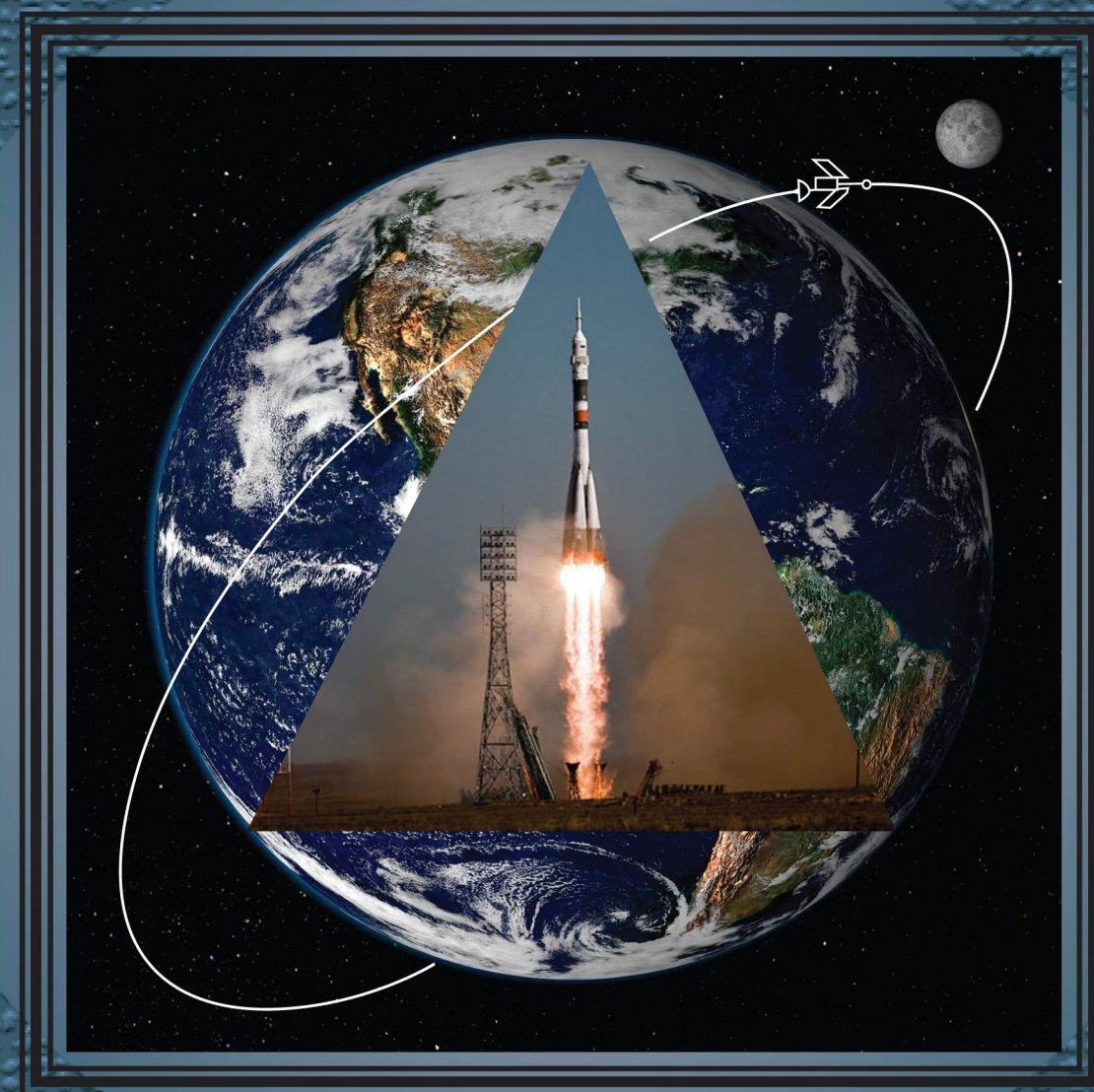


КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2



Москва 2020



Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)

Подписной индекс **79379**

Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал

Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)

Подписной индекс **80089**

Издается с 1981 года



Научно-технический журнал

Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)

Подписной индекс **79378**

Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал

Экология промышленного производства
(4 выпуска)

Подписной индекс **80090**

Издается с 1993 года



Научно-практический журнал

Вопросы защиты информации
(4 выпуска)

Подписной индекс **79187**

Издается с 1974 года

Все издания ФГУП "Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства образования и науки России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);
факс: 8 (495) 491-44-80.
E-mail: secretariat@ntckompas.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА "КОМПАС"»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАКЕТНЫЙ ЦЕНТР имени АКАДЕМИКА В. П. МАКЕЕВА»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА»

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Орган Научного совета РАН по механике
конструкций из композиционных материалов

Выпуск 2 (158)

Издается с 1981 г.

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

Сарбаев Б. С., Чжан С. Вариант расчета цилиндрической части композитного баллона высокого давления с несущим металлическим лейнером 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Янковский А. П. Моделирование динамического осесимметричного вязкоупругопластического деформирования цилиндрических композитных оболочек с различными структурами армирования 12

Таран В. М., Маркелова О. А., Гришина И. П. Разработка экспертно-статистического метода численного моделирования прочности и пористости композитных покрытий 21

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аунг Чжо Мо, Лукин Е. С., Попова Н. А. Влияние содержания добавки эвтектического состава на

уплотнение и свойства композиционной керамики на основе электроплавленного корунда 28

Болдырев Н. А., Шилкина Л. А., Резниченко Л. А., Павленко А. В. Фазовый состав и диэлектрические характеристики тройной системы твердых растворов на основе феррита висмута 33

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

Литаров М. А. Анализ математических моделей газовыделения полимерными композиционными материалами в условиях космического пространства 38

Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О., Терентьев В. С. Методы одновременного контроля деформации и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками 44

Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О. Особенности технологии оптического неразрушающего контроля композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками 52

Памяти Андрея Анатольевича Смердова 57

Главный редактор В. Г. Дегтярь, акад. РАН, д-р техн. наук,
генеральный директор, генеральный конструктор АО «ГРЦ Макеева»

Заместитель главного редактора Н. А. Тестоедов, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук,
генеральный директор АО «ИСС»

Ответственный секретарь Л. А. Жарких,
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционная коллегия:

А. В. Беляков, д-р хим. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева; **А. А. Боков**, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет им. Саймона Фрайзера, Канада; **П. И. Болтаев**, д-р техн. наук, АО "ГРЦ Макеева"; **О. Н. Будадин**, д-р техн. наук, проф., АО «ЦНИИИСМ»; **С. В. Бухаров**, д-р техн. наук, проф., МАИ (НИУ); **В. В. Васильев**, акад. РАН, д-р техн. наук, ИПМ РАН; **В. Г. Дмитриев**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., ФГУП "ЦАГИ"; **С. Т. Калашиников**, канд. техн. наук, АО "ГРЦ Макеева"; **А. Л. Каменева**, д-р техн. наук, доцент, ПНИПУ; **А. Н. Лихачев**, д-р техн. наук, проф., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; **Е. С. Лукин**, д-р техн. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева; **С. А. Оглезнева**, д-р техн. наук, доцент, ПНИПУ; **А. В. Острик**, д-р техн. наук, проф., ИПХФ РАН; **Н. Г. Паничкин**, канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГУП "ЦНИИМаш"; **Л. А. Резниченко**, д-р физ.-мат. наук, проф., НИИ физики ЮФУ; **С. Б. Сапожников**, д-р техн. наук, проф., НОЦ "Нанотехнологии" ЮУГУ; **Б. С. Сарбаев**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; **И. Д. Симонов-Емельянов**, д-р техн. наук, проф., МИРЭА-Российский технологический университет (ИТХТ им. М. В. Ломоносова); **А. А. Смердов**, д-р техн. наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана; **М. И. Соколовский**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., ПАО "НПО Искра"; **А. Н. Тимофеев**, д-р техн. наук, ОАО "Композит"; **В. И. Халиманович**, канд. физ.-мат. наук; проф., АО "ИСС"; **В. И. Хлыбов**, д-р физ.-мат. наук, АО "ГРЦ Макеева"; **Б. В. Щетанов**, д-р техн. наук, проф., ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ

Тел. (495) 491-77-67
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе электронной, без предварительного письменного разрешения редакции не допускаются.

- © Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»), 2020;
- © Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), 2020;
- © Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), 2020

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 620.22

Вариант расчета цилиндрической части композитного баллона высокого давления с несущим металлическим лейнером

Б. С. САРБАЕВ, д-р техн. наук; С. ЧЖАН

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Для расчета напряжений и деформаций в цилиндрической части композитного баллона высокого давления с несущим металлическим лейнером использованы деформационная теория пластичности и нитяная модель волокнистого композиционного материала (КМ). Композит, служащий для усиления цилиндрической части баллона, ориентирован в окружном направлении. Рассмотрены линейное и нелинейное упрочнение материала лейнера. Выполнен анализ напряжений и деформаций в лейнере и композитном слое. Предложены соотношения для расчета их толщин.

Ключевые слова: баллон высокого давления, волокнистый композиционный материал, лейнер, деформационная теория пластичности, разрушающее давление, предел прочности при растяжении, равнонапряженность.

Композитные баллоны высокого давления с несущим металлическим лейнером, цилиндрическая часть которого усилена волокнистым КМ, намотанным в окружном направлении (тип КППГ-2 по определению работы [1]), применяются в разнообразных изделиях техники. Как правило, они подвергаются интенсивному нагружению. Расчетной нагрузкой является внутреннее давление, которое в процессе эксплуатации может циклически изменяться в установленном диапазоне. Например, в соответствии с требованиями работы [1] баллоны, предназначенные для хранения газового моторного топлива на борту автомобиля и рассчитанные на рабочее давление 20 МПа, должны выдерживать циклическую нагрузку в интервале от 2 до 26 МПа без разрушения и потери герметичности.

При действии давления допускаются пластические деформации, причем число циклов нагружения равняется сроку эксплуатации в годах, умноженному на 500. Для обеспечения безопасной эксплуатации композитных баллонов высокого давления к проектным расчетам, материалам, методам испытаний, хранению и освидетельствованию конструкций предъявляются повышенные требования [1]. Отметим, что проектирование является ответственным этапом разработки композитных баллонов. Методы расчета и проектирова-

ния конструкции должны учитывать в том числе неупругие деформации как в металлическом лейнере, так и в КМ. При этом существенным подспорьем при выполнении подобных проектных расчетов являются компьютерная техника и соответствующие программные средства.

В данной работе рассмотрен один из возможных способов анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрической части композитного баллона высокого давления с несущим металлическим лейнером в физически нелинейной постановке. Он основан на применении соотношений деформационной теории пластичности изотропного тела для материала лейнера и нитяной модели для волокнистого КМ, ориентированного на цилиндрической части в окружном направлении. Расчетной нагрузкой является внутреннее давление. Отметим, что указанный способ предложен в работе [2] и затем развит в монографиях [3, 4], в которых изложены теоретические основы расчета, проектирования и испытаний композитных баллонов различной конструкции.

Приведены основные закономерности данного способа расчета. Для решения систем нелинейных алгебраических уравнений, описывающих НДС конструкции, а также для расчета разрушающего давления применен математический пакет MathCad. Для материала лейнера рассмотрены случаи линейного и нелинейного упрочнений при деформировании за пределами упругости. Для расчета толщины стенки лейнера и композитного слоя предложен вариант соотношений, основанный на предположении о равнонапряженности лейнера при достижении разрушающего давления.

Сарбаев Борис Сафиулович, профессор.

E-mail: bssarbayev@mail.ru

Чжан Сюань, аспирант.

E-mail: 564524318@qq.com

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2020 г.

© Сарбаев Б. С., Чжан С., 2020

Основные соотношения

Примем, что баллон с несущим металлическим лейнером нагружен внутренним давлением p . Радиус его цилиндрической части равен R . Толщины стенки лейнера и кольцевого композитного слоя обозначим через h_m и h_k . Деформирование материала лейнера описывается соотношениями деформационной теории пластичности изотропного тела. Для однонаправленного волокнистого КМ применим нитяную модель.

Напряженное состояние цилиндрической части баллона вдали от сечений сопряжения с днищами является безмоментным. Рассмотрим бесконечно малый элемент цилиндрической части, удаленный от этих сечений (рис. 1).

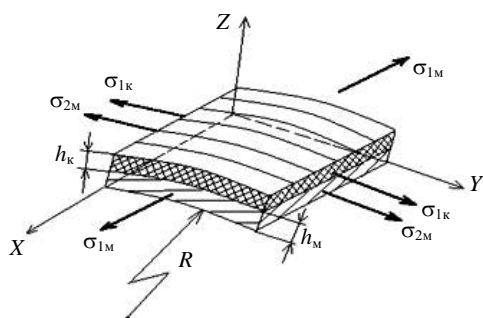


Рис. 1. Напряженное состояние элемента цилиндрической части

Систему координат выберем так, чтобы направление оси OX совпадало с направлением образующей, ось OY направим по касательной к круговому сечению цилиндрической части, а ось OZ — перпендикулярно ее поверхности. Предположим, что полюсные отверстия днищ баллона закрыты крышками. Допустим, как и в работах [3, 4], что в направлении оси OZ действует напряжение $\sigma_{3m} = -p$. В этом случае закон Гука для материала лейнера имеет следующий вид

$$\begin{cases} \varepsilon_{1m} = \frac{\sigma_{1m} - \nu\sigma_{2m} + \nu p}{E}; \\ \varepsilon_{2m} = \frac{\sigma_{2m} - \nu\sigma_{1m} + \nu p}{E}; \\ \varepsilon_{3m} = -\frac{\nu(\sigma_{1m} + \sigma_{2m}) + p}{E}, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_{1m}, σ_{2m} — осевое и окружное нормальные напряжения в лейнере;
 $\varepsilon_{1m}, \varepsilon_{2m}, \varepsilon_{3m}$ — осевая, окружная и радиальная линейные деформации;
 E и ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

Соотношение закона Гука для однонаправленного волокнистого КМ имеет вид $\sigma_{1k} = E_1 \varepsilon_{1k}$, где

E_1 — модуль упругости композита при растяжении вдоль волокон.

Для цилиндрической части баллона справедливы следующие соотношения статики:

$$\sigma_{2m} h_m + \sigma_{1k} h_k = pR; \quad \sigma_{1m} = \frac{pR}{2h_m}. \quad (2)$$

Предположим, что деформации лейнера и волокнистого КМ в окружном направлении одинаковы, т. е. $\varepsilon_{2m} = \varepsilon_{1k}$.

Воспользовавшись равенствами (1) и (2), зависимостью $\sigma_{1k} = E_1 \varepsilon_{1k}$ и условием $\varepsilon_{1k} = \varepsilon_{2m}$, получим следующие соотношения для напряжений и деформаций в лейнере и композитном слое:

$$\begin{aligned} \sigma_{2m} &= \frac{pR}{2h_m} \frac{2 + \nu\gamma(1 - 2h_m/R)}{1 + \gamma}; \\ \sigma_{1k} &= \frac{pR}{2h_m} \frac{E_1}{E(1 + \gamma)} [2 - \nu(1 - 2h_m/R)]; \\ \varepsilon_{1m} &= \frac{pR}{2h_m} \frac{(1 + \gamma)(1 + 2\nu h_m/R) - 2\nu - \gamma\nu^2(1 - 2h_m/R)}{E(1 + \gamma)}; \\ \varepsilon_{2m} &= \frac{pR}{2h_m} \frac{1}{E(1 + \gamma)} \left[2 - \nu \left(1 - \frac{2h_m}{R} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь введено обозначение $\gamma = (E_1 h_k) / (E h_m)$. Эти зависимости можно найти в [3, 4]. Здесь они представлены в иных обозначениях. Заметим, если не учитывать действие напряжения σ_{3m} , что допустимо для случая $(h_k + h_m)/R \ll 1$, то формулы (3) можно упростить:

$$\begin{aligned} \sigma_{2m} &= \frac{pR}{2h_m} \frac{2 + \nu\gamma}{1 + \gamma}; \quad \sigma_{1k} = \frac{pR}{2h_m} \frac{E_1(2 - \nu)}{E(1 + \gamma)}; \\ \varepsilon_{1m} &= \frac{pR}{2h_m} \frac{1 - 2\nu + \gamma(1 - \nu^2)}{E(1 + \gamma)}; \quad \varepsilon_{2m} = \frac{pR}{2h_m} \frac{(2 - \nu)}{E(1 + \gamma)}. \end{aligned}$$

Рассмотрим решение задачи в физически нелинейной постановке. Воспользуемся соотношениями деформационной теории пластичности изотропного тела. В рассматриваемом случае для материала металлического лейнера будем иметь

$$\begin{cases} \varepsilon_{1m} = \frac{\sigma_{1m} - \nu\sigma_{2m} + \nu p}{E} + \frac{1}{E_{ps}(\sigma_i)} \left(\sigma_{1m} - \frac{\sigma_{2m} - p}{2} \right); \\ \varepsilon_{2m} = \frac{\sigma_{2m} - \nu\sigma_{1m} + \nu p}{E} + \frac{1}{E_{ps}(\sigma_i)} \left(\sigma_{2m} - \frac{\sigma_{1m} - p}{2} \right); \\ \varepsilon_{3m} = -\frac{\nu(\sigma_{1m} + \sigma_{2m}) + p}{E} - \frac{1}{2} \frac{1}{E_{ps}(\sigma_i)} (\sigma_{1m} + \sigma_{2m} + 2p), \end{cases} \quad (4)$$

где $E_{ps}(\sigma_i) = \sigma_i / \varepsilon_{ip}$ — секущий модуль пластических деформаций на диаграмме деформирования

$\sigma_i - \varepsilon_{ip}$, где σ_i и ε_{ip} интенсивности напряжений и пластических деформаций. Для рассматриваемой задачи указанные величины можно получить по формулам

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{1M}^2 - \sigma_{1M}\sigma_{2M} + \sigma_{2M}^2 + p(\sigma_{1M} + \sigma_{2M}) + p^2}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ip} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{11p}^2 + \varepsilon_{11p}\varepsilon_{22p} + \varepsilon_{22p}^2}. \quad (6)$$

Отличную от нуля радиальную деформацию ε_{3M} , представленную в формулах (1) и (4), далее не рассматриваем, так как она влияет только на изменение толщины стенки лейнера.

При одноосном растяжении в соответствии с формулами (4)–(6) будем иметь

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} + \frac{\sigma_{11}}{E_{ps}(\sigma_i)}; \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\left[v + \frac{E}{2E_{ps}(\sigma_i)}\right] \frac{\sigma_{11}}{E},$$

причем $\sigma_i = \sigma_{11}$, $\varepsilon_{ip} = \varepsilon_{11p}$. Отсюда вытекает следующая форма записи соотношений:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_s(\sigma_i)}; \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -v_s(\sigma_i)\varepsilon_{11},$$

где

$$\frac{1}{E_s(\sigma_i)} = \frac{1}{E} + \frac{1}{E_{ps}(\sigma_i)}; \quad v_s(\sigma_i) = \frac{1}{2} - \frac{1-2\nu}{2} \frac{E_s(\sigma_i)}{E}.$$

Следовательно, секущий модуль пластических деформаций $E_{ps}(\sigma_i)$ можно исключить из рассмотрения с помощью равенства

$$\frac{1}{E_{ps}(\sigma_i)} = \frac{1}{E_s(\sigma_i)} - \frac{1}{E}. \quad (7)$$

Учитывая, что зависимость $\sigma_i = f(\varepsilon_{ip})$ справедлива для любого напряженного состояния и, что при одноосном растяжении $\sigma_i = \sigma_{11}$, секущий модуль упруго-пластических деформаций $E_s(\sigma_i)$ можно определить по диаграмме растяжения $\sigma_{11} - \varepsilon_{11}$.

Далее рассмотрим материалы с линейным и нелинейным упрочнением. Их диаграммы деформирования в координатах $\sigma_{11} - \varepsilon_{11}$ изображены на рис. 2.

В случае линейного упрочнения деформирование материала за пределами упругости при $\sigma_i \geq \sigma_T$, где σ_T — предел текучести, описывается зависимостью

$$\sigma_i = \left(1 - \frac{E_k}{E}\right) \sigma_T + E_k \varepsilon_i,$$

где E_k — касательный модуль упругопластических деформаций (см. рис. 2, а). При этом для секущего модуля в соответствии с равенством (7) будем иметь

$$E_s(\sigma_i) = E \frac{\sigma_i E_k}{E \sigma_i - \sigma_T (E - E_k)}. \quad (8)$$

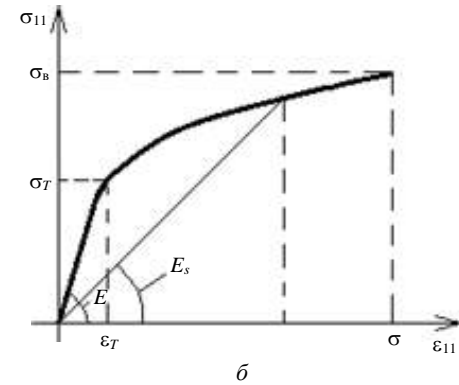
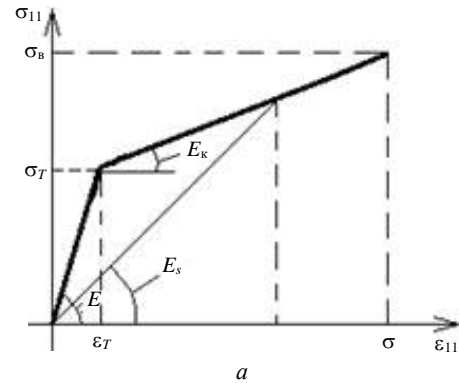


Рис. 2. Диаграммы деформирования пластического материала:

а — с линейным упрочнением;
б — с нелинейным упрочнением

Деформирование материала с нелинейным упрочнением за пределами упругости опишем зависимостью

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E} + A(\sigma_i - \sigma_T)^n,$$

где A и n — материальные параметры, определяемые в результате обработки экспериментальной диаграммы деформирования. Для секущего модуля (см. рис. 2, б) в данном случае получим зависимость

$$E_s(\sigma_i) = E \frac{\sigma_i}{\sigma_i + EA(\sigma_i - \sigma_T)^n}. \quad (9)$$

В расчетах требуется давление p_T , при котором в лейнере начинается пластическое деформирование. Его значение найдем из условия $\sigma_i = \sigma_T$.

Используя выражения для $\sigma_{1м}$ и $\sigma_{2м}$ из формул (3), а также равенство (5), после преобразований получим

$$p_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{(1-C+C^2)\left(\frac{R}{2h_m}\right)^2 + (1+C)\frac{R}{2h_m} + 1}}, \quad (10)$$

где параметр C вычисляется по формуле

$$C = \frac{2 + \nu\gamma(1 - 2h_m/R)}{1 + \gamma}.$$

Представленные зависимости (1)–(10) используем далее для анализа НДС, расчета разрушающего давления и толщины стенки лайнера и композитного слоя.

Напряженно-деформированное состояние цилиндрической части в случае материала лайнера с линейным упрочнением

Определим напряжения в цилиндрической части баллона для материала лайнера с линейным упрочнением. Из второго равенства системы (4) и соотношений статики (2) будем иметь

$$\frac{\sigma_{1к}}{E_1} = \frac{1}{E} \left(\frac{pR - \sigma_{1к}h_k}{h_m} - \nu \frac{pR}{2h_m} + \nu p \right) + \left[\frac{1}{E_s(\sigma_i)} - \frac{1}{E} \right] \left(\frac{pR - \sigma_{1к}h_k}{h_m} - \frac{pR}{4h_m} + \frac{p}{2} \right).$$

Отсюда с учетом равенства (8) после преобразований получим формулу для расчета напряжения в композитном слое:

$$\sigma_{1к} = \frac{pR}{2h_k} \frac{2 - \nu + \nu \frac{2h_m}{R} + \left(\frac{E}{E_k} - 1 \right) \left(1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_i} \right) \left(\frac{3}{2} + \frac{h_m}{R} \right)}{\frac{1}{\gamma} + \frac{E}{E_k} \left(1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_i} \right) + \frac{\sigma_T}{\sigma_i}}. \quad (11)$$

Выражение для интенсивности напряжений (5) также запишем с помощью формул (2):

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\frac{pR}{2h_m} \right)^2 \left(3 + 6 \frac{h_m}{R} + 4 \frac{h_m^2}{R^2} \right) - \frac{pR}{2h_m} \left(3 \frac{h_k}{h_m} + 2 \frac{h_k}{R} \right) \sigma_{1к} + \left(\frac{h_k}{h_m} \right)^2 \sigma_{1к}^2}. \quad (12)$$

Равенства (11) и (12) образуют систему нелинейных алгебраических уравнений относительно

величин σ_i и $\sigma_{1к}$. Исключим из (12) напряжение $\sigma_{1к}$. Для этого уравнение (11) представим в виде

$$\sigma_{1к} = \frac{pR}{2h_k} \frac{a_1\sigma_i - a_2}{b_1\sigma_i - b_2}. \quad (13)$$

Выражение (13) далее учитываем в уравнении (12). В итоге будем иметь нелинейное алгебраическое уравнение следующего вида:

$$\frac{b_1^2}{\sigma_{1м}^2} \sigma_i^4 - 2 \frac{b_1 b_2}{\sigma_{1м}^2} \sigma_i^3 + \left(\frac{b_2^2}{\sigma_{1м}^2} - D \right) \sigma_i^2 + 6 b_1 b_2 (c_2 - 1)^2 \sigma_i - 3 b_2^2 (c_2 - 1)^2 = 0. \quad (14)$$

В уравнениях (13) и (14) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} D &= c_1 b_1^2 - 2 a_1 c_2 b_1 + a_1^2; \\ c_1 &= 3 + 4 \frac{h_m}{R} c_2; \quad c_2 = \frac{3}{2} + \frac{h_m}{R}; \\ b_1 &= \frac{1}{\gamma} + \frac{E}{E_k}; \quad b_2 = \left(b_1 - \frac{1 + \gamma}{\gamma} \right) \sigma_T, \\ a_1 &= 2(1 - 2\nu) + c_2 \left(\frac{b_2}{\sigma_T} + 2\nu \right); \quad a_2 = b_2 c_2. \end{aligned}$$

При заданном давлении p уравнение (14) можно решить численно, например с помощью пакета MathCad. Зная σ_i , можно определить и другие параметры НДС цилиндрической части. Для этого используем равенство (13), а также формулы

$$\varepsilon_{2м} = \frac{\sigma_{1к}}{E_1}; \quad \sigma_{2м} = \frac{pR}{h_m} - \frac{h_k}{h_m} \sigma_{1к}.$$

Осевую деформацию $\varepsilon_{1м}$ определим, воспользовавшись первым равенством из системы (4) и формулой (5).

В рамках данного подхода можно рассчитать давление разрушения цилиндрической части. Здесь под разрушением понимается полное израсходование несущей способности либо композитного слоя, либо лайнера. Поэтому рассмотрим два механизма разрушения.

В первом механизме полагаем, что разрушение происходит при разрыве волокон композитного слоя, т. е. при выполнении условия $\sigma_{1к} = F_{+1}$, где F_{+1} — предел прочности однонаправленного композита при растяжении вдоль волокон. Тогда равенство (13) принимает следующий вид

$$\frac{p^* R}{2h_k} \frac{a_1\sigma_i - a_2}{b_1\sigma_i - b_2} = F_{+1},$$

где p^* — разрушающее давление. Введем обозначение $\xi = h_k/h_m$. Полученное выражение можно переписать в виде

$$\bar{\sigma}_{1m} \frac{a_1 \sigma_i - a_2}{b_1 \sigma_i - b_2} = f. \quad (15)$$

Здесь приняты обозначения $\bar{\sigma}_{1m} = (p^* R)/(2h_m)$, $f = F_{+1} \xi$. Из (15) следует зависимость для интенсивности напряжений:

$$\sigma_i = \frac{\bar{\sigma}_{1m} a_2 - f b_2}{\bar{\sigma}_{1m} a_1 - f b_1}. \quad (16)$$

Подставив (16) в формулу (12) и учитывая равенство $\sigma_{1k} = F_{+1}$, после преобразований получим уравнение относительно неизвестной величины $\bar{\sigma}_{1m}$:

$$\begin{aligned} & a_1^2 c_1 \bar{\sigma}_{1m}^4 - 2 f a_1 (a_1 c_2 + c_1 b_1) \bar{\sigma}_{1m}^3 + \\ & + [f^2 (a_1^2 + 4 a_1 b_1 c_2 + b_1^2 c_1) - b_2^2 c_2^2] \bar{\sigma}_{1m}^2 - \\ & - 2 f^2 b_1 [f^2 (a_1 + b_1 c_2) - b_2^2 c_2] \bar{\sigma}_{1m} + \\ & + f^2 (f^2 b_1^2 - b_2^2) = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Данное уравнение также можно решить с помощью пакета MathCad. Разрушающее давление определим по формуле $p^* = \bar{\sigma}_{1m} 2h_m/R$. Соответствующее значение интенсивности напряжений можно рассчитать по формуле (16).

Из полученных результатов видно, что при определенном давлении \bar{p}^* интенсивность напряжений может совпасть с величиной предела прочности материала лайнера σ_b . Это означает, что разрушение может произойти одновременно в лайнере и композитном слое.

Для давлений $p^* \geq \bar{p}^*$ во втором механизме разрушения предположим, что разрушение цилиндрической части обусловлено разрушением лайнера. Для этого в формулах (11) и (12) принимаем $\sigma_i = \sigma_b$. Тогда будем иметь

$$\bar{\sigma}_{1m} = \tilde{f} \frac{b_1 \sigma_b - b_2}{a_1 \sigma_b - a_2}, \quad (18)$$

где $\tilde{f} = \sigma_{1k} \xi$. Подставляя зависимость (18) в равенство (12), получим

$$\left[c_1 \left(\frac{b_1 \sigma_b - b_2}{a_1 \sigma_b - a_2} \right)^2 - 2 c_2 \frac{b_1 \sigma_b - b_2}{a_1 \sigma_b - a_2} + 1 \right] \tilde{f}^2 = \sigma_b^2.$$

Отсюда следует, что

$$\tilde{f} = \frac{\sigma_b (a_1 \sigma_b - a_2)}{\sqrt{c_1 (b_1 \sigma_b - b_2)^2 - 2 c_2 (a_1 \sigma_b - a_2) (b_1 \sigma_b - b_2) + (a_1 \sigma_b - a_2)^2}}. \quad (19)$$

Определив величину \tilde{f} , по формуле (18) найдем $\bar{\sigma}_{1m}$ и далее вычисляем искомое значение $p^* = \bar{p}^*$, где $\bar{p}^* = \bar{\sigma}_{1m} 2h_m/R$. При этом напряжение в композитном слое рассчитывается по формуле $\sigma_{1k} = \tilde{f}/\xi$.

Следует отметить, что в рассматриваемом механизме разрушения давление p^* также зависит от параметра ξ . При значении $\bar{\xi} = \tilde{f}/F_{+1}$ конструкция является равнопрочной, т. е. в этом случае и в лайнере, и в композитном слое выполняется соответствующее условие разрушения: $\sigma_{1k} = F_{+1}$ и $\sigma_i = \sigma_b$.

Напряженно-деформированное состояние цилиндрической части в случае материала лайнера с нелинейным упрочнением

В этом случае вывод разрешающих уравнений аналогичен выводу уравнений для материала с линейным упрочнением. Но здесь используем равенство (9). Для напряжения в композите будем иметь зависимость

$$\sigma_{1k} = \frac{pR}{2h_m} \frac{E_1}{E} \frac{2[1 - \nu(2 - c_2)]\sigma_i + EA(\sigma_i - \sigma_T)^n c_2}{(1 + \gamma)\sigma_i + \gamma EA(\sigma_i - \sigma_T)^n}. \quad (20)$$

Уравнение (12) представим как

$$\sigma_i^2 = c_1 \left(\frac{pR}{2h_m} \right)^2 - 2 c_2 \sigma_{1k} \xi \frac{pR}{2h_m} + \xi^2 \sigma_{1k}^2. \quad (21)$$

Уравнения (20) и (21) образуют систему нелинейных алгебраических уравнений относительно величин σ_i и σ_{1k} . При заданном давлении p ее удобно решить численно с помощью пакета MathCad. Величины σ_{1k} , σ_{2m} , ε_{1m} , ε_{2m} определяются так же, как и ранее.

Рассмотрим два механизма разрушения.

Пусть в первом механизме выполняется равенство $\sigma_{1k} = F_{+1}$. Тогда из (20) следует, что справедливо соотношение

$$\frac{p^* R}{2h_m} \gamma \frac{2[1 - \nu(2 - c_2)]\sigma_i + EA(\sigma_i - \sigma_T)^n c_2}{(1 + \gamma)\sigma_i + \gamma EA(\sigma_i - \sigma_T)^n} = f, \quad (22)$$

где $f = F_{+1} \xi$. Из уравнения (21) будем иметь

$$\sigma_i^2 = c_1 \left(\frac{p^* R}{2h_m} \right)^2 - 2 c_2 f \frac{p^* R}{2h_m} + f^2. \quad (23)$$

Решив систему уравнений (22) и (23) относительно неизвестных p^* и σ_i , определим разрушающее давление и напряжения $\sigma_{1м}$ и $\sigma_{2м}$ в момент разрушения. При давлении \tilde{p}^* в лейнере и композитном слое выполняются равенства $\sigma_{1к} = F_{+1}$ и $\sigma_i = \sigma_B$, т. е. их разрушение происходит одновременно.

Для давлений $p^* \geq \tilde{p}^*$ имеет место *второй механизм разрушения*, обусловленный разрушением лейнера. В уравнениях (22) и (23) принимаем $\sigma_i = \sigma_B$. Тогда, используя обозначения $\tilde{f} = \sigma_{1к}\xi$, получим

$$\omega = \gamma \frac{2[1 - \nu(2 - c_2)]\sigma_B + EA(\sigma_B - \sigma_T)^n c_2}{(1 + \gamma)\sigma_B + \gamma EA(\sigma_B - \sigma_T)^n}.$$

Учитывая, что $\gamma = E_1\xi/E$, из уравнения (20) будем иметь зависимость

$$\tilde{f} = \frac{p^* R}{2h_m} \omega. \quad (24)$$

Подставляя ее в уравнение (21), получим выражение

$$\sigma_B^2 = (\omega^2 - 2c_2\omega + c_1) \left(\frac{pR}{2h_m} \right)^2.$$

Отсюда следует формула для вычисления разрушающего давления:

$$p^* = \frac{2h_m}{R} \frac{\sigma_B}{\sqrt{\omega^2 - 2c_2\omega + c_1}}. \quad (25)$$

Зависимость для расчета напряжения в композитном слое, которая следует из равенств (24) и (25), имеет вид

$$\sigma_{1к} = \frac{\sigma_B \omega}{\xi \sqrt{\omega^2 - 2c_2\omega + c_1}}.$$

Как и в случае материала с линейным упрочнением, здесь при $p^* \geq \tilde{p}^*$ разрушающее давление является переменным. При $\xi = \tilde{\xi}$ конструкция является равнопрочной. Параметр $\tilde{\xi}$, а также соответствующее значение разрушающего давления можно определить, приняв в равенствах (20) и (21) условия $\sigma_{1к} = F_{+1}$, $\sigma_i = \sigma_B$.

Расчет толщины стенки лейнера и композитного слоя

Предлагаемый вариант проектного расчета основан на предположении, что в момент разрушения лейнер является равнонапряженным. При этом

разрушение вызвано разрывом волокон в композитном слое. Таким образом, должны выполняться равенства $\sigma_{1м} = \sigma_{2м}$, $\sigma_{1к} = F_{+1}$.

Обозначим через \bar{p} расчетное давление. Тогда в соответствии с формулой (5) получим

$$\sigma_i = \left(1 + \frac{R}{2h_m} \right) \bar{p}. \quad (26)$$

Из соотношений статики (2) следует, что

$$\sigma_{1к} = \frac{\bar{p}R}{2h_k}. \quad (27)$$

Из равенства (27) получим выражение для определения толщины композитного слоя:

$$h_k = \frac{\bar{p}R}{2F_{+1}}. \quad (28)$$

На основании равенства (27) и формулы (11) получим

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{E}{E_k} \right) \sigma_i - b_2 = \\ = \left[2 - 2\nu(2 - c_2) + \left(\frac{E}{E_k} - 1 \right) c_2 \right] \sigma_i - b_2 c_2, \end{aligned} \quad (29)$$

где параметр γ с учетом (28) рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{E_1}{EF_{+1}} \frac{\bar{p}R}{2h_m}.$$

При заданном расчетном давлении \bar{p} уравнение (29) можно решить относительно неизвестной величины h_m . Для этого преобразуем его, используя равенство (26). В итоге будем иметь следующее квадратное уравнение относительно величины $2h_m/R$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{b_2}{\bar{p}} + 2 \frac{EF_{+1}}{E_1 \bar{p}} - \frac{E}{E_k} - 2\nu + 1 \right) \left(\frac{2h_m}{R} \right)^2 + \\ + \left(\frac{b_2}{\bar{p}} + 2 \frac{EF_{+1}}{E_1 \bar{p}} - 2 \frac{E}{E_k} \right) \frac{2h_m}{R} - \left(1 - 2\nu + \frac{E}{E_k} \right) = 0. \end{aligned}$$

Это уравнение имеет один положительный корень. Из него следует формула для расчета искомой толщины:

$$h_m = \frac{\bar{p}R}{2} \frac{1 - 2\nu + \frac{E}{E_k}}{\left(\frac{E}{E_k} - 1 \right) \sigma_T + 2 \frac{EF_{+1}}{E_1} - \left(\frac{E}{E_k} - 1 + 2\nu \right) \bar{p}}. \quad (30)$$

Если не учитывать радиальное напряжение $\sigma_{3M} = -p$, то приближенная формула будет иметь вид

$$h_M \approx \frac{\bar{p}R}{2} \frac{1 - 2\nu + \frac{E}{E_K}}{\left(\frac{E}{E_K} - 1\right)\sigma_T + 2\frac{EF_{+1}}{E_1}}. \quad (31)$$

Приближенной формулой целесообразно пользоваться при проектировании тонкостенных конструкций с применением высокопрочных материалов, например легированной стали и углепластика.

Примеры расчетов

Рассмотрим численные примеры. Для этого воспользуемся исходными данными из работ [3, 4]. Геометрические характеристики цилиндрической части баллона следующие: $R = 0,159$ м; $h_M = 0,0128$ м; $h_K = 0,0013$ м. Предположим, что лейнер изготовлен из алюминиевого сплава, его цилиндрическая часть усилена слоем стеклопластика. Расчеты выполним для двух вариантов аппроксимации диаграммы деформирования металла (рис. 3).

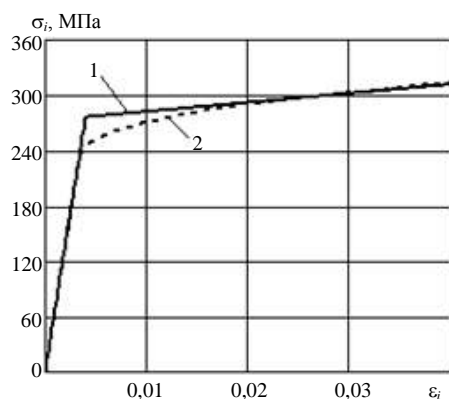


Рис. 3. Диаграммы деформирования алюминиевого сплава для двух вариантов аппроксимации:

1 — линейное упрочнение; 2 — нелинейное упрочнение

Для диаграммы с линейным упрочнением принимаем $E_K = 1$ ГПа, $\sigma_T = 276$ МПа, $\sigma_B = 324$ МПа. Для диаграммы с нелинейным упрочнением задаем $n = 2,3$; $A = 15 \cdot 10^{-7} (\text{МПа})^{-n}$; $\sigma_T = 234$ МПа; $\sigma_B = 324$ МПа. В обоих случаях параметры упругости одинаковы: $E = 69$ ГПа; $\nu = 0,3$. Физико-механические характеристики стеклопластика следующие: $E_1 = 72,4$ ГПа; $F_{+1} = 724$ МПа.

На рис. 4 представлены результаты расчета напряжений в лейнере и композитном слое. Для металла с линейным упрочнением напряжения определены с помощью уравнения (14), формулы (13) и соотношений статики (2). Отметим, что величины напряжений, определенные с помощью этих соотношений, такие же, как и в работе [3]. В случае нелинейного упрочнения использованы

уравнения (20) и (21) и зависимость (2). Для сравнения приведены результаты расчета, полученные с применением метода конечных элементов (МКЭ). Для описания физической нелинейности использованы соотношения теории течения Прандля–Рейсса. Для цилиндрической части баллона построена конечно-элементная модель в двух вариантах, на основе:

- оболочечных конечных элементов (КЭ), в которых не учитывается действие радиального напряжения σ_{3M} ;
- трехмерных КЭ, учитывающих действие этого напряжения.

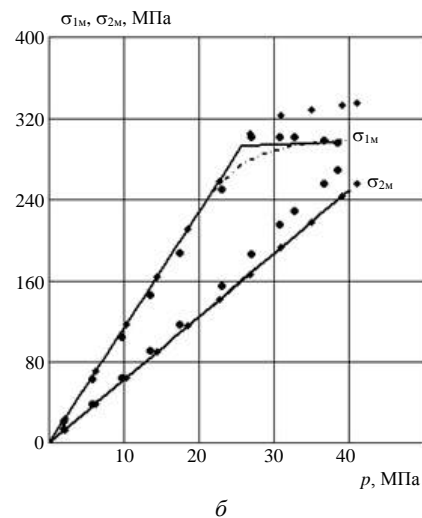
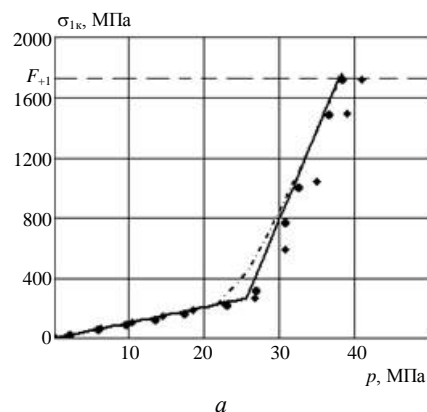


Рис. 4. Зависимость напряжений в композитном слое (а) и лейнере (б) от давления:

— — линейное упрочнение; - - - - нелинейное упрочнение; ♦ — расчет по МКЭ с применением оболочечного КЭ; • — расчет по МКЭ с применением трехмерного КЭ

Как следует из рис. 4, для баллона с заданными геометрическими характеристиками целесообразен учет действия радиального напряжения $\sigma_{3M} = -p$, так как различие напряжений, рассчитанных по двум указанным моделям, может достигать $\approx 20\%$. Результаты расчета с учетом нелинейного упрочнения незначительно отличаются от результатов, полученных для материала с линейным упрочнением.

Выполнен также анализ зависимости разрушающего давления p^* от геометрического параметра $\xi = h_k/h_m$. Полученные результаты показаны на рис. 5.

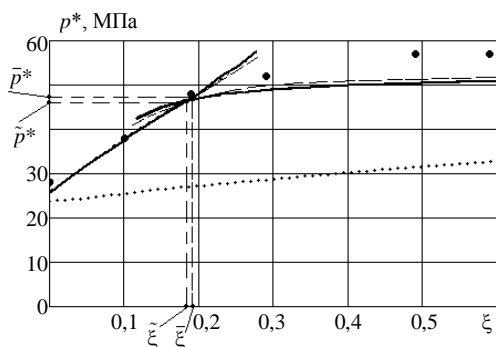


Рис. 5. Зависимость разрушающего давления от параметра $\xi = h_k/h_m$:

• — эксперимент [2, 3]; — — — линейное упрочнение;
- - - - нелинейное упрочнение металла; + + + — давление
начала пластичности в лейнере

Давление начала пластического течения в металле определено по формуле (10).

В случае линейного упрочнения при $0 \leq \xi \leq \bar{\xi}$, т. е. при $\sigma_{1k} = F_{+1}$, в расчете использованы равенство (16) и решение уравнения (17). При $\xi \geq \bar{\xi}$, т. е. при $\sigma_i = \sigma_b$, применены равенства (18) и (19). При $\xi = \bar{\xi}$ имеем $\sigma_{1k} = F_{+1}$ и $\sigma_i = \sigma_b$.

Для нелинейного упрочнения при $0 \leq \xi \leq \bar{\xi}$, т. е. при $\sigma_{1k} = F_{+1}$, разрушающее давление и интенсивность напряжений определены в результате совместного решения уравнений (22) и (23). Для значений $\xi \geq \bar{\xi}$, т. е. в случае $\sigma_i = \sigma_b$, использованы равенства (24) и (25). Одновременное разрушение лейнера и композитного слоя происходит в случае, если $\xi = \bar{\xi}$. Следует отметить, что учет нелинейного упрочнения позволяет уточнить значение разрушающего давления.

Из рис. 5 видно, что значение p^* , найденное для материала с нелинейным упрочнением, лучше соответствует экспериментальным данным, чем рассчитанное для материала с линейным упрочнением. Кроме того, разрушение одного из слоев на цилиндрической части может не приводить к окончательному исчерпанию несущей способности баллона. Например, для баллона с параметром ξ из интервала $0 \leq \xi \leq \bar{\xi}$ при разрушении композитного слоя металлический лейнер, имеющий достаточно высокое значение толщины h_m , способен воспринимать силовую нагрузку. Расчетное давление p^* по терминологии работы [5] является, по существу, нагрузкой "первого разрушения слоя".

В заключение выполним проектный расчет цилиндрической части баллона, полагая, что физико-механические характеристики материалов и радиус цилиндра прежние. Пусть расчетное давление \bar{p} равно 50 МПа. Воспользовавшись формулами (28) и (30), получим $h_k = 2,31$ мм, $h_m = 14,81$ мм и, следовательно, $h_m/R \approx 0,093$. Отметим, что в работах [3, 4] близкие результаты ($h_k = 2,85$ мм, $h_m = 12,27$ мм) были найдены иным способом, причем отмечено, что полученную толщину h_m следует рассматривать как минимальную. Не учитывая действия на лейнер радиального напряжения $\sigma_{3m} = -p$ и воспользовавшись приближенной формулой (31), получим $h'_m = 12,51$ мм. Таким образом, отличие значения h'_m от значения, полученного по формуле (30), составит $\delta \approx 16\%$.

В качестве следующего примера рассмотрим расчет цилиндрической части композитного баллона при $R = 0,4$ м, для изготовления которой планируется применить легированную сталь с характеристиками $E = 200$ ГПа, $\nu = 0,3$, $E_k = 1,2$ ГПа, $\sigma_T = 1200$ МПа, $\sigma_b = 1500$ МПа и углепластика с характеристиками $E_l = 185$ ГПа, $F_{+1} = 1400$ МПа. Для расчетного давления принимаем $\bar{p} = 45$ МПа. С помощью формулы (30) получим, что $h_k = 6,43$ мм; $h_m = 7,74$ мм; $h_m/R \approx 0,019$. Для приближенного значения в соответствии с (31) имеем $h'_m = 7,45$ мм и отклонение от точного значения $\delta \approx 3,7\%$. В этом случае для расчета может быть использована более простая формула (31).

Заключение

Для расчета и проектирования баллона высокого давления с несущим металлическим лейнером, цилиндрическая часть которого усилена кольцевыми слоями волокнистого КМ, использован подход, предложенный в работах [3, 4]. Расчетные зависимости представлены в форме, удобной для решения практических задач. Отмечено, что расчеты целесообразно выполнять с применением таких программных средств, как например математический пакет MathCad.

Показано, что аппроксимация диаграммы деформирования металла посредством нелинейного упрочнения позволяет получить теоретические результаты, качественно совпадающие с известными экспериментальными данными. Полученная зависимость позволяет также обосновать способ проектирования цилиндрической части, отличный от предложенного в [3, 4] и основанный на гипотезе равнонапряженности лейнера при разрушении. Следует подчеркнуть, что рассмотренный подход

к разрушению цилиндрической части можно трактовать как "первое разрушение слоя". Поведение конструкции после наступления данного состояния и расчет предельного давления, при котором происходит полное исчерпание несущей способности цилиндрической части, требуют отдельного рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 33986-2016. Баллоны высокого давления для сжиженного природного газа, используемого в каче-

стве моторного топлива. Технические требования и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2017. — 15 с.

2. Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 144 с.

3. Vasiliev V. V. Composite pressure vessels. Analysis, design, manufacturing. — Blacksburg: Bull Ridge Publishing, 2009. — 704 p.

4. Васильев В. В., Мороз Н. Г. Композитные баллоны давления: проектирование, расчет, изготовление и испытания. — М.: Машиностроение, 2015. — 373 с.

5. Цай С., Хан Х. Анализ разрушения композитов: кн. "Неупругие свойства композиционных материалов". — М.: Мир, 1978. С. 104—139.

Version of analysis of cylindrical part of composite vessel of high pressure with a load carrying metal liner

B. S. SARBAYEV, X. ZHANG

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

To calculate stresses and strains in the cylindrical part of a high-pressure composite vessel with a load carrying metal liner, the deformation theory of plasticity and the netting model of a fibrous composite material are used. On the cylindrical part, the composite is directed in the circumferential direction. We consider linear and nonlinear hardening of the material of the liner. The analysis of stresses and strains in the liner and composite layer is performed. Relations for calculating their thicknesses are proposed.

Keywords: vessel of high pressure, fibrous composite material, liner, deformation theory of plasticity, burst pressure, tensile strength, equal intensity stress.

Моделирование динамического осесимметричного вязкоупругопластического деформирования цилиндрических композитных оболочек с различными структурами армирования

А. П. ЯНКОВСКИЙ, д-р физ.-мат. наук

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

Исследовано вязкоупругопластическое и упругопластическое динамическое поведение относительно тонких длинных круговых цилиндрических оболочек из полимерного композиционного материала (КМ) — эпоксидного стеклопластика под действием внутреннего давления взрывного типа. Рассмотрены конструкции с окружной, продольно-окружной и ортогонально-спиральной структурами армирования. Разработана математическая модель осесимметричного вязкоупругопластического деформирования гибких цилиндрических композитных оболочек при нагружении избыточным давлением. Показано, что при фиксированном расходе волокон изменение направления армирования приводит к существенному изменению величины и формы остаточного прогиба композитной оболочки. При рациональных структурах армирования (например, окружной или продольно-окружной) форма конструкции после интенсивного неупругого деформирования остается практически цилиндрической (за исключением узких зон краевых эффектов). При нерациональных структурах, например спиральных, после неупругого динамического деформирования цилиндрическая оболочка приобретает гофрированную остаточную форму. Показано, что амплитуда поперечных колебаний композитной оболочки в окрестности начального момента прогиба значительно превышает величину максимального остаточного прогиба.

Ключевые слова: цилиндрические оболочки, эквидистантное армирование, динамическое нагружение, вязкоупругопластическое деформирование, геометрическая нелинейность, теория Редди, модель тела Максвелла–Больцмана, схема "крест".

Цилиндрические оболочки из КМ широко используют в конструкторской практике [1–4], поэтому актуальна проблема математического моделирования механического поведения таких элементов конструкций [1, 4–11]. При этом в подавляющем большинстве исследований моделируется лишь линейно-упругое деформирование КМ-оболочек [1, 4–9]. Однако такие изделия могут подвергаться высокоинтенсивному нагружению [4, 6], при котором компоненты композиции деформируются неупруго. Проблема моделирования упругопластического поведения КМ-конструкций находится в стадии становления. Так, в [6] рассмотрено неупругое динамическое деформирование слоистых тонкостенных элементов конструкций с изотропными слоями. В [10, 11] смоделировано упругопластическое поведение композитных цилиндрических оболочек. Механическое поведение компонентов композиции в [6, 10, 11] описано

определяющими уравнениями теории Прандтля–Рейсса–Хилла [12] (ТПРХ), которые не учитывают реальные демпфирующие свойства материалов при их циклическом деформировании. Поэтому расчеты, проведенные в [6, 10, 11], не позволяют определять остаточные деформации и перемещения при динамическом нагружении КМ-оболочек. Демпфирующие свойства компонентов композиции учтены в [13], где построена модель вязкоупругопластического деформирования тонкостенного элемента конструкции с перекрестным армированием по параллельным плоскостям. Для получения численных решений динамических задач теории тонкостенных конструкций используют, как правило, явные схемы типа "крест" [6, 10, 11, 13] или неявные методы Ньюмарка [14].

Цель работы — моделирование вязкоупругопластического осесимметричного деформирования гибких замкнутых круговых цилиндрических композитных оболочек с различными структурами армирования при их динамическом нагружении внутренним давлением.

Оболочки изготавливали из стеклопластика с перекрестной структурой армирования по эквидистантным цилиндрическим поверхностям. Слабое сопротивление оболочек поперечному сдвигу учитывали в рамках кинематических гипотез теории

Янковский Андрей Петрович, ведущий научный сотрудник лаборатории "Физика быстропотекающих процессов".
E-mail: lab4nemir@rambler.ru; yankovsky_ap@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2019 г.

© Янковский А. П., 2020

Редди, геометрическую нелинейность задачи — в приближении Кармана. Мгновенное упругопластическое деформирование материалов композиции описывали соотношениями теории пластического течения с изотропным упрочнением. Вязкоупругое поведение материалов характеризовали определяющими уравнениями модели тела Максвелла–Больцмана. Численное решение поставленной задачи строили по явной схеме "крест".

Постановка задачи

Рассмотрим тонкую круговую цилиндрическую оболочку радиуса R , длиной L и толщиной $2h \ll \min(L, R)$ (рис. 1), с которой свяжем цилиндрическую систему координат r, φ и z , где r и φ — полярные радиус и угол ($R-h \leq r \leq R+h$, $0 \leq \varphi < 2\pi$), z — продольная координата ($0 \leq z \leq L$). Оболочка изготовлена из композита со спирально-перекрестным армированием четным числом семейств волокон $2N$. Эти семейства можно разбить на пары таким образом, чтобы в каждой паре был один и тот же материал волокон, а арматура разных семейств была намотана меридионально-симметрично ($\psi_{2k-1}(z) = -\psi_{2k}(z)$) с одинаковыми плотностями армирования ($\omega_{2k-1}(z) = \omega_{2k}(z)$, $1 \leq k \leq N$). Здесь ψ_k и ω_k — углы (отсчитываемые от осевого направления z) и интенсивности армирования волокнами k -го семейства ($1 \leq k \leq 2N$) (на рис. 1, б изображен случай $N = 1$). В радиальном (r) и окружном (φ) направлениях структура армирования является однородной.

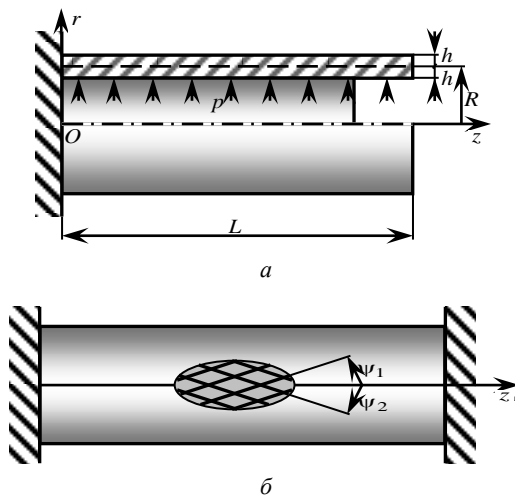


Рис. 1. Цилиндрические композитные оболочки:

а — жестко закрепленная на левой кромке;
б — жестко закрепленная на обеих кромках

Предположим, что на краях $z = 0, L$ заданы осесимметричные граничные условия, причем кручение конструкции отсутствует, оболочка осе-

симметрично нагружена поперечной поверхностной нагрузкой, например внутренним давлением p (см. рис. 1, а). Так как закрепление, нагружение и структура армирования конструкции осесимметричны, ее деформирование также осесимметрично (потеря устойчивости оболочки по неосесимметричным формам при ее нагружении внешним давлением в данном исследовании не рассматривается).

Для описания слабого сопротивления КМ-оболочки поперечному сдвигу используем традиционную неклассическую теорию Редди [5, 7, 8, 10, 11, 13], которая с математической точки зрения является более точной, чем теория Тимошенко–Рейсснера [1, 4, 6, 10]. Учитывая геометрическую нелинейность рассматриваемой задачи в приближении Кармана, для ненулевых осредненных деформаций композиции ε_{ij} и перемещений точек конструкции u_i получим следующие аппроксимации [10]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz}(t, z, \bar{r}) &= \partial u_z^0(t, z) - \bar{r} \partial^2 w + \\ &+ 2\bar{r}h^{-2} \left(h^2 - \bar{r}^2 / 3 \right) \partial \varepsilon_{rz}^0(t, z) + (\partial w)^2 / 2; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi}(t, z, \bar{r}) = R^{-1} w(t, z);$$

$$\varepsilon_{rz}(t, z, \bar{r}) = h^{-2} \left(h^2 - \bar{r}^2 \right) \varepsilon_{rz}^0(t, z);$$

$$u_z(t, z, \bar{r}) = u_z^0(t, z) - \bar{r} \partial w + 2\bar{r}h^{-2} \left(h^2 - \bar{r}^2 / 3 \right) \varepsilon_{rz}^0(t, z); \quad (2)$$

$$u_r(t, z, \bar{r}) = w(t, z), \quad |\bar{r}| \leq h, \quad 0 \leq z \leq L, \quad (3)$$

$$t \geq t_0, \quad r = R + \bar{r},$$

где u_z, u_r — перемещения точек КМ-оболочки в осевом и радиальном направлениях;

u_z^0 — то же для точек срединной поверхности ($\bar{r} = 0$);

w — прогиб;

ε_{rz}^0 — деформация поперечного сдвига в точках отсчетной поверхности;

t_0 — начальный момент времени t ;

∂ — частное дифференцирование по переменной z .

Равенство (3) — традиционная для тонкостенных элементов КМ-конструкций кинематическая гипотеза, согласно которой изменяемость радиального перемещения в поперечном направлении r не учитывается [1, 4—11, 13, 14]. Таким образом, в соотношениях (1)—(3) неизвестны функции w, u_z^0 и ε_{rz}^0 , зависящие только от времени t и продольной координаты z .

Уравнения динамического равновесия тонкой цилиндрической КМ-оболочки в рассматриваемом приближении с учетом (2) и (3) имеют вид [10]

$$\begin{aligned} 2h\rho\ddot{u}_z^0 &= \partial(F_{zz} - F_{zr}\partial w) - \partial w(\sigma_{rr}^{(+)} - \sigma_{rr}^{(-)}); \\ 2h\rho\ddot{w} &= \partial(F_{zr} + F_{zz}\partial w) - R^{-1}F_{\varphi\varphi} + \sigma_{rr}^{(+)} - \sigma_{rr}^{(-)}; \quad (4) \\ 2h^3\rho\ddot{\gamma}/3 &= \partial M_{zz} - F_{zr}; \quad 0 \leq z \leq L; \quad t \geq t_0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \gamma(t, z) &\equiv \frac{8}{5}\varepsilon_{rz}^0 - \partial w; \quad \rho \equiv \rho_0\omega_0 + \sum_{k=1}^{2N}\rho_k\omega_k; \\ \omega_0 &= 1 - \sum_{k=1}^{2N}\omega_k; \end{aligned} \quad (5)$$

F_{zz} , $F_{\varphi\varphi}$, F_{zr} — мембранные и перерезывающие силы в конструкции;

M_{zz} — изгибающий момент;

$\sigma_{rr}^{(\pm)}$ — заданные на внутренней (–) и внешней (+) лицевых поверхностях нормальные напряжения (на рис. 1, a $\sigma_{rr}^{(+)} \equiv 0$, $\sigma_{rr}^{(-)} = -p$);

ρ_0 , ρ_k — объемная плотность материала связующего и волокон k -го семейства;

γ — введенная для удобства функция;

точка — операция частного дифференцирования по времени t .

Так как рассматривается динамическое деформирование КМ-оболочки как гибкой тонкостенной механической системы, напряжение $\sigma_{rr}(t, z, \bar{r})$ с приемлемой для инженерных приложений точностью можно линейно аппроксимировать по переменной \bar{r} [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}(t, z, \bar{r}) &= \frac{\sigma_{rr}^{(+)}(t, z) - \sigma_{rr}^{(-)}(t, z)}{2h}\bar{r} + \\ &+ \frac{\sigma_{rr}^{(+)}(t, z) + \sigma_{rr}^{(-)}(t, z)}{2}; \quad |\bar{r}| \leq h; \quad 0 \leq z \leq L; \quad t \geq t_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Как и в [13], предполагаем, что материалы компонентов композиции однородны и изотропны, их пластическое деформирование описывается соотношениями теории течения с изотропным упрочнением, а вязкоупругое поведение — определяющими уравнениями модели тела Максвелла–Больцмана [15]. Тогда для k -го компонента композиции оболочки определяющие уравнения его вязкоупругопластического деформирования при учете (6) можно записать в матричной форме [13]:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_k &= Z_k \dot{\varepsilon}_k + V_k \sigma_k + \mathbf{w}_k \left[\dot{\sigma}_{rr} + (B^{(k)} - D^{(k)}) \sigma_{rr} \right] + \\ &+ \mathbf{q}_k \sigma_{rr}; \quad 0 \leq k \leq 2N; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{rr}^{(k)} &= \mathbf{g}_k^T \dot{\varepsilon}_k - \mathbf{e}_k^T \sigma_k + \zeta^{(k)} \left[\dot{\sigma}_{rr} + (B^{(k)} - D^{(k)}) \sigma_{rr} \right]; \quad (8) \\ 0 &\leq k \leq 2N. \end{aligned}$$

Здесь и далее

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_k &= \bar{\mathbf{Z}}_k - \bar{\bar{\mathbf{Z}}}_k; \quad \mathbf{V}_k = \bar{\mathbf{V}}_k - \bar{\bar{\mathbf{V}}}_k; \\ k &= 0, 1, \dots, 2N; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sigma_k &= \left\{ \sigma_1^{(k)}, \sigma_2^{(k)}, \sigma_3^{(k)}, \sigma_4^{(k)}, \sigma_5^{(k)} \right\}^T \equiv \\ &\equiv \left\{ \sigma_{zz}^{(k)}, \sigma_{\varphi\varphi}^{(k)}, \sigma_{z\varphi}^{(k)}, \sigma_{zr}^{(k)}, \sigma_{r\varphi}^{(k)} \right\}^T; \\ \varepsilon_k &= \left\{ \varepsilon_1^{(k)}, \varepsilon_2^{(k)}, \varepsilon_3^{(k)}, \varepsilon_4^{(k)}, \varepsilon_5^{(k)} \right\}^T \equiv \\ &\equiv \left\{ \varepsilon_{zz}^{(k)}, \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(k)}, 2\varepsilon_{z\varphi}^{(k)}, 2\varepsilon_{zr}^{(k)}, 2\varepsilon_{r\varphi}^{(k)} \right\}^T; \\ \mathbf{s}_k &= \left\{ s_1^{(k)}, s_2^{(k)}, s_3^{(k)}, s_4^{(k)}, s_5^{(k)} \right\}^T \equiv \\ &\equiv \left\{ s_{zz}^{(k)}, s_{\varphi\varphi}^{(k)}, s_{z\varphi}^{(k)}, s_{zr}^{(k)}, s_{r\varphi}^{(k)} \right\}^T; \end{aligned} \quad (10)$$

$\bar{\mathbf{Z}}_k = (\bar{z}_{ij}^{(k)})$, $\bar{\bar{\mathbf{Z}}}_k = (\bar{\bar{z}}_{ij}^{(k)})$, $\bar{\mathbf{V}}_k = (\bar{v}_{ij}^{(k)})$, $\bar{\bar{\mathbf{V}}}_k = (\bar{\bar{v}}_{ij}^{(k)})$ — 5×5 -матрицы; $\mathbf{w}_k = \{w_i^{(k)}\}$, $\mathbf{q}_k = \{q_i^{(k)}\}$, $\mathbf{g}_k = \{g_i^{(k)}\}$, $\mathbf{e}_k = \{e_i^{(k)}\}$ — пятикомпонентные векторы-столбцы, ненулевые элементы которых вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \bar{z}_{ij}^{(k)} &= 2\delta_{ij}G^{(k)} + \lambda^{(k)} = \text{const}; \quad \bar{z}_{il}^{(k)} = G^{(k)} = \text{const}; \\ \bar{\bar{z}}_{ij}^{(k)} &= A^{(k)}s_i^{(k)}s_j^{(k)} + \\ &+ \zeta^{(k)} \left(\lambda^{(k)} - A^{(k)}s_i^{(k)}s_{rr}^{(k)} \right) \left(\lambda^{(k)} - A^{(k)}s_j^{(k)}s_{rr}^{(k)} \right); \\ \bar{\bar{z}}_{il}^{(k)} &= \bar{\bar{z}}_{li}^{(k)} = \\ &= A^{(k)}s_l^{(k)} \left[s_i^{(k)} - \zeta^{(k)}s_{rr}^{(k)} \left(\lambda^{(k)} - A^{(k)}s_i^{(k)}s_{rr}^{(k)} \right) \right]; \\ \bar{\bar{z}}_{lm}^{(k)} &= A^{(k)}\sigma_l^{(k)}\sigma_m^{(k)} \left(1 + A^{(k)}\zeta^{(k)}s_{rr}^{(k)}s_{rr}^{(k)} \right); \\ \bar{v}_{ij}^{(k)} &= -\delta_{ij}B^{(k)} + D^{(k)}; \quad \bar{v}_{il}^{(k)} = -B^{(k)}; \\ \bar{\bar{v}}_{ij}^{(k)} &= D^{(k)}\zeta^{(k)} \times \left(\lambda^{(k)} - A^{(k)}s_i^{(k)}s_{rr}^{(k)} \right); \\ \bar{\bar{v}}_{lj}^{(k)} &= -D^{(k)}\zeta^{(k)}A^{(k)}s_l^{(k)}s_{rr}^{(k)}; \\ w_i^{(k)} &= \zeta^{(k)} \left(\lambda^{(k)} - A^{(k)}s_i^{(k)}s_{rr}^{(k)} \right); \\ w_l^{(k)} &= -A^{(k)}\zeta^{(k)}\sigma_l^{(k)}s_{rr}^{(k)}; \quad q_i^{(k)} = D^{(k)}; \\ g_i^{(k)} &= -\zeta^{(k)} \left(\lambda^{(k)} - A^{(k)}s_i^{(k)}s_{rr}^{(k)} \right); \\ g_l^{(k)} &= 2A^{(k)}\zeta^{(k)}\sigma_l^{(k)}s_{rr}^{(k)}; \quad e_i^{(k)} = D^{(k)}\zeta^{(k)}; \\ \zeta^{(k)} &= \left(2G^{(k)} + \lambda^{(k)} - A^{(k)}s_i^{(k)}s_{rr}^{(k)} \right)^{-1}; \quad (11) \\ i, j &= 1, 2; \quad l, m = 3, 4, 5; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A^{(k)} &= \frac{c^{(k)} G^{(k)}}{(1 + g^{(k)}) T^{(k)2}}; \quad B^{(k)} = \frac{G^{(k)}}{\eta^{(k)}} \left(1 - \frac{c^{(k)}}{1 + g^{(k)}} \right); \\
D^{(k)} &= \frac{1}{3} \left(B^{(k)} - \frac{K^{(k)}}{\mu^{(k)}} \right); \quad g^{(k)} = \frac{\bar{G}^{(k)}}{G^{(k)}}; \\
G^{(k)} &= \frac{E^{(k)}}{2(1 + \nu^{(k)})}; \quad \lambda^{(k)} = \frac{\nu^{(k)} E^{(k)}}{(1 + \nu^{(k)})(1 - 2\nu^{(k)})}; \\
K^{(k)} &= \frac{E^{(k)}}{3(1 - 2\nu^{(k)})}; \\
T^{(k)2} &= \sum_{l=3}^5 \sigma_l^{(k)2} + \frac{1}{2} (s_1^{(k)2} + s_2^{(k)2} + s_{rr}^{(k)2}); \\
s_{ij}^{(k)} &= \sigma_{ij}^{(k)} - \delta_{ij} \sigma_0^{(k)} \quad (i, j = r, \varphi, z); \\
\sigma_0^{(k)} &= \frac{1}{3} (\sigma_{rr}^{(k)} + \sigma_{\varphi\varphi}^{(k)} + \sigma_{zz}^{(k)}); \\
c^{(k)} &= \begin{cases} 0 & \text{при } T^{(k)} < T_*^{(k)} \text{ или } T^{(k)} = T_*^{(k)} \\ & \text{и } W^{(k)} \leq T_*^{(k)2} / \eta^{(k)}; \\ 1 & \text{при } T^{(k)} = T_*^{(k)} \text{ и } W^{(k)} > T_*^{(k)2} / \eta^{(k)}; \end{cases} \\
W^{(k)} &\equiv \mathbf{s}_k^T \dot{\mathbf{e}}_k + \zeta^{(k)} s_{rr}^{(k)} \times \\
&\times \left\{ \left[\dot{\sigma}_{rr}^{(k)} + (B^{(k)} - D^{(k)}) \sigma_{rr}^{(k)} \right] - \right. \\
&\times \left. \left[-D^{(k)} (\sigma_{zz}^{(k)} + \sigma_{\varphi\varphi}^{(k)}) - \right. \right. \\
&\times \left. \left. -\lambda^{(k)} (\dot{\epsilon}_{zz}^{(k)} + \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}^{(k)}) + A^{(k)} s_{rr}^{(k)} \mathbf{s}_k^T \dot{\mathbf{e}}_k \right] \right\}; \\
T_*^{(k)} &= \max \{ T_p^{(k)}, T_m^{(k)} \}; \quad 0 \leq k \leq 2N, \\
\text{где } \sigma_{ij}^{(k)}, \epsilon_{ij}^{(k)} &\text{ — компоненты тензора напряжений и деформаций;} \\
E^{(k)}, \nu^{(k)} &\text{ — модуль Юнга и коэффициент Пуассона;} \\
\eta^{(k)} &\text{ — коэффициент линейной вязкости при сдвиге в соотношениях Максвелла–Больцмана (см. (2) в [13]);} \\
\mu^{(k)} &\text{ — коэффициент объемной вязкости в тех же соотношениях;} \\
T_p^{(k)} &\text{ — значение интенсивности касательных напряжений } T^{(k)}, \text{ при котором впервые достигается пластическое состояние;} \\
T_m^{(k)} &\text{ — максимальное значение } T^{(k)}, \text{ достигнутое за всю предыдущую историю деформирования элемента материала;} \\
\delta_{ij} &\text{ — символ Кронекера;} \\
\text{индекс "Т"} &\text{ — операция транспонирования;} \\
\text{индекс "k"} &\text{ — номер компонента композиции (k = 0 — связующее, k ≥ 1 — арматура k-го семейства).}
\end{aligned}
\tag{12}$$

Равенства (10) задают соответствия между пятью компонентами $f_i^{(k)}$ ($i = \overline{1, 5}$) некоторого вектора-столбца \mathbf{f}_k и компонентами симметричного тензора второго ранга $f_{jl}^{(k)}$ ($j, l = \overline{1, 3}$; $0 \leq k \leq 2N$). Функции σ_{rr} и $\dot{\sigma}_{rr}$ в (7)–(12) известны из (6).

Используя формулы (7) и (8) с учетом выражений (9)–(11) и повторяя рассуждения из [13], в текущий момент времени t получим следующее матричное определяющее уравнение, описывающее вязкоупругопластическое деформирование рассматриваемой КМ-оболочки:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{B} \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{p}, \tag{13}$$

где

$$\begin{aligned}
\mathbf{B} &\equiv (\omega_0 \mathbf{B}_0 + \sum_{k=1}^{2N} \omega_k \mathbf{B}_k \mathbf{E}_k) \mathbf{H}^{-1}; \\
\mathbf{p} &\equiv \mathbf{f} - \mathbf{B} \mathbf{g}; \quad \mathbf{f} \equiv \omega_0 \mathbf{p}_0 + \sum_{k=1}^{2N} \omega_k (\mathbf{p}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{r}_k); \\
\mathbf{H} &\equiv \omega_0 \mathbf{I} + \sum_{k=1}^{2N} \omega_k \mathbf{E}_k; \quad \mathbf{g} \equiv \sum_{k=1}^{2N} \omega_k \mathbf{r}_k;
\end{aligned}
\tag{14}$$

$$\mathbf{r}_k \equiv \mathbf{D}_k^{-1} \boldsymbol{\zeta}_k; \quad \mathbf{E}_k \equiv \mathbf{D}_k^{-1} \mathbf{C}_k; \quad 1 \leq k \leq 2N;$$

$\dot{\boldsymbol{\sigma}}, \dot{\mathbf{e}}$ — пятикомпонентные векторы-столбцы скоростей осредненных напряжений $\dot{\sigma}_{ij}$ и деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}$ в композиции, аналогичные по структуре (10);

$\mathbf{B}, \mathbf{E}_k, \mathbf{C}_k$ — 5×5 -матрицы;

$\mathbf{D}_k^{-1}, \mathbf{H}^{-1}$ — матрицы, обратные 5×5 -матрицам \mathbf{D}_k и \mathbf{H} ;

$\mathbf{p}, \mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{r}_k, \boldsymbol{\zeta}_k$ — пятикомпонентные векторы-столбцы.

Элементы $c_{ij}^{(k)}, d_{ij}^{(k)}$ матриц $\mathbf{C}_k, \mathbf{D}_k$ и компоненты $\zeta_i^{(k)}$ векторов-столбцов $\boldsymbol{\zeta}_k$ вычисляют по формулам (55) и (56) из [13]. Они зависят от механического состояния k -го компонента композиции и направления армирования ψ_k .

Силовые факторы в уравнениях (4) и осредненные напряжения в композиции связаны равенствами [1, 4–10]:

$$\begin{aligned}
F_{zz}(t, z) &= \int_{-h}^h \sigma_{zz}(t, z, \bar{r}) d\bar{r}; \\
F_{\varphi\varphi}(t, z) &= \int_{-h}^h \sigma_{\varphi\varphi}(t, z, \bar{r}) d\bar{r}; \\
F_{zr}(t, z) &= \int_{-h}^h \sigma_{zr}(t, z, \bar{r}) d\bar{r}; \\
M_{zz}(t, z) &= \int_{-h}^h \sigma_{zz}(t, z, \bar{r}) \bar{r} d\bar{r}; \quad 0 \leq z \leq L; \quad t \geq t_0.
\end{aligned}
\tag{15}$$

Для однозначного интегрирования исследуемой начально-краевой задачи на кромках конструкции необходимо задать следующие граничные условия.

- *Силовые* [10]:

$$\begin{aligned} (-1)^i (F_{zz} - F_{zr} \partial w) &= F_z; \quad (-1)^i (F_{zr} + F_{zz} \partial w) = F_r; \\ M_{zz} &= M_z; \\ i=1 \text{ при } z=0; \quad i=2 \text{ при } z=L; \quad t \geq t_0. \end{aligned} \quad (16)$$

- *Кинематические* [10] (см. (2) и (3) при учете (5)):

$$\begin{aligned} w(t, z_*) &= u_{r*}(t, z_*); \quad 2hu_z^0(t, z_*) = u_{z*}(t, z_*); \\ 2h^3\gamma(t, z_*)/3 &= \bar{u}_{z*}(t, z_*); \quad z_* = 0, L; \quad t \geq t_0. \end{aligned} \quad (17)$$

Кроме того, необходимо задать начальные условия [10]:

$$\begin{aligned} w(t_0, z) &= u_{r0}(z); \quad \dot{w}(t_0, z) = v_{r0}(z); \\ 2hu_z^0(t_0, z) &= u_{z0}(z); \quad 2h\dot{u}_z^0(t_0, z) = v_{z0}(z); \\ 2h^3\gamma(t_0, z)/3 &= \bar{u}_{z0}(z); \\ 2h^3\dot{\gamma}(t_0, z)/3 &= \bar{v}_{z0}(z); \quad 0 \leq z \leq L. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь использованы обозначения:

$$\begin{aligned} u_{z*}(t, z_*) &\equiv \int_{-h}^h U_{z*}(t, z_*, \bar{r}) d\bar{r}; \\ \bar{u}_{z*}(t, z_*) &\equiv \int_{-h}^h U_{z*}(t, z_*, \bar{r}) \bar{r} d\bar{r}; \\ u_{z0}(z) &\equiv \int_{-h}^h U_{z0}(z, \bar{r}) d\bar{r}; \\ \bar{u}_{z0}(z) &\equiv \int_{-h}^h U_{z0}(z, \bar{r}) \bar{r} d\bar{r}; \quad v_{z0}(z) \equiv \int_{-h}^h V_{z0}(z, \bar{r}) d\bar{r}; \\ \bar{v}_{z0}(z) &\equiv \int_{-h}^h V_{z0}(z, \bar{r}) \bar{r} d\bar{r}, \end{aligned}$$

F_z, F_r — продольная и радиальная силы, приложенные к кромкам;

M_z — изгибающий момент, заданный на кромках;

U_{z*}, u_{r*} — перемещения, известные на кромках;

$u_{r0}, U_{z0}, v_{r0}, V_{z0}$ — известные начальные перемещения и скорости точек конструкции.

При отсутствии скручивания оболочки в силу осевой симметрии задачи на каждой кромке можно задать по три смешанных из (16), (17) граничных условия, например в случае шарнирного опирания кромки.

Метод расчета

Численное решение рассматриваемой начально-краевой задачи построим на базе алгоритма шагов по времени [6, 10, 11, 13, 14], т. е. будем вычислять неизвестные функции в дискретные моменты времени $t_{n+1} = t_n + \Delta$, где $\Delta = \text{const} > 0$ — шаг по времени. При этом предположим, что в моменты времени t_m уже определены значения следующих функций [10, 13]:

$$\begin{aligned} u_z^0(z) &\equiv u_z^0(t_m, z); \quad w(z) \equiv w(t_m, z); \quad \gamma(z) \equiv \gamma(t_m, z); \\ \sigma_{rr}^{(\pm)}(z) &\equiv \sigma_{rr}^{(\pm)}(t_m, z); \quad \sigma_{zz}(z, \bar{r}) \equiv \sigma_{zz}(t_m, z, \bar{r}); \\ \sigma_{\varphi\varphi}(z, \bar{r}) &\equiv \sigma_{\varphi\varphi}(t_m, z, \bar{r}); \quad \sigma_{zr}(z, \bar{r}) \equiv \sigma_{zr}(t_m, z, \bar{r}); \\ \sigma_k(z, \bar{r}) &\equiv \sigma_k(t_m, z, \bar{r}); \quad \dot{\sigma}_k(z, \bar{r}) \equiv \dot{\sigma}_k(t_m, z, \bar{r}); \\ |\bar{r}| &\leq h; \quad 0 \leq z \leq L; \quad m = n-1, n; \quad 0 \leq k \leq 2N. \end{aligned} \quad (19)$$

Используя соотношение (15), с учетом (19) в текущий момент времени t_n можно вычислить все функции, входящие в правые части уравнений (4).

Производные по времени t аппроксимируем центральными конечными разностями на трехточечном шаблоне $\{t_{n-1}, t_n, t_{n+1}\}$ [10, 11, 13], что позволит разработать явную численную схему "крест". После замены в левых частях соотношений (4) производных по времени их конечно-разностными аналогами с учетом обозначений, аналогичных (19), будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{2h\rho}{\Delta^2} \left(u_z^{n+1} - 2u_z^n + u_z^{n-1} \right) &= \partial \left(F_{zz}^n - F_{zr}^n \partial w^n \right) - \\ &- \partial w^n \left(\sigma_{rr}^{n(+)} - \sigma_{rr}^{n(-)} \right); \\ \frac{2h\rho}{\Delta^2} \left(w^{n+1} - 2w^n + w^{n-1} \right) &= \partial \left(F_{zr}^n + F_{zz}^n \partial w^n \right) - \\ &- R^{-1} F_{\varphi\varphi}^n + \sigma_{rr}^{n(+)} - \sigma_{rr}^{n(-)}; \\ \frac{2h^3\rho}{3\Delta^2} \left(\gamma^{n+1} - 2\gamma^n + \gamma^{n-1} \right) &= \partial M_{zz}^n - F_{zr}^n; \\ 0 \leq z \leq L; \quad n &= 1, 2, 3... \end{aligned} \quad (20)$$

Правые части в (20) уже известны. Поэтому добавляя к (20) необходимые граничные условия на кромках (см. (16) и (17)) и заменяя в соотношениях (16), (20) производные $\partial(\cdot)$ их конечно-разностными аналогами по продольной координате z , получим явную схему "крест" [6, 10, 11, 13] для численного интегрирования рассматриваемой задачи.

При уже известных из (20) функциях u_z^{n+1} , w^{n+1} и γ^{n+1} на основании первого соотношения (5) можно вычислить функцию ε_{zr}^{n+1} , после чего, используя выражения (1), в каждой точке конструкции можно определить осредненные деформации композиции ε_{zr}^{n+1} , ε_{zz}^{n+1} и $\varepsilon_{\varphi\varphi}^{n+1}$. Далее с учетом (11), (13), (14) решение исследуемой задачи строится совершенно так же, как и в [13].

Структура левых частей уравнений (20) указывает на то, что для начала расчета по схеме "крест", кроме функций u_z^0 , w^0 и γ^0 , которые известны из начальных условий (18), требуется знать функции u_z^1 , w^1 , γ^1 (см. (20) при $n=1$). Эти функции с требуемой точностью определим по формуле Тейлора (см. соотношения (14) в [10]) при учете начальных условий (18) и уравнений движения (4) при $t=t_0$.

Необходимые условия устойчивости разработанной схемы "крест" получим из условия Куранта [6] и для КМ-оболочки выполним с запасом, если выполнены условия для каждого компонента композиции оболочки [10, 13].

Обсуждение результатов расчетов

В качестве конкретного примера рассмотрим динамическое упругопластическое и вязкоупругопластическое деформирование относительно тонкой длинной цилиндрической оболочки с толщиной $2h = 1$ см, радиусом $R = 1$ м и длиной $L = 4$ м. Оболочка жестко закреплена на обоих концах ($u_{r*} = 0$; $u_{z*} = 0$; $\bar{u}_{z*} = 0$; $z_* = \pm 2$ м (см. (17) и рис. 1, б)) и нагружается равномерным внутренним давлением по следующему закону (см. (4), (6) и (20)) [14]:

$$\sigma_{rr}^{(+)} \equiv 0; \quad -\sigma_{rr}^{(-)} \equiv p(t) = \begin{cases} p_{\max} t / t_{\max}, & 0 \leq t \leq t_{\max}; \\ p_{\max} \exp[-\alpha(t - t_{\max})], & t > t_{\max}, \end{cases} \quad (21)$$

где

$$\alpha = -\ln(0,01) / (t_{\min} - t_{\max}) > 0; \quad t_{\min} \gg t_{\max}; \quad (22)$$

t_{\max} — время, при котором давление $p(t)$ достигает максимума ($p_{\max} > 0$);

t_{\min} — момент времени, при превышении которого можно пренебречь $p(t)$ по сравнению с p_{\max} (согласно (22) $p(t_{\min}) = 0,01 p_{\max}$).

В расчетах зададим $t_{\max} = 0,1$ мс, $t_{\min} = 2$ мс. Это соответствует давлению, вызванному воздушной взрывной волной [14]. В начальный момент времени ($t_0 = 0$) конструкция покоится: $u_{r0} \equiv 0$; $v_{r0} \equiv 0$; $u_{z0} \equiv 0$; $v_{z0} \equiv 0$; $\bar{u}_{z0} \equiv 0$; $\bar{v}_{z0} \equiv 0$; $|z| \leq 2$ м (см. (18)).

Оболочка изготовлена из КМ на основе эпоксидного связующего и стекловолокон марки S-994. Структуры армирования конструкции однородны ($\omega_k = \text{const}$; $\psi_k = \text{const}$; $1 \leq k \leq 2N$). Мгновенное упругопластическое деформирование компонентов композиции при активном нагружении определяется диаграммой с линейным упрочнением:

$$\sigma = \begin{cases} E^{(k)} \varepsilon, & |\varepsilon| \leq \varepsilon_s^{(k)} = \sigma_s^{(k)} / E^{(k)}; \\ \text{sign}(\varepsilon) \sigma_s^{(k)} + E_s^{(k)} [\varepsilon - \text{sign}(\varepsilon) \varepsilon_s^{(k)}], & |\varepsilon| > \varepsilon_s^{(k)}, \quad 0 \leq k \leq 2N, \end{cases}$$

где σ , ε — осевое напряжение и деформация; $E_s^{(k)}$ — модуль линейного упрочнения k -го материала композиции;

$\sigma_s^{(k)}$, $\varepsilon_s^{(k)}$ — условный предел текучести и соответствующая ему деформация.

Физико-механические характеристики компонентов композиции приведены в таблице ($\mu^{(k)} \rightarrow \infty$, т. е. объемная вязкость материалов не учитывается; см. (11)).

При заданных условиях закрепления, нагружения и схемах армирования КМ оболочка деформируется не только осесимметрично, но и симметрично относительно центрального сечения (т. е. $w(t, z) = w(t, -z)$, $0 \leq z \leq 2$ м и т. п.).

Физико-механические характеристики компонентов композиции [16, 17]

Материал	ρ , кг/м ³	ν	σ_s , МПа	E , ГПа	E_s , ГПа	η , МПа·с	μ , МПа·с
Эпоксидное связующее	1210	0,33	20	2,8	1,114	50	∞
Стекловолокно S-994	2520	0,25	4500	86,8	6,230	200	∞

Рассмотрим три структуры армирования:

1. окружное армирование ($\omega_1 = \omega_2 = 0,15$; $\psi_1 = -\psi_2 = \pi/2$);
2. продольно-окружное армирование ($\omega_1 = 0,1$; $\omega_2 = 0,2$; $\psi_1 = 0$; $\psi_2 = \pi/2$);
3. ортогональное спиральное армирование ($\omega_1 = \omega_2 = 0,15$; $\psi_1 = -\psi_2 = \pi/4$; см. рис. 1, б).

Общий расход армирующих волокон во всех структурах одинаков.

На рис. 2 изображены осцилляции максимальных по модулю значений прогиба ($w_{\max}(t) = \max_z |w(t, z)|$) таких КМ-оболочек в окрестности начального момента времени (рис. 2, а), в окрестности момента времени $t = 150$ мс (рис. 2, б) и на всем рассматриваемом отрезке времени $0 \leq t \leq 150$ мс (рис. 2, в), рассчитанные при $p_{\max} = 3$ МПа (см. (21)).

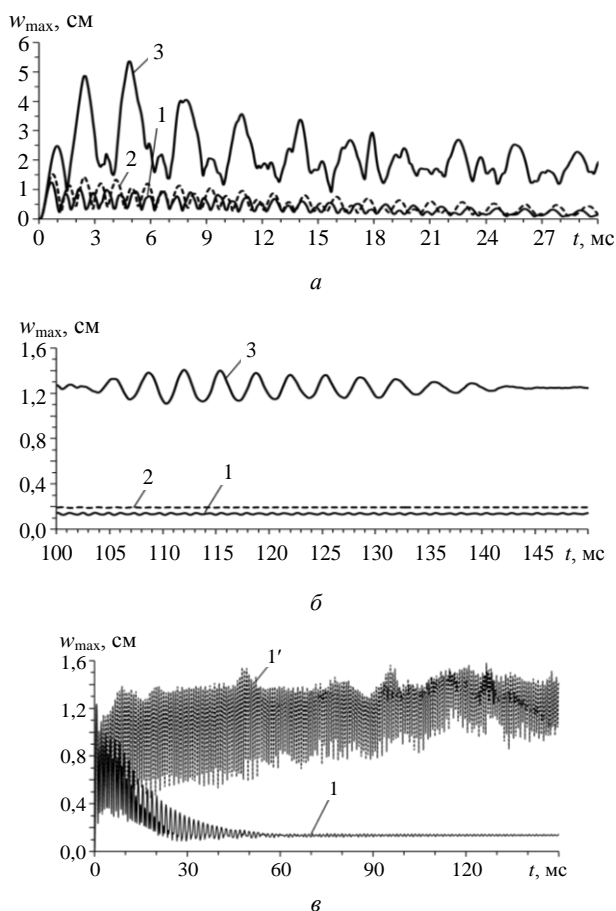


Рис. 2. Осцилляции максимального по модулю значения прогиба КМ-оболочек (номера кривых соответствуют номерам структур армирования):

а — в окрестности начального момента времени;
б — в окрестности $t = 150$ мс; в — на всем расчетном интервале времени

Поведение всех кривых на рис. 2, а и кривой 1 на рис. 2, в показывает, что с течением времени

поперечные колебания КМ-оболочек затухают и к моменту времени $t = 150$ мс практически полностью прекращаются (см. рис. 2, б). Это позволяет определить величину максимального по модулю остаточного прогиба конструкции. В окрестности момента времени $t = 150$ мс (рис. 2, б) штриховая кривая 2 лежит несколько выше сплошной кривой 1, а кривая 3 — значительно выше остальных кривых. Следовательно, структура армирования существенно влияет на величину максимального остаточного прогиба КМ-конструкции. Из всех рассматриваемых структур армирования наименьший остаточный прогиб для длинной тонкой цилиндрической оболочки обеспечивает окружная намотка волокон (кривая 1 на рис. 2), а наибольший — спиральная структура (кривая 3). В связи с этим представляет интерес рассмотрение эпюр остаточных прогибов КМ-оболочки с разными структурами армирования.

На рис. 3 приведена зависимость остаточных прогибов от продольной координаты, рассчитанная при $t = 150$ мс, когда осцилляции КМ-конструкции почти полностью прекратились.

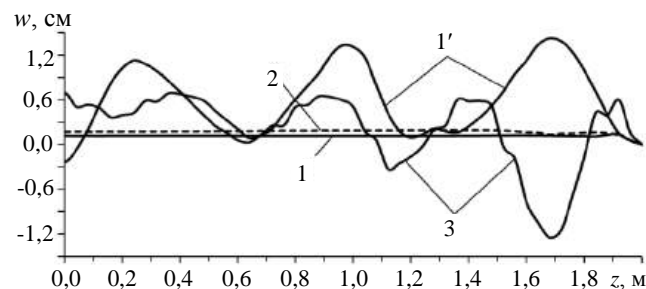


Рис. 3. Эпюры остаточных прогибов КМ-оболочек в момент времени $t = 150$ мс

Кривые на рис. 3 получены при тех же условиях, что и на рис. 2. Так как решение рассматриваемой задачи обладает симметрией относительно центрального сечения $z = 0$, на рис. 3 изображены только правые участки соответствующих кривых (при $z \geq 0$). Из рис. 3 видно, что кривые 1 (окружное армирование) и 2 (продольно-окружное армирование) имеют протяженные почти горизонтальные участки, лишь в окрестности кромки ($z \approx 2$ м) на эпюрах остаточных прогибов проявляются краевые эффекты. Поведение кривой 3 свидетельствует о том, что в конструкции со спиральной структурой армирования остаточный прогиб является знакопеременным и имеет сложную зависимость $w(z)$. При этом максимальное по модулю значение остаточного прогиба реализуется не в направлении действия внешней нагрузки (см. (21)), а в противоположном направлении — внутрь оболочки (см. кривую 3 при $z \approx 1,7$ м).

На рис. 4 изображены рассчитанные для тех же случаев осцилляции максимальных значений интенсивности деформаций связующего материала

$$\varepsilon_{\max}^{(0)}(t) = \max_{z, \bar{r}} \varepsilon_{\max}^{(0)}(t, z, \bar{r}); |z| \leq 2 \text{ м}; |\bar{r}| \leq h).$$

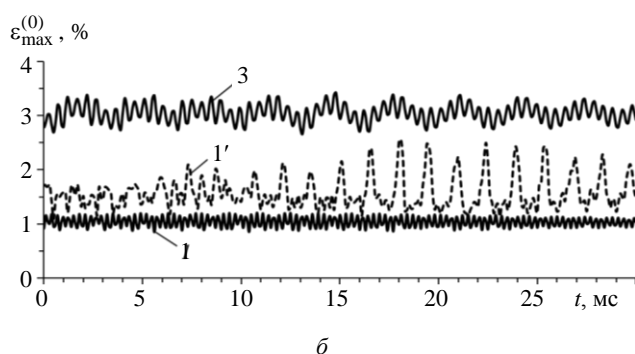
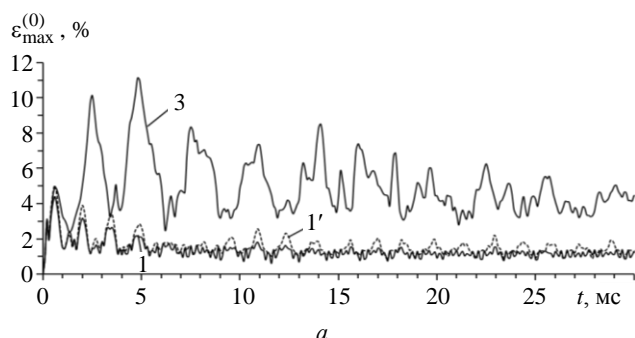


Рис. 4. Осцилляции максимальных значений интенсивности деформаций связующего КМ-оболочек:
а — в окрестности начального момента времени;
б — в окрестности $t = 150$ мс

Кривая 2 на рис. 4 не приведена, чтобы его не загромождать (соответствующая зависимость $\varepsilon_{\max}^{(0)}(t)$ осциллирует в окрестности кривых 1 и 1' на рис. 4). Сравнение максимальных значений $\varepsilon_{\max}^{(0)}$ для кривых 1 и 3 на рис. 4, а свидетельствует о том, что при спиральной структуре армирования (кривая 3) наибольшее значение интенсивности деформаций связующего в разы превосходит значение аналогичной величины при окружной намотке волокон (кривая 1). Подобный результат справедлив и для максимальных значений интенсивности остаточных деформаций связующего материала соответствующих КМ-оболочек (см. правые участки кривых 1 и 3 на рис. 4, б).

Целесообразно сравнить расчеты, выполненные в рамках моделей вязкоупругопластического и упругопластического (ТПРХ) деформирования материалов компонентов композиции. На рис. 2, в, 3 и 4 для сравнения приведены кривые 1', рассчитанные при тех же условиях, что и кривые 1, но в рамках ТПРХ [10]: $\eta \rightarrow \infty$ (см. таблицу). Поведение кривых 1' на этих рисунках свидетельствует о том, что в рамках расчетов по ТПРХ цилиндрическая КМ-оболочка с окружной структурой арми-

рования неограниченно долго осциллирует. Это не позволяет определить остаточные прогибы и остаточные деформации компонентов композиции. Сравнение кривых 1 и 1', определенных по разным теориям деформирования материалов компонентов композиции, показывает, что на основе расчетов по ТПРХ даже приближенно нельзя оценить величину максимального остаточного прогиба (кривые на рис. 2, в при $t \approx 150$ мс и на рис. 3) и максимальную величину интенсивности остаточных деформаций компонентов композиции (ср. кривые 1 и 1' на рис. 4, б). Действительно, если осреднить значения локальных максимумов и минимумов на кривых 1' (см. рис. 2, в и 4, б при $t \approx 150$ мс), то рассчитанные таким образом кривые будут лежать существенно выше соответствующих кривых 1.

Выводы

Разработанная математическая модель вязкоупругопластического деформирования композитных цилиндрических оболочек позволяет учесть слабое сопротивление таких конструкций поперечным сдвигам и рассчитать их затухающие осцилляции при воздействии высокоинтенсивных динамических нагрузок, а также определить остаточные перемещения и остаточное деформированное состояние компонентов композиции.

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что величина и форма остаточного прогиба и интенсивность остаточных деформаций компонентов композиции существенно зависят от структуры армирования материала оболочки. Следовательно, параметрическое управление структурами армирования целесообразно осуществлять для определения рациональных и оптимальных значений параметров армирования, минимизирующих остаточные прогибы и интенсивности остаточных деформаций компонентов композиции. Так, для тонких длинных цилиндрических оболочек рациональной оказалась структура с окружной укладкой волокон. При такой структуре армирования форма оболочки после ее неупругого деформирования остается по-прежнему практически цилиндрической (за исключением узких зон краевых эффектов). При использовании же нерациональной (ортогонально-спиральной) структуры армирования круговая цилиндрическая оболочка после пластического динамического деформирования имеет гофрированный вид со складками, ориентированными в окружном направлении.

Так как высокопрочные армирующие волокна в силу больших значений пределов текучести при деформировании запасают в большом количестве упругую энергию, амплитуда поперечных осцилляций цилиндрической КМ-оболочки в окрестно-

сти начального момента времени значительно (в разы) превосходит величину максимального по модулю остаточного прогиба, причем наибольший остаточный прогиб может быть направлен в сторону, противоположную направлению действия внешней динамической нагрузки.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2017—2020 годы (проект 23.4.1 Механика деформирования и разрушения материалов, сред при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных сред).

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданович А. Е. Нелинейные задачи динамики цилиндрических композитных оболочек. — Рига: Зинатне, 1987. — 295 с.
2. Bannister M. Challenger for composites into the next millennium — a reinforcement perspective // Composites. 2001. Part A 32. P. 901–910.
3. Mouritz A. P., Gellert E., Burchill P., Challis K. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines // Compos. Struct. 2001. V. 53. № 1. P. 21–42.
4. Соломонов Ю. С., Георгиевский В. П., Недбай А. Я., Андришин В. А. Прикладные задачи механики цилиндрических оболочек. — М.: Физматлит, 2014. — 408 с.
5. Амбарцумян С. А. Общая теория анизотропных оболочек. — М.: Наука, 1974. — 446 с.
6. Абросимов Н. А., Баженов В. Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. — Н. Новгород: Изд-во НГУ, 2002. — 400 с.
7. Андреев А. Н., Немировский Ю. В. Многослойные анизотропные оболочки и пластины / Изгиб, устойчивость и колебания. — Новосибирск: Наука, 2001. — 287 с.
8. Reddy J. N. Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis. 2nd ed. — N. Y.: CRC Press, 2004. — 831 p.
9. Каледин В. О., Аульченко С. М., Миткевич А. Б., Решетникова Е. В., Седова Е. А., Шпакова Ю. В. Моделирование статике и динамики оболочечных конструкций из композиционных материалов. — М.: Физматлит, 2014. — 196 с.
10. Янковский А. П. Моделирование осесимметричного упругопластического деформирования цилиндрических волокнистых оболочек // Механика машин, механизмов и материалов. 2018. № 2 (43). С. 68–76.
11. Янковский А. П. Моделирование упругопластического поведения гибких цилиндрических оболочек с пространственными структурами армирования // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 2. С. 9–21.
12. Зубчанинов В. Г. Механика процессов пластических сред. — М.: Физматлит, 2010. — 352 с.
13. Янковский А. П. Моделирование вязкоупругопластического деформирования гибких армированных пластин с учетом слабого сопротивления поперечному сдвигу // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12. № 1. С. 80–97.
14. Houlston R., DesRochers C. G. Nonlinear structural response of ship panels subjected to air blast loading // Computers & Structures. 1987. V. 26. № 1/2. P. 1–15.
15. Фрейденталь А., Гейрингер Х. Математические теории неупругой сплошной среды. — М.: Физматгиз, 1962. — 432 с.
16. Композиционные материалы. Справочник / под ред. Карпиноса Д. М. — Киев: Наук. думка, 1985. — 592 с.
17. Справочник по композитным материалам. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. Любина Дж. / Пер. с англ. Геллера А. Б., Гельмонта М. М. / под ред. Геллера Б. Э. — М.: Машиностроение, 1988. — 448 с.

Modeling of dynamic axisymmetric viscoelastic-plastic deformation of cylindrical composite shells with different reinforcement structures

A. P. YANKOVSKIY

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

The viscoelastic-plastic and elastoplastic dynamic behavior of relatively thin long circular cylindrical shells from polymer composite materials — epoxy glass-reinforced plastic under the influence of internal pressure of an explosive type is investigated. Shells with circumferential, longitudinal-circumferential and orthogonal-spiral reinforcement structures are considered. A mathematical model of axisymmetric viscoelastic deformation of flexible cylindrical composite shells under the influence of excess pressure is developed. It is shown that at fixed fiber consumption, change in the direction of reinforcement leads to significant change in the magnitude and shape of the residual deflection of the composite shell. With rational reinforcement structures (for example, circumferential or longitudinal-circumferential), the shape of the shell after intense inelastic deformation remains almost cylindrical (with the exception of narrow zones of edge effects). In case of irrational reinforcement structures (for example, spiral ones), after inelastic dynamic deformation, the cylindrical shell takes on a corrugated residual shape. It was shown that the amplitude of the transverse vibrations of the composite shell in the vicinity of the initial time instant significantly exceeds the value of the maximum residual deflection.

Keywords: cylindrical shells, equidistant reinforcement, dynamic loading, viscoelastic-plastic deformation, geometric nonlinearity, Reddy theory, Maxwell–Boltzmann body model, "cross" scheme.

УДК 621.793

Разработка экспертно-статистического метода численного моделирования прочности и пористости композитных покрытий

В. М. ТАРАН, д-р техн. наук; О. А. МАРКЕЛОВА; И. П. ГРИШИНА, канд. техн. наук
Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов, Россия

Даны основные характеристики пористых покрытий, предназначенных для хранения жидких веществ в объеме покрытия, смоделированные с использованием принципа работы гидравлической системы. Разработана методика моделирования прочности и пористости плазменного покрытия. Геометрическая структура покрытия представлена в виде дискретных ячеек, которые выражены в форме графовых моделей, опирающихся на понятие множества. Экспериментально установлено повышение качества плазмонапыленных покрытий за счет применения разработанного метода экспертно-статистического моделирования.

Ключевые слова: экспертно-статистический метод, математическое моделирование, плазменные покрытия, пористые структуры.

Методика насыщения пористых композитных покрытий деталей жидкими веществами является перспективной технологией [1, 2]. Основным структурным образованием таких покрытий является каркас из частиц порошка, внутри которого имеются поры (пустоты) вследствие неплотной упаковки частиц порошка [3—8].

Каркас пористого покрытия можно представить как сложную гидравлическую систему, где поры являются емкостью для длительного хранения жидкого вещества и связаны между собой капиллярными каналами. Жидким веществом, вводимым в пористое покрытие, могут служить смазка для улучшения трения, электролиты в электрохимических электродах, лекарственные вещества в покрытиях медицинского назначения и т. д.

Сложность получения прочного пористого покрытия связана прежде всего с наличием корреляционной связи между величиной пористости покрытия и его прочностью. Чем выше степень пористости покрытия, тем ниже его прочность. Поэтому необходимо подобрать допустимые значения этих двух свойств покрытия таким образом, чтобы пористость соответствовала требованиям функционального назначения покрытия, а прочность — требованиям технической надежности

изделия с покрытием. Актуальной задачей является разработка технологии формирования пористых адгезионнопрочных покрытий методом плазменного напыления. В связи со сложностью и многофакторностью процесса плазменного напыления разработка данной технологии возможна с применением метода экспертных оценок и математического моделирования.

Анализ литературных данных и постановка задачи

Как известно, плазмелонапыленные покрытия обладают сложной внутренней структурой [3]. Изменяя режимы нанесения покрытий, можно добиться варьирования макропористости от 20 до 60 %, а также сформировать на поверхности частицы нанодиапазона [4]. Большое влияние на механические свойства плазменных покрытий оказывают внутренние напряжения, возникающие как в процессе нанесения покрытия, так и при его функционировании [5]. Отмечается, что даже незначительное изменение дистанции напыления [6] и тока дуги [7] приводит к изменению кристалличности покрытия в диапазоне от 24 до 69 %. С другой стороны, морфология покрытия напрямую зависит от размера напыляемых частиц [8]: чем крупнее частицы, тем в меньшей степени они расплавляются в плазменной струе [1].

Экспериментально учесть множество факторов, влияющих на структурные и механические характеристики покрытия, практически невозможно. Для теоретического прогнозирования свойств покрытий часто прибегают к математическому моделированию.

Так, описаны модели пористости композитных покрытий, полученных различными методами, в том числе плазменным напылением [9]. Однако

Таран Владимир Маркович, профессор кафедры "Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия".

E-mail: kafbma2011@yandex.ru

Маркелова Ольга Анатольевна, ассистент кафедры "Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия".

E-mail: markelovaoa@bk.ru

Гришина Ирина Петровна, доцент кафедры "Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия".

E-mail: kafbma2011@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2019 г.

© Таран В. М., Маркелова О. А., Гришина И. П., 2020

имеющиеся модели не учитывают взаимосвязи пористости покрытия с его адгезионными характеристиками, что особенно важно при применении покрытий в медицинских целях.

С другой стороны, имеет место моделирование движения жидких веществ в пористых материалах, что связано с применением таких материалов в различных отраслях машиностроения, медицины, электроники и т. д. Разработана серия аналитических моделей для прогнозирования глубины проникновения жидких веществ в пористые среды [10]. При работе с ньютоновскими и неньютоновскими жидкостями используют аналитическую модель прогнозирования глубины проникновения жидкости в пористые среды [11]. Известна технология моделирования высвобождения жидких лекарственных веществ из артериальных стентов [12]. Результаты работы [13] дают представление о движении жидкостей в нанопорах. Однако имеющиеся модели не могут описать гидравлические процессы, происходящие в пористых плазменно-напыленных покрытиях. Это связано с тем, что плазменное покрытие имеет очень сложную структуру, включающую открытые и закрытые поры, разветвленные каналы и т. д.

Цель и задачи исследования

Цель работы — повышение качества плазменно-напыленных покрытий путем моделирования их прочности и пористости. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- разработать модель прочности пористых композитных покрытий;
- смоделировать основные характеристики пористых покрытий с использованием принципа работы гидравлической системы для хранения жидких веществ в объеме покрытия;
- проверить экспериментально результаты моделирования.

Методика экспертно-статистического моделирования прочности и пористости порошковых покрытий

Предлагаемый в работе метод экспертно-статистического моделирования прочности и пористости порошковых покрытий включает следующие этапы [14, 15].

1. Примем, что для моделирования достаточно рассматривать сравнительно небольшой объем покрытия, свойства которого характерны для всего объема покрытия.

2. На основе экспертных оценок сформируем шкалы физических величин (параметров), участвующих в статистическом моделировании:

$$\delta_n = \begin{cases} \delta_1 = 1 \text{ (большое значение);} \\ \delta_2 = 0,8 \text{ (выше среднего);} \\ \delta_3 = 0,7 \text{ (среднее);} \\ \delta_4 = 0,5 \text{ (ниже среднего);} \\ \delta_5 = 0,3 \text{ (малое значение);} \\ \delta_6 = 0,1 \text{ (очень малое значение).} \end{cases} \quad (1)$$

Предположим, что физические величины являются случайными величинами с нормальным законом распределения, а среднее значение физической величины равно 0,7.

3. Для статистического моделирования введем следующие параметры:

- вероятность случайной величины (параметра) $p[0, 1]$ и пороговый критерий α , определяющий доверительный интервал случайной величины;
- индикатор случайного события

$$\mu = \begin{cases} 1, \text{ если событие выполняется;} \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Значения вероятности случайной величины $p[0, 1]$ и индикатора случайного события μ формируются генератором случайных чисел путем розыгрыша на ЭВМ.

Согласно предлагаемой методике математическое описание структуры пористого покрытия для решения на ЭВМ будет следующим:

$$St = \Psi \cup C(\Psi) \cup (x, y, z), \quad (3)$$

- где St — структура пористого покрытия;
 Ψ — дискретные ячейки в форме куба;
 $C(\Psi)$ — поверхность дискретных ячеек;
 (x, y, z) — прямоугольная система координат;
 • понятие "счетное множество дисперсных ячеек Ψ_N ":

$$\Psi_N \{ \Psi_i \} i = \overline{(1, N)}, \quad (4)$$

где Ψ_i — отдельная дискретная ячейка из множества Ψ_N ;

N — максимальное число дискретных ячеек, участвующих в моделировании;

- размеры моделируемого объекта покрытия: $L(x)$ — длина; $B(y)$ — ширина; $H(z)$ — высота.
 - длина ребра дискретной ячейки r .
- Определим величину N как

$$N = klm, \quad (5)$$

где $k = \frac{L(x)}{r^{\text{эк}}}$ — количество дискретных ячеек по координате $L(x)$;

$l = \frac{B(y)}{r^{\text{ЭК}}}$ — количество дискретных ячеек по координате $B(y)$;

$m = \frac{H(z)}{r^{\text{ЭК}}}$ — количество дискретных ячеек по координате $H(z)$;

$r^{\text{ЭК}}$ — экспертная оценка длины ребра дискретной ячейки;

- понятие "счетное множество эквивалентных поверхностей дискретных ячеек":

$$C(\Psi_i) = \{C_\gamma(\Psi_i)\}, \quad \gamma = \overline{(1, 6)}. \quad (6)$$

4. В качестве системы координат для моделирования используем решетчатую модель сетки как наиболее эффективную для компьютерного моделирования.

Так как связь между соседними дискретными ячейками проходит по их границам, введем понятие "эквивалентной поверхности" дискретной ячейки (рис. 1, а). При выборе в качестве дискретной ячейки фигуры куба каждая ячейка будет иметь шесть эквивалентных поверхностей, по две вдоль каждой оси прямоугольной системы координат (рис. 1, б).

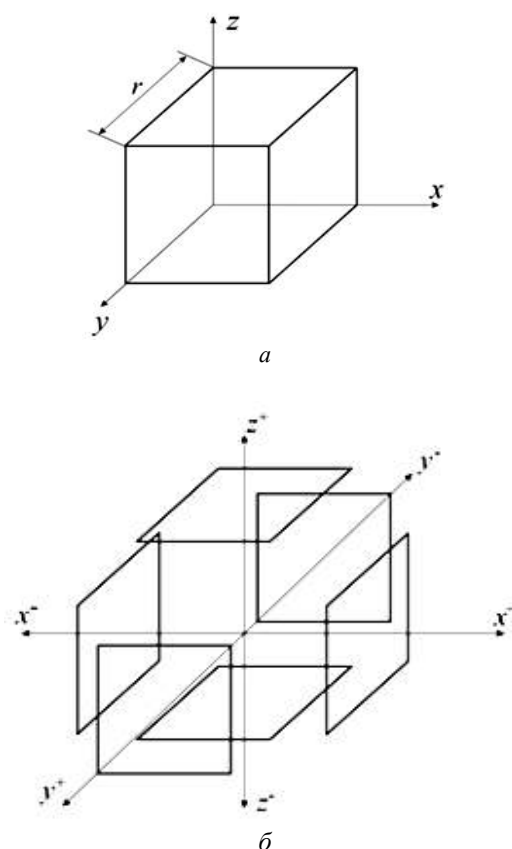


Рис. 1. Схема геометрической модели дискретной ячейки: а — в прямоугольной системе координат; б — расположение эквивалентных поверхностей в продольной системе координат (r — размер ребра дискретной ячейки)

Разделение каркаса покрытия, а также связь между отдельными порами соседних структурных образований осуществляются по их границам. Поэтому оценка прочности и пористости покрытия проводится по результатам моделирования состояния эквивалентных поверхностей дискретных ячеек.

5. Введем понятие "поровые каналы" (взаимосвязанные дискретные ячейки), так как этот термин соответствует сути рассматриваемой проблемы, а именно задаче формирования гидравлических каналов внутри объема покрытия.

Практический интерес имеют взаимосвязанные поры, которые могут формировать гидравлические каналы для ввода жидкостей в объем пористого покрытия и их вывода на поверхность. Для возможности дальнейшего математического моделирования покрытия введем схему разбиения объема пористого покрытия на кубические фигуры (рис. 2, а) и схему моделирования поровых каналов на координатной сетке (рис. 2, б).

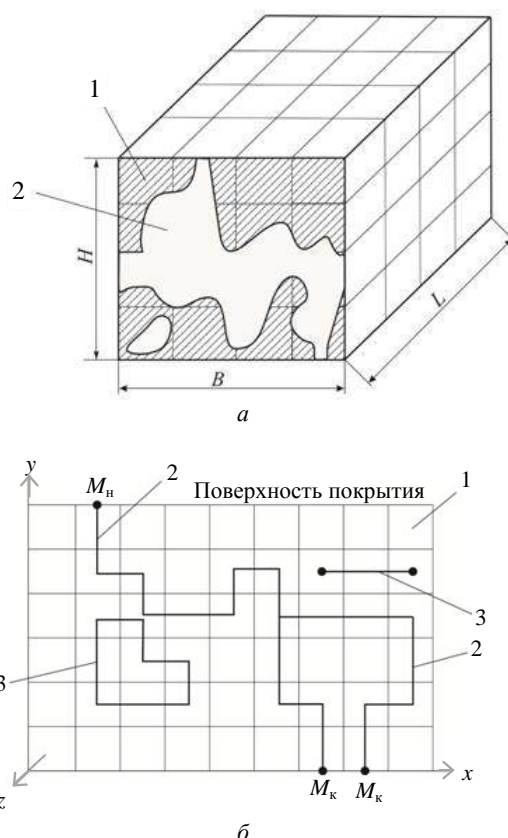


Рис. 2. Схемы моделирования пористого покрытия: а — разбиение объема пористого покрытия на кубические фигуры (1 — каркас покрытия; 2 — поры; H, B, L — высота, ширина и длина покрытия); б — схема моделирования поровых каналов на координатной сетке (1 — координатная сетка; 2, 3 — поровые каналы, выходящие и не выходящие на поверхность покрытия; M_n — начальное положение точки M ; M_k — конечное положение точки M ; M — блуждающая точка, описывающая движение жидкого вещества)

Введем понятие вероятности p_k образования порового канала между двумя смежными эквивалентными поверхностями. Эта вероятность формируется путем розыгрыша на ЭВМ.

6. Введем понятие плотности поровых каналов на поверхности покрытия, которое определяется количеством видов каналов пор на единицу поверхности покрытия:

$$k = \frac{m}{s}, \quad (7)$$

где k — плотность поровых каналов, шт/мм²;

s — поверхность покрытия, мм²;

m — количество поровых каналов на единичной поверхности покрытия по результатам моделирования.

7. Под прочностью покрытия σ_n будем понимать напряженное состояние определенных участков объема покрытия, где величина напряжения выше некоторого предельно допустимого значения $[\sigma_n]$:

$$\sigma_n > [\sigma_n]. \quad (8)$$

Если прочность σ_n меньше предельно допустимого напряжения, то в данной области покрытия возможно образование трещин. При этом происходит разделение соседних поверхностей внутреннего объема покрытия на две ровные поверхности, примыкающие одна к другой, но не связанные в единое целое. По мере увеличения длин трещин и их плотности в объеме покрытия они становятся одной из главных причин его разрушения.

Прочность пористого покрытия рассмотрим как результат действия трех видов напряжений:

$$\sigma_n = \varphi(\sigma_{\text{хим}}, \sigma_{\text{ос}}, \sigma_{\text{внеш}}), \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{хим}}$ — напряжение покрытия, обусловленное химической активностью атомов покрытия;

$\sigma_{\text{ос}}$ — остаточное напряжение;

$\sigma_{\text{внеш}}$ — напряжение, обусловленное внешними воздействиями.

Суммарный результат зависит как от величины напряжений, так и от их пространственной направленности:

$$\sigma_n = \pm \sigma_{\text{хим}} \pm \sigma_{\text{ос}} \pm \sigma_{\text{внеш}}. \quad (10)$$

По результатам компьютерного розыгрыша и экспертным оценкам определим множество напряжений дискретных ячеек:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\text{хим}}(\Psi_i) &= \sigma_{\text{хим}}^{\text{эк}} \cup \{p[0,1] \in C(\Psi_i)\} \cap \\ &\cap \{C_\gamma \Psi(\Psi_i)\} \cap \{x, y, z\}; \\ \sigma_{\text{ос}}(\Psi_i) &= \sigma_{\text{ос}}^{\text{эк}} \cup \{p[0,1] \in C(\Psi_i)\} \cap \\ &\cap \{C_\gamma \Psi(\Psi_i)\} \cap \{x, y, z\}; \\ \sigma_{\text{внеш}}(\Psi_i) &= \sigma_{\text{внеш}}^{\text{эк}} \cup \{p[0,1] \in C(\Psi_i)\} \cap \\ &\cap \{C_\gamma \Psi(\Psi_i)\} \cap \{x, y, z\}; \\ \sigma_n(\Psi_i) &= \{\sigma_{\text{хим}}(\Psi_i) + \sigma_{\text{ос}}(\Psi_i) + \\ &+ \sigma_{\text{внеш}}(\Psi_i)\}, i = (1, N), \end{aligned} \right. \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{хим}}^{\text{эк}}, \sigma_{\text{ос}}^{\text{эк}}, \sigma_{\text{внеш}}^{\text{эк}}$ — экспертные оценки, соответственно, напряжения химического взаимодействия атомов, остаточных напряжений и напряжений внешних воздействий.

Введем следующие параметры:

- счетчик события "дискретная ячейка с дефектом":

$$v = v + 1, \quad (12)$$

где $v = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma_n(\Psi_i) \geq [\sigma_n^{\text{эк}}]; \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$

$[\sigma_n^{\text{эк}}]$ — экспертная оценка прочности покрытия;

- индикатор события "образование трещины":

$$t = \begin{cases} 1, & \text{если количество последовательно} \\ & \text{расположенных дискретных ячеек} \\ & \text{с дефектом } v > a; \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (13)$$

где a — предельное число дефектных ячеек по экспертным оценкам.

- счетчик события "количество трещин":

$$t = t + 1; \quad (14)$$

- "предельное количество трещин" (определяет степень прочности покрытия):

$$t \geq [t^{\text{эк}}], \quad (15)$$

где $[t^{\text{эк}}]$ — предельное количество трещин по экспертной оценке, при котором прочность покрытия ниже допустимой.

Таким образом, если по результатам компьютерного моделирования $t \geq [t^{\text{эк}}]$, то покрытие, имеющее такую прочность, не может иметь практическое применение.

Численное моделирование предложенной методики проводили с использованием представленной математической зависимости и специально написанной компьютерной программы на языке программирования Object Pascal среды Borland Delphi 7.

Примеры экспертных оценок параметров покрытия, учитываемых в предложенной методике:

Параметры покрытия	Диапазон значений параметра
Толщина покрытия $H^{\text{ЭК}}(z)$, мкм	25—50
Длина покрытия $L^{\text{ЭК}}(x)$, мм	5—20
Ширина покрытия $B^{\text{ЭК}}(y)$, мм	5—20
Пороговый критерий α	0,6—1
Длина ребра дискретной ячейки r , мкм	1—100
Напряжение, создаваемое химическим взаимодействием, $\sigma_{\text{хим}}^{\text{ЭК}}$, МПа	$\pm(5—30)$
Остаточное напряжение $\sigma_{\text{ос}}^{\text{ЭК}}$, МПа	$\pm(5—30)$
Напряжение за счет внешних воздействий $\sigma_{\text{внеш}}^{\text{ЭК}}$, МПа	$\pm(5—30)$
Предельное напряжение покрытия $[\sigma_{\text{п}}^{\text{ЭК}}]$, МПа	8—20
Предельное количество трещин $[r^{\text{ЭК}}]$, шт	5—10
Предельное количество дефектных ячеек a , шт	5—30

Видно, что основными параметрами пористого покрытия являются толщина, длина, ширина, а также создаваемые в нем напряжения.

Экспериментальная проверка и обсуждение результатов моделирования

Для проверки предложенного метода проведены экспериментальные исследования пористости и прочности композитных покрытий. В качестве объектов исследования были выбраны образцы с композитным титан-гидроксиапатитовым покрытием. Такие покрытия находят широкое применение в технологиях изготовления медицинских имплантатов [1]. Покрытия для экспериментального исследования формировали на специальных автоматических стендах с компьютерным управлением (рис. 3).

Технология формирования покрытий включает операцию преобразования мелкодисперсных порошков в крупнодисперсные с помощью энергии лазерного луча (рис. 3, а) и последующее использование крупнодисперсных частиц порошка в процессе плазменного напыления (рис. 3, б).

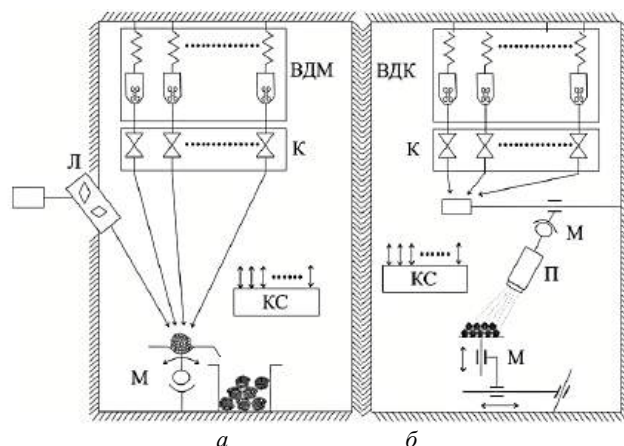


Рис. 3. Схемы автоматических стендов для формирования покрытий:

а — стенд лазерного формирования крупнодисперсных порошков из мелкодисперсных; б — стенд плазменного напыления покрытий; ВДМ и ВДК — вибродозаторы мелко- и крупнозернистого порошка; Л — лазерный источник энергии; П — плазматрон; К — клапанные устройства; КС — компьютерная система; М — автоматические манипуляторы

Качество покрытия оценивали по трем показателям: прочности, пористости покрытия и степени его заполнения жидким веществом. Оценку последнего показателя проводили на специальном автоматическом стенде (рис. 4) по формуле

$$Z = \frac{P_0}{P_z}, \% \quad (16)$$

где Z — степень заполнения пористого покрытия жидким веществом;

P_0 и P_z — массы испытуемого образца до и после заполнения.

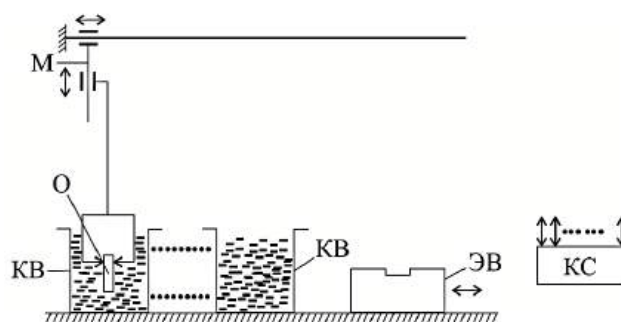


Рис. 4. Автоматизированный стенд для определения степени заполнения покрытия жидким веществом:

О — испытуемый образец; КВ — кювета с жидким веществом; ЭВ — электронные весы для взвешивания образцов; М — автоматический манипулятор для перемещения образцов; КС — компьютерная система

Прочность покрытия определяли на испытательной универсальной машине ИР 5082-100 по методу на сдвиг. Определение пористости покрытия проводили методом низкотемпературной адсорбции

азота по методу Брунауэра–Эммета–Теллера на анализаторе удельной площади поверхности NOVA 2000e. Результаты исследования опытных образцов покрытий, полученных по технологии с применением и без применения методики экспертно-статистического моделирования, представлены в таблице.

Показатели качества титан-гидроксипатитовых покрытий, полученных по технологии с применением методики экспертно-статистического моделирования и без применения методики

Метод формирования покрытий	Показатели качества		
	Прочность, МПа	Пористость, %	Степень заполнения покрытий жидкими веществами
С применением методики экспертно-статистического моделирования	15—20	30—40	0,1—0,8
Без применения методики	8—16	10—25	0,01—0,08

По результатам испытаний оптимальными по показателям прочности, пористости и степени заполнения покрытий жидкими веществами являются покрытия, полученные по технологии с применением метода экспертно-статистического моделирования.

Разработанный экспертно-статистический метод математического моделирования прочности и пористости композитных покрытий позволит сократить время на формирование пористых покрытий плазменным напылением, повысить качество покрытий за счет достижения оптимальных параметров пористости (30—40 %) и высоких адгезионных показателей (15—20 МПа).

Разработанный метод может найти широкое применение в технологических процессах нанесения покрытий, а также в технологии введения жидких веществ в пористые покрытия.

Выводы

Разработана модель прочности и пористости композитных покрытий, необходимая для компьютерного моделирования. Пористость покрытия представлена как модель состояния эквивалентных поверхностей дискретных ячеек, благодаря чему удается смоделировать не только крупные поры (40—150 мкм), но и поры размером менее 2 мкм. Модель прочности учитывает напряжения покрытия, обусловленные химической активностью атомов покрытия, остаточные напряжения и напряжения, обусловленные внешними воздействиями. На основании предложенной модели сформулированы экспертные оценки прочности покрытий.

Разработана модель, описывающая характеристики пористых покрытий, предназначенных для хранения жидких веществ в объеме покрытия, с использованием принципа работы гидравлической системы. Представленная модель учитывает движение жидкости по поровым каналам, которые представлены в виде координатной сетки. Благодаря этому дальнейшее моделирование реализовано с использованием компьютерной техники. Полученная модель позволяет оценить скорость введения и вывода жидкого вещества из пористого композитного покрытия.

Экспериментально установлено существенное повышение качества покрытий, сформированных с применением методики экспертно-статистического моделирования. Так, пористость такого покрытия составляет 30—40 %, а его прочность равна 15—20 МПа, что является оптимальными показателями для плазменных композитных покрытий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендий Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-63.2019.4 и СП-5048.2018.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметгареева А. М., Ильинкова Т. А., Балдаев С. Л., Мазилин И. В., Жуков А. О. Модифицирование поверхности керамических теплозащитных покрытий на основе оксида циркония методом пропитки // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 5 (206). С. 15—19.
2. Esteban J., Moxon T. E., Simons T. H., Bakalis S., Fryer P. J. Understanding and Modeling the Liquid Uptake in Porous Compacted Powder Preparations // Langmuir. 2017. V. 33 (28). P. 7015—7027.
3. Ctibor P., Bohac P., Stranyanek M., Ctvtlik R. Structure and mechanical properties of plasma sprayed coatings of titania and alumina // J. European Ceramic Society. 2006. V. 26. Iss. 16. P. 3509—3514.
4. Girolamo Di G., Brentari A., Blasi C., Serra E. Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed alumina-based coatings // Ceramics International. 2014. V. 40. Iss. 8. Part B. P. 12861—12867.
5. Shamray V. F., Sirotinkin V. P., Smirnov I. V., Kalita V. I., Fedotov A. Yu., Barinov S. M., Komlev V. S. Structure of the hydroxyapatite plasma-sprayed coatings deposited on pre-heated titanium substrates // Ceramics International. 2017. V. 43. Iss. 12. P. 9105—9109.
6. Candidato Jr. R. T., Sokolowski P., Pawlowski L., Lecomte-Nana G., Constantinescu C., Denoirjean A. Development of hydroxyapatite coatings by solution precursor plasma spray process and their microstructural characterization // Surface and Coatings Technology. 2017. V. 318. P. 39—49.
7. Zheng B., Luo Y., Liao H., Zhang C. Investigation of the crystallinity of suspension plasma sprayed hydroxyapatite coatings // J. European Ceramic Society. 2017. V. 37. Iss. 15. P. 5017—5021.
8. Qin Y., He J., Yin F., Zhang F., Liu B. Influence of initial Ti particle size on microstructure and fracture toughness of reactive plasma sprayed TiCN coatings // Surface and Coatings Technology. 2017. V. 325. № 25. P. 482—489.

9. Behera A., Mishra S. C., Dhal J. P. Porosity Analysis of Plasma Sprayed Coating by Application of Soft Computing // J. Materials. 2013. V. 2013. P. 1—6.
10. Ding X., Ebin J. P., Harris A. L. T., Li Z., Fuller T. F. Analytical models for predicting penetration depth during slot die coating onto porous media // American Institute of Chemical Engineers Journals. 2014. V. 60. P. 4241—4252.
11. Ginty S. M., King D., Pontrelli G. Mathematical modeling of variable porosity coatings for controlled drug release // Medical Engineering & Physics. 2017. V. 45. P. 51—60.
12. McGinty S. A decade of modelling drug release from arterial stents // Math Biosci. 2014. V. 257. P. 80—90.
13. Tan S. P., Piri M. Equation-of-state modeling of confined-fluid phase equilibria in Nanopores // Fluid Phase Equilibria. 2015. V. 393. P. 48—63.
14. Казаринов В. Е. Кинетика сложных электрохимических реакций. — М.: Наука, 1981. — 312 с.
15. Аврамчук Е. Ф., Вавилов А. А., Емельянов С. В. и др. Технология системного моделирования. — М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988. — 520 с.

Development of expert-statistical method of numerical modeling of strength and porosity of composite coatings

V. M. TARAN, O. A. MARKELOVA, I. P. GRISHINA
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

The main characteristics of porous coatings intended for storing liquid substances in the coating volume are given, modeled using the principle of the hydraulic system. A technique has been developed for modeling the strength and porosity of a plasma coating. The geometric structure of the coating is presented in the form of discrete cells, which are expressed in the form of graph models based on the concept of a set. It has been experimentally established to improve the quality of plasma-sprayed coatings through the application of the developed method of expert-statistical modeling.

Keywords: expert-statistical method, mathematical modeling, plasma coatings, porous structures.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 666.3:549.517.1.001.5

Влияние содержания добавки эвтектического состава на уплотнение и свойства композиционной керамики на основе электроплавленного корунда

АУНГ ЧЖО МО; Е. С. ЛУКИН, д-р техн. наук; Н. А. ПОПОВА, канд. техн. наук
Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

Представлены результаты исследования уплотнения и фазообразования порошка добавки эвтектического состава в системе Al_2O_3 – MgO – SiO_2 в заготовках на основе электроплавленного корунда (ЭПК) при различных температурах спекания. Показано, что спекание в воздушной среде при 1550 °С заготовок из гомогенной смеси ЭПК марки F-1000–эвтектическая добавка $0,17Al_2O_3$ – $0,21MgO$ – $0,62SiO_2$ в мольном соотношении обеспечивает формирование плотного материала, содержащего максимальное количество (15 масс. %) эвтектической добавки. Консолидированный материал состоит из ЭПК ламеллярной структуры и субкристаллических зерен кордиерита, протоэнстатита и кристобаллита. Плотность керамики достигает 3,56 г/см³ при открытой пористости 0,12 %. Прочность ее при изгибе составляет 330 МПа.

Ключевые слова: электроплавленный корунд, эвтектическая добавка, спекание, фазообразование, структура, прочность при изгибе.

Композиционные материалы на основе керамической матрицы, сочетающие два или более компонента для улучшения термомеханических свойств (прочность, твердость, трещиностойкость и т. д.), находят широкое применение в области высоких технологий. Их рассматривают в качестве наиболее приемлемой альтернативы износостойким металлическим сплавам и покрытиям.

Одним из перспективных функциональных материалов для изготовления деталей и изделий, подвергаемых интенсивному износу в процессе эксплуатации, является корунд, имеющий слоистое строение и вследствие этого обладающий необычными полезными свойствами. Корунд имеет высокие значения теплопроводности, модуля Юнга и твердости, относительно низкую плотность (~4,0 г/см³) и высокую температуру плавления (~2050 °С). Он стоек к термоудару и высоким температурам [1]. Важнейшим обстоятельством в производстве плотной корундовой керамики является

использование эвтектических добавок для получения высокого уровня свойств композитных керамических материалов. Введение добавок эвтектических составов в двойных и тройных оксидных системах обеспечивает получение высокоплотной композиционной корундовой керамики [2].

Тройная оксидная система Al_2O_3 – MgO – SiO_2 играет важную роль в технологии получения различных огнеупоров, специальных керамических изделий и стеклокристаллических материалов [3]. Список керамических материалов, найденных в этой системе, включает магнезиальные огнеупоры, форстеритовую керамику, специальные синтетические соединения с малыми диэлектрическими потерями и кордиеритовую керамику. При любых соотношениях оксидов в данной системе первичным продуктом реакции является магнезиальная шпинель ($MgAl_2O_4$), взаимодействие которой с кремнеземом приводит к образованию сапфирина или кордиерита в зависимости от состава исходной смеси. Поэтому в системе существуют четыре бинарных соединения, а также два тройных соединения: кордиерит ($2MgO$ – $2Al_2O_3$ – $5SiO_2$) и сапфирин ($4MgO$ – $5Al_2O_3$ – $2SiO_2$) [4]. Ценными техническими свойствами кордиеритовой керамики являются весьма низкий коэффициент термического расширения и хорошая термостойкость. Такую керамику используют не только для чистых кордиеритовых изделий, но и в качестве добавок для спекания керамических материалов, особенно на основе корунда [5].

Аунг Чжо Мо, аспирант кафедры "Химическая технология керамики и огнеупоров".

E-mail: autumnghos14@gmail.com

Лукин Евгений Степанович, профессор кафедры "Химическая технология керамики и огнеупоров".

E-mail: lukin.1938@mail.ru

Попова Нелли Александровна, старший преподаватель кафедры "Химическая технология керамики и огнеупоров".

E-mail: nik-bakuga@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2020 г.

© Аунг Чжо Мо, Лукин Е. С., Попова Н. А., 2020

Цель работы — изучение процессов уплотнения, фазообразования и упрочнения заготовок из гомогенной смеси состава электроплавенный корунд–эвтектическая добавка в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--SiO}_2$ при спекании в воздушной среде.

Исходные материалы и методики

Для получения композиционных материалов на основе ЭПК использовали порошок белого электрокорунда марки F-1000 фракции < 14,95 мкм. Исходными материалами порошка добавки служили соли углекислого магния, гидроксид алюминия и диоксид кремния аморфный квалификации хч. Компоненты с учетом потерь при прокаливании смешивали в планетарной мельнице мокрым способом в течение 40 мин в соответствии с составом эвтектики в соотношении: 17,49 масс. % Al_2O_3 ; 20,6 масс. % MgO; 61,91 масс. % SiO_2 . Для исключения загрязнения материала при размоле использовали оснастку, изготовленную из тефлона. Синтез добавки осуществляли в силитовой печи с температурой обработки 1200 °С и временем выдержки 2 ч. Гомогенизацию композитной шихты ЭПК–эвтектическая добавка проводили в планетарной мельнице фирмы "Санд" (Армения) при частоте вращения барабана от 120 об/мин в течение 1 ч в корундовых барабанах. Соотношение масс мелющих тел и обрабатываемого материала составляло 3,5/1,0. Концентрацию добавки варьировали от 1 до 15 масс. %. Образцы заготовок в виде дисков ($\varnothing = 20$ мм, $h = 4$ мм) и штабиков (4×6×40 мм) формовали полусухим прессованием при давлении 100 МПа. Спекание заготовок проводили в печи с хромит-лантановыми нагревателями в воздушной среде. Температуру варьировали в пределах 1450—1550 °С, изотермическая выдержка составляла 120 мин. Средняя скорость нагрева 3 °С/мин.

Плотность и пористость консолидированных образцов определяли гидростатическим взвешиванием по стандартной методике [6]. Рентгенофазовый анализ синтезированного порошка добавки и полученных на их основе материалов проводили на дифрактометре XRD-6000 (фирма "Shimadzu", Япония) в λ -Co-излучении. Содержание фаз рассчитывали при помощи ПО "PowderCell". Микроструктуру материалов исследовали на сканирующем электронном микроскопе "VEGA 3 Tescan" (Чехия) в режимах вторичных электронов. Прочность при трехточечном изгибе определяли по стандартной методике [7].

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены распределение частиц порошка по размеру и структура исходного порошка

белого электрокорунда марки F-1000. Видно, что исходный материал представляет собой полидисперсную смесь частиц (монокристаллов) размером $d = 6\text{--}12$ мкм и микрочастиц размером $d < 3$ мкм.

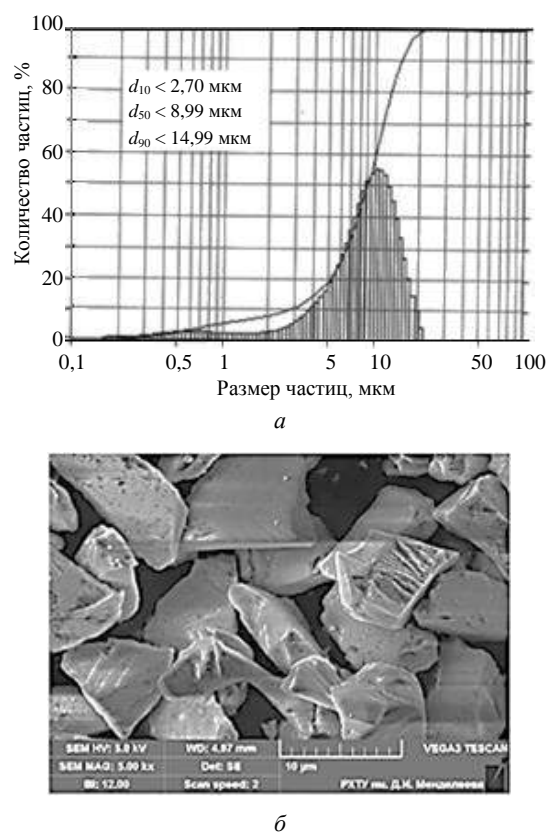
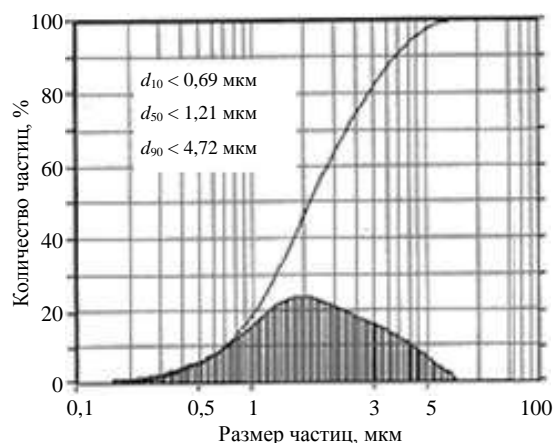


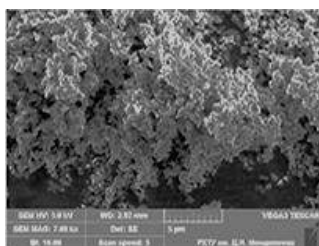
Рис. 1. Распределение частиц по размерам (а) и микроструктура электрокорунда марки F-1000, полученная с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) (б) (d_{10} , d_{50} , d_{90} — диаметры частиц при определенном их количестве в %)

Для исследования спекания заготовок композиционной керамики на основе ЭПК использовали гомогенизированную в планетарной мельнице смесь порошков ЭПК и эвтектической добавки в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--SiO}_2$ в количестве 1,0; 3,0; 5,0 и 7,0 масс. %. Гомогенизация в планетарной мельнице позволяет, во-первых, равномерно перемешать исходные компоненты, во-вторых, повысить их реакционную способность. Относительная плотность образцов заготовок после прессования составила > 55 %.

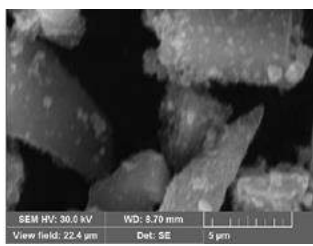
На рис. 2 приведены распределение субмикронных частиц порошка добавки по размеру (рис. 2, а), структура порошка эвтектической добавки (рис. 2, б) и композитная шихта после смешения — гомогенизации в планетарной мельнице (рис. 2, в, г). Видно, что порошок добавки представляет собой полидисперсную смесь субмикронных частиц размером $d = 0,58\text{--}0,69$ мкм и агрегатов размером 1—4 мкм, состоящих из частиц с $d < 300$ нм.



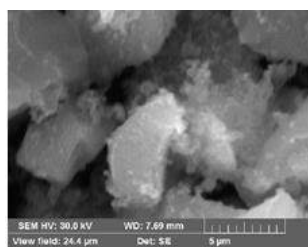
а



б



в



г

Рис. 2. Распределение частиц по размерам эвтектической добавки (а); микроструктура порошка (РЭМ) эвтектической добавки после синтеза (б); микроструктура (РЭМ) композитной шихты с 1,0 и 7,0 масс. % добавки (в, г)

После гомогенизации композитной шихты зерна электроплавленного корунда равномерно плакированы субмикронными частицами добавки. Удельная поверхность шихты после гомогенизации составляет $\sim 4 \text{ м}^2/\text{г}$.

На рис. 3 представлена рентгенограмма порошка добавки после синтеза при температуре 1200°C . Согласно рентгенофазовому анализу фазовый состав эвтектической добавки: кордиерит ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$), кварц (SiO_2) и протоэнстатит (MgSiO_3).

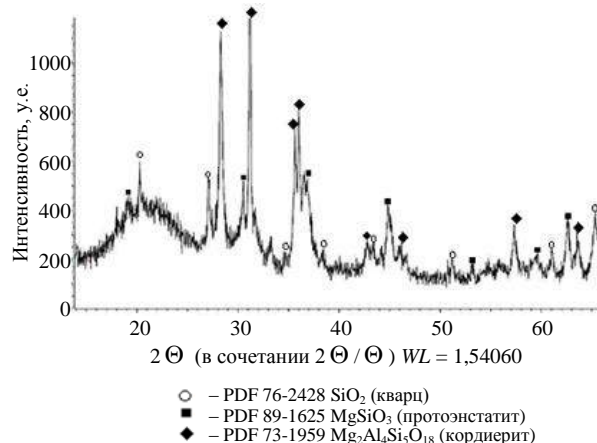


Рис. 3. Рентгенограмма порошка эвтектического состава в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--SiO}_2$

Результаты спекания заготовок композитного материала на основе ЭПК с эвтектической добавкой в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--SiO}_2$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы спекания и свойства спеченных образцов материала системы электроплавленный корунд– $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--SiO}_2$

Температура обжига, $^\circ\text{C}$	Содержание добавки, %	Плотность до обжига, $\text{г}/\text{см}^3$	Линейная усадка $\Delta l/l$, %	Плотность после обжига, $\text{г}/\text{см}^3$	Пористость, %	Прочность при изгибе, МПа
1450	0	2,28	1	2,43	37,83	19
	1	2,29	2	2,62	32,1	39
	3	2,33	2	2,65	31,9	53
	5	2,33	2	2,66	31,0	57
	7	2,33	2	2,67	30,9	58
1500	0	2,22	1,5	2,46	36,6	23
	1	2,25	5,2	2,77	28,4	67
	3	2,28	6,3	2,92	23,6	97
	5	2,29	7	2,97	21,0	131
	7	2,29	7,6	3,01	19,9	142
1550	0	2,29	1,8	2,49	35,8	42
	1	2,19	7,3	3,01	22,0	85
	3	2,25	10	3,21	15,2	148
	5	2,30	11	3,32	10,1	181
	7	2,31	13,2	3,56	1,5	227

Как видно из табл. 1, пористость образцов снижается при повышении как температуры, так и количества эвтектической добавки. Однако при температуре спекания 1450 °С пористость практически не снижается. Некоторое увеличение плотности обусловлено изменением фазового состава: увеличивается содержание кордиерита, имеющего большую плотность. При повышении температуры до 1550 °С плотность материала интенсивно увеличивается. При температуре 1550 °С и концентрации эвтектической добавки 7 % получен материал, обладающий минимальной открытой пористостью (~ 1,5 %).

Для уточнения влияния добавки на уплотнение и упрочнение были изготовлены образцы заготовок, содержащих 10 и 15 масс. % эвтектической добавки. Образцы были обожжены при 1550 °С с изотермической выдержкой 2 ч. Результаты спекания приведены в табл. 2.

Микроструктура образцов, спеченных при 1550 °С и концентрации добавки 1, 7 и 15 масс. %, представлена на рис. 4. Образцы содержат два основных структурных элемента: зерна ЭПК с размерами от 6 до 12 мкм и субмикронные включения закристаллизованной эвтектики с размерами от 0,5 до 1,0 мкм. Микроструктура имеет ламеллярное строение, эвтектическая добавка упорядоченно

распределена вокруг зерен ЭПК и стягивает их в плотный каркас.

Можно полагать, что процесс спекания происходит за счет перемещения зерен ЭПК под действием сил поверхностного натяжения расплава до их максимально плотной упаковки, а при введении 10 и 15 масс. % эвтектической добавки расплав заполняет оставшиеся открытые поры, что уменьшает пористость практически до нуля. Прочность при изгибе материала составляет 330 МПа, что свидетельствует о высокой степени связи закристаллизованных фаз с поверхностью зерен ЭПК. Можно полагать, что при обжиге образцов при 1550 °С с увеличением количества добавки постепенно увеличивается количество образующегося расплава. Ввиду большого количества SiO₂ в составе добавки вязкость расплава постепенно уменьшается с увеличением температуры спекания и количества расплава, о чем свидетельствуют постепенное увеличение усадки и уменьшение пористости.

Использование различных режимов спекания показало (см. таблицы), что для достижения наилучших механических свойств требуются температура спекания 1550 °С и 15 масс. % эвтектической добавки. Материал, изготовленный по этому режиму, имеет минимальную открытую пористость (0,12 %) и прочность при изгибе 330 МПа.

Таблица 2

Свойства спеченных образцов материала системы электроплавленный корунд–Al₂O₃–MgO–SiO₂

Температура обжига, °С	Содержание добавки, %	Плотность до обжига, г/см ³	Линейная усадка Δl/l, %	Плотность после обжига, г/см ³	Пористость, %	Прочность при изгибе, МПа
1550	10	2,13	13,3	3,45	0,45	291
	15	2,13	13,6	3,56	0,12	328

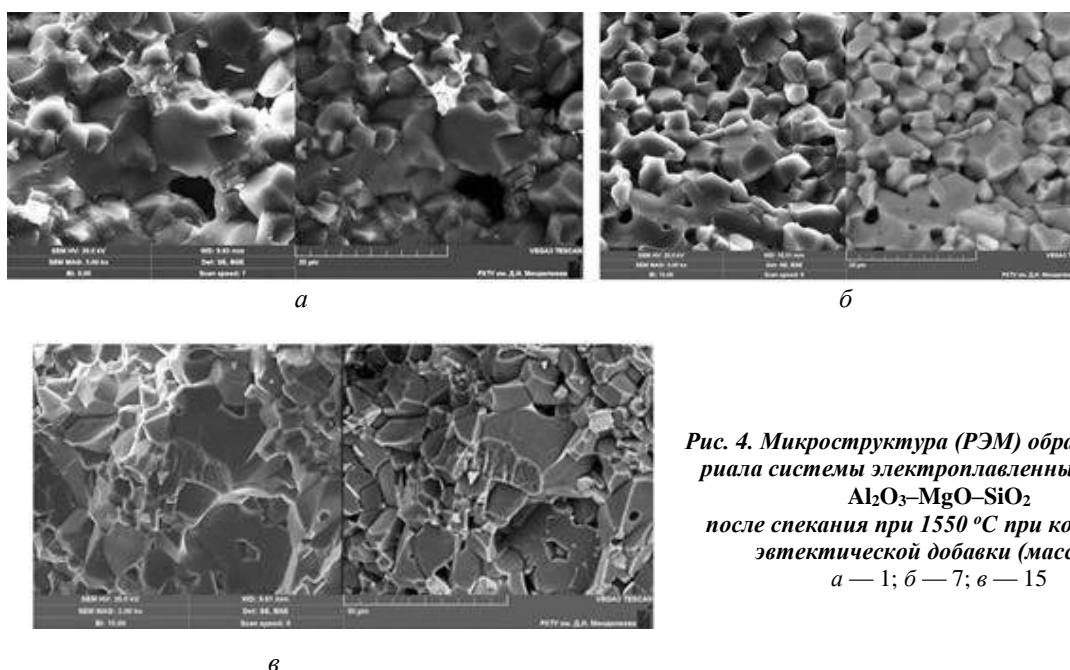


Рис. 4. Микроструктура (РЭМ) образцов материала системы электроплавленный корунд–Al₂O₃–MgO–SiO₂ после спекания при 1550 °С при количестве эвтектической добавки (масс. %): а — 1; б — 7; в — 15

Заклучение

Исследованы процесс спекания заготовок композитной керамики на основе электроплавленного корунда и эвтектической добавки в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--SiO}_2$ и свойства получаемых материалов. С использованием разработанного процесса получены композитные материалы на основе электроплавленного корунда.

Установлено, что при содержании эвтектической добавки в количестве 15 масс. % спекание порошка электроплавленного корунда осуществляется более успешно при прочих равных условиях, получаемые образцы отличаются более низкой пористостью и более высокими значениями прочности при изгибе. Микроструктура керамики имеет ламеллярное строение, вокруг зерен электроплавленного корунда локализованы субмикронные равноосные включения закристаллизованной эвтектической добавки, образующие непрерывный каркас из кордиерита, протоэнстатита и кристобаллита.

Закристаллизованные фазы существенно влияют на упрочнение образцов керамики: прочность достигает значения 330 МПа. Композиционная керамика на основе электроплавленного корунда с эвтектической добавкой получена впервые и

может быть использована в различных областях техники наряду с корундовой керамикой, изготовленной из глинозема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В. Я., Баринов С. М. Техническая керамика. — М.: Наука, 1993. — 287 с.
2. Лукин Е. С., Макаров Н. А., Попова Н. А., Тарасова С. В., Доданова И. В., Бадина Е. А. Новые виды корундовой керамики с добавками эвтектических составов // Конструкции из композиционных материалов. 2001. № 3. С. 28—38.
3. Лукин Е. С., Ануфриева Е. В., Макаров Н. А., Попова Н. А., Бакунов В. С., Нагаюк И. И. Оксид алюминия и керамика на его основе — материалы XXI века // Новые огнеупоры. 2008. № 3. С. 155—160.
4. Торопов Н. А., Барзаковский В. П., Лапин В. В., Курцева Н. Н., Байкова А. И. Диаграмма состояния силикатных систем. Справочник. Вып. 3. Тройные системы. — Л.: Наука, 1972. С. 172—183.
5. Лукин Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Ч. 4. Технологические методы получения высокодисперсных порошков оксидов для многокомпонентной оксидной керамики // Огнеупоры и техническая керамика. 1996. № 9. С. 2—20.
6. ГОСТ 2409–95 Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения.
7. Лемешев Д. О., Макаров Н. А. Методы исследования тугоплавких неметаллических и силикатных материалов: учеб. пособие. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2013. — 120 с.

Influence of content of additive of eutectic composition on compaction and properties of composite ceramics based on electrofused corundum

AUNG ZHU MO, E. S. LUKIN, N. A. POPOVA

Russian Chemical-Technological University D. I. Mendeleev, Moscow, Russia

The results of the study of compaction and phase formation of a powder of an eutectic composition additive in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--SiO}_2$ system in billets based on electrofused corundum at various sintering temperatures are presented. It was shown that sintering in air of preforms from a homogeneous mixture of F-1000 electrofused corundum and a $0.17\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}0.21\text{MgO--}0.62\text{SiO}_2$ eutectic additive in a molar ratio at 1550 °C ensures the formation of a dense material containing maximum amount of eutectic additive of 15 wt. %. The consolidated material consists of the lamellar structure of electrofused corundum and subcrystalline grains of cordierite, protoenstatite and cristoballite. The ceramic density reaches 3.56 g/cm³ with an open porosity of 0.12 %, and its flexural strength is 330 MPa.

Keywords: electrofused corundum, eutectic additive, sintering, phase formation, structure, bending strength.

УДК 538.956

Фазовый состав и диэлектрические характеристики тройной системы твердых растворов на основе феррита висмута

Н. А. БОЛДЫРЕВ, канд. физ.-мат. наук; Л. А. ШИЛКИНА;

Л. А. РЕЗНИЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия

А. В. ПАВЛЕНКО, д-р физ.-мат. наук

Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Россия

Методом твердофазных реакций с последующим спеканием по обычной керамической технологии получена керамика семи квазибинарных разрезов тройной системы $(1-x-y)\text{BiFeO}_3-x\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,325$; $0,05 \leq y \leq 0,325$). С помощью рентгенофазного анализа построена фазовая диаграмма системы, которая содержит области тетрагональной и ромбоэдрической симметрии и морфотропную область между ними. Установлены закономерности формирования диэлектрических характеристик исследуемых объектов. Выявлено, что композиции $0,65\text{BiFeO}_3-0,1\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-0,25\text{PbTiO}_3$ и $0,625\text{BiFeO}_3-0,1\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-0,275\text{PbTiO}_3$ демонстрируют поведение, характерное для сегнетоэлектриков-релаксоров, проявившееся в размытии фазового перехода из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу в интервале температур 600–800 К.

Ключевые слова: композиционные материалы, мультиферроики, твердые растворы, диэлектрические характеристики, фазовый состав.

Мультиферроики — это материалы, в которых сосуществуют электрическое и магнитное упорядочения в широком диапазоне температур. Они являются одними из наиболее интенсивно исследуемых в физическом материаловедении [1], что обусловлено в первую очередь широким спектром их возможных применений, включающим:

- датчики переменного и постоянного магнитных полей (используемые в системах навигации, электродвигателях и по точности значительно превосходящие аналоги на основе эффекта Холла или магнетосопротивления [2]);
- элементы памяти (MRAM, Magnetoresistive Random Access Memory) [3];
- устройства спинтроники (в том числе спинтронные системы искусственного интеллекта — нейронные сети, узлами которых являются спинтронные компоненты [4]) и т.д.

К числу таких материалов прежде всего относится феррит висмута BiFeO_3 (BFO), который, в

частности, выступает в роли базового компонента мультиферроидных структур [5–7]. Особенность BFO заключается в том, что в объемных образцах спины ионов железа Fe^{3+} выстраиваются в виде пространственной циклоиды, которую можно разрушить либо сильными внешними воздействиями (магнитным полем или механическими напряжениями), либо путем химического модифицирования (чаще редкоземельные элементы — РЗЭ) [8–10], либо путем конструирования n -компонентных систем твердых растворов (ТР) [11–13].

Твердые растворы различных бинарных систем на основе BFO довольно хорошо изучены [14–18]. Значительно менее исследованы более сложные многоэлементные композиции с участием BiFeO_3 . В связи с этим объектом исследований авторов стала тройная система $(1-x-y)\text{BiFeO}_3-x\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3$, в которой титанат свинца PbTiO_3 — высокотемпературный сегнетоэлектрик, являющийся основным компонентом ряда промышленно используемых сегнетоэлектрических материалов, а феррониобат свинца $\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3$ (PFN) — мультиферроик, сочетающий в широком диапазоне температур сегнетоэлектрические и магнитные свойства. Это и определило выбор данных соединений в качестве компонентов ТР. Создание многокомпонентных ТР, как правило, усложняет фазовый состав объекта и усиливает кристаллохимический беспорядок в исследуемой керамике, что зачастую приводит к появлению релаксорных свойств и усилению роли процессов, связанных с максвелл—вагнеровской

Болдырев Никита Анатольевич, научный сотрудник.

E-mail: nboldyrev@sfedu.ru

Шилкина Лидия Александровна, старший научный сотрудник.

E-mail: lid-shilkina@yandex.ru

Резниченко Лариса Андреевна, заведующая отделом интеллектуальных материалов и нанотехнологий.

E-mail: ilich001@yandex.ru

Павленко Анатолий Владимирович, научный сотрудник.

E-mail: tolik_260686@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 октября 2019 г.

© Болдырев Н. А., Шилкина Л. А., Резниченко Л. А., Павленко А. В., 2020

(межфазной) поляризацией и диэлектрической релаксацией.

Объекты и методы их получения

Тройную систему $(1-x-y)\text{BiFeO}_3-x\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3$ исследовали при помощи семи исследовательских разрезов: I ($x = 0,175-0,325$; $\Delta x = 0,025$; $y = 0,05$); II ($x = 0,125-0,275$; $\Delta x = 0,025$; $y = 0,1$); III ($x = 0,075-0,225$; $\Delta x = 0,025$; $y = 0,15$); IV ($x = 0,05$; $y = 0,175-0,325$; $\Delta y = 0,025$); V ($x = 0,1$; $y = 0,125-0,275$; $\Delta y = 0,025$); VI ($x = 0,15$; $y = 0,075-0,225$; $\Delta y = 0,025$); VII ($x = 0,1125-0,1875$; $\Delta x = 0,0125$; $y = 0,1125-0,1875$; $\Delta y = 0,0125$). Образцы получали путем двукратного твердофазного синтеза при $T_1 = 1093-1173$ К ($\tau_1 = 10$ ч), $T_2 = 1143-1223$ К ($\tau_2 = 10$ ч) с последующим спеканием при температуре $T_{\text{сп}} = 1273-1353$ К ($\tau_{\text{спек}} = 2$ ч) в зависимости от состава. Исходными реагентами служили Bi_2O_3 , Fe_2O_3 , PbO , TiO_2 , Nb_2O_5 с содержанием основного вещества не менее 99,95 %. Образцы спекали в виде дисков $\varnothing = 10$ мм и $h = 1$ мм. После механической обработки на плоские поверхности дисков наносили электроды ступенчатым вжиганием серебряносодержащей пасты: при 473 К в течение 20 мин, при 773 К в течение 30 мин и при 1073 К в течение 20 мин.

Методы исследования образцов

Рентгенографические исследования проводили с использованием дифрактометра ДРОН-3 (фокусировка по Брэггу—Брентано, отфильтрованное $\text{CoK}\alpha$ -излучение). Параметры перовскитовой ромбоэдрической ячейки $a = b = c$ и α рассчитывали с использованием квадратичной формы, упрощенной с учетом малого отклонения перовскитовой ячейки от кубической [19]:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{N}} \left(1 + \frac{hk + kl + lh}{N} \cos \alpha \right), \quad (1)$$

где h, k, l — индексы дифракции, $N = h^2 + k^2 + l^2$.

Погрешности измерений структурных параметров составили: $\Delta a = \pm(0,002-0,004)$ Å, $\Delta \alpha = \pm 0,05^\circ$; $\Delta V = \pm 0,1$ Å³.

Исследования зеренной структуры (микроструктуры) поверхностей и сколов образцов спеченной керамики осуществляли на электронном сканирующем микроскопе Hitachi TM-1000 (Япония). Температурную зависимость относительной комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon^*/\varepsilon_0 = \varepsilon'/\varepsilon_0 - i\varepsilon''/\varepsilon_0$ (где $\varepsilon'/\varepsilon_0$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0$ — действительная и мнимая части $\varepsilon^*/\varepsilon_0$ соответственно; ε_0 — электрическая постоянная) при $T = 300-900$ К в

диапазоне частот $f = 10^2-10^6$ Гц получали с помощью анализатора импеданса Agilent 4980A.

Экспериментальные результаты, обсуждение

Полученные данные позволили построить фазовую диаграмму исследуемой системы в области, богатой BFO. На рис. 1 показана построенная при помощи данных из работ [20—24] фазовая диаграмма системы BFO—PFN—PT.

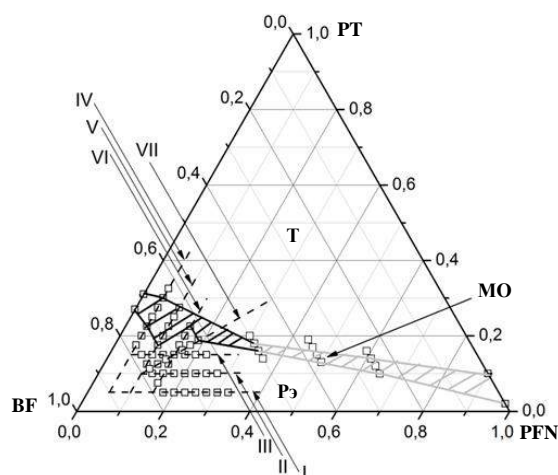


Рис. 1. Фазовая диаграмма тройной системы $(1-x-y)\text{BiFeO}_3-x\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3$ (BFO—PFN—PT) с исследованными разрезами (черной штриховкой обозначена МО, определенная в данной работе; серой — в работах [20—24])

Установлено, что в разрезах I, II и III преобладает ромбоэдрическая (Рэ) фаза, в остальных фазах наблюдается морфотропный фазовый переход из Рэ в тетрагональную (Т) фазу, который полностью происходит только в IV разрезе.

Видно, что при концентрациях $x + y \geq 0,5$ в исследуемой тройной системе наблюдается обширная морфотропная область (МО), расширяющаяся по мере увеличения концентрации BFO. Разрез V практически полностью расположен в МО.

На рис. 2 представлены результаты рентгенографического исследования образцов данного разреза. Следы Т-фазы наблюдаются уже при $y = 0,15$, но в структурированном виде она появляется лишь в ТР с $y = 0,20$. Полностью фазовый переход в Т-фазу в данном разрезе не происходит, вплоть до $y = 0,2725$ сохраняется МО. Таким образом, увеличение концентрации Nb^{5+} расширяет МО и сдвигает ее в сторону меньшей концентрации титана. Фазовая диаграмма имеет следующий вид: Рэ-фаза существует в интервале $0,125 \leq y \leq 0,275$; МО (Рэ + Т) — в интервале $0,125 < y \leq 0,275$. Из рис. 2 видно, что в Рэ-фазе кривые $V_{\text{ЭК}}(y)$ и $V_{\text{теор}}(y)$ в целом соответствуют друг другу, т. е. замещение катионов соответствует химической формуле ТР. Уменьшение $V_{\text{ЭК}}$ при $y = 0,225$ вызва-

но выделением структурированной Т-фазы, в которой содержание свинца больше, чем в Рэ-фазе.

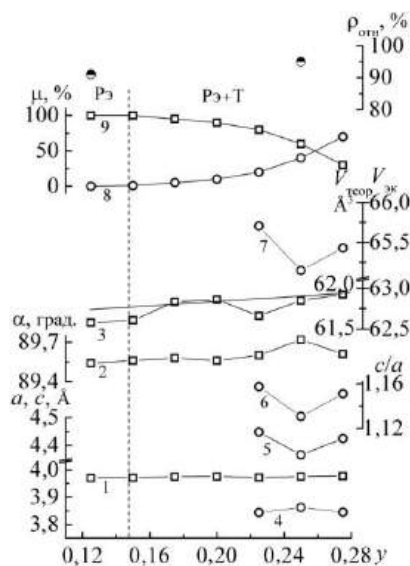


Рис. 2. Концентрационная зависимость параметров ячейки: ромбоэдрической (a — 1, α — 2, V_k — 3); тетрагональной (a — 4, c — 5, c/a — 6, V_k — 7, $V_{теор}$ — прямая линия); относительного количества фаз Т (8) и Рэ (9); относительной плотности исследуемой керамики

На рис. 3 представлена температурная зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь для керамик ТР исследуемого разреза, который практически полностью расположен в МО. Анализ показал, что во всех составах при температуре выше 500 К начинается резкий рост величины $\tan \delta$, обусловленный повышением проводимости керамики. В то же время в высокотемпературной области с ростом y наблюдается небольшое снижение величины тангенса угла потерь, обусловленное уменьшением в структуре исследуемой керамики количества ионов Fe^{2+} , ответственных за высокую проводимость. На зависимости ϵ'/ϵ_0 от T в составе с $y = 0,125$ в районе ~ 825 К формируется сильно размытый максимум, однако при $y > 0,125$ степень размытия уменьшается, а значение $(\epsilon'/\epsilon_0)_{max}$ (величина ϵ'/ϵ_0 в точке максимума) возрастает почти вдвое. Дальнейший рост y вновь приводит к постепенному размытию максимумов и проявлению в ТР с $y = 0,225, 0,25$ и $0,275$ закономерностей изменения зависимости ϵ'/ϵ_0 от T и $\tan \delta$ от T , что позволяет отнести их к сегнетоэлектрикам-релаксорам.

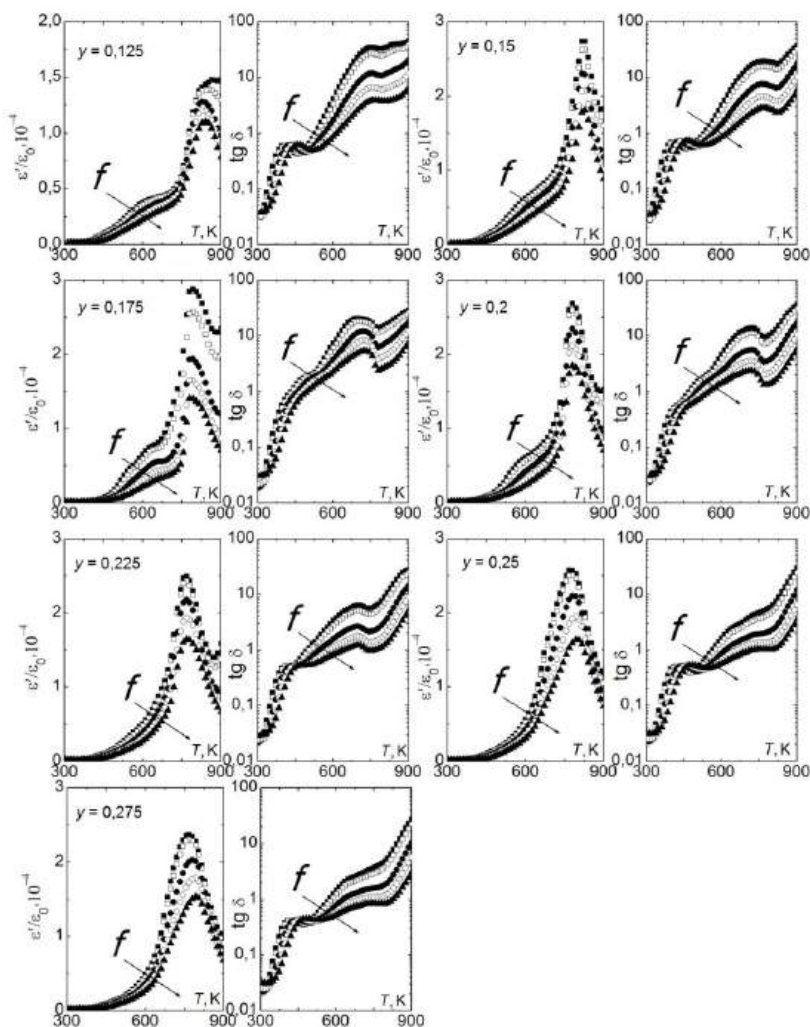


Рис. 3. Температурная зависимость ϵ'/ϵ_0 и $\tan \delta$ в интервале температур 300—900 К и частот $75\text{—}10^3$ кГц (стрелкой указано направление роста частоты f ; для четкости использованы темные и светлые значки)

При аппроксимации зависимости $T_{\max}(f)$ для образцов с $y = 0,25$ и $0,275$ наилучшие результаты достигнуты в случае использования соотношения Фогеля—Фулчера (рис. 4):

$$f = f_0 \exp \frac{E_{\text{ак}}}{k(T_{\max} - T_F)}, \quad (2)$$

где $E_{\text{ак}}$ — энергия активации;

f_0 — частота попыток преодоления потенциального барьера;

T_F — температура Фогеля—Фулчера, интерпретируемая как температура "статического замораживания" электрических диполей, или перехода в состояние дипольного стекла;

k — постоянная Больцмана.

Рассчитанные значения $E_{\text{ак}}$ и f_0 близки к наблюдаемым в СЭ-релаксорах, а величина T_F позволяет связать выявленные ранее аномалии на зависимости $\varepsilon'/\varepsilon_0$ от T в этой области температур с переходом составов с $y = 0,25$ и $0,275$ из релаксорного (нанополярного) состояния в макродоменное.

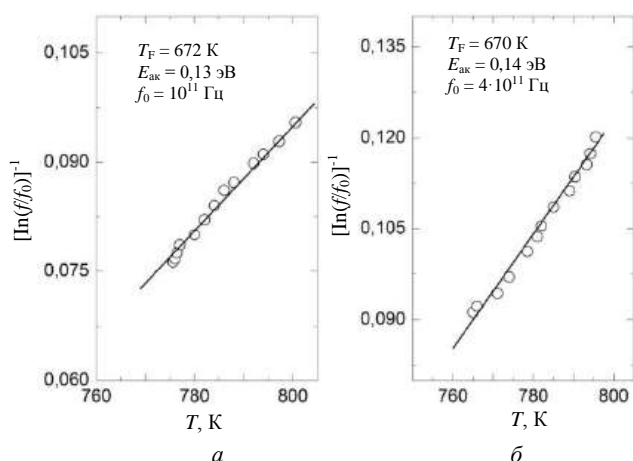


Рис. 4. Температурная зависимость $[\ln(f/f_0)]^{-1}$ керамик с $y = 0,25$ (а) и $0,275$ (б) (прямая линия — результат расчета по соотношению Фогеля—Фулчера)

Проведены работы по созданию в исследуемых керамиках поляризованного состояния с использованием метода "горячей" поляризации [19]. Несмотря на то, что именно ТР из МО во многих случаях проявляют экстремальные электрофизические свойства [20], в образцах V разреза высоких и стабильных во времени пьезооткликов авторы не обнаружили. Скорее всего, это связано с тем, что концентрация PFN в этом разрезе сравнительно мала, а состав близок системе BF—PT, которая, как известно, обладает высокими значениями коэрцитивного поля и электропроводности. Для повышения пьезоэлектрического отклика в

таких композициях следует использовать методы горячего прессования и механоактивации [14].

Заключение

Твердые растворы тройной системы $(1-x-y)\text{BiFeO}_3-x\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-y\text{PbTiO}_3$ были изготовлены в виде семи квазибинарных разрезов методом твердофазных реакций с последующим спеканием по обычной керамической технологии. Построена фазовая диаграмма исследуемой тройной системы. Морфотропная область сосуществования Рэ- и Т-фаз локализована в концентрационном регионе с высоким содержанием BFO. Исследования диэлектрических характеристик керамик $0,65\text{BiFeO}_3-0,1\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-0,25\text{PbTiO}_3$ и $0,625\text{BiFeO}_3-0,1\text{PbFe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_3-0,275\text{PbTiO}_3$ показали, что данные материалы являются сегнетоэлектриками-релаксорами. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых функциональных высокотемпературных пьезоэлектрических материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание в области научной деятельности, Южный федеральный университет, 2020 г.) с использованием оборудования ЦКП "Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел" НИИ физики ЮФУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. Magnetoelectric and multiferroic media // *Phys. Usp.* 2012. V. 55. P. 557—581.
2. Junyi Zhai, Zengping Xing, Shuxiang Dong, Jiefang Li, Viehland D. Detection of pico-Tesla magnetic fields using magneto-electric sensors at room temperature // *Appl. Phys.* 2006. Lett. V. 88. P. 062510.
3. Tehrani S., Slaughter J. M., Deherrera M., Engel B. N., Rizzo N. D., Salter J. John, Durlam M., Dave R. W., Janesky J., Butcher B., Smith K., Grynkewich G. Magnetoresistive random access memory using magnetic tunnel junctions // *Proceedings of the IEEE*. 2003. V. 91 (5). P. 703.
4. Borders W. A., Akima H., Fukami S., Moriya S., Kurihara S., Horio Y., Sato S., Ohno H. Analogue spin-orbit torque device for artificialneural-network-based associative memoryoperation // *Appl. Phys. Express*. 2017. V. 10 (1). P. 013007.
5. Katoch R., Sekhar D., Adyam V., Scott J. F., Gupta R., Garg A. Spin phonon interactions and magnetodielectric effects in multiferroic $\text{BiFeO}_3\text{--PbTiO}_3$ // *J. Phys. Condens. Matter*. 2016. V. 28 (7). P. 075901.
6. Shariq M., Kaur D., Chandel V. S. Structural, magnetic and optical properties of multiferroic $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}(\text{BaTiO}_3)_x$ solid solutions // *Chinese J. Phys.* 2017. V. 55 (6). P. 2192—2198.

7. Khelifi H., Zannen M., Abdelmoula N., Mezzane D., Maalej A., Khemakhem H., Es-Souni M. Dielectric and Magnetic properties of $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ ceramics // *Ceramics International*. 2012. V. 38. I. 7. P. 5993—5997.
8. Bozgeyik M. S., Katiyar R. K., Katiyar R. S. Improved magnetic properties of bismuth ferrite ceramics by La and Gd co-substitution // *J. Electroceramics*. 2018. V. 40. I. 3. P. 247—256.
9. Tian Y., Xue F., Fu Q., Zhou L., Wang C., Gou H., Zhang M. Structural and physical properties of Ti-doped BiFeO_3 nanoceramics // *Ceramics International*. 2018. V. 44. I. 4. P. 4287—4291.
10. Khasbulatov S. V., Pavelko A. A., Shilkina L. A., Reznichenko L. A., Gadjeiev G. G., Bakmaev A. G., Magomedov M.-R. M., Omarov Z. M., Aleshin V. A. Phase composition, microstructure, and thermophysical and dielectric properties of multiferroic $\text{Bi}_{1-x}\text{Dy}_x\text{FeO}_3$ // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016. V. 23. I. 3. P. 445—450.
11. Fernández-Posada C. M., Castro A., Kiat J.-M., Porcher F., Peña O., Jiménez R., Alguero M., Amorín H. The Polar/Antipolar Phase Boundary of $\text{BiMnO}_3\text{--BiFeO}_3\text{--PbTiO}_3$: Interplay among Crystal Structure, Point Defects, Multiferroism // *Advanced Functional Materials*. 2018. V. 28. I. 35. P. 1802338.
12. Huang W. J., Yang J., Qin Y. F., Xiong P., Wang D., Yin L. H., Tang X. W., Song W. H., Tong P., Zhu X. B., Sun Y. P. Room temperature multiferrocity and magnetodielectric properties of ternary $(1-x)(0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{--}0.06\text{BaTiO}_3)\text{--}x\text{BiFeO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.9$) solid solutions // *Appl. Phys. Lett.* 2017. V. 111. I. 11. P. 112902.
13. Kumar N., Narayan B., Kumar S., Verma K. C., Rangan R., Shah J., Kotnala R. K. Magnetic controlled voltage in the pseudo-ternary multiferroic $\text{BiFeO}_3\text{--PbTiO}_3\text{--BaTiO}_3$ // *Materials Research Express*. 2017. V. 4. I. 9. P. 095701.
14. Klyndyuk A. I., Chizhova E. A. Structure, Thermal Expansion and Electrical Properties of $\text{BiFeO}_3\text{--NdMnO}_3$ Solid Solutions // *Inorganic Materials*. 2015. V. 51 (3). P. 272—277.
15. Choi J. H., Kim J. S., Cheon C. I. Effect of process condition on the ferroelectric properties in $\text{BiFeO}_3\text{--(Bi,K)TiO}_3$ ceramics // *J. Korean Phys. Society*. 2014. V. 65 (3). P. 382—386.
16. Ivanova T. L., Gagulin V. V. Dielectric properties in the microwave range of solid solutions in the $\text{BiFeO}_3\text{--SrTiO}_3$ system // *Ferroelectrics*. 2002. V. 265 (1). P. 241—246.
17. Boldyrev N. A., Pavlenko A. V., Shilkina L. A., Konstantinov G. M., Turik A. V., Sitalo E. I., Amirov A. A., Rodionova V. V., Chichay R. A., Reznichenko L. A. Obtaining, crystal and grain structure, macroresponses of the binary system solid solutions $(1-x)\text{BiFeO}_3\text{--}x\text{PbTiO}_3$ // *Springer Proceedings in Physics*. 2017. V. 193. P. 25.
18. Boldyrev N. A., Pavlenko A. V., Shilkina L. A., Nazarenko A. V., Reznichenko L. A., Miller A. I. / Structure, microstructure, and dielectric responses of $(1-x)\text{BiFeO}_3\text{--}x\text{BaTiO}_3$ solid solutions // *Bulletin of the RAS: Physics*. 2016. V. 80 (11). P. 1303—1305.
19. Фесенко Е. Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. — М.: Атомиздат, 1972. — 248 с.
20. Pang D., He C., Han S., Pan S., Long X., Tailor H. A new multiferroic ternary solid solution system of $\text{BiFeO}_3\text{--Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{--PbTiO}_3$ // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. V. 35. P. 2033—2040.
21. Singh P. S., Yusuf S. M., Yoon S., Baik S., Shin D. N. Ferroic transitions in the multiferroic $(1-x)\text{Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{--}x\text{PbTiO}_3$ system and its phase diagram // *Acta Materialia*. 2010. V. 58. P. 5381—5392.
22. Fedulov S. A., Ladyzhinskii P. B., Pyatigorskaya I. L., Venevsev Yu. N. Complete phase diagram of the $\text{PbTiO}_3\text{--BiFeO}_3$ system // *Sov. Phys. Solid State*. 1964. V. 6. P. 375.
23. Zhu W.-M., Guo H.-Y., Ye Z.-G. Structural and magnetic characterization of multiferroic $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$ solid solutions // *Phys. Rev. B*. 2008. V. 78. P. 014401.
24. Bhattacharjee S., Tripathi S., Pandey D. Morphotropic phase boundary in $(1-x)\text{BiFeO}_3\text{--}x\text{PbTiO}_3$: phase coexistence region and unusually large tetragonality // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 042903.

Phase composition and dielectric characteristics of ternary solid solutions based on bismuth ferrite

N. A. BOLDYREV, L. A. SHILKINA, L. A. REZNICHENKO
Southern Federal University, Research Institute of Physics, Rostov-on-Don, Russia

A. V. PAVLENKO
Southern Scientific Center of the RAS, Rostov-on-Don, Russia

Ceramics of seven quasi-binary concentration sections of the ternary solid solution system $(1-x-y)\text{BiFeO}_3\text{--}x\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3\text{--}y\text{PbTiO}_3$ was prepared by the conventional solid-phase reaction method in the range of $0.05 \leq x \leq 0.325$; $0.05 \leq y \leq 0.325$. By using x-ray diffraction technique the phase diagram of the system was constructed which was shown to contain the regions of tetragonal and rhombohedral symmetry and the morphotropic phase boundary between them. The regularities of the formation of the studied objects dielectric characteristics are established. Dielectric characteristics of $0.65\text{BiFeO}_3\text{--}0.1\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3\text{--}0.25\text{PbTiO}_3$ and $0.625\text{BiFeO}_3\text{--}0.1\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3\text{--}0.275\text{PbTiO}_3$ ceramics revealed ferroelectric relaxor behavior and region of diffuse phase transition from the paraelectric to ferroelectric phase in the temperature range of 600—800 K.

Keywords: composite materials, multiferroics, solid solutions, dielectric characteristics, phase composition.

Анализ математических моделей газовыделения полимерными композиционными материалами в условиях космического пространства

М. А. ЛИТАРОВ

ГБОУ ВО МО «Технологический университет», г. Королев, Московская обл., Россия

Рассмотрены математические модели выделения газов полимерными композиционными материалами (ПКМ), используемыми в качестве внешних покрытий космических аппаратов (КА). Существующие модели пригодны либо для интерпретации и аппроксимации только результатов лабораторных экспериментов, либо для изучения влияния отдельных факторов космического пространства на процесс газовой выделения, учитываемый с помощью функций источников, требующих уточнения. В АО "Композит" разработана модель, которая учитывает все основные физико-химические процессы, определяющие газовойделение ПКМ в вакууме.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, космические аппараты, математическая модель газовой выделения, ионизирующее излучение, кинетика потери массы.

Полимерные композиционные материалы обладают целым комплексом свойств, позволяющих использовать их в качестве внешних покрытий различных КА. Газы, выделяющиеся из ПКМ в условиях эксплуатации КА, являются одними из основных летучих веществ (ЛВ), способных конденсироваться на чувствительных к загрязнениям поверхностях бортовой аппаратуры, таких, как поверхности оптических систем управления, элементов солнечных батарей и т. д.

Это обстоятельство является одним из факторов, потенциально ограничивающим работоспособность и срок службы КА. С увеличением сроков активного существования КА в условиях космоса создание прогностических моделей выделения газа материалами покрытий и загрязнения чувствительных поверхностей аппарата продуктами его собственной атмосферы становится все более актуальной задачей [1—5].

Материалы, используемые в качестве терморегулирующего покрытия (ТРП), занимают значительную площадь поверхности спутников и являются основными источниками продуктов их собственной внешней атмосферы. Так, ТРП типа "солнечный отражатель", являясь внешним покрытием КА, наиболее подвержено действию ионизирующих излучений космического пространства. Например, за год эксплуатации КА на геостаци-

онарной орбите приповерхностная поглощенная доза составила $8,8 \times 10^6$ Гр [1]. Поэтому необходимо разработать физико-математические модели и исследовать газовойделение из ПКМ под действием ионизирующих излучений.

Математические модели газовойделения ПКМ под действием ионизирующих излучений космического пространства

Модель, используемая в Европейском космическом агентстве (European Space Agency — ESA). Исследования загрязнения чувствительных поверхностей КА проводят по этапно:

1. Оценка параметров кинетики газовойделения;
2. Моделирование загрязнения;
3. Зучение влияния загрязнения.

Чтобы оценить параметры кинетики потери массы для определенного материала, сделаны три предположения:

- явление газовойделения — реакция первого порядка [6, 7], т. е. поток газовойделения для каждой его компоненты пропорционален количеству компоненты, остающейся в материале в момент времени t_1 :

$$\left[\frac{dW}{dt} \right]_{t_1} = k_i (\mu_i - W_{t_1}), \quad (1)$$

где k_i — константа реакции;

μ_i — потенциально возможная масса газовойделения;

W_{t_1} — газообразная масса, выделившаяся в момент времени t_1 ;

i — число компонент;

Литаров Михаил Александрович, аспирант второго года обучения кафедры "Управление качеством и стандартизация". E-mail: mishuga09@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.

© Литаров М. А., 2020

• константа процесса газовыделения описывается уравнением Аррениуса:

$$k_i = A_i \exp[-E / kT], \quad (2)$$

где A_i — фактор частоты;

E — энергия активации;

R — универсальная газовая постоянная;

T — температура поверхности образца материала;

• задача оценки параметров кинетики потери массы может быть заметно упрощена, если рассматривать молекулярную массу "семейств" продуктов газовыделения. В данной модели рассмотрены три семейства в порядке снижения летучести: растворители, компоненты газовыделения со средней молекулярной массой и более тяжелые компоненты газовыделения.

Интегрирование уравнения (1) приводит к следующему уравнению:

$$W_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \mu_i [1 - \exp(-k_i t)]. \quad (3)$$

В этом случае необходимо определить девять кинетических параметров, по три для каждого семейства: $(\mu_i, A_i, E_i)_{i=1,2,3}$, необходимых для программы моделирования.

Другой метод — многошаговые температурные испытания, когда температуру образца каждые 24 ч повышают с 25 до 125 °C с шагом 25 °C. Непрерывные измерения потери массы проводят при помощи вакуумных весов. На основании принципа Архимеда для каждой экспериментальной кривой газовыделения подвешенного стандартного образца должны быть применены поправки принципа Архимеда. Затем осуществляют математическую подгонку, чтобы смоделировать кривые газовыделения как сумму трех экспоненциальных кривых в соответствии с тремя семействами продуктов газовыделения. Для моделирования кривых газовыделения выбрано несколько методов, в том числе и метод наименьших квадратов.

Модели, используемые в Японском агентстве аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA). В моделях JAXA [8—13] экспериментальную зависимость потери массы от времени аппроксимируют следующими выражениями:

$$\begin{aligned} M(t, T_s) &= at^b \exp(-E_s / RT_s) + c; \\ M(t, T_s) &= a \ln(t) \exp(-E_s / RT_s) + c; \\ M(t, T_s) &= a [1 - \exp(-t / \tau)] + c, \end{aligned} \quad (4)$$

где a, b — константы для данного материала;

E_s — энергия активации реакции;

T_s — температура образца;

c — поправочный коэффициент;

$M(t)$ — масса ЛВ в образце в момент времени t .

Модели (1)—(3) и (4) просты для решения и удобны для воспроизведения экспериментальной зависимости небольшой длительности. Однако в них не учтены физико-химические процессы, определяющие газовыделение ПКМ в условиях космического пространства. Поэтому они непригодны для проведения прогностических расчетов. Содержательная физико-математическая модель может дать основу для численного анализа, с помощью которого могут быть получены данные не только описательного, но и прогностического характера.

Модели, используемые в АО "Композит". Необходимость работ по моделированию газовыделения полимерными композитами космического назначения и их испытанию обусловлена тем, что материалы внешних покрытий, изготовленных из ПКМ, являются одним из основных источников ЛВ—компонентов собственной внешней атмосферы КА. В частности, такими источниками являются ТРП и экранно-вакуумная теплоизоляция. Они покрывают большую часть поверхности КА и выполняют основную роль в его терморегулировании — в установлении баланса между энергией, выделенной внутри КА, поглощенной энергией солнечного излучения и энергией, излучаемой в космическое пространство. Для упрощения вида математических моделей газовыделения и восприятия результатов вычислений в качестве модельного материала рассмотрим ТРП.

Предлагаемая в работах [14, 15] математическая модель описывает изменения концентраций потенциальных продуктов газовыделения в образце ТРП и кинетику газовыделения через границу материал—вакуум при термовакуумном воздействии. Изменение концентрации $C_n(x, t)$ n -й компоненты газовыделения в материале, нанесенном на герметичную подложку, обусловлено следующими процессами:

- десорбцией компонентов с поверхности на границе материал—вакуум;
- деструкцией в материале под воздействием внешних факторов;
- уменьшением за счет химических реакций;
- испарением материала через границу материал—вакуум;
- диффузией компонентов, вызванной пере-численными процессами.

Модель построена на следующих предположениях:

- толщина образца ТРП намного меньше остальных его линейных размеров, следовательно, можно пренебречь краевыми эффектами и рассматривать одномерную задачу;

- температура образца постоянна;

- эффективные коэффициенты диффузии, десорбции и термической деструкции не зависят от времени (как правило, процесс "наблюдается" только до определенной степени "деградации" материала), а определяются только температурой образца данного материала;

- некоторые компоненты газовой выделения могут появиться в результате термической деструкции других компонентов, остальные формы их взаимного влияния в модели не учитываются;

- компоненты газовой выделения в материале образца участвуют только в реакциях первого порядка;

- материал испаряется со всей поверхности с одинаковой скоростью, которая для данного материала зависит только от интенсивности воздействующих факторов;

- газовой выделения происходит только через границу материал—вакуум.

При рассмотрении перечисленных процессов в ПКМ и на их поверхностях реально возможен только макроскопический подход. Поэтому авторы вынуждены говорить только об эффективных коэффициентах диффузии и десорбции — о параметрах, с помощью которых описаны процессы, наблюдаемые при лабораторных и натурных экспериментах.

Обозначим через $C_i(x, t)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) концентрации компонентов газовой выделения, которые не могут быть образованы в материале при деструкции других компонентов под воздействием внешних факторов. Изменение их концентрации в образце в рамках сделанных предположений можно описать дифференциальными уравнениями:

$$\frac{\partial C_i(x, t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i(x, t)}{\partial x^2} - \sum_{j=1}^M \sigma_{i \rightarrow j} C_i(x, t) - \chi_i C_i(x, t) + S_i(x, t) \quad (5)$$

при $x \in (0, h - vt)$ и $t > 0$

с начальными и граничными условиями

$$C_i(x, t)|_{t=0} = R_i \text{ при } x \in [0, h]; \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_i(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \text{ при } t > 0; \quad (7)$$

$$D_i \frac{\partial C_i(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=h-vt} + k_i C_i(x, t) \Big|_{x=h-vt} = 0 \text{ при } t > 0, \quad (8)$$

где $\sigma_{i \rightarrow j}$ — эффективный коэффициент термической деструкции i -й компоненты по j -му каналу, с^{-1} ;

χ_i — скорость химических реакций с участием i -й компоненты, с^{-1} ;

D_i — эффективный коэффициент диффузии i -й компоненты, $\text{мкм}^2/\text{с}$;

R_i — концентрация i -й компоненты в материале в начальный момент времени;

k_i — эффективный коэффициент десорбции i -й компоненты, $\text{мкм}/\text{с}$;

$S_i(x, t)$ — функция источника i -й компоненты, с^{-1} ;

h — толщина образца материала, мкм ;

v — скорость испарения материала, $\text{мкм}/\text{с}$.

Температурная зависимость коэффициентов диффузии и десорбции описывается соотношением Аррениуса [8]:

$$D_i = D_{0i} \exp\left(-\frac{E_m}{RT}\right); \quad k_i = k_{0i} \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right), \quad (9)$$

где E_m и E_d — энергии активации диффузии и десорбции соответственно;

D_{0i}, k_{0i} — константы материала;

T — абсолютная температура.

Функции $C_i(x, t)$, полученные при решении задачи (5)—(8), с весовыми множителями $\sigma_{i \rightarrow j}$ входят в уравнения, описывающие изменения концентрации j -й компоненты газовой выделения ($j = 1, 2, 3, \dots, L$), образование которой возможно при деструкции соответствующей i -й компоненты:

$$\frac{\partial C_j(x, t)}{\partial t} = D_j \frac{\partial^2 C_j(x, t)}{\partial x^2} - \sum_{l=1}^L \sigma_{j \rightarrow l} C_j(x, t) - \chi_j C_j(x, t) + \sum_{i=1}^N \sigma_{i \rightarrow j} C_i(x, t) + S_j(x, t) \quad (10)$$

при $x \in (0, h - vt)$ и $t > 0$

с начальными и граничными условиями

$$C_j(x, t)|_{t=0} = R_j \text{ при } x \in [0, h]; \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_j(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \text{ при } t > 0; \quad (12)$$

$$D_j \frac{\partial C_j(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=h-vt} + k_j C_j(x, t) \Big|_{x=h-vt} = 0, \quad (13)$$

где $\sigma_{i \rightarrow j}$ — массовый коэффициент термической деструкции j -й компоненты по l -му каналу; $R_j \geq 0$.

Таким образом, используя все возможные компоненты газовой выделения, построим систему дифференциальных уравнений, описывающих изменения $C_n(x, t)$ в образце материала. Для большинства практических задач решение такой системы уравнений не составляет особого труда, но из-за их громоздкости приведем только некоторые, имеющие, по мнению автора, практический интерес.

Для упрощения восприятия результатов расчетов в качестве базовых значений параметров модели выбраны следующие: $D = 0,001$ мкм²/с; $k = 0,01$ мкм/с; $\beta = 10^{-7}$ с⁻¹; $l = 100$ мкм; $R = 1$ (концентрация ЛВ в материале в начальный момент времени выбрана равной единице).

На рис. 1 показана пространственно-временная зависимость концентрации ЛВ в ПКМ при разных значениях параметров модели. Эти диаграммы демонстрируют влияние отдельных процессов на перераспределение концентрации ЛВ в материале в вакууме при постоянной температуре.

При базовых значениях параметров модели получен результат, представленный на рис. 1, а.

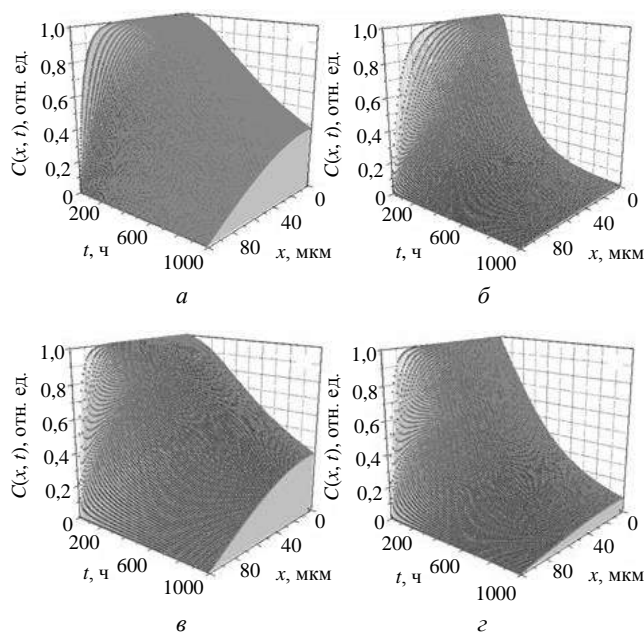


Рис. 1. Пространственно-временное распределение концентрации ЛВ в материале при разных значениях параметров модели:

- а — $D = 0,001$ мкм²/с, $k = 0,01$ мкм/с, $\beta = 10^{-7}$ с⁻¹;
 б — $D = 0,005$ мкм²/с, $k = 0,01$ мкм/с, $\beta = 10^{-7}$ с⁻¹;
 в — $D = 0,001$ мкм²/с, $k = 0,05$ мкм/с, $\beta = 10^{-7}$ с⁻¹;
 г — $D = 0,001$ мкм²/с, $k = 0,01$ мкм/с, $\beta = 5 \cdot 10^{-7}$ с⁻¹

Каждая из функций $C(x, t)$ на рис. 1, б—г отличается от представленной на рис. 1, а значением только одного параметра: коэффициента диффузии, коэффициента десорбции или параметра β соответственно, увеличенным в пять раз при совпадении значений остальных параметров модели с

базовыми значениями. Изменение коэффициента диффузии наиболее существенно сказалось на поведении функции $C(x, t)$, хотя и с ростом параметра β тоже произошли значительные изменения в распределении концентрации ЛВ. Наименьшие отклонения от функции, приведенной на рис. 1, а, имеет распределение концентрации ЛВ при увеличении коэффициента десорбции.

Решение задачи (5)—(8) позволяет определить скорость потери массы за счет выделения i -й компоненты с единицы поверхности покрытия из выражения

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = (v + k_i) m_i C_i(h - vt, t), \quad (14)$$

где m_i — масса молекулы i -й компоненты.

На рис. 2 приведены результаты вычислительного эксперимента, проведенного для анализа влияния параметров модели на характер поведения функций $\dot{M}(t)$ (а) и $M(t)$ (б) [15].

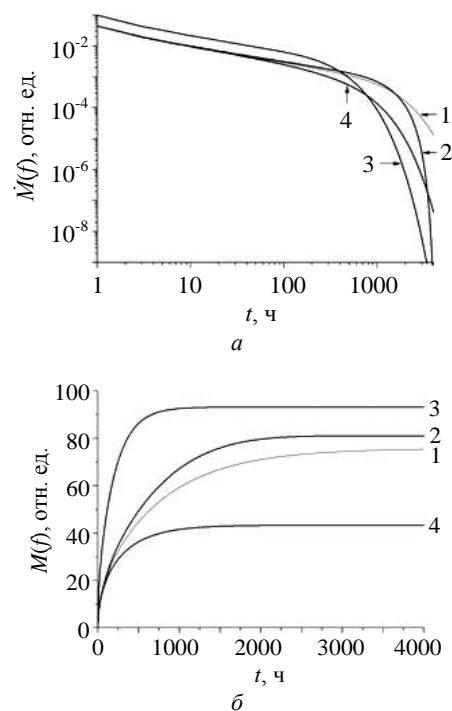


Рис. 2. Функции скорости (а) и динамики потери массы (б) при разных значениях параметров модели:

- 1 — $D = 10^{-3}$, $\beta = 10^{-7}$, $v = 0$; 2 — $D = 10^{-3}$, $\beta = 5 \cdot 10^{-7}$, $v = 0$;
 3 — $D = 5 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 10^{-7}$, $v = 0$; 4 — $D = 10^{-3}$, $\beta = 10^{-7}$, $v = 5 \cdot 10^{-6}$

При базовых значениях параметров модели получена зависимость этих величин от времени (линии 1 на рис. 2, а, б), относительно которой и рассматривались изменения в поведении функции скорости и динамики потери массы при варьировании отдельных параметров. Из анализа результатов, представленных на рис. 2, следует, что увеличение значений каждого из перечисленных

параметров модели приводит к существенному изменению рассматриваемых функций. Наиболее ярко эти изменения проявляются на рис. 2, б. Так, увеличение коэффициента диффузии (линия 3) приводит к росту потери массы, а увеличение скорости реакций первого порядка (линия 4) — к снижению ее значения. Естественно, что наличие сублимации ведет к увеличению потери массы материала (линия 2).

Помимо исследования изменений функциональных характеристик ТРП необходимо знать закономерности потери массы ТРП из полимерных композитов под действием факторов космического пространства. Результаты первых попыток моделирования влияния электронного и УФ-излучения на кинетику потери массы, представленные в работах [16, 17], требуют уточнения в части определения функции источника. В качестве примера на рис. 3 представлены функции источника ЛВ i -го типа $S_i^{\text{rad}}(x, t)$ в материале ЭКОМ-1 при облучении электронами разных энергий [17].

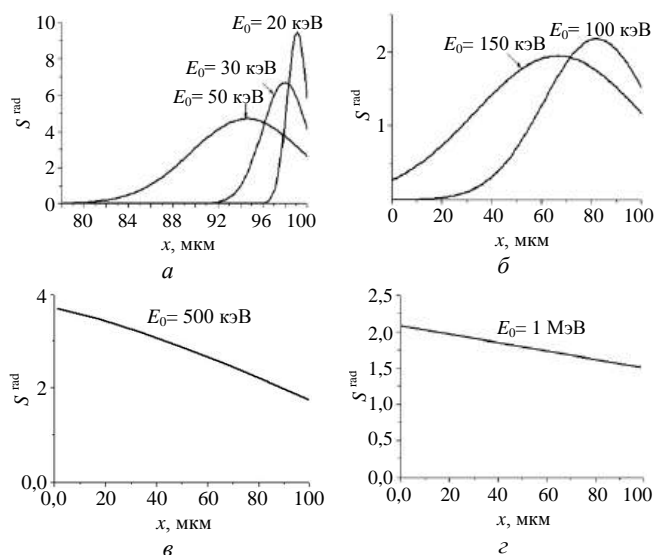


Рис. 3. Распределение продуктов радиолитиза по толщине ПКМ при облучении электронами ($t = 0$):
а — $E_0 = 20, 30$ и 50 кэВ; б — $E_0 = 100$ и 150 кэВ;
в — $E_0 = 500$ кэВ; г — $E_0 = 1$ МэВ

Заключение

Математические модели, используемые в исследовательских центрах JAXA и ESA, удобны для аппроксимации лабораторных экспериментов, длительность проведения которых может составлять до нескольких суток. Это обусловлено минимальным количеством параметров, определяющих кинетику потери массы при лабораторных экспериментах. Однако они непригодны для долгосрочных прогнозов потери массы материалов в условиях эксплуатации.

Модель, разработанная и используемая в АО "Композит", является более содержательной, поскольку она учитывает все основные физико-химические процессы, определяющие газовыделение полимерными композитами в вакууме. Добавление в основное уравнение модели функции источника позволяет учитывать влияние основных факторов космического пространства (вакуум, температура, воздействие ультрафиолетового и ионизирующего излучений) на процесс газовыделения. Для реализации этой модели необходимо из анализа результатов эксперимента с максимальной возможной точностью оценить такие параметры, как эффективные коэффициенты диффузии и десорбции.

Для реализации и дальнейшего развития физико-математической модели необходимо разработать и внедрить более точную систему измерения кинетики газовыделения полимерными композитами и алгоритмы для определения параметров модели из экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов: Модель космоса. Научно-информационное издание / под ред. Новикова Л. С. — М.: КДУ МГУ им. М. В. Ломоносова, 2007. Т. 2. — 1144 с.
2. Delphine FAYE: "Projet SPOT 5 / HELIOS II :caracterisation optique de la contamination moleculaire issue de la peinture MAP PU1", document CNES, 1999. P. 58—64.
3. Bouquet R. Developpement d'une application d'analyse des courbes de degazage des materiaux, rapport de stage CNES. 1999. P. 22—27.
4. Cheoux-Damas P., Theroude C., Ounougha L. Contamination Modelling in Space Environment: proceedings of the 6th International Symposium on Materials in Space Environment, ESA SP-368. The Netherlands, 1994. P. 45—50.
5. Sorensen J. ESA BASE OUTGASSING: application manual, ESA publications division, ESABASE/OGS-UM-013, 1995. Is. 2. P. 12—18.
6. Guillin J. Evaluation of isothermal outgassing kinetics for some materials used in Space, Proceedings of the Third European Symposium on Spacecraft Materials in Space Environment. ESA SP-232. The Netherlands. October 1985. P. 35—38.
7. Faye D. Calculation approach for outgassing curves of PU1 paint and molecular contamination modeling: ground testing and computer simulation: 8th International Symposium on "Materials in a space environment", Arcachon-France. 5—9 June 2000. P. 31—38.
8. Urayama F., Hayashia T., Takeda N., Baba N. Modeling of material outgassing and deposition phenomena, Optical Systems Degradation, Contamination, and Stray Light: Effects, Measurements, and Control / ed. by Chen Ph. T. C., Fleming J. C., Dittman M. G., Proceedings of SPIE. V. 5526. SPIE, Bellingham, WA, 2004.
9. Baba N., Kimoto Y. Contamination Growth Observed on the Micro-Particles Capturer and Space Environment Exposure Device // J. Spacecraft and Rockets. 2009. V. 46. № 1. P. 410—413. <https://doi.org/10.2514/1.31870>
10. Urayama F., Hayashi T., Takeda N., Baba N. Modeling of material outgassing and deposition phenomena: proceedings Article | 15 October 2004. Proc. SPIE. 5526, Optical Systems

Degradation, Contamination, and Stray Light: Effects, Measurements and Control.

11. **Isobe N., Nakagawa T., Okazaki Sh., Sato Y., Ando M., Baba S., Miura Y., Miyazaki E., Kimoto Y., Ishizawa J., Tani H., Maruyama K., Urayama F., Mori A.** Contamination control for the space infrared observatory SPICA: proceedings Article. 28 August 2014. Proc. SPIE. 9143, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave.

12. **Shimazaki K., Miyazaki E., Kimoto Y.** // Optical calculations and in-situ measurement of transmittance spectra of contaminant thin films: proceedings Article | 27 September 2016. Proc. SPIE. 9952, Systems Contamination: Prediction, Control, and Performance 2016.

13. **Miyazaki E., Miura Y., Numata O., Yamanaka R., Baba S., Ishizawa J., Kimoto Y., Tamura T.** // Evaluating the bakeout effectiveness of RTV-S691 silicone adhesive by measuring outgassing rate: proceedings Article. 9 September 2014. Proc.

SPIE. 9196, Systems Contamination: Prediction, Measurement, and Control 2014.

14. **Костюк В. И., Хасаншин Р. Х.** К вопросу моделирования газовой выделения материалами покрытий КА при термовакуумном воздействии // Космонавтика и ракетостроение. 2002. № 28. С. 155.

15. **Хасаншин Р. Х.** Моделирование конденсации продуктов газовой выделения при термовакуумном воздействии на материалы покрытий космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 4 (33). С. 111—121.

16. **Khassanchine R. H., Timofeev A. N., Grigorevskiy A. V., Galygin A. N.** Influence of UV radiation on outgassing of polymeric composites // J. Spacecraft and Rockets. 2006. V. 43. № 2. P. 410—413.

17. **Khassanchine R. H., Timofeev A. N., Galygin A. N., Kostiuk V. I.** Simulation of electron radiation on outgassing of spacecraft materials // J. Spacecraft and Rockets. 2006. V. 43. № 3. P. 509—513.

Analysis of mathematical models of outgassing by polymeric composites in the conditions of space environment

M. A. LITAROV

State Educational Institution of Higher Education Moscow Region "University of Technology",
Korolev, Moscow region, Russia

Mathematical models for outgassing by polymeric composites which are used in the capacity of the outer coatings of spacecrafts are considered. Existing models either are used for interpretation and approximation only of the results of the laboratory experiments, or if influence of some factors of space environment on the outgassing process is considered with the help of sources functions, which need clarification. Model developed in Joint Stock Company "Composite" take into account whole basic physic-chemical processes defined outgassing by polymeric composites in the conditions of space environment.

Keywords: polymeric composites, spacecrafts, mathematical model of outgassing, ionizing radiation, kinetics of mass loss.

УДК 620.179.18

Методы одновременного контроля деформации и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками

М. Ю. ФЕДОТОВ, канд. техн. наук
Российская инженерная академия, Москва, Россия

О. Н. БУДАДИН, д-р техн. наук; С. О. КОЗЕЛЬСКАЯ, канд. техн. наук
АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»,
г. Хотьково, Московская обл., Россия

В. С. ТЕРЕНТЬЕВ, канд. физ.-мат. наук
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Рассмотрены возможности использования волоконно-оптических датчиков (ВОД), позволяющих осуществлять контроль качества конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) одновременно по двум параметрам: деформации и температуре. Установлено, что наиболее технологично применять точечные, квазираспределенные и распределенные волоконно-оптические датчики на основе разнолегированных волокон с различной деформационной и температурной чувствительностью. Адаптация существующих методов оптического неразрушающего контроля под конкретные изделия и условия эксплуатации позволит обеспечить повышение качества контроля и безопасности эксплуатации композитных конструкций.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, полимерный композиционный материал, волоконно-оптический датчик, деформация, температура.

Слоистые ПКМ широко применяют в изделиях авиакосмической и ракетной техники, строительной, транспортной техники, а также в судостроении и энергетике. Они позволяют существенно повысить массовую эффективность конструкций, обеспечивая заданный уровень прочности и надежности при эксплуатации [1, 2].

Вследствие сравнительно высокой стоимости углепластиков, например по сравнению со стеклопластиковыми, в ряде случаев в целях оптимизации сочетания стоимости и механических характеристик применяют гибридные ПКМ на основе полимерных матриц армирующего наполнителя, состоящего из чередующихся углеродных и стеклянных слоев. Это может приводить к усложнению технологических режимов изготовления изделий и их эксплуатации в реальных условиях вследствие как анизотропии свойств, так и появления дополнительных границ раздела.

Важным критерием при разработке и внедрении перспективных материалов, технологий и

конструкций на их основе является их безопасная эксплуатация. Эта проблема решается за счет разработки новых и применения существующих методов неразрушающего контроля (НК) и диагностики [3, 4]. Однако классические методы НК (акустические, рентгеновские, тепловые) дают возможность осуществлять контроль изделий из ПКМ на входном этапе, этапе проведения периодических и регламентных работ, не позволяя проводить диагностику в течение эксплуатации конструкции в режиме реального времени, отслеживать возникновение и накопление дефектов, сравнивать их с пороговыми значениями и принимать решение о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации.

Отметим, что по состоянию на начало 2020 г. как в РФ, так и за рубежом одним из наиболее перспективных методов контроля, потенциально позволяющих планомерно осуществлять переход от эксплуатации по заданному ресурсу к эксплуатации по фактическому техническому состоянию, является оптический метод, основанный на применении ВОД. Это связано с особенностями метода, который не является методом неразрушающего контроля в классическом смысле, поскольку не позволяет обнаруживать дефекты, но дает возможность измерять деформации и/или температуры внутри материалов при механических и температурных воздействиях [5]. Дополнительные преимущества метода — возможность реализации системы контроля на поверхности конструкции (аналогично средствам классической тензометрии, которая в ряде случаев, несомненно, имеет преимущества), а также возможность внедрения волоконных световодов (ВС), имеющих сравнитель-

Федотов Михаил Юрьевич, академический советник.

E-mail: fedotovmyu@gmail.com

Будадин Олег Николаевич, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: oleg.budadin@yandex.ru

Козельская Софья Олеговна, старший научный сотрудник.

E-mail: kozelskaya.sofik1977@yandex.ru

Терентьев Вадим Станиславович, старший научный сотрудник.

E-mail: terentyev@iae.nsk.su

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2020 г.

© Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О.,
Терентьев В.С., 2020

но небольшой диаметр (0,1—0,2 мм), сравнимый с толщиной монослоя ПКМ, в конструкцию на стадии ее изготовления. Это позволяет создать интегрированную систему контроля именно в структуре материала, что особенно важно для толстостенных конструкций.

За рубежом такая технология называется Structural Health Monitoring (SHM) [6]. Исследования и внедрение разработок в данной области проводят NASA (США), Boeing Company (США), Luna Innovations Inc. (США), Airbus (Европейский союз), EADS (Европейский союз), Embraer S.A. (Бразилия). Объектами контроля могут являться авиационные конструкции (крыло, фюзеляж, элементы хвостового оперения), конструкции вертолетов (прежде всего лопасти несущего винта), строительные конструкции (мосты, здания, сооружения), конструкции специального назначения (баллоны высокого давления, сложные пространственные конструкции).

Отметим, что при эксплуатации конструкций из ПКМ происходит одновременное воздействие механических и тепловых нагрузок. Это усложняет процесс контроля, поскольку требуется регистрировать как текущие значения деформаций в материале конструкции, так и значения температур, определяя вклад каждой из составляющих в изменение оптических характеристик ВОД.

Цель работы — выбор методов одновременного измерения деформации и температуры с помощью ВОД, которые потенциально могут быть применены для создания интегрированной системы контроля конструкций из ПКМ.

Методы одновременного контроля деформации и температуры с помощью точечных, квазираспределенных и распределенных ВОД

В научной литературе описано довольно большое количество методов, позволяющих осуществлять одновременный контроль деформации и температуры с помощью ВОД, построенных на различных физических принципах [7, 8]. Однако отсутствуют информация о потенциальной применимости данных методов для контроля конструкций из ПКМ различного назначения, методология, нормативная база и экспериментальные работы, посвященные решению данной научной проблемы, которая является крайне актуальной.

По признаку локальности контроля ВОД можно условно разделить на:

- точечные, контроль которых осуществляется в отдельно взятой точке — локальной области расположения чувствительного элемента (ЧЭ);
- квазираспределенные, система контроля в которых реализуется на основе массива ЧЭ, рас-

положенных как на одном, так и на нескольких ВС. Система позволяет осуществлять контроль в соответствии с заданной для конкретного изделия пространственной топологией;

- распределенные [9—11], в которых ВС на всем своем протяжении представляет собой ЧЭ и имеет определенное пространственное разрешение в диапазоне от единиц сантиметров до нескольких метров в зависимости от протяженности контролируемого объекта.

В качестве точечных и квазираспределенных ВОД могут выступать волоконные брэгговские решетки (ВБР) и интерферометры различных типов. Они могут быть применены для контроля конструкций различного назначения. В случае одновременного контроля деформации и температуры работа распределенных систем контроля чаще всего реализуется на основе использования эффекта Мандельштама–Бриллюэна [12]. При распределенном контроле температуры целесообразно применять системы контроля на основе эффекта Рамана [13]. Отдельно стоит отметить акустические системы на основе когерентного рэлеевского рассеяния [14], которые служат для контроля трубопроводов на предмет врезки, копки, иной активности в охранной зоне, охраны периметра, мониторинга движения подвижного состава вдоль железной дороги, тяжелой, в том числе боевой, техники вдоль автомагистралей. Для мониторинга сложных технических систем, в том числе объектов специального назначения, применяются гибридные системы контроля, сочетающие возможности квазираспределенных и распределенных волоконно-оптических систем.

Точечные и квазираспределенные волоконно-оптические датчики. Рассмотрим более подробно варианты организации одновременного измерения деформации и температуры с помощью точечных и квазираспределенных ВОД. Простейшим вариантом организации системы контроля является размещение в локальной зоне расположения ВОД деформации независимого ВОД температуры, например на основе ВБР, на которую не действует механическая нагрузка. ВОД температуры может быть интегрирован в структуру ПКМ или находиться вне материала конструкции, что в случае контроля тонкостенных конструкций позволит с минимальной погрешностью определить температуру в зоне расположения ВОД деформации. Интеграция датчика температуры в ПКМ обеспечивает защиту ЧЭ от воздействия механических нагрузок. Такая защита может быть реализована в виде цилиндрического кварцевого капилляра [15], запаянного с обеих сторон после его нанесения на зону ЧЭ ВОД температуры. Предложенный метод имеет существенные недостатки. Так, в случае ис-

пользования внешнего ВОД температуры может существенно повыситься погрешность измерений при быстром изменении температуры, появлении градиента температуры, что характерно для толстостенных конструкций, а также при наличии источников тепла внутри самой конструкции. Хотя применение капилляра частично решает эти проблемы, его наличие создает дополнительный концентратор напряжений, искажение структуры материала в месте расположения ВОД температуры, что может существенно снизить механические свойства и несущую способность конструкции из ПКМ. В то же время в некоторых случаях такой подход может быть реализован на практике в силу своей простоты и возможности обеспечения требуемой погрешности контроля.

Одним из способов, основанных на применении единственного чувствительного элемента в составе ВОД, является метод, в основе которого лежит анализ сдвига резонансной длины волны ВБР в первом и втором порядке дифракции [16, 17]. Существенный недостаток метода — необходимость использовать сразу нескольких источников оптического излучения и спектрометров, работающих в различных диапазонах оптического спектра, что приводит к удорожанию системы контроля.

Другой метод [18, 19] основан на применении в качестве ЧЭ ВОД чирпированной ВБР [20], резонансная длина волны которой меняется вдоль решетки либо ступенчато, либо непрерывно. Для решеток такого типа характерны широкий спектр отражения (более 100 нм) или большая дисперсия (более 1000 пс/нм). Действующая на решетку деформация вызывает уширение спектра отраженного сигнала, в то время как при воздействии температуры изменяется резонансная длина волны решетки. Однако для достижения такого эффекта решетка должна записываться на участке ВС конечной формы. Это усложняет процесс изготовления ВОД и влияет на его структурную однородность, что немаловажно при его интеграции в ПКМ.

Возможно также применение наклонной ВБР, обладающей повышенной связью основной моды сердцевинной с модами оболочки за счет наклона плоскости штриха ВБР [21]. Оболочечная мода и мода сердцевинной в такой решетке проявляют разную чувствительность к температурному воздействию и одинаковую к механическому. Анализ сдвига резонансной длины волны по двум модам позволяет разделить деформационную и температурную составляющие, обеспечивая одновременный контроль двух параметров.

Еще одним методом разделения деформационной и температурной составляющих отклика явля-

ется использование ВБР, записанной в ВС с высоким двулучепреломлением. В таких ВС ВБР имеет два пика отражения, незначительно отличающихся по длине волны ввиду различного показателя преломления для двух ортогональных поляризационных мод ("быстрая" и "медленная" оси двулучепреломления). Расстояние между пиками меняется пропорционально температуре, но остается практически неизменным при приложении нагрузки. Измерение сдвига резонансных длин волн двух поляризационных мод ВБР, а также определение поляризационно-зависимых потерь в ВС позволяют разделить температурное и деформационное воздействие. Данные ВОД обладают необходимыми характеристиками для интеграции в ПКМ, однако достаточно узкий диапазон измеряемых температур и сложность требуемой системы опроса ВОД затрудняют их применение.

Еще один способ одновременного измерения основан на применении суперструктурированной ВБР [22] (superstructure FBG), сформированной путем последовательной записи отдельных периодически расположенных ВБР, в результате чего в спектре возникает несколько узкополосных пиков, заполняющих определенный спектральный интервал. Разделение деформационной и температурной составляющих в данном случае возможно за счет одновременного измерения резонансной длины волны и интенсивности одного из пиков ВБР, по-разному изменяющихся в зависимости от температуры и приложенной нагрузки.

Одновременное определение деформации и температуры можно реализовать также за счет применения ВС с двумя или более ВБР, наложенными друг на друга по принципу суперпозиции [23, 24]. Подобная структура формируется в выбранном месте сердцевинной ВС с высокой фоточувствительностью путем последовательной записи ВБР с существенно отличными резонансными длинами волн, что обеспечивает необходимую разницу по чувствительности ВОД к температуре. Указанные условия накладывают ряд ограничений на применение подобного метода, связанных с уменьшением коэффициента преломления первой ВБР после записи второй, а также с усложнением процесса опроса и обработки данных от ВОД.

Еще один метод разделения температурного и деформационного воздействия — применение длиннопериодных волоконных брэгговских решеток (ДПВР). Такие решетки имеют период 100—500 мкм и связывают однонаправленные моды сердцевинной и оболочки ВС. ДПВР также чувствительны к температуре и механической нагрузке. Для разделения деформационного и температурного воздействий анализируют длины волн двух резонансных полос, чувствительность к темпера-

туре и деформации на которых различна. Однако для обеспечения точности измерения деформации и температуры при таком подходе резонансные длины волн должны быть разнесены как можно дальше. Недостаток метода — необходимость использования сложной системы опроса ВОД, работающей в широком оптическом диапазоне.

Очевидно, что одним из наиболее простых в реализации способов эффективного разделения деформационной и температурной составляющих суммарного отклика ВОД в целях контроля одновременно по двум параметрам является применение двух близко расположенных чувствительных элементов, например ВБР, имеющих различную чувствительность к температурному и/или деформационному воздействию. Такую систему, по сути, можно рассматривать как точечный ВОД. Совокупность точечных ВОД образует квазираспределенную волоконно-оптическую систему контроля.

Так, в [25] показана возможность разделения деформации и температуры с помощью записи двух ВБР с близкими значениями резонансных длин волн в ВС различного диаметра. В данном случае ВБР имеют различную чувствительность к деформации и одинаковую к температурному воздействию. Однако при интеграции в ПКМ данный эффект практически сводится к нулю, так как модуль упругости ВС в составе материала определяется модулем упругости ПКМ. Следует отметить, что сварка двух ВС вблизи ВБР приводит к снижению механической прочности ВОД, а сварка ВС различного диаметра — к значительным потерям мощности оптического сигнала. Эти факторы наиболее существенно проявляются при интеграции ВОД в ПКМ.

Для раздельного измерения температуры и деформаций в качестве чувствительного элемента можно использовать ВБР, записанные на разных по составу одномодовых ВС геометрически близко друг к другу и сваренные между собой в единый световод. При этом ВБР, как и в предыдущем варианте, должны располагаться вблизи места сварки. В [26, 27] описан способ разделения деформации и температуры за счет применения ВБР с близкими значениями длин волн, сформированных на разнолегированных ВС, сваренных между собой. Такую систему можно рассматривать как сдвоенную ВБР (рис. 1).

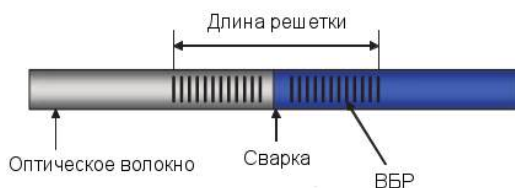


Рис. 1. Схема ВОД для одновременного измерения температуры и деформации

На основе аналогичной конфигурации ВОД было проведено одновременное измерение температуры и деформации в адаптивных композиционных материалах [28]. При этом ВОД интегрировали в материал. На различных волокнах (SMF-28e, G9, G18, G22, G25, PS1500, Photosil) были записаны ВБР. Измерены зависимости их длины волны от температуры. Установлено, что вклад температурного расширения в изменение длины волны на порядок меньше вклада от термооптического эффекта. Следовательно, температурная чувствительность зависит от степени легирования сердцевины GeO_2 и B_2O_3 . На основе результатов измерения выбраны волокна PS1500 и G22, чувствительность которых к температуре различается сильнее всего, и проведены соответствующие измерения (рис. 2). Данный метод обеспечивает одинаковую чувствительность к деформации и различную к температуре.

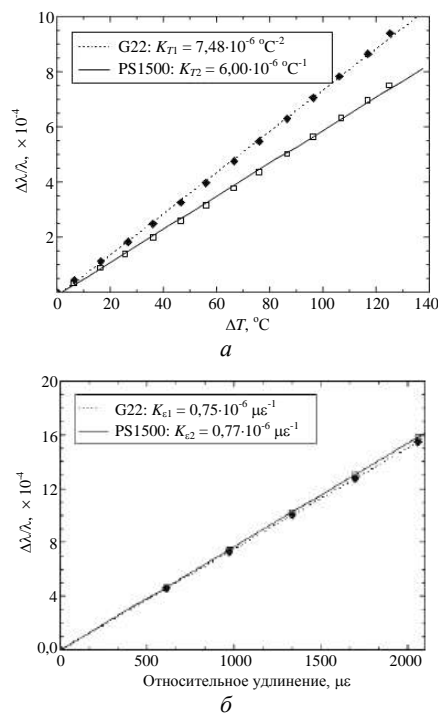


Рис. 2. Зависимость относительного смещения брэгговской длины волны оптических волокон G22 и PS1500 от: а — температурного воздействия; б — механической нагрузки (K_{T1} , K_{T2} и $K_{\epsilon 1}$, $K_{\epsilon 2}$ — коэффициенты чувствительности ВОД к температуре и деформации соответственно)

При участии авторов на основе метода двух волокон проведены предварительные экспериментальные исследования возможности контроля образцов из углепластика с помощью интегрированных квазираспределенных ВОД на основе ВБР [29]. Для проведения эксперимента подобрана пара доступных волокон: легированное германием оптическое волокно фирмы Fibercore (Великобритания) в полиимидном покрытии SM1500P (9/125) (SM1500P-125/150) с диаметром 150 мкм, обладающее высокой температурной чувствительностью,

и легированное бором оптическое волокно фирмы Fibercore в акрилатном покрытии PS1250-1500 (PS1250-125/250) с диаметром 250 мкм, обладающее сравнительно низкой температурной чувствительностью. В выбранных волокнах при помощи фемтосекундного лазера с длиной волны 1026 нм записаны по 3 ВБР. Собраны пакеты препрега углепластика на основе эпоксидного расплавного связующего ВСЭ-1212 и среднемодульного углеродного жгута IMS65 24К фирмы Toho Tenax (Япония) размером 500×500×2 мм со схемой армирования слоев $[0]_n$, и отформованы плиты, из которых методом механической резки изготовлены образцы размером 400×25×2 мм. Два квазираспределенных оптоволоконных сенсора, каждый из которых включал по три ВБР с геометрической длиной 2 мм на расстоянии 40 мм друг от друга, располагались между центральными слоями препрега в 1 мм друг от друга параллельно длинной грани образца таким образом, чтобы ВБР находились примерно в геометрическом центре образца. Выводы ВОД из образцов выполнялись через поверхность под углом не более 15° с помощью фторопластовых кембриков, обеспечивающих необходимую гибкость волокна и, как следствие, защиту от механических повреждений в зоне ввода/вывода. Формование углепластика проводили в автоклаве с максимальной температурой нагрева не более 180 °С и удельным давлением не более 0,7 МПа. Образцы были испытаны на растяжение при одновременном воздействии изменяющейся температуры. Полученная точность измерения температуры и деформации составила 2,6—3,8 °С и 50—83 мк соответственно. При этом рассматривались диапазоны 30—120 °С и 0—400 мк [30]. Установлено, что варьируя типы волокон с различной чувствительностью к деформации и температуре, можно добиться необходимой точности контроля.

Еще одним методом разделения деформационной и температурной составляющих отклика является применение кварцевого и полимерного ВС с ВБР, соединенных специальным коннектором [31]. При таком способе обеспечивается хорошее различие чувствительности ВОД к температуре и нагрузке. В [32] приведены результаты измерения отклика ВБР, сформированной в одномодовом фоточувствительном волокне из полиметилметакрилата (ПВБР), в сравнении со стандартным кварцевым волокном (на рис. 3 обозначено как ВБР).

Измерения проводили на:

- температуру (в диапазоне 25—45 °С) для случаев свободной ВБР и ВБР, интегрированной в ПКМ на основе стеклянного армирующего наполнителя и полиэфирной матрицы;
- удлинение при изгибе (в диапазоне 0—2,5 мм, ~ 2000 мк) для ВБР в составе ПКМ.

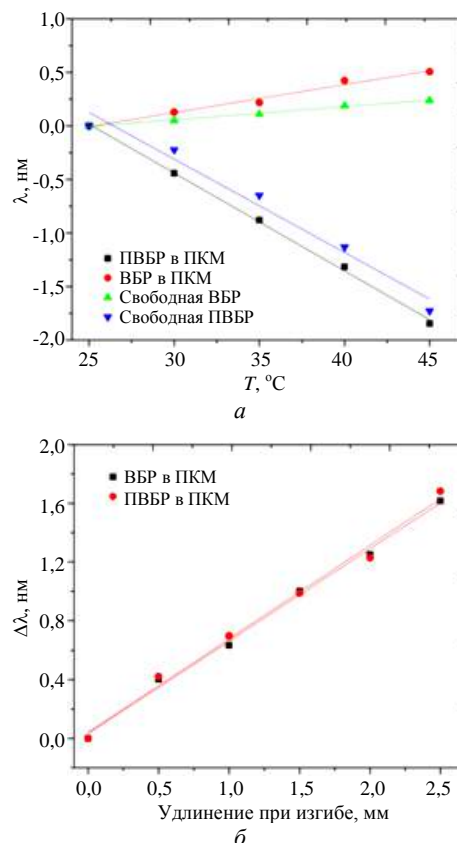


Рис. 3. Относительное смещение брэгговской длины волны для ПВБР и ВБР от:

а — температурного воздействия; б — механической нагрузки

Из рис. 3 видно, что чувствительность к удлинению ПВБР в полиметилметакрилате равна 1,3 пм/мк, в то время как для ВБР в кварцевом волокне обычно составляет 1,2 пм/мк. Температурная чувствительность ПВБР и ВБР равна 90,0 пм/°С и 11,2 пм/°С соответственно. Однако низкая термостойкость (обычно не более 80 °С) неприемлема при применении подобных волокон для интеграции в ПКМ, так как средняя температура формования ПКМ составляет примерно 170—180 °С. Данную проблему можно нивелировать, применяя специальные полимерные ВС с необходимой рабочей температурой.

Кроме того, существуют способы разделения деформации и температуры, основанные на использовании в качестве ВОД комбинации двух чувствительных элементов различного типа. К таким гибридным датчикам относятся ВОД на основе ДПВР и ВБР, ВБР и интерферометра Фабри-Перо, ВБР и интерферометра Маха-Цендера, ДПВР и интерферометра Фабри-Перо и т. д. Главный недостаток ВОД гибридного типа — сложность процессов изготовления и опроса.

Отметим, что для создания волоконно-оптических систем одновременного контроля деформации и температуры ПКМ и конструкций на их основе наиболее целесообразно применять метод двух волокон, который позволяет, варьируя типы воло-

кон, обеспечить необходимый уровень достоверности результатов контроля.

Распределенные волоконно-оптические датчики. С точки зрения возможности практической реализации двухпараметрического контроля конструкций из ПКМ целесообразно использовать распределенные системы [33], основанные на Brillouinovском рассеянии света. Рассеяние света Мандельштама–Бриллюэна происходит на акустических колебаниях среды и сопровождается изменением набора частот в излучении. Для спонтанно рассеянного света в спектре появляются дополнительные пики, отстоящие от частоты накачки ν_0 на Brillouinovскую частоту $\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda}$. При вынуж-

денном рассеянии слабый сигнал усиливается в случае, если он расположен ниже частоты накачки на значение Brillouinovской частоты. Волны накачки и сигнала интерферируют друг с другом, образуя бегущую волну биения, которая в результате электрострикции вызывает периодические флуктуации вещества и, как следствие, бегущую брэгговскую решетку с частотой $\nu_B = 2n \frac{V_a}{\lambda_0} \sin \frac{\theta}{2}$

[34]. На этой решетке происходит дифракция волны накачки (рис. 4), причем в результате эффекта Доплера происходит сдвиг частоты на ν_B , прибавляясь таким образом к волне сигнала и усиливая эффект.

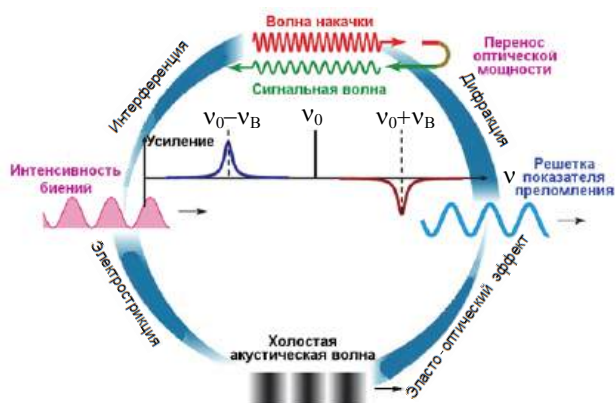


Рис. 4. Схема рассеяния Мандельштама–Бриллюэна

Методы одновременного контроля деформации и температуры на основе эффекта Мандельштама–Бриллюэна можно представить в виде схемы (рис. 5).

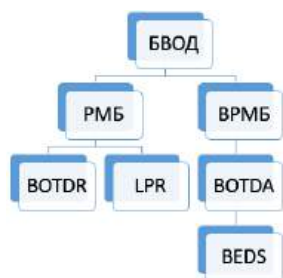


Рис. 5. Классификация методов одновременного контроля деформации и температуры на основе эффекта Мандельштама–Бриллюэна

На рис. 5 БВОД — бриллюэновский волоконно-оптический датчик, РМБ — рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, ВРМБ — вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) — рефлектометрия бриллюэновского рассеяния во временной развертке, LPR (Landau Placzek Ratio) — соотношение Ландау–Плачека, BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) — анализ бриллюэновского рассеяния во временной развертке, Brillouin Echo Distributed Sensing (BEDS) — распределенный сенсор на бриллюэновском эхе.

Определение деформации и температуры основано на измерении двух независимых параметров. Для стандартных телекоммуникационных одномодовых кварцевых волокон в качестве таких параметров могут выступать, например, сдвиг бриллюэновской частоты [35] и мощность бриллюэновского рассеяния.

Еще один метод состоит в использовании одномодовых LEAF-волокон со смещенной ненулевой дисперсией NZ-DSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber). Одновременное определение деформации и температуры может осуществляться за счет анализа значений акустических резонансных пиков различного порядка в спектре бриллюэновского рассеяния. Однако данный метод требует модификации алгоритма поиска пиков бриллюэновского рассеяния, что может оказаться невыполнимым при использовании коммерческо-доступного оборудования, например фирм Omnisces SA (Швейцария), OZ Optics (Канада), Yokogawa (Япония).

В двулучепреломляющих волокнах одним из параметров является сдвиг бриллюэновской частоты, второй параметр, также имеющий зависимость от деформации и температуры, — девиация частоты у-поляризованного света на величину частоты х-поляризованного света.

Кроме того, существуют механизмы разделения температуры и деформации, опирающиеся на анализ сигнала обратного рэлеевского рассеяния, а также комплексный анализ сигнала бриллюэновского и рэлеевского рассеяний, в том числе с использованием соотношения Ландау–Плачека [36], бриллюэновского и рамановского рассеяний, распространяющихся в одномодовых волокнах и в оптических волокнах, сохраняющих состояние поляризации.

Следует отметить, что применение комплексного анализа сопряжено со значительными трудностями, связанными со сложностью создания требуемой системы опроса распределенных сенсоров и последующей обработки данных. Вместе с тем, как и в случае точечных и квазираспределенных ВОД, наиболее простым с точки зрения потенциальной реализации контроля ПКМ и досто-

верности получаемых результатов является применение метода двух волокон с различными легирующими добавками и, как следствие, различной чувствительностью к деформации и температуре либо к одному из этих параметров. Дополнительным преимуществом такого метода служит отсутствие необходимости корректировки встроенных алгоритмов работы коммерческо-доступного оборудования.

Выводы

Применение современных методов одновременного контроля деформации и температуры с использованием точечных, квазираспределенных и распределенных ВОД открывает новые возможности в области контроля технического состояния высоконагруженных и ответственных конструкций из ПКМ различного назначения.

В качестве точечного ВОД, основываясь на простоте реализации системы опроса и процессов обработки данных, оптимально использовать две близко расположенные ВБР с различной чувствительностью к температуре и механической деформации либо к одному из этих параметров, а в качестве квазираспределенного сенсора — массив точечных ВОД.

Применительно к распределенным ВОД наиболее простым способом является определение бриллюэновских сдвигов частот двух сваренных между собой разнолегированных оптических волокон. Оптимальными механизмами для стандартного одномодового волокна являются совместное определение бриллюэновского сдвига частоты с мощностью бриллюэновского рассеяния или со сдвигом центральной длины волны рэлеевского рассеяния, линейно зависящих от деформации и температуры, либо используя соотношение Ландау–Плачека.

Адаптация описанных методов под условия эксплуатации конкретных конструкций из ПКМ позволит скорректировать методику и получать детальную информацию о действующих нагрузках, возникающих в материале конструкции при одновременных механических и температурных воздействиях, прогнозировать работоспособность отдельных ее частей, информировать о необходимости их ремонта или замены и в конечном итоге перейти от эксплуатации по заданному ресурсу к эксплуатации по фактическому техническому состоянию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов Б. Б., Филатов А. А. Эффективное применение полимерных композиционных материалов при изготовлении современных и перспективных изделий авиационной техники: мат. научн.-техн. конф. "Полимерные композицион-

ные материалы и производственные технологии нового поколения", 2016. С. 8.

2. Гуняева А. Г., Раскутин А. Е., Гуляев И. Н., Сидорина А. И., Мишкин С. И. Полимерные композиционные материалы нового поколения для авиационной, электротехнической и строительной промышленности: сб. докл. II Межд. научн.-техн. конф. "Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья — основа инновационного развития экономики России". 2017. С. 7.

3. Кульков А. А., Будадин О. Н. Диагностика качества изделий из полимерных композиционных материалов в процессе одноосного силового нагружения на основе анализа динамических температурных полей // Конструкции из композиционных материалов. 2017. № 1 (145). С. 64—72.

4. Бойчук А. С., Генералов А. С., Далин М. А., Диков И. А. Контроль монолитных деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, ультразвуковым методом неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток: сб. тр. X Всероссийской конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов "ТестМат". — ФГУП "ВИАМ", 2018. С. 18—31. <https://conf.viam.ru/conf/270/proceedings>

5. Федотов М. Ю. Развитие технологии оптического контроля конструкций из ПКМ волоконно-оптическими датчиками: автореферат дис. ... канд. тех. наук. — М., 2019. — 24 с.

6. Raymond M. Measures Structural Monitoring with Fiber Optic Technology [Электронный ресурс]. URL: <http://bookre.org/avtory?name=Raymond%20M.%20Measures> (дата обращения: 10.02.2020).

7. Резников В. А., Махсидов В. В., Гуляев И. Н. Современное состояние методов определения деформации материала с помощью интегрированных в его структуру волоконных брэгговских решеток // Контроль. Диагностика. 2015. № 11. С. 49—56.

8. Сорокин К. В., Мурашов В. В. Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 3 (36). С. 90—94.

9. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. — М.: Физматлит, 2001. — 272 с.

10. Juarez J. C., Maier E. W., Choi K. N., Taylor H. F. Distributed fiber optic intrusion sensor system // J. Lightwave Technology. 2005. V. 23. № 6. P. 2081.

11. Shatalin S. V., Treschikov V. N., Rogers A. J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing // Applied Optics. 1998. V. 37. № 24. P. 5600—5604.

12. Волоконно-оптические датчики распределения деформации и температуры (DSTS) [Электронный ресурс]. URL: https://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0115RU.pdf (дата обращения: 10.02.2020).

13. Dakin J. P., Pratt D. J., Bibby G. W., Ross J. N. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector // Electronics Letters. 1985. V. 21. № 13. P. 569—570.

14. Juškaitis R., Mamedov A. M., Potapov V. T., Shatalin S. V. Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber // Optics Letters. 1994. V. 19. № 3. P. 225—227.

15. Mulle M., Zitoun R., Collombet F., Olivier P., Grunvald Y. H. Thermal expansion of carbon-epoxy laminates measured with embedded FBGS-Comparison with other experimental techniques and numerical simulation // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007. № 38 (5). P. 1414—1424.

16. Echevarria J., Quintela A., Jauregui C., Lopez-Higuera J. M. Uniform fibre Bragg grating first-and-second-order diffraction wavelength experimental characterization for strain-temperature discrimination // IEEE Photonics Technology Letters. 2001. № 13 (7). P. 696—698.

17. Yam S. P., Brodzeli Z., Wade S. A., Baxter G. W., Collins S. F. Use of first-order diffraction wavelengths corresponding to dual-grating periodicities in a single fibre Bragg grating for simultaneous temperature and strain measurement // Measurement

Science and Technology. 2009. V. 20. № 3. P. 034008.

18. **Fraza O., Melo M., Marques P. V. S., Santos J. L.** Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain-temperature discrimination // *Measurement Science and Technology*. 2005. № 16. P. 984—988.

19. **Kim S., Kwon J., Kim S., Lee B.** Temperature-independent strain sensor using a chirped grating partially embedded in a glass tube // *IEEE Photonics Technology Lett.* 2000. № 12—6. P. 678—680.

20. **Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Божков А. С., Курков А. С., Дианов Е. М.** Волоконные решетки показателя преломления и их применения // *Квант. электроника*. 2005. № 35—12. С. 1085—1103.

21. **Chehura E., James S. W., Tatam R. P.** Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating // *Optics communications*. 2007. № 275. P. 344—347.

22. **Guan B. O., Tam H. Y., Tao X. M., Dong X. Y.** Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating // *IEEE Photonics Technology Lett.* 2000. № 12—6. P. 675—677.

23. **Demirel M., Robert L., Molimard J., Vautrin A., Orteu J.-J.** Strain and temperature discrimination and measurement using superimposed fiber Bragg grating sensor: proc. of the International Conference on Experimental Mechanics. 2007. P. 639—640.

24. **Xu M. G., Archambault J.-L., Reekie L., Dakin J. P.** Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors // *Electronics Lett.* 1994. № 30—13. P. 1085—1087.

25. **James S. W., Dockney M. L., Tatam R. P.** Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors // *Electronic Lett.* 1996. № 32—12. P. 1133—1134.

26. **Cavaleiro P. M., Araujo F. M., Ferreira L. A., Santos J. L., Farahi F.** Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in germanosilicate and boron-codoped germanosilicate fibers // *IEEE Photonics Technology Lett.* 1999. № 11. P. 1635—1637.

27. **Guan B.-O., Tam H.-Y., Ho S.-L., Chung W.-H., Dong X.-Y.** Simultaneous strain and temperature measurement using a single fibre Bragg grating // *Electron. Lett.* 2000. № 36—12. P. 1018—1019.

28. **Yoon H.-J., Costantini D. M., Michaud V., Limberger H. G., Manson A., Salathe R. P.** In-situ simultaneous strain

and temperature measurement of adaptive composite materials using a fiber Bragg grating based sensor // *Proc. of SPIE*. 2005. № 5758. P. 62—69.

29. **Terentyev V. S., Kharenko D. S., Dostovalov A. V., Wolf A. A., Simonov V. A., Babin S. A., Fedotov M. Yu., Shienok A. M., Shishkin V. V., Shelemba I. S.** Fiber-optic sensors based on FBGs with increased sensitivity difference embedded in polymer composite material for separate strain and temperature measurements: Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction "Transforming the Future of Infrastructure through Smarter Information". ICSIC 2016. 2016. P. 75—79.

30. **Shishkin V. V., Terentyev V. S., Kharenko D. S., Dostovalov A. V., Wolf A. A., Simonov V. A., Babin S. A., Shelemba I. S., Fedotov M. Yu., Shienok A. M.** Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femto-second-inscribed FBGs // *J. Sensors*. 2016. V. 2016. — 6 p. <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/3230968/>

31. **Liu H. B., Liu H. Y., Peng G. D., Chu P. L.** Strain and temperature sensor using a combination of polymer and silica fibre Bragg gratings // *Optics Communications*. 2003. № 219. P. 139—142.

32. **Rajan G., Ramakrishnan M., Semenova Y., Ambikairajah E., Farrell G., Peng G.** Experimental study and analysis of a polymer fibre Bragg grating embedded in a composite material // *J. Lightwave Technology*. 2014. V. 32 (9). P. 1726—1733.

33. **Гончаров В. А., Федотов М. Ю., Шиенок А. М., Юшин Д. В.** Распределенные оптоволоконные сенсоры для контроля напряженно-температурного состояния конструкций // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 1 (85). С. 73—79.

34. **Boh Ruffin A.** Stimulated Brillouin Scattering: An Overview of Measurements, System Impairments, and Applications [Электронный ресурс]. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/309651/stimulated-brillouin-scattering-an-overview-of-measurements-> (дата обращения: 10.02.2020).

35. **Thévenaz L.** Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/41146107_Brillouin_distributed_time-domain_sensing_in_optical_fibers_State_of_the_art_and_perspectives (дата обращения: 10.02.2020).

36. **Wait P. C., Newson T. P.** Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing // *Optics Communications*. 1996. V. 122. P. 141—146.

Methods of the simultaneous monitoring the deformation and temperature of composite structures by fiber-optic sensors

M. Yu. FEDOTOV

Russian Engineering Academy, Moscow, Russia

O. N. BUDADIN, S. O. KOZELSKAYA

Joint Stock Company "Central Research Institute for Special Machinery", Khotkovo, Moscow region, Russia

V. S. TERENCEV

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

This article describes the possibilities of application fiber-optic sensors (FOS), which allow to control the quality of structures made of polymer composite materials (PCM) simultaneously by two parameters — deformation and temperature. It has been established that the most technologically advanced use of point, quasi-distributed and distributed fiber-optic sensors based on multi-doped fibers with different deformation and temperature sensitivity. Adaptation of existing methods of optical non-destructive testing to specific products and operating conditions allow to provide the quality of control and safety of operation of composite structures.

Keywords: non-destructive testing, polymer composite material, fiber optic sensor, strain, temperature.

УДК 620.179.18

Особенности технологии оптического неразрушающего контроля композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками

М. Ю. ФЕДОТОВ, канд. техн. наук
Российская инженерная академия, Москва, Россия

О. Н. БУДАДИН, д-р техн. наук; С. О. КОЗЕЛЬСКАЯ, канд. техн. наук
АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»,
г. Хотьково, Московская обл., Россия

Приведены теоретические и экспериментальные исследования, подтверждающие возможность применения линейной модели для обработки данных от волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) при неразрушающем контроле (НК) полимерных композиционных материалов (ПКМ). Рассмотрены технологические аспекты создания системы встроенного контроля ПКМ: взаимодействие системы ВОД—ПКМ, влияние технологических режимов изготовления ПКМ, теплового и тепловлажностного старения на работоспособность ВОД, влияние интеграции ВОД в ПКМ, изготавливаемые автоклавным методом и методом вакуумной инфузии, на их механические свойства. Предложена усовершенствованная технология контроля ПКМ с помощью интегрированных ВОД, показаны возможности контроля статических и динамических нагрузок.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, полимерный композиционный материал, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, технология оптического неразрушающего контроля.

Развитие методов и средств НК и диагностики связано с необходимостью обеспечения безопасности конструкций различного назначения. Широкое применение слоистых ПКМ, особенно для сложных пространственных структур, технологически позволяет создавать интегрированные в конструкцию при ее изготовлении системы диагностики, имеющие возможность непрерывно регистрировать величины действующих нагрузок в процессе эксплуатации конструкций из ПКМ [1, 2]. В перспективе такой подход позволит перейти от эксплуатации конструкции по заданному ресурсу к эксплуатации по фактическому техническому состоянию. Наиболее оптимальными с точки зрения интеграции в ПКМ являются ВОД на основе ВБР, имеющие малые геометрические размеры и массу, широкий диапазон измерения деформаций, высокую точность определения деформации и температуры, электромагнитную совместимость с радиоэлектронной аппаратурой, стойкость к агрессивным средам и коррозии, мультиплексируемость, совместимость с компонентами ПКМ при интеграции, возможность контроля крупногабаритных и протяженных объектов.

Цель работы — исследование проблемы встраивания ВОД в ПКМ, в том числе изучение технологических аспектов создания системы встроенного контроля в едином технологическом цикле производства и методических вопросов интерпретации данных контроля.

Теоретические аспекты контроля композитных конструкций с помощью волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брэгговских решеток

В целях совершенствования технологии контроля, а также минимизации количества экспериментов, проведение которых не всегда возможно и целесообразно экономически, доработана математическая модель, описывающая процесс контроля конструкции из ПКМ с применением ВОД как связь исходных физических параметров, регистрируемых ВОД (резонансная длина волны ВБР), и конечных характеристик (деформация и температура материала конструкции).

Для ВБР взаимодействие основной моды волоконного световода (ВС) с модой, распространяющейся в противоположном направлении, осуществляется при условии фазового синхронизма. Для первого порядка взаимодействия справедливо соотношение

$$\lambda_B = 2n_{\text{ef}} \Lambda, \quad (1)$$

где λ_B — резонансная длина волны ВБР, нм;

n_{ef} — эффективный показатель преломления сердцевины ВС;

Λ — период ВБР, нм.

Федотов Михаил Юрьевич, академический советник.

E-mail: fedotovmyu@gmail.com

Будадин Олег Николаевич, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: oleg.budadin@yandex.ru

Козельская Софья Олеговна, старший научный сотрудник.

E-mail: kozelskaya.sofik1977@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2020 г.

© Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О., 2020

В общем случае λ_B , n_{ef} , Λ являются функциями механического напряжения и температуры.

Разложим (1) в ряд Тейлора, предположив, что зависимость изменения λ_B носит линейный характер. Применяв закон Гука, получим

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T, \quad (2)$$

где K_ε — коэффициент чувствительности ВОД к деформациям, зависящий от упруго-оптических свойств ВС (коэффициент Пуассона, коэффициенты Поккельса упруго-оптического тензора, эффективный показатель преломления);

K_T — коэффициент чувствительности ВОД к температуре, зависящий от термооптических свойств ВС (термооптический коэффициент, коэффициент линейного температурного расширения—КЛТР).

В литературе [3, 4] для кварцевых ВС $K_\varepsilon = 0,78 \mu\varepsilon^{-1}$, $K_T = 6,67 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. При интеграции в ПКМ эти значения могут варьироваться.

Абсолютная чувствительность ВОД к деформации составляет 1 пм/ $\mu\varepsilon$, к температуре — 10 пм/К, а с учетом чувствительности спектрального оборудования к изменению длин волн 1 пм может быть достигнута точность измерения относительной деформации 1 $\mu\varepsilon$ (1 $\mu\varepsilon = 1$ мкм/м = $1 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. = $1 \cdot 10^{-4}$ %), температуры — 0,1 К.

Сравнение экспериментального значения K_ε (0,76 $\mu\varepsilon^{-1}$), полученного на образцах из углепластика на основе однонаправленной углеродной ткани Porcher 14535 и клеевого эпоксидного связующего ВСК-14-3, изготавливаемого методом автоклавного формования, с теоретическим (0,75 $\mu\varepsilon^{-1}$) показывает, что сходимость результатов составляет более 97 %.

Оценка достоверности модели на образцах из углепластика на основе однонаправленной углеродной ленты 10524 24К и эпоксидного связующего Т67, изготавливаемого методом вакуумной инфузии, путем калибровки ВОД по показаниям тензодатчиков продемонстрировала, что применение калибровки позволяет уточнить фактическое значение K_ε и уменьшить погрешность измерения относительной деформации в 5—7 раз.

Технологические аспекты создания системы контроля композитных конструкций интегрированными волоконно-оптическими датчиками

Важным аспектом при создании интегрированной в ПКМ системы контроля является изучение

взаимодействия ВОД с компонентами ПКМ [5]. Проблема осложняется тем, что при изготовлении конструкций из композитов процесс создания материала осуществляется в едином технологическом цикле с процессом создания конструкции.

Для изучения границы раздела ВОД—ПКМ на растровом электронном микроскопе JSM-840 (фирма JEOL, Япония) проведены исследования микроструктуры шлифов углепластика на основе среднемодульного углеродного жгута IMS65 24К и эпоксидного связующего ВСЭ-1212 в зоне ВОД (рис. 1).

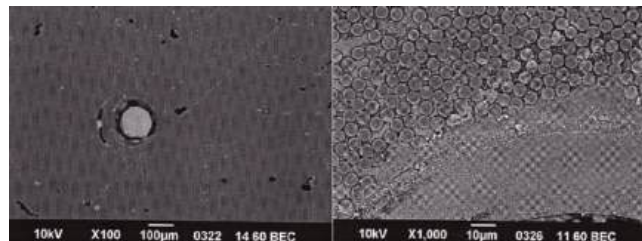


Рис. 1. Микроструктура углепластика в зоне волоконно-оптического датчика

Из рис. 1 видно, что матрица ПКМ плотно прилегает к ВОД. В ряде случаев наблюдаются поры, однако их количество не превышает количество пор в образцах без ВОД, а их наличие связано с травлением шлифов. Защитная полимерная оболочка ВОД имеет слоистую структуру. По данным термогравиметрического анализа, активное разложение оболочки начинается при температуре выше 300 °С, что говорит о целесообразности использования ВОД в акрилатном покрытии для создания систем встроенного контроля и диагностики ПКМ. При испытаниях на выдергивание ВС из блока в ряде случаев возможно возникновение микропроскальзывания на границе раздела ВОД—ПКМ. Однако данный факт не сказывается на качестве измерений, т. к. это приводит к незначительной корректировке коэффициента K_ε , определяемого экспериментально для конкретного ПКМ.

Исследовано влияние технологических режимов изготовления углепластика на основе однонаправленной углеродной ленты ЭЛУР-П и эпоксидного связующего ЭНФБ-2М (180 °С; 0,7 МПа) на оптические характеристики и работоспособность ВОД. Экспериментально установлено, что все ВОД сохраняют работоспособность. При этом значение λ_B уменьшается не более чем на 0,24 нм, что обусловлено разностью КЛТР волоконного световода и ПКМ, приводящей к продольному сжатию ВБР в ПКМ при его остывании. Значения коэффициента отражения и ширины спектра на полувысоте остаются неизменными. Исследования влияния теплового и тепловлажностного старения

на оптические характеристики ВОД, интегрированных в данный углепластик, показали, что значения λ_B в среднем изменились на 0,02 нм, коэффициент отражения — не более чем на 0,75 %, ширина спектра на полувысоте не изменилась. Таким образом, режимы изготовления ПКМ и эксплуатационные факторы не влияют на интегрированную волоконно-оптическую систему контроля, что позволяет использовать ВОД в качестве эффективного инструмента контроля технического состояния конструкций.

Исследования по оценке влияния ВОД на механические свойства ПКМ при интеграции проведены на образцах из углепластиков ЭЛУР-П/ЭНФБ-2М и Tenax E-Style 450/BCЭ-21 на основе равнопрочной углеродной ткани и эпоксидного связующего, изготавливаемых автоклавным методом и методом вакуумной инфузии соответственно. Установлено, что значения предела прочности при растяжении и сжатии углепластиков с однонаправленной и квазиизотропной укладкой (как без ВОД, так и с ВОД) лежат в пределах разброса свойств не более 9 %.

Контроль статических и динамических нагрузок на композитные конструкции интегрированными волоконно-оптическими датчиками

На образцах из углепластиков Porcher 3338/ЭНФБ-2М, Porcher 3338/BC-2526к (на основе клеевого связующего), Porcher 3338/BC-36РТ-140 (на основе клеевого пленочного связующего) проведены исследования по контролю ударных воздействий различной интенсивности с помощью интегрированных ВОД (рис. 2, а). Относительная деформация ПКМ в диапазоне удельных энергий от 2 до 10 Дж/мм составила не более 0,3 % при сохранении работоспособности ВОД в 93 % случаев. После окончания ударного воздействия часть резонансных длин волн возвратились в исходное состояние, что говорит об обратимых деформациях в зоне локализации ВБР, сохранении чувствительности и линейности показаний ВБР, а также о хорошей адгезии на границе раздела ПКМ—ВС, обеспечивающей совместную работу ВС с полимерной матрицей и армирующим наполнителем в структуре ПКМ, что характерно для энергий малой интенсивности (до 3 Дж/мм). Остальные резонансные длины волн частично возвратилась в исходное состояние, характеризуя возникновение дефектов в зоне удара, что подтверждено результатами ультразвукового НК. Экспериментально установлено, что в указанном диапазоне удельных энергий ПКМ зона чувствительности ВОД к удару составляет 120—150 мм в зависимости от места

расположения ВОД. Испытания образцов из углепластиков на растяжение (рис. 2, б), сжатие, сжатие после удара, при длительных нагрузках (до 1000 ч) показали, что ВОД фиксируют равномерное нагружение. При этом линейность показаний сохраняется вплоть до разрушения образцов, что говорит о работоспособности и стабильности системы встроенного контроля во всем диапазоне работы ПКМ.

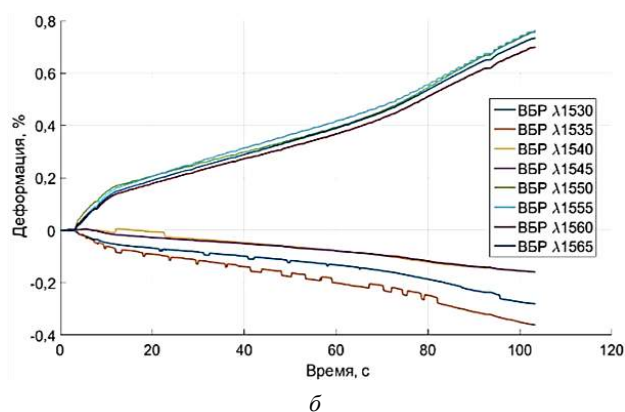
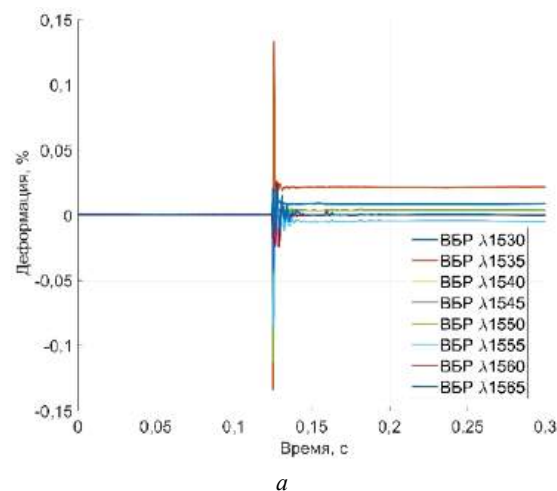


Рис. 2. Временная зависимость деформации при испытаниях на удар (а) и растяжение/сжатие (б)

Циклические испытания (малоцикловая усталость на базе 10^4 циклов, ресурс на базе 10^5 циклов) показали, что наблюдается высокая повторяемость изменения длины волны ВБР от цикла к циклу, а также повторяемость изменения горизонтальных огибающих, характеризующих воспроизводимость данных от ВОД в процессе испытаний.

Выводы

Повышены качество и достоверность результатов НК ПКМ за счет совершенствования технологии контроля с применением оптимальных решений по интеграции ВОД в ПКМ.

Обобщена математическая модель, описывающая процесс контроля ПКМ с помощью ВОД, поз-

воляющая сократить количество дорогостоящих экспериментов и повысить экономическую эффективность технологии контроля.

По результатам исследования взаимодействия системы ВОД—ПКМ установлено, что ВОД на основе одномодовых кварцевых ВС типа SMF-28e с акрилатным защитным покрытием можно применять для создания систем встроенного контроля конструкций из ПКМ (температура переработки — до 180 °С, давление — до 0,7 МПа). При этом ВОД сохраняют работоспособность после воздействия технологических режимов формования ПКМ (180 °С; 0,7 МПа), теплового (1000 ч, 100 °С) и тепловлажностного старения (60 °С, 85 %), являясь эффективным инструментом контроля внешних статических и динамических механических воздействий.

Определены требования к размещению ВОД [6] в конструкциях из ПКМ исходя из используемых на практике схем армирования как регулярных зон, так и зон перехода конструкций летательных аппаратов. Установлено, что ВОД целесообразно размещать между слоями с одинаковым направлением армирования либо между одним слоем в направлении ВОД и одним слоем с другим направлением укладки, отличающимся не более чем на 45°, а также с учетом механической обработки конструкции во избежание возможного затухания отраженного сигнала вследствие резких перегибов и передавливания ВС слоями армиру-

ющего наполнителя. Вывод при этом необходимо осуществлять через поверхность под углом не более 20° с использованием защитной гибкой фторопластовой трубки, радиус перегиба ВС — не менее 30 мм. Выполнение данных требований позволит добиться того, что введение ВОД не повлияет на механические свойства ПКМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анискович В. А., Будадин О. Н., Заикина Н. Л., Кутюрин В. Ю. и др. Измерение деформаций с использованием волоконно-оптических датчиков в процессе прочностных испытаний анизотропных конструкций из композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2018. № 7. С. 44—49.
2. Nielsen M. W., Schmidt J. W., Høgh J. H. Life cycle strain monitoring in glass fibre reinforced polymer laminates using embedded fibre Bragg grating sensors from manufacturing to failure // J. Composite Materials. 2014. V. 48 (3). P. 365—381.
3. Kersey A., Davis M. A., Patrick H. J., LeBlanc M. et al. Fiber Grating Sensors // IEEE J. Lightwave Tech. 1997. V. LT-15. № 8. P. 1442—1463.
4. Morey W. W., Meltz G., Glenn W. H. Fiber Bragg grating sensors: Proc. SPIE Fiber Optic & Laser Sensors VII. 1989. V. 1169. P. 98.
5. Fedotov M. Yu., Shiyonok A. M., Mukhametov R. R., Gulyaev I. N. Research of interface of the polymer matrix with optical fibers in smart materials // Inorganic Materials. Applied Research. 2018. V. 9 (6). P. 1123—1131.
6. Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О. Развитие технологии оптического контроля конструкций из ПКМ волоконно-оптическими датчиками // Контроль. Диагностика. 2019. № 10 (256). С. 26—35.

Features of the technology of optical non-destructive testing of composite structures by fiber-optic sensors

M. Yu. FEDOTOV

Russian Engineering Academy, Moscow, Russia

O. N. BUDADIN, S. O. KOZELSKAYA

Joint Stock Company “Central Research Institute for Special Machinery”,
Khotkovo, Moscow region, Russia

This article describes theoretical and experimental researches confirming the possibility of application a linear model for processing of data from fiber-optic sensors (FOS) based on fiber Bragg gratings (FBG) for non-destructive testing (NDT) of polymer composite materials (PCM). The technological aspects of creating a built-in PCM testing system are considered: the interaction of the “FOS—PCM” system, the influence of technological processes for the production of PCM, thermal and heat-humidity aging on the performance of the FOS, the effect of the integration of FOS into PCM made by the autoclave method and the vacuum infusion method, on their mechanical properties. An improved PCM testing technology using integrated FOS is proposed, possibilities of testing static and dynamic loads are shown.

Keywords: non-destructive testing, polymer composite material, fiber optic sensor, fiber Bragg grating, optical non-destructive testing technology.

Конструкции из композиционных материалов: Межотр. науч.-техн. журн. / Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»; Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». 2020. Вып. 2 (158). С. 1—60.

Редактор ***О. А. Константинова***
Компьютерная верстка ***Н. В. Ильина, К. В. Трыкина***

Подписано в печать 26.05.2020. Формат 60х84 1/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,0, Уч.-изд. л. 7,2.
Тираж 250 экз. Заказ 1950. Свободная цена.
Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77,
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».
www.ntckompas.ru E-mail: izdanie@ntckompas.ru
Отпечатано в ООО "РАПИТОГРАФ".
117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 17Б.
Индекс 80089.

ПАМЯТИ АНДРЕЯ АНАТОЛЬЕВИЧА СМЕРДОВА

12.08.1958–15.03.2020



15 марта 2020 г. после тяжелой продолжительной болезни ушел из жизни Андрей Анатольевич Смердов, доктор технических наук, заведующий лабораторией СМ1-8 НИИСМ МГТУ им. Н. Э. Баумана, профессор кафедры СМ-1 МГТУ, член диссертационных советов МГТУ, член редакционной коллегии журнала "Конструкции из композиционных материалов", автор более 130 научных работ и изобретений в области механики тонкостенных конструкций из композиционных материалов.

Андрей Анатольевич Смердов в 1981 г. с отличием окончил МВТУ им. Н. Э. Баумана (кафедра М-1), был оставлен на кафедре младшим научным сотрудником и вскоре поступил в аспирантуру. В 1987 г. он защитил диссертацию и получил степень кандидата технических наук.

На протяжении четырех десятилетий Андрей Анатольевич оставался верен избранной профессии научного работника, прошел путь от младшего научного

сотрудника до заведующего лабораторией. Став заведующим лабораторией композитов СМ1-8 НИИСМ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Андрей Анатольевич продолжил работы своего предшественника П. А. Зиновьева в области расчетно-экспериментальных исследований композитных материалов и конструкций, а также в области оптимального проектирования.

Сотрудники лаборатории композитов всегда принимали участие в решении важных научных задач ракетно-космической и оборонной техники. Проводились совместные работы с ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, АО НПО им. С. А. Лавочкина, ОНПП "Технология" им. А. Г. Ромашина, АО "ЦИИСМ" и другими предприятиями отрасли, а работы с АО "Композит" по-прежнему продолжаются.

Андрей Анатольевич никогда не боялся трудностей, поступал решительно и смело при решении научно-производственных задач, всегда лично отвечал за взятые коллективом обязательства.

В 2007 г. Андрей Анатольевич защитил диссертацию на соискание степени доктора технических наук по специальности "Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов". Им опубликовано несколько учебных пособий, подготовлены и прочитаны учебные курсы по механике, а также по проектным расчетам конструкций из композиционных материалов.

Под руководством Андрея Анатольевича было выполнено и защищено много кандидатских диссертаций. Андрей Анатольевич был руководителем многих дипломных проектов, защищенных на кафедре СМ-1, его ученики работают в отечественной ракетно-космической отрасли нашей страны и в других странах.

Хочется отметить деятельную работу Андрея Анатольевича в редколлегии журнала "Конструкции из композиционных материалов", его активное участие в проведении конференций, семинаров по композиционным материалам, в наполнении журнала интересными научными статьями.

Андрей Анатольевич был смелым и мужественным человеком, всегда оставался оптимистом, очень любил путешествовать. Он был очень чутким, талантливым человеком, знал и любил музыку, живопись, имел прекрасный голос, радовал грузей исполнением песен, которых знал очень много.

Светлая память об Андрее Анатольевиче Смердове навсегда сохранится в памяти родных, грузей, коллег, учеников и всех, кто близко знал его.

*Редакционная коллегия журнала
"Конструкции из композиционных материалов"*

Правила для авторов по оформлению рукописей статей, предлагаемых к публикации в журналах

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной и электронной версиях журнала в сети Интернет. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в том числе "авторское право"). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи,
предоставляем редколлегии журнала и издателю ФГУП «НТЦ оборонного комплекса
«Компас»

.....
(название журнала)

безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: (ф.и.о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала.

Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

Каждая статья рецензируется в соответствии с решением редколлегии журнала. Рецензенты выбираются из числа ученых и специалистов, компетентных в вопросах, рассматриваемых в статье, и имеющих собственные публикации в данном направлении. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлгией с учетом мнения рецензентов. В случае разногласий среди членов редколлегии окончательное решение принимает главный редактор. При полном отклонении рукописи статьи от публикации редакция журнала направляет авторам мотивированный отказ. По этому факту редакция не вступает в полемику с авторами.

Комплектование статьи (обзора)

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в

Российской Федерации и других государствах. При отсутствии в организации экспертной комиссии вместо экспертного заключения может быть представлено соответствующее заявление на имя главного редактора журнала от имени руководства организации, где работают авторы. В экспертном заключении или заявлении в обязательном порядке должна быть отражена возможность открытой публикации и передачи публикуемых материалов за границу.

- лицензионный договор по приведенному образцу;
- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;
- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word.

Оформление статьи:

- статья начинается с указания УДК;
- название статьи набирается строчными буквами (кроме начальной прописной) полужирным шрифтом, размер шрифта 14, для остального текста используется простой шрифт размером 12, причем рекомендуемая гарнитура шрифта — Times New Roman;

- после названия — список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;
- с отступлением в 2 строки представляется аннотация статьи;
- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);
- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литературных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;
- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;
- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.
- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;
- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

Оформление рисунков:

- рисунки и графики вставляются непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе.
- рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только в символьной (буквенной) форме, а через запятую — размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только на

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

- подписи под соответствующими рисунками (полужирный курсивный) представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию.

Оформление формул:

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;
- стандартные математические обозначения (например, \max , \log , \sin , \exp и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;
- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);
- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;
- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $v_{\text{гр}}$ и т. п.
- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

Оформление таблицы:

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;
- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

Рисунки, формулы и таблицы должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания.

Авторы (или автор) каждой статьи после выхода журнала в свет имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).

БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2020 г.
на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Наименование издания	Индекс издания (количество выпусков в год)	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	79379 (4 вып.)	1550,00		
Конструкции из композиционных материалов	80089 (4 вып.)	1700,00		
Экология промышленного производства	80090 (4 вып.)	1500,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	79378 (4 вып.)	1750,00		
Вопросы защиты информации	79187 (4 вып.)	1750,00		
В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.				

Поставка журналов подписчикам через издательство осуществляется почтовыми бандеролями с приложением всех необходимых бухгалтерских документов.

Наши реквизиты:

Полное наименование организации: _____

Сокращенное наименование организации: _____

ИНН/КПП _____

ОКПО _____

Расчётный счёт № _____ в _____

к/с _____ БИК _____

Юридический адрес: _____

Почтовый адрес: _____

Контактное лицо _____ тел. _____

E-mail: _____

Справочно:

Заполненный бланк-заказ просьба отправить по факсу: 8(495) 491-44-80 или

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

Более подробную информацию об изданиях и подписке можно получить по телефону:

8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-20.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское шоссе, д.77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».