотя в настоящее время существует ряд стандартов экспериментального определения упругих постоянных и прочности при сдвиге, однако универсальных методов (для определения тех и других характеристик) нет. Более того, выбор вида испытательной оснастки и размеров образцов во многом зависит от цели испытаний: определение упругих постоянных или прочности при сдвиге.

Отмечается, что испытание на сдвиг плоских образцов – более трудная задача и в части создания необходимых устройств для нагружения. Увеличение толщины с (1–3) мм до 10 мм испытываемых образцов приводит к увеличению зон краевых эффектов, повышению степени неравномерности распределения НДС в рабочей зоне образца, что, в свою очередь, требует усовершенствования и видоизменения узлов крепления и нагружения приспособлений для испытаний.

#### Литература

1. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков.– М., Химия, 1981.–272с.

### **ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛЫХ ШИРОКОХОРДНЫХ ЛОПАТОК, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Т.Д.Каримбаев, А.А.Луннов* (ФГУП “ЦИАМ им.П.И.Баранова”, г.Москва, Россия)

Проблема облегчения широкохордных лопаток современных вентиляторов является крайне актуальной задачей при обеспечении надежности и ресурса роторов. Задача облегчения может быть решена при создании разработанной в ЦИАМ полый широкохордной лопатки вентилятора. В такой лопатке основным силовым элементом являются стержни, изготовленные из высокопрочных и жестких композиционных материалов с низкой плотностью. Профиль лопатки оформлен тонкостенной обшивкой, изготовленной также из композиционного материала. Для проектирования лопатки необходимо выяснить особенности поведения её в типичных для лопаток вентиляторов условиях применения. К последним относятся возможные вынужденные колебания лопаток. В связи со сказанным, в настоящей работе проведены исследования собственных частот и форм колебаний полых лопаток одного типоразмера. Основное внимание уделено сравнению потенциальной возможности возбуждения колебаний полых и сплошных лопаток и предварительной оценке их пригодности к использованию. Сравнительный анализ частотных диаграмм полых и сплошных лопаток показал, что в целом полые лопатки имеют более низкие значения собственных частот во всем диапазоне действующих рабочих оборотов, чем сплошные лопатки, изготовленные из того же композиционного материала, что и несущие стержни. Кроме того, нежелательный эффект сближения собственных частот и уплотнения спектра форм собственных колебаний с ростом оборотов сильнее проявляется для полых лопаток. Наконец, для полых лопаток со стержнями обнаружено явление местных (локальных) колебаний тонкой обшивки, которые одновременно присутствуют при частотах, соответствующих одной из собственных форм колебаний лопатки в целом. Это явление требует более детального исследования. Вместе с тем, предоставляемая особенностью составной конструкции широкая возможность выбора материала несущих стержней, их числа, способов размещения в теле лопатки, а также выбора толщины обшивки позволяют спроектировать полую лопатку, отстроенную от опасных колебаний. Управление отдельными собственными частотами и соответствующими формами собственных колебаний путём изменения числа силовых стержней и их месторасположения подробно обсуждается.

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОРПУСА ВЕНТИЛЯТОРОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Т.Д.Каримбаев, М.Ю.Ромейков*

(ФГУП “ЦИАМ им.П.И.Баранова”, г.Москва, Россия)

При эксплуатации авиационных двигателей не исключается возможность разрушения лопатки. Высокая кинетическая энергия оборвавшейся лопатки может быть причиной катастрофических ситуаций. Для предотвращения таких событий Авиационные правила АП-33 (§ 33.19) требуют создания и использования таких корпусов, которые должны обеспечить локализацию разрушенной рабочей лопатки внутри двигателя. Аналогичное требование содержится в европейских Нормах летной годности CS-E (§ CS-E 520).

Под локализацией корпусом разрушенной лопатки понимают такую величину кинетической энергии лопатки после прохождения корпуса, которая не может привести к повреждению любых элементов двигателя или планера, находящихся за пределом корпуса. Кроме того, не сбалансированный от обрыва одной лопатки ротор не должен привести к катастрофическим последствиям в течение определенного промежутка времени.

Проблема локализации разрушившейся лопатки в пределах двигателя связана с решением комплекса сложных технических задач. Решение этой задачи должно быть построено на выполнении комплекса требований. Эти требования порой являются противоречивыми и потому решение проблемы не является однозначным. Действительно, обычными требованиями к системе для локализации разрушившейся лопатки являются обеспечение:

- минимального веса конструкции;
- максимальной стойкости к ударному воздействию при обрыве лопатки и воздействию несбалансированного ротора после её обрыва;
- достаточной жесткости и несущей способности вслед за обрывом лопатки и пробитием корпуса;
- уменьшения последующих за обрывом лопатки повреждений элементов ротора;
- снижения влияния повышенной температуры в области периферии лопаток на механические характеристики используемых материалов, особенно материалов на полимерной матрице;
- снижения эффекта врезания лопатки острыми кромками в тело корпуса;
- формирования ниши для оборвавшейся лопатки при минимальном размере корпуса, в том числе с использованием гондолы (интегрированная конструкция корпуса и гондолы);
- минимального раскрытия фланцев и т.д.

В настоящей работе проводятся исследования возможных конструкций корпусов вентилятора из композиционных материалов, удовлетворяющих вышеприведенным требованиям. Приводятся экспериментальные оценки этих конструкций.