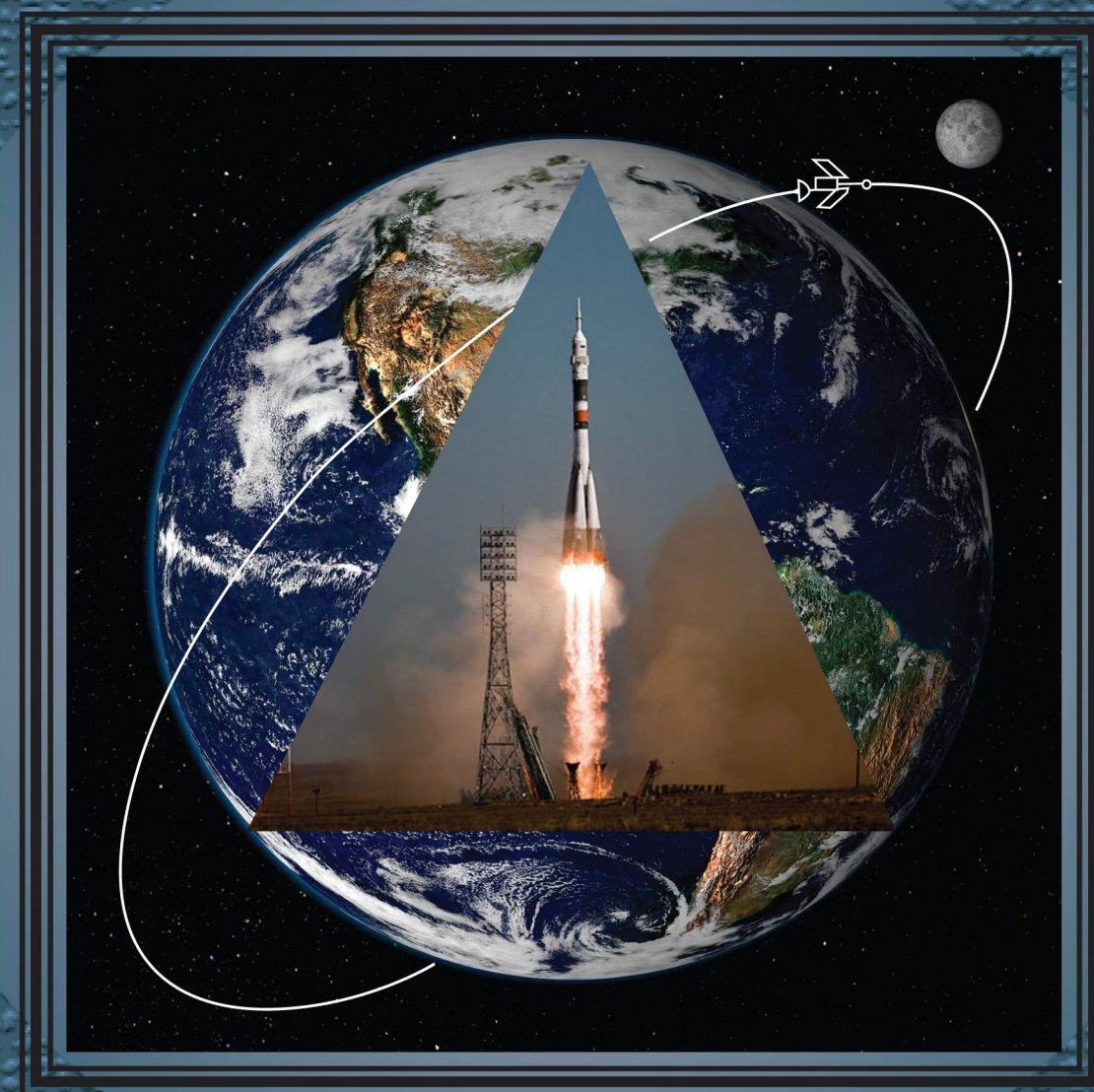


КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2



Москва 2023



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 науки и высшего образования 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: izdanie@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 (170)

Издается с 1981 г.

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

- Склезов А. А. Устойчивость лейнера цилиндрического
металлокомпозитного бака при осевом сжатии 3
- Евстафьев В. А., Бокучава П. Н. Расчет приведенных
жесткостных характеристик композитных сетчатых
цилиндрических оболочек с учетом изгибных и сдви-
говых деформаций ребер 8

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

- Титов В. А., Юранев О. А., Склезов А. А., Разин А. Ф.,
Бабичев А. А., Пшеничников И. В., Бородулин Д. А.
Проектирование и изготовление криогенных металло-
композитных топливных баков 12

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Лушпа Е. Ю., Костенко В. А., Кабаков В. В. Анализ про-
блем применения композиционных материалов для
ракетных двигателей на твердых топливах 21

- Дудкина С. И., Шилкина Л. А., Алешин В. А., Андрю-
шин К. П., Андрюшина И. Н., Вербенко И. А., Резни-
ченко Л. А. Композиционные сегнетоактивные матери-
алы, не содержащие свинец, для конструкций
оборонного комплекса 24

КЛЕИ, РЕЗИНЫ, ПОКРЫТИЯ И МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Калушев А. Н., Дубровин А. Ю., Калушев К. А. Примене-
ние новых материалов в горной промышленности 31

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

- Злобина И. В., Бекренев Н. В., Белоглазов А. П., Таиро-
ва Л. П. Влияние схемы армирования углепластика на
изменение физико-механических свойств при воздей-
ствии СВЧ электромагнитного поля 37

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

- Федотов М. Ю. Теоретические аспекты калибровки и
оценки погрешностей волоконно-оптической системы
диагностики полимерных композитов 43

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

Заместитель главного редактора Н. А. Тестоедов, акад. РАН, д-р техн. наук,
генеральный конструктор АО «ИСС»

Ответственный секретарь Е. И. Андреева,
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; **О. Н. Будадин**, д-р техн. наук, проф., АО «ЦНИИСК»; **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. Калаишиков**, 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; **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. 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»), 2023;
- © Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), 2023;
- © Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), 2023

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.3

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_2_3

END: AANDQVB

Устойчивость лайнера цилиндрического металлокомпозитного бака при осевом сжатии

А. А. СКЛЕЗНЕВ, канд. техн. наук

АО «Центр перспективных разработок», г. Хотьково, Московская обл., Россия

АО «Центральный НИИ специального машиностроения», г. Хотьково, Московская обл., Россия

Рассмотрен лайнер металлокомпозитного бака как изотропная цилиндрическая оболочка, находящаяся в жёсткой среде, моделирующей наружный композитный слой. Оболочка нагружена осевой сжимающей силой, которая может вызвать потерю устойчивости, сопровождающуюся изгибом оболочки во внутреннюю полость бака. При помощи уравнений нелинейной теории цилиндрических оболочек и метода Бубнова—Галёркина получено приближённое решение, определяющее предельную величину докритической деформации бака.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, устойчивость оболочки при осевом сжатии, устойчивость лайнера, металлокомпозитный бак.

Топливные баки транспортных систем представляют собой герметичные ёмкости, размещённые внутри транспортного средства посредством той или иной системы крепления, либо являются частью силовой конструкции корпуса, совмеща (или комбинируя) в себе две различных функции — хранение рабочего тела и восприятие внешних силовых нагрузок. В России и за рубежом в основном используют металлические баки различной конструкции [1]. В последнее время в открытой печати появляется информация о применении полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции баков. Так разработан криогенный композитный топливный бак с несущей стенкой бака для применения в верхней ступени SLS — сверхтяжёлой перспективной ракеты, США [2].

В данной конструкции применяют композитный герметизирующий лайнер, воспринимающий внутреннее давление, а силовая конструкция, воспринимающая осевую силу, представляет собой набор силовых элементов треугольного сечения.

Такая конструкция бака обладает рядом существенных недостатков, препятствующих широкому внедрению предлагаемой технологии: для изготовления гладкой внутренней оболочки бака используют крупногабаритную разборную металлическую оправку, стоимость которой, превышает

стоимость изготавливаемого изделия, а трудоёмкость сборки—разборки существенно повышает себестоимость и время изготовления баков; используется неавтоматизированная ручная сборка силовой оболочки бака из треугольных профилей, что также значительно увеличивает трудоёмкость изготовления конструкции бака; отсутствуют конструктивные и технологические решения по организации внутреннего конструктивного наполнения топливного бака. В используемых в настоящее время топливных баках имеются трубопроводы, перегородки, гасители колебаний топлива и другие детали из металлических сплавов, соединяемых сваркой с оболочкой бака. Сборку и наполнение предлагаемого бака затруднительно организовать при использовании внутренней композитной оболочки.

Указанные недостатки отсутствуют в предлагаемой конструкции топливного бака из ПКМ с металлическим герметизирующим лайнером и наружной композитной оболочкой [3, 4]. Композитная оболочка воспринимает основные эксплуатационные нагрузки и небольшое внутреннее давление, лайнер обеспечивает герметичность бака и воспринимает внутреннее давление. Кроме того, лайнер позволяет осуществлять крепление внутренних конструктивных элементов бака, а также служит неизвлекаемой оправкой для намотки в процессе изготовления бака. Эксплуатационные нагрузки могут быть приведены к эквивалентной осевой сжимающей силе, от действия которой в композитной стенке бака и в лайнере возникают сжимающие напряжения. Такие напряжения могут привести к потере устойчивости лайнера, приво-

Склезнев Андрей Анатольевич, ведущий инженер, старший научный сотрудник.

E-mail: skleznev@crism10.ru

Статья поступила в редакцию 30 января 2023 г.

© Склезнев А. А., 2023

дающей к его отслоению от наружной силовой композитной оболочки радиуса R (рис. 1).

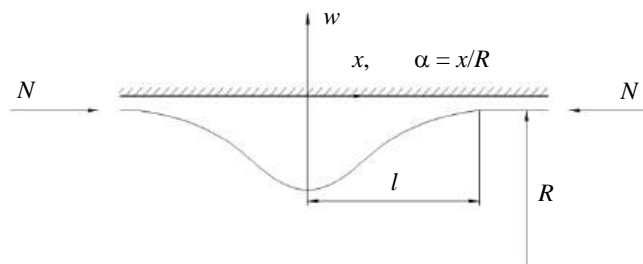


Рис. 1. Форма потери устойчивости лайнера композитного бака при действии осевой сжимающей силы

Решение рассматриваемой задачи автору неизвестно. В имеющихся работах рассматривается оболочка в виде стержня на упругом основании [5, 6] или воздействие наружного слоя на оболочку моделируется внешним давлением [7]. Решение аналогичной задачи для случая внешнего давления получено в работе [8].

Исходные уравнения

Будем считать композитный слой бака абсолютно жёстким по отношению к тонкому изотропному лайнеру, который сохраняет цилиндрическую форму до момента потери устойчивости лайнера. Рассмотрим отслоившийся участок оболочки (см. рис. 1). Действующие на рассматриваемом участке силы и перемещения показаны на рис. 2.

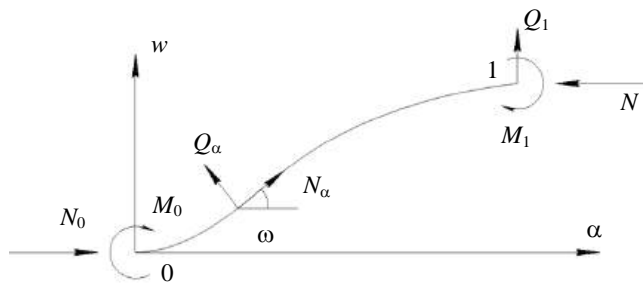


Рис. 2. Силы и перемещения на рассматриваемом участке лайнера

Рассмотрим участок 0–1 и запишем уравнение равновесия для проекции сил на ось α

$$N_0 = -N.$$

В промежуточной точке на участке 0–1 из этого же условия получим

$$N + N_\alpha - Q_\alpha \bar{w}' = 0,$$

откуда

$$N_\alpha = Q_\alpha \bar{w}' - N. \quad (1)$$

Уравнение равновесия для проекции сил, действующих на элемент оболочки, на её радиус запишем в форме

$$Q'_\alpha + (N_\alpha \bar{w}') - N_\beta = 0. \quad (2)$$

Уравнение моментов имеет вид

$$M'_\alpha - R Q_\alpha = 0. \quad (3)$$

Соотношения упругости запишем следующим образом

$$N_\alpha = \bar{E}h(\xi_\alpha + \nu \varepsilon_\beta), \quad N_\beta = \bar{E}h(\varepsilon_\beta + \nu \xi_\alpha), \quad (4)$$

$$M_\alpha = D \alpha_\alpha.$$

$$\text{Здесь } \bar{E} = E/(1 - \nu^2), \quad D = \bar{E}h^3/12,$$

где E — модуль упругости материала лайнера;

ν — коэффициент Пуассона;

h — толщина лайнера.

Геометрические соотношения имеют вид

$$\xi_\alpha = \varepsilon_\alpha + \frac{\omega^2}{2} = \frac{1}{R} \frac{du}{d\alpha} + \frac{1}{2} (\bar{w}')^2 = \bar{u}' + \frac{1}{2} (\bar{w}')^2, \quad (5)$$

где $\bar{u} = u/R$ и $\bar{w} = w/R$,

$$\varepsilon_\beta = \bar{w}, \quad \alpha_\alpha = \frac{\omega'}{R}, \quad \omega = -\bar{w}'. \quad (6)$$

В уравнениях (1)–(6) N , Q , M — осевое усилие, поперечное усилие и изгибающий момент, действующие в осевом (α) и кольцевом (β) направлениях. Их положительные направления (см. рис. 2), u , w — осевое перемещение и прогиб, направленный по наружной нормали, ω — угол поворота нормали к поверхности оболочки, $(\cdot)' = d(\cdot)/d\alpha$. Уравнения (4)–(6) соответствуют бесконечно длинной цилиндрической оболочке.

Вывод нелинейного уравнения

Рассмотрим соотношения упругости. Из первого уравнения (4) выразим деформацию

$$\xi_\alpha = \frac{N_\alpha}{\bar{E}h} - \nu \varepsilon_\beta.$$

С учётом соотношений (1) и (6) перепишем это выражение в виде

$$\xi_\alpha = \frac{Q_\alpha}{\bar{E}h} \bar{w}' - \frac{N}{\bar{E}h} - \nu \bar{w}.$$

Подставляя полученное соотношение во второе уравнение (4) получим усилие в кольцевом направлении в виде

$$N_\beta = \bar{E}h\bar{w} + \nu Q_\alpha \bar{w}' - \nu N. \quad (7)$$

Из уравнения моментов (3) выразим поперечную силу, и с помощью равенств (4) и (6) представим её в виде

$$Q_\alpha = \frac{M'_\alpha}{R} = -D \frac{\bar{w}'''}{R^2}. \quad (8)$$

Возвращаясь к уравнениям равновесия, рассмотрим уравнение (2). Подставляя в него выражения (8), (1) и (7) получим дифференциальное уравнение 4-го порядка относительно прогиба Лейнера

$$\begin{aligned} & \left(1 + (\bar{w}')^2\right) \bar{w}^{IV} + 2\bar{w}'\bar{w}''\bar{w}''' - \nu\bar{w}'\bar{w}''' + \\ & + \frac{\bar{E}hR^2}{D} \bar{w} + \frac{NR^2}{D} (\bar{w}'' - \nu) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Это уравнение имеет очевидное частное решение, вызванное эффектом Пуассона, т. е.

$$\bar{w}_p = \frac{\nu N}{\bar{E}h}.$$

Прогиб, соответствующий данному решению, не соответствует условиям решаемой задачи — наружный слой не позволяет оболочке деформироваться таким образом. Для того, чтобы исключить этот эффект, предположим, что наружный композитный слой обладает таким же коэффициентом Пуассона, что и внутренняя изотропная оболочка. Представим решение уравнения (9) в виде

$$\bar{w} = \bar{w}_p + f(\alpha). \quad (10)$$

Подставляя это решение в (9), получим

$$\begin{aligned} L(f) = & \left(1 + (f')^2\right) f^{IV} + 2ff'f''' + \\ & + 12r \left(f + \varepsilon(1 - \nu^2)f''\right) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь

$$r = \frac{R^2}{h^2}, \quad \varepsilon = \frac{N}{hE},$$

а неизвестными являются функция прогиба и деформация ε .

Определение критической деформации

Для приближённого решения уравнения (11) воспользуемся методом Бубнова—Галёркина [9], приняв искомую функцию прогиба в виде

$$f = f_0 + C_1\alpha^2 + C_2\alpha^4, \quad (12)$$

где f_0 — безразмерная амплитуда прогиба.

Запишем граничные условия рассматриваемой задачи. При $\alpha = 0$ имеем

$$f' = 0 \quad \text{и} \quad Q_\alpha = 0, \quad \text{т. е.} \quad f''' = 0.$$

При $\alpha = \bar{l} = l/R$, где l — длина полуволны зоны потери устойчивости (см. рис. 1), имеем $f = 0$ и $f' = 0$.

Удовлетворяя граничные условия, найдём константы интегрирования:

$$C_1 = -2\frac{f_0}{\bar{l}^2}, \quad C_2 = \frac{f_0}{\bar{l}^4}.$$

Таким образом, выражение (12) для прогиба принимает вид

$$f = f_0 \left(1 - \frac{\alpha^2}{\bar{l}^2} \left(2 - \frac{\alpha^2}{\bar{l}^2}\right)\right). \quad (13)$$

Согласно методу Бубнова-Галёркина запишем следующее уравнение для f_0 :

$$\int_0^{\bar{l}} L(f) \left(1 - \frac{\alpha^2}{\bar{l}^2} \left(2 - \frac{\alpha^2}{\bar{l}^2}\right)\right) d\alpha = 0. \quad (14)$$

В результате интегрирования получим

$$f_0^2 + \frac{11\bar{l}^2}{48} \left(r\bar{l}^2(\bar{l}^2 - 3\varepsilon(1 - \nu^2)) + \frac{21}{8}\right) = 0. \quad (15)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$f_0 = -\frac{\bar{l}}{48} \sqrt{1584\varepsilon\bar{l}^2r(1 - \nu^2) - 528\bar{l}^4r - 1386}.$$

Проанализируем полученное решение. Для выполнения условия существования действительного значения f_0 , необходимо потребовать, чтобы подкоренное выражение было неотрицательным, т. е.

$$1584\varepsilon\bar{l}^2r(1 - \nu^2) - 528\bar{l}^4r - 1386 \geq 0.$$

Преобразуя это неравенство, получим следующую зависимость относительно искомой деформации ε

$$\varepsilon \geq \frac{8\bar{l}^4r + 21}{24\bar{l}^2r(1 - \nu^2)}. \quad (16)$$

Для заданного параметра $r = R^2 / h^2$ можно построить зависимость деформации ε от длины полуволны \bar{l} (рис. 3).

Критическим является минимальное значение этой деформации, т. е. $\varepsilon_{cr} = \min(\varepsilon)$. Для тонкостенного лейнера при $R / h = 500$ и $\nu = 0,3$ получим $\varepsilon_{cr} = 0,23 \%$. На рис. 4 показан прогиб, определяемый согласно уравнению (13), для оболочки с отношением $R / h = 500$.

Для определения значения длины полуволны \bar{l} , соответствующего минимальному значению деформации, найдём экстремум функции деформации от \bar{l} , т. е. $d\varepsilon/d\bar{l} = 0$:

$$\frac{4\bar{l}}{3(1-\nu^2)} - \frac{8\bar{l}^4 r + 21}{12r\bar{l}^3(1-\nu^2)} = 0,$$

или

$$\bar{l}^4 = \frac{21}{8r}.$$

С помощью данного значения длины полуволны выражение (16) можно записать в окончательном виде

$$\varepsilon_{cr} = \frac{7}{\sqrt{42r}(1-\nu^2)}.$$

Заключение

В рамках нелинейной теории цилиндрических оболочек получено приближённое аналитическое решение, определяющее критическую величину осевой деформации при действии осевой силы, сжимающей цилиндрическую оболочку, находящуюся в жёсткой среде, моделирующей наружный композитный слой. Приведена приближённая формула для расчёта критической деформации, зависящей от радиуса оболочки и её толщины.

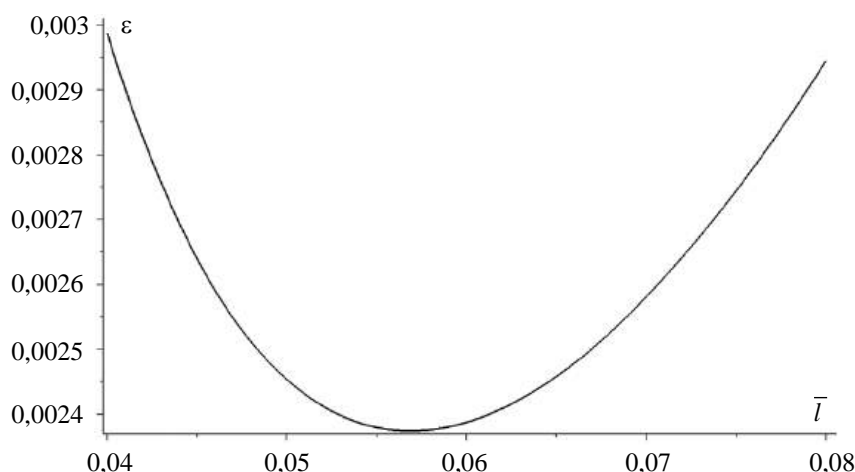


Рис. 3. Зависимость деформации ε от длины полуволны \bar{l} для $R / h = 500$

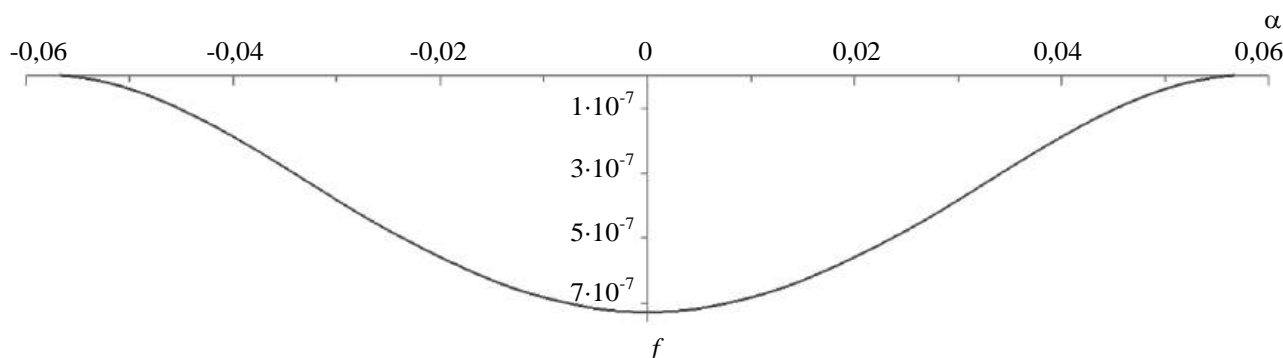


Рис. 4. Прогиб оболочки с $R / h = 500$ при критической деформации

ЛИТЕРАТУРА

1. Склезнев А. А. Обзор существующих конструктивных исполнений несущих топливных баков: Сб. тр. 19-й Междун. конф. "Авиация и космонавтика", Москва, 23—27 ноября 2020. — М.: Изд-во "Перо". 2020. С. 791—792.
2. McCarville D. A., Guzman J. C., Dillon A. K., Jackson J. R., Birkland J. O. Design, Manufacture and Test of Cryotank Components. Comprehensive Composite Materials II — Publ. house "Elsevier". 2018. V. 3. Ch. 3, 5. P. 153—179. Doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09958-6.
3. Васильев В. В., Разин А. Ф., Недайвода А. К. и др. Топливный бак летательного аппарата. Патент РФ № RU2157322. Заявл. 99123514/02 от 11.04.1999. Опубл. 10.10.2000. Бюл. № 28. Патентообладатель и заявитель: АО "ЦПР АО "ЦНИИСМ" и ГКНПЦ им. М. В. Хруничева.
4. Склезнев А. А. Проектирование композитного криогенного топливного бака с несущей сетчатой обечайкой: Сб. тр. 10-й Всерос. науч. конф. "Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред", Москва, 17—19 ноября 2020. — М.: ООО "Сам Полиграфист", 2020. С. 205—208. Doi: 10.33113/conf.mkmk.ras.2020.205_208.30.
5. Wilson W. N., Perkins T. K., Striegler J. H. Axial Buckling Stability of Cemented Pipe. — Society of Petroleum Engineers. 1979. — 7 p. Doi: 10.2118/8254-MS. January.
6. Rashidov T. R., An E. V. Geometrically Nonlinear Buckling Stability Analysis of Axially Loaded Underground Pipelines — Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2017. V. 52(2). P. 76—80.
7. Hobbs R. E. Pipeline buckling caused by axial loads // J. Construction Steel Research. Jan. 1981. P. 175—189.
8. Васильев В. В., Склезнев А. А. Устойчивость лейнера цилиндрического композитного баллона давления // Механика композиционных материалов и конструкций. 2022. Т. 28. № 2. С. 235—246.
9. Красносельский М. А., Вайникко Г. М., Забрейко П. П. и др. Приближённое решение операторных уравнений. — М.: Наука, 1969. — 456 с.

Liner stability of a cylindrical metal composite tank under the axial compressive load

A. A. SKLEZNEV

Center of Advanced Technologies, Khotkovo, Moscow region, Russia
Central Research Institute of Special Machinery, Khotkovo, Moscow region, Russia

The liner of a metal-composite tank is considered as an isotropic cylindrical shell located in a rigid environment modeling the outer composite layer. The shell is loaded with axial compressive force so that it can lose stability. Using equations of nonlinear theory of cylindrical shells and Bubnov-Galerkin method an approximate solution which specifies the critical compressive axial deformation of the shell is obtained.

Keywords: cylindrical shell, shell stability under axial load, liner stability, metal composite tank.

УДК 539.3

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_2_8

EDN: ACKUNC

Расчет приведенных жесткостных характеристик композитных сетчатых цилиндрических оболочек с учетом изгибных и сдвиговых деформаций ребер

В. А. ЕВСТАФЬЕВ, канд. техн. наук; П. Н. БОКУЧАВА
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Предложены формулы для определения некоторых приведенных жесткостных характеристик композитных цилиндрических сетчатых оболочек. Результаты получены путем аналитического решения системы уравнений равновесия элементарной ячейки сетчатой структуры, состоящей из трех конечных элементов. Предложенные соотношения позволяют повысить точность аналитических расчетов при проектировании композитных цилиндрических сетчатых оболочек.

Ключевые слова: сетчатые конструкции, композитные материалы, метод конечных элементов.

Сетчатые композитные конструкции, состоящие из спиральных и кольцевых ребер, обладают высокой степенью массового совершенства и находят широкое применение в авиакосмической технике: в качестве фюзеляжей самолетов, переходных отсеков ракет-носителей, несущих конструкций космических аппаратов и т. п. [1] (рис. 1). Для определения оптимальных геометрических параметров таких оболочек требуется проводить расчет их напряженно-деформированного состояния (НДС). Существует подход к расчету НДС [2], базирующийся на теории ортотропных оболочек, при котором система ребер заменяется на условно сплошную оболочку с приведенными жесткостными характеристиками — мембранными и изгибными жесткостями.

Однако зависимости, используемые в этом случае для определения приведенных жесткостных

характеристик, не учитывают сдвиговые и изгибные деформации в ребрах сетки. Это может приводить к значительным погрешностям при расчетах НДС сетчатых оболочек из композитных материалов с полимерным связующим из-за их низкого модуля сдвига, особенно для сеток с достаточно малым количеством спиральных ребер и большой кривизной.

Зависимости для приведенных мембранных и изгибных жесткостей, учитывающие сдвиговые деформации в ребрах, могут быть получены с использованием следующей расчетной схемы (рис. 2).

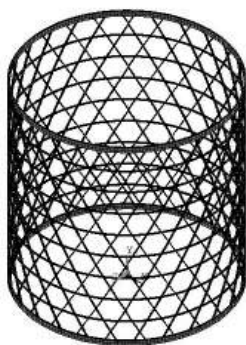


Рис. 1. Модель сетчатой цилиндрической оболочки

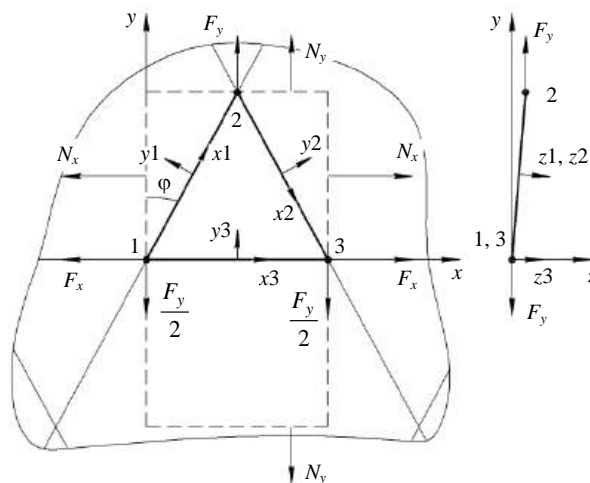


Рис. 2. Расчетная схема

Ребра в элементарной ячейке оболочки, обведенные пунктирной линией, представлены в виде трех балочных конечных элементов. Ось x проведена через узлы 1 и 3, а ось y направлена вдоль образующей цилиндра. $x_1y_1z_1$, $x_2y_2z_2$ и $x_3y_3z_3$ — локальные системы координат элементов. К узлам балочных элементов приложены усилия F_x и F_y , а к краям элементарной ячейки — соответствующие им погонные усилия N_x и N_y . На виде слева пока-

Евстафьев Виктор Александрович, профессор кафедры "Космические аппараты и двигатели".

E-mail: virata@rambler.ru

Бокучава Петр Нугзариевич, ассистент кафедры "Космические аппараты и двигатели".

E-mail: bokuchava.peter@ya.ru

Статья поступила в редакцию 6 марта 2023 г.

© Евстафьев В. А., Бокучава П. Н., 2023

зано, что узел 2 не лежит в плоскости xu . Для воспроизведения характера деформаций, характерного для сетчатых оболочек, на перемещения узлов элементарной ячейки наложены ограничения: для узлов 1 и 3 — ограничения на вращение вокруг осей x и y , для узла 2 — ограничения на вращение вокруг оси x . Для трех конечных элементов составляется система уравнений, связывающая усилия и перемещения в узлах этих элементов. После решения этой системы по соотношениям нагрузок и перемещений находят приведенные жесткостные характеристики в системе координат xu .

Как показали численные эксперименты с конечно-элементной моделью элементарной ячейки сетки, учет сдвиговых деформаций в ребрах почти не влияет на величины изгибных жесткостей. Поэтому наибольший интерес представляет определение приведенных мембранных жесткостей B_{xx} , B_{xy} , B_{yx} , B_{yy} . Они выражаются из соотношений для погонных усилий и деформаций в элементарной ячейке цилиндрической оболочки:

$$\begin{cases} N_x = B_{xx}\varepsilon_x + B_{xy}\varepsilon_y \\ N_y = B_{yx}\varepsilon_x + B_{yy}\varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

Для решения системы (1) необходимо определить перемещения узлов элементарной ячейки под действием усилий. Это можно сделать с использованием метода конечных элементов. Локальная матрица жесткости $[K]$ для трехмерного балочного конечного элемента с учетом сдвига имеет следующий вид [3], где E — модуль упругости материала в продольном направлении ребра, G — модуль сдвига в плоскости поперечного сечения ребра, A — площадь сечения ребра, L — длина элемента, I_y , I_z — моменты инерции сечения ребер при изгибе, I_x — момент инерции сечения ребра при кручении, l_y , l_z , k_y , k_z — коэффициенты, учитывающие форму сечения, длину элемента и отношение модуля упругости к модулю сдвига материала в продольных плоскостях:

$$k_{y,z} = \frac{1}{1 + 12l_{y,z}}; \quad l_{y,z} = \frac{EI_{y,z}}{cG_{xy,xz}AL},$$

где G — модуль сдвига в продольных плоскостях ребра;

c — коэффициент формы сечения ребра. Для прямоугольного сечения $c = 5/9$.

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z k_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z k_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z k_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z k_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y k_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y k_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y k_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y k_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y k_y}{L^2} & 0 & \frac{EI_y k_y (12l_y + 4)}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y k_y}{L^2} & 0 & \frac{EI_y k_y (2 - 12l_y)}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z k_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_z k_z (12l_z + 4)}{L} & 0 & -\frac{6EI_z k_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_z k_z (2 - 12l_z)}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z k_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z k_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z k_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z k_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y k_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y k_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y k_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y k_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y k_y}{L^2} & 0 & \frac{EI_y k_y (2 - 12l_y)}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y k_y}{L^2} & 0 & \frac{EI_y k_y (12l_y + 4)}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z k_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_z k_z (2 - 12l_z)}{L} & 0 & -\frac{6EI_z k_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_z k_z (12l_z + 4)}{L} \end{bmatrix}.$$

Глобальные матрицы жесткости спиральных элементов 1 и 2 получаются путем поворота локальной матрицы жесткости сначала на угол φ вокруг оси z , затем на угол ψ вокруг оси y :

$$[\bar{K}]_1 = [T]_\psi^T [T]_\varphi^T [K] [T]_\varphi [T]_\psi,$$

$$[\bar{K}]_2 = [T]_\psi [T]_\varphi [K] [T]_\varphi^T [T]_\psi^T.$$

$$[T]_{\varphi,\psi} = \begin{bmatrix} [C]_{\varphi,\psi} & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [C]_{\varphi,\psi} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [C]_{\varphi,\psi} & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [C]_{\varphi,\psi} \end{bmatrix},$$

$$[0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [C]_\varphi = \begin{bmatrix} \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ -\cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[C]_\psi = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & \sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{bmatrix}.$$

Для объединения глобальных матриц жесткости отдельных элементов в одну необходимо определить матрицу соединений:

$$[A] = \begin{bmatrix} [E] & [0] & [0] \\ [0] & [E] & [0] \\ [0] & [E] & [0] \\ [0] & [0] & [E] \\ [E] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [E] \end{bmatrix}, \quad \text{где } [0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[E] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Глобальную матрицу жесткости можно записать следующим образом:

$$[\bar{K}] = [A]^T \begin{bmatrix} [\bar{K}_1] & [0] & [0] \\ [0] & [\bar{K}_2] & [0] \\ [0] & [0] & [K] \end{bmatrix} [A].$$

Уравнение равновесия системы имеет вид

$$[\bar{K}]\{\Delta\} = \{F\}, \quad (2)$$

где $\{\Delta\}$ — вектор узловых перемещений;

$\{F\}$ — вектор узловых усилий.

Решение данной системы из 18 линейных уравнений позволяет определить перемещения и реакции в узлах элементарной ячейки оболочки.

Приложив поочередно усилия F_x , F_y и решив систему уравнений (2), можно определить два набора перемещений узлов и соответствующих им деформаций элементарной ячейки: ε_{x1} и ε_{y1} для случая нагружения усилием F_x , ε_{x2} и ε_{y2} — для F_y . После подстановки деформаций в (1) получается система из четырех уравнений

$$\begin{cases} N_x = B_{xx}\varepsilon_{x1} + B_{xy}\varepsilon_{y1} \\ 0 = B_{yx}\varepsilon_{x1} + B_{yy}\varepsilon_{y1} \\ 0 = B_{xx}\varepsilon_{x2} + B_{xy}\varepsilon_{y2} \\ N_y = B_{yx}\varepsilon_{x2} + B_{yy}\varepsilon_{y2} \end{cases}.$$

Решив, в свою очередь, эту систему и отбросив малые слагаемые, можно получить следующие формулы для приведенных жесткостей

$$B_{xx} = \frac{E \tan \varphi}{W} \times \frac{12I_{ys}k_{ys} \left(A_s \sin^3 \varphi W^2 + A_r (W^2 + 4z^2) \right) + A_r A_s (W^2 z^2 + 4z^4)}{(W^2 + 4z^2)(A_s z^2 + 12I_{ys}k_{ys})},$$

где $W = \frac{\pi R}{ns}$ — ширина элементарной ячейки;

$z = R \left(1 - \cos \frac{\pi}{2ns} \right)$ — смещение узла 2 от плоскости xy (рис. 2);

ns — количество пар спиральных ребер;

R — радиус оболочки;

A_s, A_r — площади поперечного сечения спиральных и кольцевых ребер;

I_{ys}, k_{ys} — момент инерции сечения и коэффициент, учитывающий форму сечения, длину элемента и отношение модуля упругости к модулю сдвига спиральных ребер;

$$B_{xy} = B_{yx} = \frac{12 \sin^2 \varphi \cos \varphi E A_s I_{ys} k_{ys}}{\sqrt{W^2 + 4z^2} (A_s z^2 + 12I_{ys}k_{ys})};$$

$$B_{yy} = \frac{12 \cos^3 \varphi E A_s I_{ys} k_{ys}}{W (A_s z^2 + 12I_{ys}k_{ys})}.$$

Для проверки эффективности использования полученных соотношений были проведены расчеты перемещений верхнего кольцевого ребра цилиндрической оболочки по аналитическим соотношениям, изложенным в [4], в их исходном виде и с заменой формул для приведенных жесткостей на полученные выше, а также численно с исполь-

зованием программного пакета ANSYS. Параметры исследуемой сетчатой оболочки: длина — 2 м, радиус R — 0,25 м, угол наклона спиральных ребер φ — $35,8^\circ$, модуль упругости материала E — 93 ГПа, модуль сдвига материала G — 1,8 ГПа, толщина оболочки — 4 мм, толщина ребер — 2 мм, осевая нагрузка — 10 кН. Результаты расчетов перемещений верхнего кольцевого ребра приведены в таблице.

Результаты расчетов перемещений

Количество пар спиральных ребер n_s	Аналитически без учета сдвига и изгиба ребер, мм	Аналитически с учетом сдвига и изгиба ребер, мм	Численно в ANSYS, мм
14	2,16	2,61	2,89
18	1,68	1,84	1,89
22	1,37	1,45	1,48
26	1,16	1,20	1,22

Таким образом, полученные зависимости для расчета мембранных жесткостей композитных цилиндрических сетчатых конструкций, позволяют повысить точность аналитических расчетов, особенно в случаях оболочек с малым количеством ребер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В. В., Барынин В. А., Разин А. Ф., Петровский С. А., Халиманович В. И. Анизотропные композитные сетчатые конструкции — разработка и приложение в космической технике // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38—50.
2. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1988. — 271 с.
3. Усюкин В. И. Строительная механика конструкций космической техники: Учеб. — М.: Машиностроение, 1988. — 392 с.
4. Lopatin A. V., Morozov E. V., Shatov A. V. Axial deformability of the composite lattice cylindrical shell under compressive loading: Application to a load-carrying spacecraft tubular body // Composite Structures. 2016. V. 146. P. 201—206.

Determining of composite cylindrical lattice equivalent stiffness characteristics considering ribs bending and shear strain

V. A. EVSTAFYEV, P. N. BOKUCHAVA

Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D. F. Ustinov, St. Petersburg, Russia

Formulas for determining some of composite cylindrical lattice equivalent stiffness characteristics are proposed in the article. They were obtained by solving the equilibrium equations of grid structure elementary cell consisting of three finite elements. The proposed formulas help to improve the accuracy of composite cylindrical lattice analytical design calculations.

Keywords: lattice structures, composite materials, finite element method.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

УДК 629.78-03 620.2(15)

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_2_12

EDN: AGYQOY

Проектирование и изготовление криогенных металлокомпозитных топливных баков

¹В. А. ТИТОВ, д-р техн. наук; ¹О. А. ЮРАНЕВ;

^{2,3}А. А. СКЛЕЗНЕВ, канд. техн. наук; ²А. Ф. РАЗИН, д-р техн. наук;

²А. А. БАБИЧЕВ, канд. техн. наук; ⁴И. В. ПШЕНИЧНИКОВ; ⁴Д. А. БОРОДУЛИН

¹АО «Центральный НИИ машиностроения», г. Королёв, Московская обл., Россия

²АО «Центральный НИИ специального машиностроения», г. Хотьково, Московская обл., Россия

³АО «Центр перспективных разработок», г. Хотьково, Московская обл., Россия

⁴Госкорпорация «Роскосмос», Москва, Россия

Рассмотрена возможность разработки криогенных топливных баков для ракетносителей на жидком топливе, выполненных из полимерных композиционных материалов с использованием анизотридных сетчатых структур в качестве несущих элементов силовой оболочки бака с внутренним металлическим лайнером. Приведены технологические особенности изготовления бака, проводится сравнение с экспериментальными данными, полученными на масштабной модели рассматриваемого бака. Результаты экспериментального исследования несущей способности и весовой эффективности криогенных топливных баков предлагаемой конструкции сопоставлены с расчётными характеристиками аналогичного металлического бака вафельной конструкции.

Ключевые слова: композитные материалы, сетчатые конструкции, криогенный топливный бак, несущий топливный бак.

Традиционным конструктивным исполнением несущих криогенных топливных баков ракетносителей на жидком топливе являются баки вафельной конструкции из металлических (преимущественно алюминиевых) сплавов, изготавливаемые

методом фрезерования [1, 2]. Конструкция вафельного бака представляет собой оболочку вращения, состоящую из металлических панелей, имеющих обшивку с интегральным подкрепляющим набором рёбер. При этом рёбра образуют регулярную структуру, имеющую, как правило, продольно-поперечный набор. Технологический процесс изготовления криогенных топливных баков с несущей стенкой вафельной конструкции является исключительно трудоёмким. Используются толстостенные алюминиевые плиты, в которых путём удаления материала химическим травлением, электрохимической обработкой или механическим фрезерованием [3] формируют рёбра подкрепляющего набора. Полученные панели сваривают между собой, формируя несущую силовую оболочку бака. Такая технология требует уникального технологического оборудования, особенно для изготовления баков большой длины и диаметра. Следует также отметить крайне низкий коэффициент использования материала (КИМ) в конструкции металлического топливного бака, который не превышает 0,07–0,08.

Одним из путей повышения технологичности и весовой эффективности несущих криогенных топливных баков, а также возможного снижения их массы является замена конструкционного мате-

Титов Василий Александрович, зам. генерального директора по прикладным исследованиям, испытаниям и экспериментальной базе — начальник Центра прикладных исследований.
E-mail: titovva@tsniimash.ru

Юранев Олег Александрович, начальник лаборатории.

E-mail: juranevoa@tsniimash.ru

Склезнев Андрей Анатольевич, старший научный сотрудник, ведущий инженер.

E-mail: skleznev@crism10.ru

Разин Александр Фёдорович, генеральный директор и главный конструктор.

E-mail: tsniism@tsniism.ru

Бабичев Антон Александрович, начальник отделения 10 — заместитель главного конструктора.

E-mail: 185@bk.ru

Пшеничников Игорь Викторович, заместитель директора Департамента перспективных программ и проекта СФЕРА.

E-mail: Pshenichnikov.IV@roscosmos.ru

Бородулин Дмитрий Александрович, главный специалист Департамента перспективных программ и проекта СФЕРА.

E-mail: Borodulin.DA@roscosmos.ru

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2023 г.

© Титов В. А., Юранев О. А., Склезнев А. А., Разин А. Ф., Бабичев А. А., Пшеничников И. В., Бородулин Д. А., 2023

риала — применение в конструкции несущих топливных баков армированных полимерных композиционных материалов (ПКМ). Предпосылки для такого решения имеются достаточно серьёзные — в ракетах на твёрдом топливе доля применения силовых конструкций, выполненных из полимерных композиционных материалов с непрерывным армированием (включая такие элементы, как корпуса транспортно-пусковых контейнеров, соединительные отсеки, головные обтекатели, сопловые блоки и ракетные двигатели твёрдого топлива), составляет около 80 %, а экономия веса по сравнению с аналогичными изделиями из металлических сплавов составляют 25—30 % [4].

В работе [5] приведена информация о проведённых в последнее время в США исследованиях возможности создания криогенного топливного бака из ПКМ для применения в верхней ступени PH SLS, NASA, Boeing, США. Сообщается, что в течение 30 месяцев было проведено проектирование, изготовление и испытание двух экспериментальных макетов баков с диаметрами 2,4 и 5,5 м. В результате проведённых работ подтверждена потенциальная возможность снижения веса несущего бака на 33 %. Конструкция баков, рассмотренных в работе [5], не предусматривает использование металлического герметизирующего лайнера и состоит из гладкой тонкостенной слоистой композитной оболочки, воспринимающей внутреннее давление, и силовой наружной оболочки, собираемой из тонкостенных профилей треугольного сечения и обеспечивающей восприятие осевой нагрузки. Такое конструктивно-технологическое решение обладает рядом существенных недостатков:

- используется неавтоматизированная ручная сборка силовой оболочки бака из треугольных профилей, увеличивающая трудоёмкость изготовления конструкции;
- для изготовления гладкой внутренней оболочки бака используется крупногабаритная раз-

борная металлическая оправка, стоимость которой, по всей видимости, значительно превышает стоимость изготавливаемого изделия;

- отсутствуют конструктивные и технологические решения по организации внутреннего конструктивного наполнения топливного бака.

В используемых топливных баках имеются тоннельные и иные трубопроводы, перегородки, гасители колебаний топлива и др. из металлических сплавов, соединяемые сваркой с оболочкой бака. Сборку и наполнение предлагаемого бака затруднительно организовать при использовании внутренней композитной оболочки без металлического лайнера.

Указанные недостатки отсутствуют в предлагаемой авторами конструкции криогенного топливного бака из ПКМ с металлическим герметизирующим лайнером.

Проектирование металлических баков вафельной конструкции

Силовая оболочка вафельной конструкции, обладая часто расположенным регулярным набором подкрепляющих рёбер (рис. 1) и являясь конструктивно-ортотропной оболочкой [3], может быть заменена на эквивалентную по толщине гладкую оболочку с осреднёнными жёсткостными характеристиками и приведённой толщиной h_r , определяемой следующим образом

$$h_r = h(2\bar{b} + \bar{\delta}). \quad (1)$$

Здесь h — высота подкрепляющего набора рёбер, δ — толщина обшивки, b — ширина рёбер, a — расстояния между рёбрами подкрепляющего набора, одинаковые для продольных и кольцевых рёбер. Относительные толщины рёбер и оболочки здесь и далее имеют вид: $\bar{b} = b/a$, $\bar{\delta} = \delta/h$.

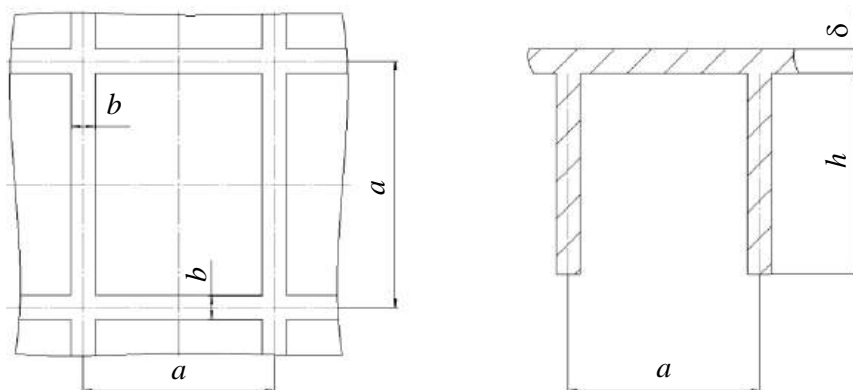


Рис. 1. Геометрические параметры вафельной конструкции

Рассмотрим вафельную оболочку с продольно-поперечным набором рёбер, расстояния между которыми в кольцевом и осевом направлении совпадают и обозначены через a . Тогда, масса 1 м² силовой оболочки вафельной конструкции может быть определена следующим образом:

$$M_{\text{ваф}} = \rho h_r, \quad (2)$$

где ρ — плотность металлического сплава.

Исходя из действующих на бак нагрузок, можно определить проектные ограничения для решения задачи оптимизации.

Ограничение по общей устойчивости оболочки при осевом сжатии [3]

$$P \leq P_{\text{кр}}, \text{ где } P_{\text{кр}} = 4\pi \sqrt{(1-\nu^2)BD}. \quad (3)$$

B и D — мембранная и изгибная жёсткости, одинаковые для осевого и кольцевого направления, и определяемые равенствами

$$B = Eh \left(\bar{b} + \frac{\bar{\delta}}{1-\nu^2} \right),$$

$$D = \frac{Eh^3}{3} \left[\bar{b} - \frac{\bar{\delta}}{1-\nu} (3\langle 1+\bar{\delta} \rangle + \bar{\delta}^2) - \frac{\left\langle \bar{b} + \frac{\bar{\delta}}{1-\nu^2} \langle 2+\bar{\delta} \rangle \right\rangle^2}{4 \left(\bar{b} + \frac{\bar{\delta}}{1-\nu^2} \right)} \right].$$

Ограничение по прочности от внутреннего давления в кольцевом направлении бака

$$\frac{pR}{h_r} \leq \sigma_T. \quad (4)$$

Ограничение по местной устойчивости обшивки, определяемое решением задачи о потере устойчивости квадратной пластины, свободно опертой по краям

$$\frac{P}{2\pi R h_r} \leq \frac{4\pi^2 E \bar{\delta}^3}{1-\nu^2}. \quad (5)$$

Ограничение по прочности вафельной оболочки при сжатии осевой силой

$$\frac{P}{2\pi R h_r} \leq \sigma_T. \quad (6)$$

В приведённых выражениях использованы следующие обозначения: P — расчётная осевая эквивалентная сжимающая сила, действующая на оболочку, $P_{\text{кр}}$ — критическая сила потери устойчивости оболочки, E — модуль упругости материала оболочки, ν — коэффициент Пуассона материала оболочки, σ_T — предел текучести мате-

риала оболочки, p — внутреннее давление наддува, R — радиус оболочки. Расчётная осевая эквивалентная сжимающая сила вычисляется с учётом разгрузки оболочки бака от действия внутреннего давления [2], [3].

$$P = \left(N \pm \frac{2M}{R} \right) - \pi R^2 \cdot p. \quad (7)$$

Здесь дополнительно использованы следующие обозначения действующие на оболочку: N — осевая сжимающая сила и M — изгибающий момент.

В ограничения (3)–(6), а также в выражение (2) для массы оболочки вафельной конструкции кроме исходных данных задачи (радиус оболочки, характеристики материала и действующие нагрузки) входят три неизвестных параметра: h , \bar{b} , $\bar{\delta}$.

Рассмотрим задачу проектирования бака вафельной конструкции.

Используя уравнения (3)–(6), можно, выразив высоту ребра структуры h , получить следующие соотношения:

$$h_1 = \sqrt{\frac{P}{2\pi E}} \cdot \frac{\sqrt[4]{3}}{\sqrt[4]{\frac{\bar{\delta}^4}{1-\nu^2} - \bar{b} \left[4\bar{\delta} \left(4\bar{\delta}^2 + \frac{3}{2}\bar{\delta} + 1 \right) - \bar{b}(1-\nu^2) \right]}};$$

$$h_2 = \frac{pR}{\sigma_T (\bar{\delta} + 2\bar{b})};$$

$$h_3 = \frac{P(1-\nu^2)}{8\pi^3 R E \bar{\delta}^3 (\bar{\delta} + 2\bar{b})}; \quad h_2 = \frac{P}{2\pi R \sigma_T (\bar{\delta} + 2\bar{b})}. \quad (8)$$

Для решения задачи оптимизации используем графический метод. Задавая $\bar{\delta}$, можно с помощью равенств (8) построить границы ограничений и с помощью формулы (2) найти параметры h и \bar{b} , соответствующие заданной величине $\bar{\delta}$. Варьируя $\bar{\delta}$, можно определить параметры оболочки, соответствующие условию минимума массы.

Проектирование и изготовление металлокомпозитного топливного бака

Предлагаемая конструкция металлокомпозитного топливного бака представлена на рис. 2 [6].

Внутри бака располагается тонкостенный металлический лайнер с толщиной стенки, достаточной для придания лайнеру конструктивной жёсткости (0,5–1,5 мм в зависимости от размеров бака). Основное предназначение металлического лайнера — создание герметизирующего слоя внутри бака. Дополнительно металлический лайнер используется в качестве технологической оправки

при намотке композитной структуры бака. Для восприятия внутреннего давления поверхность металлического лайнера при необходимости покрывают силовым слоем из армированного полимерного композиционного материала, например углепластика. На цилиндрической части бака дополнительно к спиральным слоям могут быть добавлены кольцевые слои.

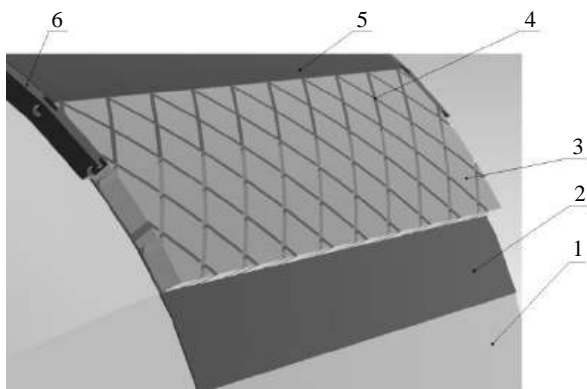


Рис. 2. Конструкция криогенного топливного бака с сетчатой несущей оболочкой из полимерных композиционных материалов:

1 — тонкостенный металлический лайнер; 2 — композитная обшивка, намотанная на лайнер; 3 — формообразующий пенопласт; 4 — рёбра сетчатой структуры, формируемые в пенопласте методом намотки; 5 — наружная композитная обшивка; 6 — торцевой шпангоут с отверстиями для механического соединения

Силовая оболочка бака, воспринимающая полётные нагрузки, представляет собой интегральную цилиндрическую сетчатую конструкцию. Сетчатая структура формируется на цилиндрической части бака при помощи лёгкого конструкционного пенопласта с высокой жёсткостью и низкой плотностью (менее 100 кг/м^3), в котором

механически образуются пазы, формирующие рёбра однонаправленного материала сетчатой структуры. Сетчатая структура и силовые шпангоуты, в свою очередь, формируются при помощи автоматизированной мокрой намотки в пазы, выполненные в пенопласте на цилиндрической поверхности бака. После отверждения сетчатой структуры пенопласт остаётся внутри конструкции, создавая дополнительный эффект как теплоизоляционное покрытие для криогенного топливного бака. Наружную поверхность бака закрывают внешней обшивкой из армированного полимерного материала. Для обеспечения стыковки рассматриваемого бака с соседними отсеками в силовых шпангоутах выполняют отверстия для стыковочных шпилек.

Для восприятия внутреннего давления в баке предлагаемой конструкции предназначен металлический тонкостенный лайнер, толщина которого принимается минимальной с учётом технологических ограничений. В случае, если такой толщины недостаточно для восприятия внутреннего давления, металлический лайнер усиливают намоткой спиральных и кольцевых композитных слоёв (см. 2 на рис. 2).

На лайнере с композитным слоем формируют слой из пенопласта с пазами для рёбер и изготавливают сетчатую структуру, которая предназначена для восприятия внешних нагрузок, действующих на бак в процессе эксплуатации. Параметры сетчатой структуры определяют без учёта несущей способности лайнера и композитных обшивок.

Метод оптимального проектирования сетчатых конструкций описан в работе [7], а геометрические параметры сетчатой структуры приведены на рис. 3.

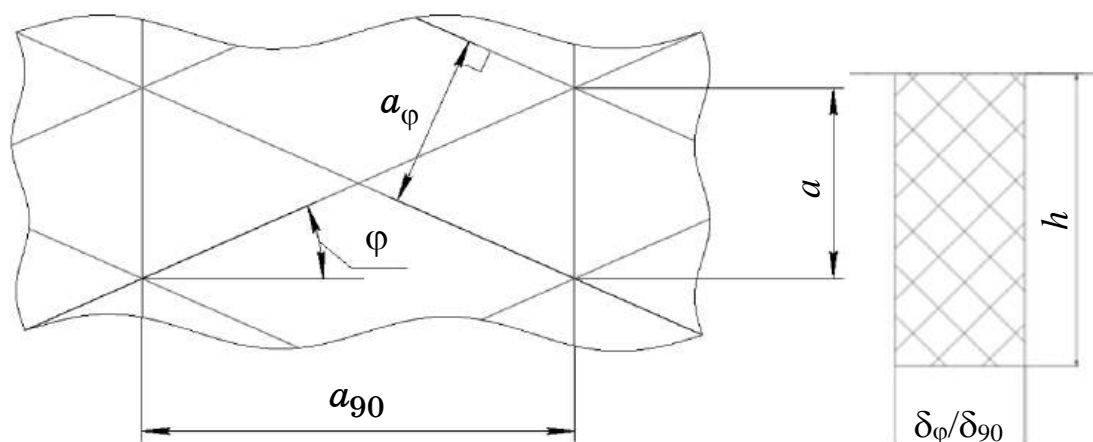


Рис. 3. Геометрические параметры сетчатой структуры:

h — высота рёбер сетчатой структуры; $E_{\phi,90}$ — модули упругости материала спиральных и кольцевых рёбер; ϕ — угол наклона спиральных рёбер к образующей; $\delta_{\phi,90}$ — толщины спиральных и кольцевых рёбер; $a_{\phi,90}$ — расстояния между спиральными и кольцевыми рёбрами в кольцевом и осевом направлении соответственно; $\bar{\delta}_{\phi} = \delta_{\phi}/a_{\phi}$, $\bar{\delta}_{90} = \delta_{90}/a_{90}$ — относительные толщины спиральных и кольцевых рёбер сетчатой структуры

Силовая оболочка сетчатой структуры так же, как и оболочка вафельной конструкции, обладает регулярной структурой часто расположенных рёбер, выполненных из однонаправленного композитного материала. Такая структура может быть заменена на эквивалентную гладкую оболочку с осреднёнными жёсткостными характеристиками и приведённой толщиной h_r^c , определяемой следующим образом:

$$h_r^c = h(2\bar{\delta}_\phi + \bar{\delta}_{90}). \quad (9)$$

Масса единицы поверхности сетчатой структуры имеет вид

$$M_{\text{км}} = \rho_{\text{км}} h_r^c, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{км}}$ — плотность композитного материала рёбер сетчатой структуры.

Исходя из действующих на сетчатую оболочку бака нагрузок [2], задаются следующие проектные ограничения для решения задачи оптимизации [7].

Ограничение по осесимметричной форме потери устойчивости при осевом сжатии:

$$P \leq 2\pi \sqrt{\frac{2}{3}} h^2 \cos^2 \phi \sqrt{E_\phi E_{90} \bar{\delta}_\phi \bar{\delta}_{90}}. \quad (11)$$

Ограничение по неосесимметричной форме потери устойчивости:

$$P \leq \frac{4\pi\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times E_\phi \bar{\delta}_\phi h^2 \cos^2 \phi \sin^2 \phi \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{E_{90} \bar{\delta}_{90}}{2E_\phi \bar{\delta}_\phi \sin^4 \phi}}}. \quad (12)$$

Ограничение по местной устойчивости спиральных рёбер, работающих как сжатые стержни между точками своего взаимопересечения:

$$P \leq \frac{4}{3} \pi^3 k E_\phi R h \bar{\delta}_\phi^3 \cos^4 \phi \sin^2 \phi. \quad (13)$$

Ограничение по прочности спиральных рёбер при действии осевой силы:

$$P \leq 4\pi R \bar{\sigma} h \bar{\delta}_\phi \cos^2 \phi. \quad (14)$$

Расчётная осевая эквивалентная сжимающая сила определяется равенством (7). В ограничения (11)—(14), а также в выражение для массы (10) входят проектные параметры h , ϕ , $\bar{\delta}_\phi$ и $\bar{\delta}_{90}$. Оптимизация сетчатой структуры может быть произведена численно при помощи соответствующего

математического программного обеспечения, например *Maple*, или *MATLAB*.

Проектирование, изготовление и испытания масштабной модели бака

Для проверки работоспособности предлагаемой конструктивно-силовой схемы криогенного топливного бака был спроектирован экспериментальный бак с диаметром 1,055 м и длиной цилиндрической части 1,5 м. Сетчатая структура бака состоит из спиральных и кольцевых рёбер, изготовленных из углепластика на основе углеродных волокон марки Umatex UMT-49S и эпоксидного связующего ЭД-И. Однонаправленные рёбра из этого углепластика имеют следующие свойства: модуль упругости $E_1 = 90$ ГПа; предельные напряжения материала рёбер при сжатии $[\sigma]^- = 350$ МПа, при растяжении $[\sigma]^+ = 950$ МПа; плотность углепластика $\rho = 1550$ кг/м³. Для намотки шпангоутов использована углеродная ткань саржевого плетения с эпоксидным связующим. Бак проектировали на следующую нагрузку: внутреннее давление $p = 500$ кПа и осевая эквивалентная сжимающая сила 4 МН. При этом на внутреннее давление работает металлический лейнер, толщиной 1,0 мм, изготовленный из титанового сплава марки BT1-0, и его композитная оболочка, представляющая собой слоистый композит с одним спиральным слоем и одним кольцевым слоем, изготовленными также из углепластика на основе углеродных волокон марки Umatex UMT-49S и эпоксидного связующего ЭД-И. Толщина композитной оболочки на металлическом лейнере (см. 2 на рис. 2) составила 0,9 мм. Толщина наружной обшивки (см. 5 на рис. 2), изготовленной из углепластика на основе углеродных волокон марки Umatex UMT-49S и эпоксидного связующего ЭД-И, содержащей один спиральный слой, составила 0,3 мм. Толщина лейнера и усиливающей его композитной оболочки достаточна для восприятия внутреннего давления. Сетчатая структура спроектирована на осевую сжимающую силу 4 МН. При этом несущую способность металлического лейнера и композитных оболочек не учитывали. При помощи ограничений (11)—(14) с помощью численного алгоритма оптимального проектирования получены зависимости геометрических параметров рёбер сетчатой структуры от угла наклона спиральных рёбер (рис. 4, а), для которых по формуле (10) была определена соответствующая проектная масса сетчатой структуры (рис. 4, б).

В результате оптимизации получены следующие проектные параметры: число пар спиральных рёбер в сечении оболочки — 48; высота сетчатой структуры $h = 19$ мм; ширина спиральных рёбер

$\delta_\phi = 8$ мм; ширина кольцевых рёбер $\delta_{90} = 4$ мм. Расчётная масса 1 м^2 сетчатой структуры составляет 7,28 кг. Следует отметить, что к полученной массе сетчатой конструкции необходимо добавить массу металлического лайнера, внутренней композитной оболочки и внешней обшивки бака. Кроме этого, вес добавляет конструкционный пенопласт, необходимый для применения в технологических целях для формирования геометрии рёбер сетчатой структуры при намотке на металлический

лейнер, и конструкционные клеи, применяемые для улучшения адгезии при криогенных температурах между металлическим лайнером и композитной оболочкой, а также для приклейки конструкционного пенопласта в процессе изготовления бака. Фактический вес 1 м^2 изготовленного экспериментального бака составил 15,35 кг. Внешний вид изготовленного бака и его испытание показаны на рис. 5.

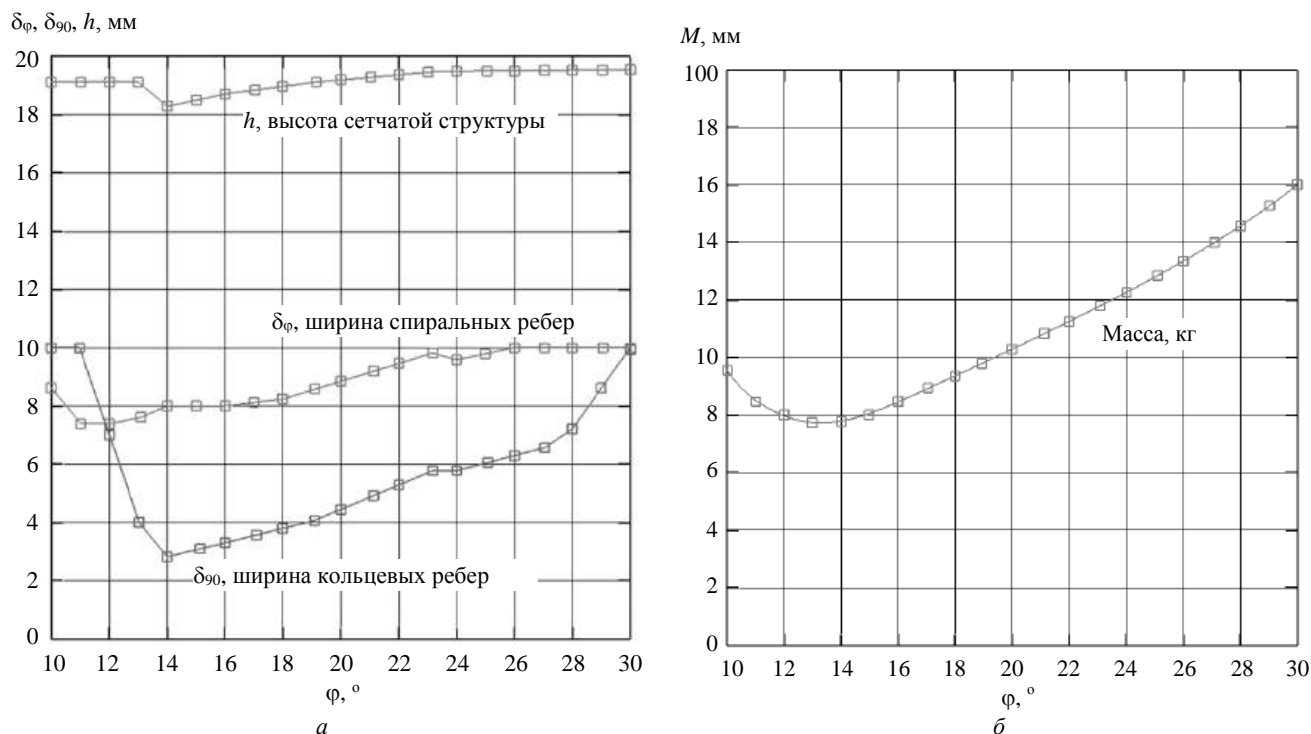


Рис. 4. Результаты оптимального проектирования сетчатой оболочки экспериментального бака:
а — проектные параметры, б — целевая функция

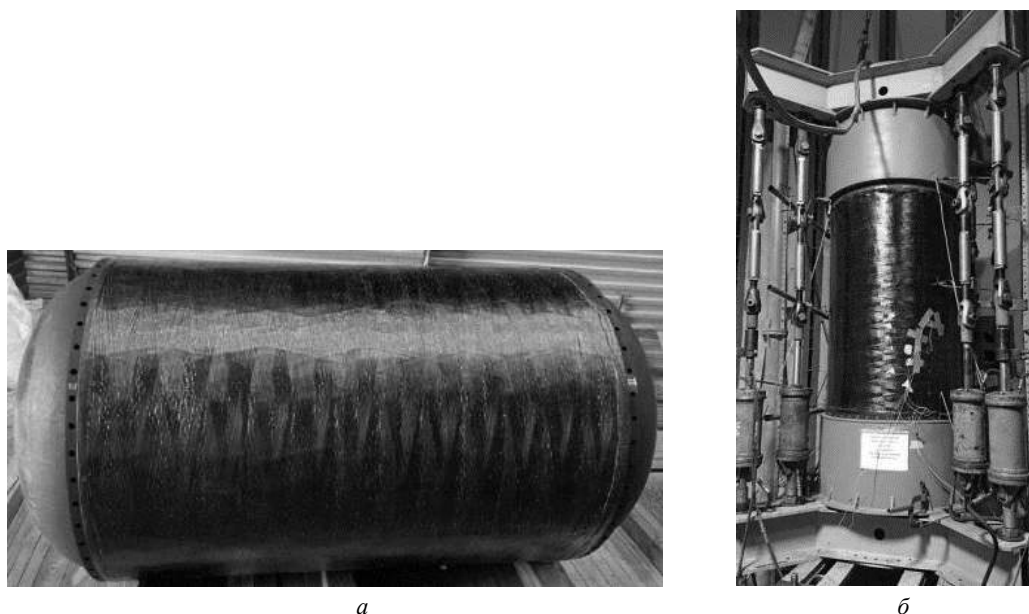


Рис. 5. Внешний вид экспериментального бака (а), испытания экспериментального бака (б)

В процессе изготовления бака в структуру рёбер, а также внутрь обшивки и на границе лайнер-композит были имплементированы деформационные и температурные датчики на основе оптоволокон с решётками Брэгга [8]. Были опробованы несколько различных способов реализации такого внедрения датчиков, а также способы сохранения неповреждёнными их выводов и коннекторов в процессе автоматизированной намотки, термообработки и последующей механической обработки. Во время проведения испытаний экспериментального бака данные с оптоволоконных датчиков фиксировали в режиме реального времени на протяжении всего эксперимента.

При испытаниях (см. рис. 5, б) экспериментальный бак нагружали комбинацией осевой силы и изгибающего момента. При этом внутренняя полость бака была заполнена жидким азотом при температуре минус 196 °С при давлении 0,5 МПа. Экспериментальный бак выдержал 92,5 % от расчётного значения эквивалентной осевой силы и потерял несущую способность в результате разрушения спиральных рёбер. При разрушении бака не наблюдали потери герметичности — целостность металлического лайнера и композитной оболочки не были нарушены.

Для сравнения было проведено проектирование аналогичного по размерам бака вафельной конст-

рукции. Проектирование проводили на эквивалентную сжимающую силу 4 МН и внутреннее давление $p = 0,5$ МПа. Предполагалось, что бак изготовлен из алюминиевого сплава АМг6 с модулем упругости 68,6 ГПа, коэффициентом Пуассона 0,3, пределом текучести 160 МПа и плотностью 2680 кг/м³. Проектирование бака осуществлялось графическим методом, описанным ранее. Для фиксированного значения $\bar{\delta} = 0,07$ результаты оптимизации показаны на рис. 6.

Как следует из рис. 6, активными ограничениями являются общая потеря устойчивости и прочность оболочки при осевом сжатии. В результате оптимизации минимальная масса 1 м² вафельной оболочки диаметром 1,055 м составила 17,99 кг. При этом получены следующие параметры вафельного бака: толщина полотна обшивки $\delta = 4,76$ мм; шаг рёбер вафельной структуры $a = 33,3$ мм, ширина рёбер $b = 5,0$ мм, высота рёбер $h = 6,5$ мм.

Таким образом, масса 1 м² оболочки изготовленного экспериментального бака с учётом внешней обшивки, металлического лайнера, композитной оболочки лайнера, а также конструкционного пенопласта в совокупности оказалась на 15 % ниже массы спроектированной на аналогичные нагрузки оболочки бака вафельной конструкции.

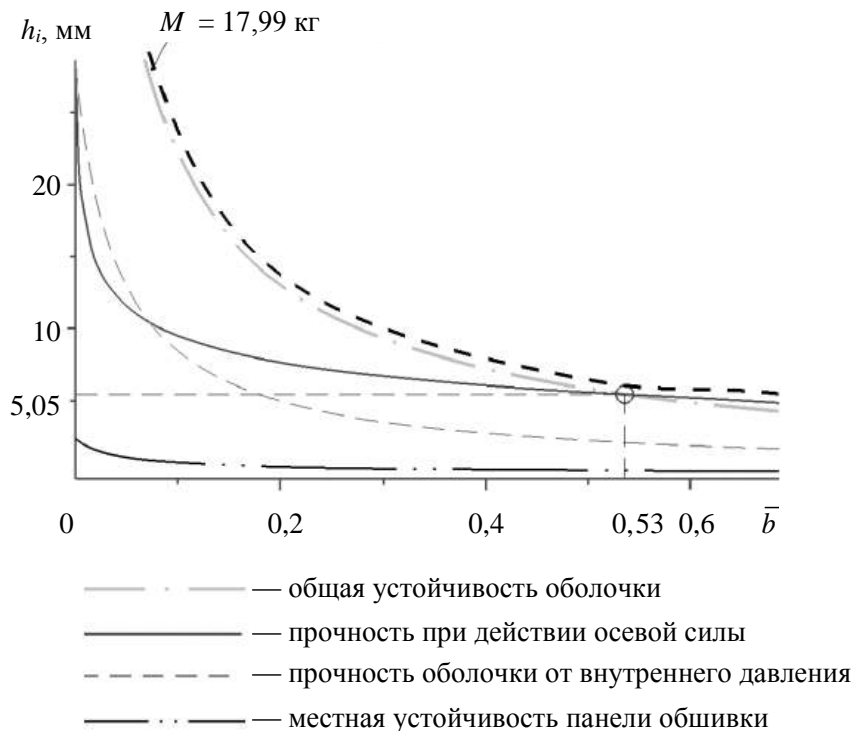


Рис. 6. Зависимость проектных параметров h_i от \bar{b} для вафельной силовой оболочки при $\bar{\delta} = 0,07$
(Точкой обозначен локальный оптимум)

Сравнительная оценка эффективности металлокомпозитного и вафельного баков

Для обоснования возможности реализации предложенной концепции в реальных конструкциях рассмотрим результаты проектирования описанными методами металлокомпозитного и традиционного вафельного баков с диаметром, равным 4,1 м, соответствующим размерам баков первой или второй ступеней современных ракетносителей (РН) среднего и тяжёлого классов. Свойства материалов, использованные в расчётах, аналогичны описанным авторами. Проектирование осуществляется на действие осевой сжимающей силы 11,6 МН и внутреннего давления 0,5 МПа. Получены следующие результаты проектировочных расчётов: масса 1 м² бака вафельной конструкции составила 18,35 кг; проектная масса 1 м² бака сетчатой структуры с учётом веса лайнера, пенопласта, внутренней и наружной оболочек оказалась равной 14,99 кг.

Результаты проектирования баков с диаметрами, приближенными к реальным диаметрам ступеней РН, показывают возможность снижения массы при использовании предлагаемой концепции до 18,3 %. Этот результат, а также значительно более низкая трудоёмкость изготовления и более высокий коэффициент использования материалов в металлокомпозитном баке, подтверждают возможность эффективной реализации предлагаемой конструктивно-технологической концепции в ракетной технике.

При разработке реальных металлокомпозитных баков возникает ряд новых технологических задач. В частности, проведения дополнительных исследований и технологической отработки требует применение неудаляемых из конструкции вспененных материалов вместо традиционно используемых удаляемых эластичных резиновых подложек, применяемых для формирования рёбер. Дополнительных исследований и отработки требует проблема устойчивости тонкостенного металлического лайнера при использовании его в качестве технологической оправки [9, 10]. Актуальной является проблема сборки внутренних конструкций бака внутри тонкостенного лайнера.

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что предлагаемая конструктивно-силовая схема криогенного топливного бака с металлическим лайнером, имеющего силовую

оболочку сетчатой структуры из полимерных композиционных материалов, работоспособна и может быть применена для создания баков ракетносителей на жидком топливе. Подтверждена технологическая возможность изготовления конструкций подобного рода. Применение предлагаемой концепции представляется перспективным и новым техническим направлением. Показана возможность снижения веса и трудоёмкости изготовления используемых в ракетостроении топливных баков, а также значительное снижение отходов материалов. Применение криогенного топливного бака с несущей сетчатой структурой позволяет перейти от металлических конструктивно-силовых схем криогенных топливных баков к бакам из полимерных композиционных материалов с обеспечением снижения веса конструкции до 20 % по сравнению с вафельными или гладкими баками с подкрепляющим силовым набором.

Авторы выражают благодарность академику РАН Валерию Витальевичу Васильеву за ценные рекомендации и научную поддержку при проведении исследований и оформлении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 22350-91. Корпус ракеты на жидком топливе. Термины и определения. Введ. 1992–07–01. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 17 с.
2. Балабух Л. И., Алфутов Н. А., Усюкин В. И. Строительная механика ракет. — М.: Высшая школа, 1984. — 391 с.
3. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций: учеб. пособие для студентов вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1994. — 384 с.
4. [Электронный ресурс] КОМПОЗИТЫ info // Ракеты и композиты // АО "ЦНИИСМ" 55 лет. Пресс-релиз. <http://k-blog.ru/rakety-i-kompozity/> (Дата обращения: 03.08.2018).
5. McCarville D. A., Guzman J. C., Dillon A. K., Jackson J. R., Birkland J. O. Design, Manufacture and Test of Cryotank Components. Comprehensive Composite Materials II, V. 3, Chapter 3.5. — Elsevier, 2018. P. 153—179. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09958-6.
6. Васильев В. В., Разин А. Ф., Недайвода А. К. и др. Топливный бак летательного аппарата. Патент РФ № RU2157322. Заявка 99123514/02 от 1999.11.04. Опубл. 2000.10.10. Бюл. № 28. Патентообладатель и заявитель: АО "ЦПР АО "ЦНИИСМ" и ГКНПЦ им. М. В. Хруничева.
7. Азаров А. В. Проблема проектирования аэрокосмических сетчатых конструкций // Изв. РАН. МТТ. 2018. № 4. С. 85—93.
8. Анискович В. А., Будадин О. Н., Козельская С. О. и др. Интегрирование волоконно-оптических датчиков в композитный цилиндрический корпус из углепластика, изготов-

ленный способом непрерывной намотки // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 2. С. 16—23.

9. Васильев В. В., Склезнев А. А. Устойчивость лейнера цилиндрического композитного баллона давления // Механика композиционных материалов и конструкций, 2022. № 2. С. 235—246.

10. Васильев В. В., Салов В. А., Склезнев А. А. Устойчивость бесконечно длинной цилиндрической оболочки под действием наружного давления, создаваемого намоткой гибких нитей // Известия РАН. Механика твёрдого тела. 2022. № 6. С. 63—71.

Design and manufacturing of cryogenic metal-composite fuel tanks

¹V. A. TITOV, ¹O. A. YURANEV; ^{2,3}A. A. SKLEZNEV, ²A. F. RAZIN, ²A. A. BABICHEV;
⁴I. V. PSHENICHNIKOV, ⁴D. A. BORODULIN

¹ Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Moscow region, Russia

² Central Research Institute of Special Machinery, Khotkovo, Moscow region, Russia

³ Center of Advanced Technologies, Khotkovo, Moscow region, Russia

⁴ State Space Corporation "ROSCOSMOS", Moscow, Russia

Possibility of developing of cryogenic fuel tanks for liquid-propellant launch vehicles made of polymer composite materials using anisogrid lattice structures as load-bearing elements of the tank shell with an internal metal liner. Technological features are given of the tank are considered. The experimental data obtained on a scale model of the tank under consideration are presented. The results of an experimental study of the carrying capacity and weight efficiency of cryogenic fuel tanks of the proposed design are compared with the design characteristics of a similar waffle metal tank.

Keywords: composite materials; lattice structures; cryogenic fuel tank; load-bearing fuel tank.

УДК 621.454.3 + 691.175.3

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_2_21

EDN: AKTFLN

Анализ проблем применения композиционных материалов для ракетных двигателей на твердых топливах

Е. Ю. ЛУШПА, канд. техн. наук; В. А. КОСТЕНКО, канд. воен. наук;
В. В. КАБАКОВ

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Рассмотрены проблемные вопросы совершенствования углерод-углеродных композиционных материалов, применяемых при производстве ракетных двигателей на твердых топливах. Установлено, что основное внимание направлено на создание углерод-углеродных композиционных материалов с высокой эрозионной стойкостью и удельной прочностью, сохраняющейся при температуре до 4200 К.

Ключевые слова: углерод-углеродные композиционные материалы, ракетные двигатели на твердых топливах, эрозионная стойкость.

При проектировании и производстве ракетных двигателей на твердых топливах (РДТТ) широко применяют углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), обладающие высокой удельной прочностью, сохраняющейся при температуре до 2973 К, малым коэффициентом термического расширения, стойкостью к термоудару, достаточной жесткостью [1]. УУКМ представляют собой углеродную или графитовую матрицу, армированную углеродным или графитовым волокном.

Углеродная матрица этих КМ обладает высокой термостойкостью, а армирующий каркас из углеродных волокон позволяет в несколько раз увеличить прочность композита по сравнению с графитом [2, 3].

Основные преимущества УУКМ состоят в высокой термостойкости, малой плотности, стойкости к облучению. Они обладают высокими прочностными и жесткостными свойствами при обычной и повышенной температурах, низким термическим коэффициентом линейного расширения и рядом других ценных свойств. Из УУКМ изготавливают вкладыши критического сечения,

раструбы и другие элементы соплового блока РДТТ. Формирование каркаса двухмерно-армированного УУКМ включает:

- намотку на металлическую оправку углеродного волокнистого материала, пропитанного раствором фенолоформальдегидного связующего;
- автоклавное отверждение сформированного пакета при температуре 413,15 К и давлении 1 МПа с получением углепластиковой заготовки;
- карбонизацию углепластиковой заготовки в инертной среде при температуре 1073,15—1173,15 К;
- термообработку карбонизованной заготовки в вакуумной печи при температуре 2173,15—2273,15 К.

Окончательное заполнение пор, образовавшихся в каркасе, осуществляется осаждением пироуглерода, получаемого из газовой фазы при пиролизе метана при температуре 1173,15—1273,15 К.

Для обеспечения максимальной эрозионной стойкости УУКМ содержание связующего в углепластике должно составлять 30 ± 2 % от общей массы [4].

Разработка высокоэнергетичных топлив для РДТТ требует создания КМ с более высокой эрозионной стойкостью, чем у применяемых УУКМ, при этом рабочая температура может достигать 4200 К. Повышение эрозионной стойкости может быть достигнуто за счет повышения температуры плавления, теплопроводности, твердости, химической инертности. Достаточно перспективными композитами считаются материалы на основе тугоплавких карбидов переходных металлов и кремния (таблица).

Лушпа Евгений Юрьевич, доцент кафедры 202.

E-mail: euglushpa@list.ru

Костенко Валерий Анатольевич, доцент кафедры 202.

E-mail: Varnick70@yandex.ru

Кабаков Виталий Валериевич, старший преподаватель кафедры 104.

E-mail: Ser-KVV73@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2023 г.

© Лушпа Е. Ю., Костенко В. А., Кабаков В. В., 2023

Свойства тугоплавких карбидов переходных металлов [4]

Соединение	$T_{пл}, K$	$\lambda, Вт/(м·K)$ (300 K)	Предел прочности		ТКЛР $\alpha \cdot 10^6, 1/K$
			при растяжении $\sigma_p, МПа$	при сжатии $\sigma_{сж},$ МПа	
TiC	3054	68	65	1380	7,95
ZrC	3803	116	76	1600	7,01
HfC	4233	163	44	—	6,8
NbC	3660	150	67	2423	7,21
TaC	4257	219	80	1750	7,09

Замена углеродной матрицы на матрицу из карбидов тугоплавких металлов позволит решить указанные проблемы. Так, например, введение карбида тантала в пористый углеродный каркас позволяет существенно увеличивать предел прочности при сжатии, а главное понижает эрозионный унос в условиях работы РДТТ в 3—4 раза по сравнению с УУКМ. Поскольку карбид тантала смачивается медью, то композит С-ТаС-Си обладает эффектом абляции, что также способствует повышению эрозионной стойкости при использовании данного композита в РДТТ [4].

Другая значительная проблема связана с тем, что УУКМ быстро окисляется на воздухе при температурах выше 873 K. Поэтому применение перспективных композитов позволит повысить температуру эксплуатации изделий до 2273,15 K и выше в течение нескольких десятков часов при циклической эксплуатации [4].

Существует два основных подхода к защите углерод-углеродных материалов при их эксплуатации в окислительных и агрессивных средах: поверхностная и объемная защита.

Первое направление — это разработка покрытий внешней поверхности УУКМ. Предполагается, что покрытие должно состоять из нескольких слоев различных соединений, каждый из них несет свою функциональную нагрузку: барьерный слой, предотвращающий диффузию углерода из подложки, различные демпферные слои, обеспечивающие плавный переход по термическому коэффи-

циенту линейного расширения (ТКЛР), непосредственно жаростойкий слой и теплозащитный слой. Достоинство данного вида покрытий заключается в возможности обеспечить равномерный переход от подложки к внешнему слою по различным механическим и теплофизическим свойствам в пределах окислительностойкого покрытия.

Данные покрытия могут быть нанесены послойно различными способами, предпочтительно газофазными ("дифференциальные" покрытия), или термообработкой шликера из нескольких соединений, приводящей к "интегральному" покрытию.

Главный недостаток защиты УУКМ с помощью покрытий низкая трещиностойкость, что не позволяет применять их в условиях термоциклическости. Для успешного применения стойких к окислению УУКМ система защиты от окисления должна обеспечивать удовлетворительную работоспособность на протяжении всего срока эксплуатации. Из-за хрупкого характера разрушения покрытий различные ударные повреждения, приводящие к образованию сквозных трещин до углеродной подложки, сколов, могут свести на нет эффективность покрытия. Так оголенные до углерода участки, интенсивно окисляются и приводят к катастрофическому разрушению конструкций, особенно, если они эксплуатируются в воздушных потоках. Подобный характер хрупкого разрушения металлокомпозитных баллонов представлен в исследовании (рисунок) [5].



а



б



в



г

Характер разрушения композитной оболочки и лайнера металлокомпозитного баллона:

а — общий вид места разрушения;
б — вид со стороны сварного шва;
в — вид с противоположной стороны шва; г — разветвление и поворот зоны разрушения

Второе направление — объемная защита УУКМ от окисления заключается во введении различных ингибиторов в состав матрицы или наполнителя. Эти ингибиторы функционируют как поглотители кислорода и как стеклообразователи. В качестве ингибиторов обычно предлагают Si, B, Zr и различные соединения этих элементов. Совмещение поверхностной защиты с объемной позволяет предотвратить катастрофичность разрушения конструкции в случае повреждения внешнего покрытия, однако проблема сохранения высоких механических характеристик, присущих углерод-углеродным материалам, остается.

Основную роль в процессе эрозии материалов соплового тракта РДДТ играют термомеханическое и механическое разрушения рабочей поверхности при воздействии твердо- и жидкофазной составляющей потока. Растрескивание и скол прококсованного слоя композита обусловлены недостаточной твердостью и прочностью кокса при рабочих температурах, слабой связью кокса и связующего с армирующими волокнами, малой прочностью межслоевой связи.

Заключение

Несмотря на очевидные преимущества применяемых при производстве РДТТ углерод-углеродных композитных материалов, существует

ряд проблемных вопросов, которые в связи с созданием высокоэнергетичных РДТТ требуют совершенствования и самих УУКМ. Основными направлениями дальнейших исследований по разработке УУКМ, удовлетворяющих возросшие требования являются следующие:

- создание УУКМ с высокой эрозионной стойкостью;
- достижение удельной прочности УУКМ, сохраняющейся при температуре до 4200 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галкин Г. Н., Мигачев А. С., Ильин Е. А. Двигательные установки ракет: Учеб. Изд. 2. — Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. — 492 с.
2. Ильиных Е. Л. Углерод-углеродные композиционные материалы и технология изготовления излучателей из углерод-углеродных композиционных материалов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2015. Т. 1. С. 166—170. EDN: VRRATZ.
3. Щурик А. Г. Искусственные углеродные материалы. — Пермь: Изд-во УНИИМК, 2009. С. 127—231.
4. Скорород В. В., Никифоров Н. А., Резник С. В. и др. Материалы покрытия и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее // Передовые технологии производства. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2002. В 3-х т., Т. 2. — 296 с.
5. Лушпа Е. Ю., Амелин С. С., Гразион С. В. Особенности разрушения металлокомпозитных баллонов высокого давления для хранения сжатых газов: Сб. науч. ст. XLV Межведомств. науч.-техн. конф. "Вооружение и экономика". — М.: 46 ЦНИИ, 2021. С. 568—572.

Analysis of the problems of using composite materials for solid-fuel rocket engines

E. Yu. LUSHPA, V. A. KOSTENKO, V. V. KABAKOV
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

The main problematic issues and areas of improvement of carbon-carbon composite materials used in the production of rocket engines on solid fuels are considered. It has been established that the main issues of improvement are aimed at creating carbon-carbon composite materials with high erosion resistance and specific strength that persists at temperatures up to 4200 K.

Keywords: carbon-carbon composite materials, solid fuel rocket engines, erosion resistance.

УДК 538.95

DOI: 10.52190/2073-2562_2023_2_24

EDN: ALUQWH

Композиционные сегнетоактивные материалы, не содержащие свинец, для конструкций оборонного комплекса

С. И. ДУДКИНА; Л. А. ШИЛКИНА; В. А. АЛЕШИН; К. П. АНДРЮШИН, канд. физ.-мат. наук;
И. Н. АНДРЮШИНА, канд. физ.-мат. наук; И. А. ВЕРБЕНКО, д-р физ.-мат. наук;
Л. А. РЕЗНИЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики, г. Ростов-на-Дону, Россия

Представлены результаты изучения свойств твердых растворов на основе ниобатов натрия—лития при модифицировании 3- и 4-валентными ионами. Показано, что введение указанных модификаторов вызывает сходные изменения характеристик, немонотонные с ростом содержания модификаторов, что обусловлено их кристаллохимическим строением, а также может быть следствием их сложного распределения в структуре. Полученные материалы могут быть использованы в высокочастотных преобразователях устройств оборонного комплекса.

Ключевые слова: ниобаты натрия—лития, модифицирование, структура, микроструктура, электрофизические параметры.

Ранее авторами [1—8] уже были представлены результаты комплексного исследования сегнето-пъезокерамических (одна из разновидностей композиционных [3]) материалов (СПМ), не содержащих свинец, на основе ниобатов щелочных металлов (НЦМ). Последние являются безальтернативными основами [9] для замены широко используемых в мировой практике свинецсодержащих сред на основе n -компонентных (с $n = 2—6$) твердых растворов (ТР) вида PZT — $\sum_{n=1}^4 (PbV_{1-\alpha}''B_{\alpha}''O_3)_n$ (PZT — бинарная система ТР цирконата—титаната свинца, $Pb(Zr,Ti)O_3$) [10].

Необходимость такой замены диктуется экологическими соображениями, обусловленными чрезвычайной токсичностью свинца [11], что побудило ряд стран выступить с законодательными инициативами, запрещающими использование подобных сред в электротехнической и электронной отраслях [12—14].

Данная работа является продолжением и развитием предпринятых авторами ранее исследований и направлена на установление закономерностей фазообразования и формирования диэлектрических и пьезоэлектрических свойств ТР на основе ниобатов натрия—лития при их модифицировании 3- и 4-валентными ионами.

Объекты исследования, методы получения и диагностики образцов

Объектом исследования явился ТР бинарной системы $(Na,Li)NbO_3$ состава $Na_{0,875}Li_{0,125}NbO_3$, лежащий на ромбоэдрической (Рэ) границе морфотропной области (МО) системы и обладающий экстремальными значениями электрофизических параметров [15], который модифицировали стехиометрически 3-валентными ионами Al, Fe, Cr и 4-валентными ионами Ti, Si, Mn в количествах (0,2—3,0) ат. %. Керамические образцы получены двукратным твердофазным синтезом с последующим спеканием методом горячего прессования. Рентгенографические исследования и анализ микроструктуры проводили в соответствии с [16, 17], диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики определяли, основываясь на [18].

Дудкина Светлана Ивановна, научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: s.i.dudkina@yandex.ru

Шилкина Лидия Александровна, научный сотрудник.

E-mail: lid-shilkina@yandex.ru

Алешин Владимир Афанасьевич, старший научный сотрудник.

E-mail: vlalimir.alyoshin@gmail.com

Андрюшин Константин Петрович, ведущий научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: vortexblow@gmail.com

Андрюшина Инна Николаевна, старший научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: futur6@mail.ru

Вербенко Илья Александрович, директор.

E-mail: ilich001@yandex.ru

Резниченко Лариса Андреевна, профессор, заведующая отделом "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: lareznichenko@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2023 г.

© Дудкина С. И., Шилкина Л. А., Алешин В. А., Андрюшин К. П., Андрюшина И. Н., Вербенко И. А., Резниченко Л. А., 2023

Экспериментальные результаты, обсуждение

На рис. 1 и 2 показаны зависимости структурных характеристик (параметров элементарной перовскитной ячейки) ТР системы $(\text{Na,Li})\text{NbO}_3$ от содержания, x , вводимых модификаторов (М).

Рентгенографические исследования показали практически для всех случаев растворимость вводимых модификаторов (отсутствие примесных фаз, логическое изменение параметров ячейки).

При этом все элементы встраиваются в решетку, приводя, в соответствии с размерным фактором и занимаемым положением в структуре, к монотонному увеличению или уменьшению среднего параметра элементарной ячейки, \bar{a}_p , ромбической (Р) фазы. Так, например, все модификаторы, кроме Fe^{3+} , замещая Nb^{5+} и имея меньший радиус, r , (табл. 1), приводят к уменьшению \bar{a}_p .

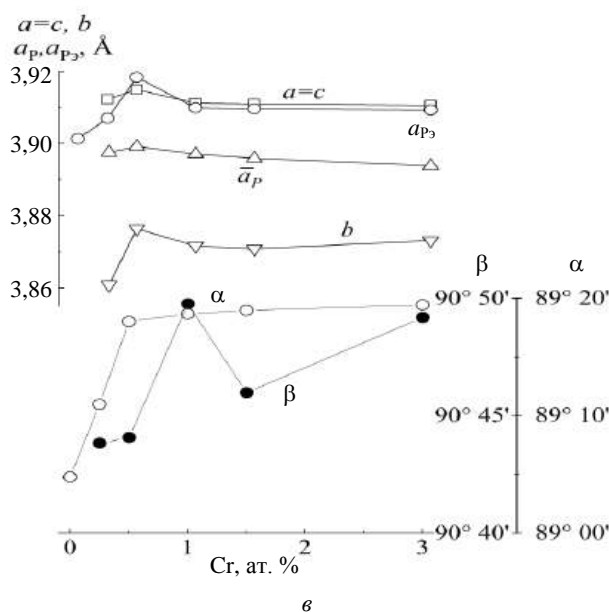
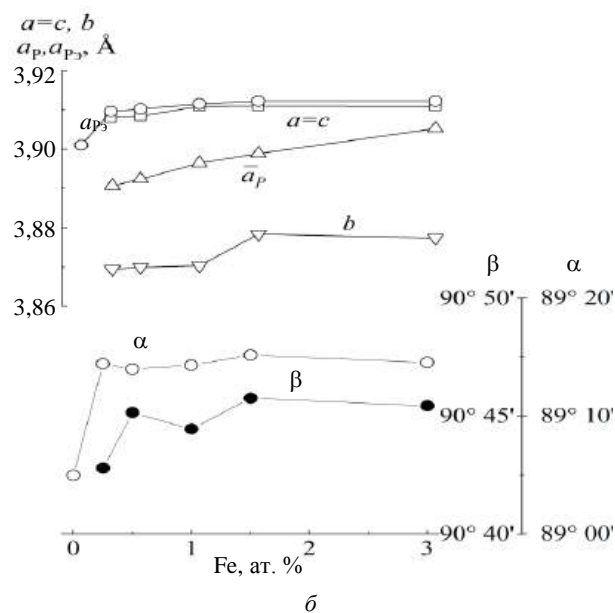
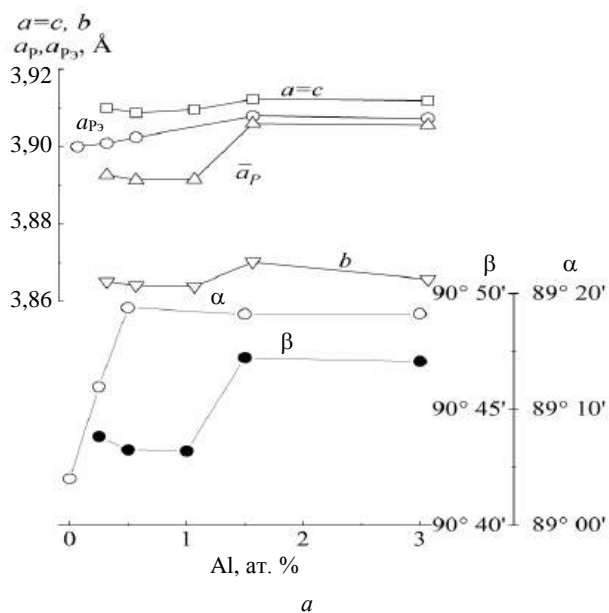


Рис. 1. Зависимость структурных характеристик исследуемого ТР от содержания модификаторов Al^{3+} (а), Fe^{3+} (б), Cr^{3+} (в) ($a = c, b$ — линейные параметры, α, β — угловые)

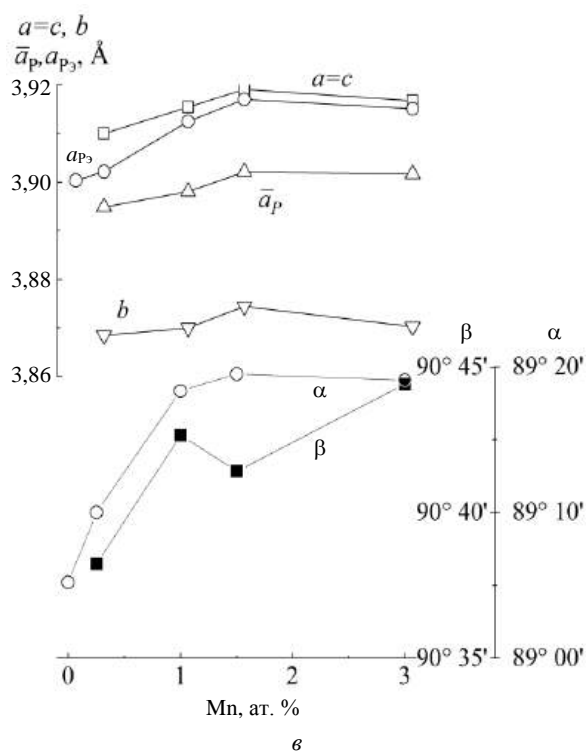
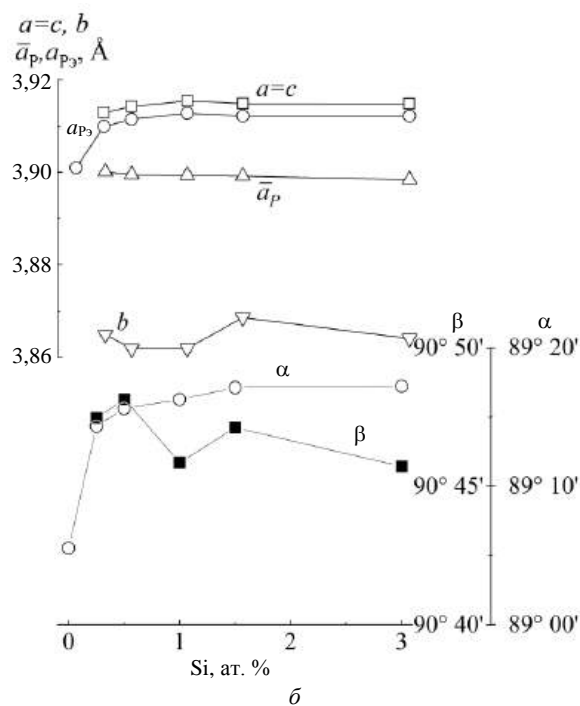
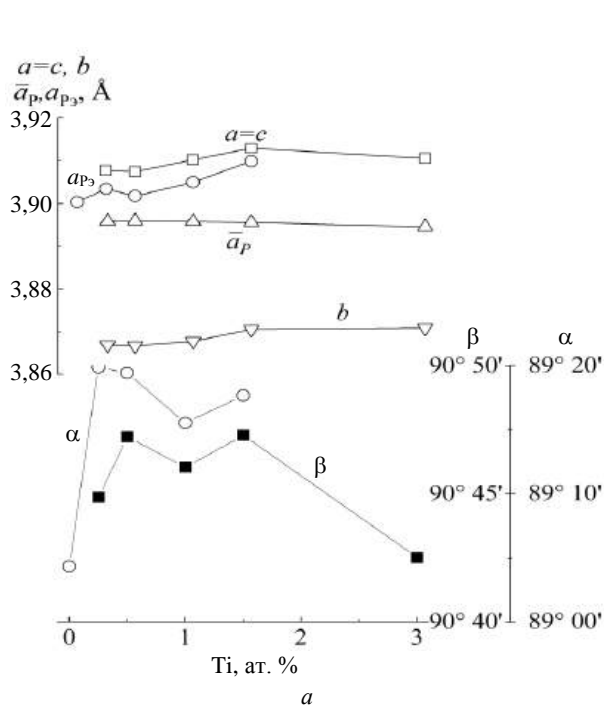


Рис. 2. Зависимости структурных характеристик исследуемого ТР от содержания модификаторов Ti^{4+} (а), Si^{4+} (б), Mn^{4+} (в) ($a = c, b$ — линейные параметры, α, β — угловые)

Исключение составляет Fe^{3+} , в случае которого \bar{a}_p увеличивается. Судя по очень малым размерам Al^{3+} , Mn^{4+} , Si^{4+} ($r = 0,57 \text{ \AA}$; $0,52 \text{ \AA}$; $0,39 \text{ \AA}$, соответственно), близким к предельно допустимым в структуре типа перовскита ($r_B \sim 0,51 \text{ \AA}$), при возможном их встраивании в решетку можно было бы ожидать резкого уменьшения \bar{a}_p . Однако этого не происходит. Для этих катионов характерно

неполное встраивание в решетку, а частичное внедрение в междуузельные или вакансионные пространства. Можно предположить также образование с их участием жидких фаз (ЖФ), локализующихся в межкристаллитных прослойках. Невстраиванию, возможно, может способствовать в некоторых случаях (Si) и разница в симметрии валентных орбиталей, а также и большие отличия в значениях электроотрицательности (см. табл. 1).

Таблица 1

Кристаллохимические характеристики ниобия и М-катионов

Валентности М-катионов	М-катионы	Кристаллохимические характеристики [16]			Электронные конфигурации внешних слоев
		Радиус катионов, r , Å (к.ч. 6)	Длина ненапряженных связей, $L_{\text{во}}$, Å	Электроотрицательность, ЭО, кДж/г-ат	
3	Al	0,57	1,90	922	S^2P
	Fe	0,67	2,03	1027	$(d^5)dS^2$
	Cr	0,67	1,99	1048	$(d^3)d^2S$
4	Ti	0,64	1,97	1089	d^2S^2
	Si	0,39	1,75	1131	S^2P^2
	Mn	0,52	1,91	1299	$(d^3)d^2S$
5	Nb	0,66	2,01	1006	d^4S^1

Обращает на себя внимание резко немонотонное поведение $\overline{a_p}$ Al^{3+} . Средний параметр заметно падает до $x = 1$ ат. %. Дальнейшее введение Al приводит к некоторому росту $\overline{a_p}$ и далее очень слабому изменению. Скорее всего, это говорит о том, что при малых концентрациях модификатора последний встраивается в решетку, а при $x > 1$ ат. % начинает заполнять нерегулярные позиции, внедряясь в структуру или образуя ЖФ.

На рис. 3 представлены фрагменты микроструктур ТР системы $(Na, Li)NbO_3$, модифицированного 3- и 4-валентными ионами.

Микроструктуры ТР, модифицированного Al^{3+} , Fe^{3+} и Cr^{3+} , характеризуются мелкозернистостью

с наличием отдельных крупных зерен в ТР с Cr^{3+} (см. рис. 3, в).

Для ТР с Ti также характерна мелкозернистая структура. Кремний, не входя полностью в структуру (из-за малости размера), сегрегируется по границам зерен, блокируя их рост (см. рис. 3, д). Введение Mn способствует формированию неоднородной микроструктуры с мелкими зернами в центре образцов и гигантскими плотноупакованными — на периферии, образующими по краям корку. Возникновение последней характерно для керамик на основе ниобата натрия и связано с выдавливанием на поверхность фторсодержащей ЖФ, способствующей вторичной прерывистой рекристаллизации (росту идеоморфных зерен).

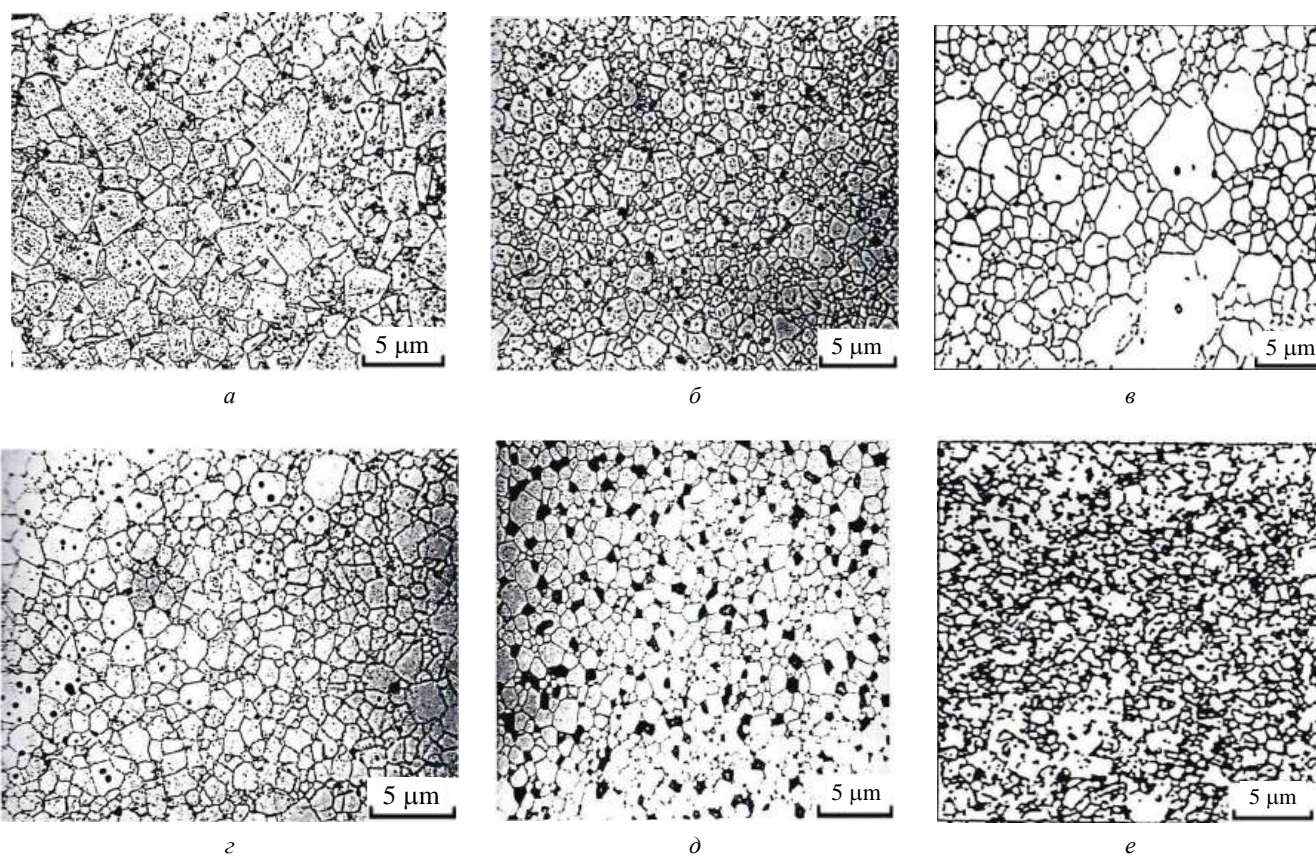


Рис. 3. Фрагменты микроструктур исследуемого ТР, модифицированного 3- и 4-валентными ионами: Al^{3+} (а), Fe^{3+} (б), Cr^{3+} (в), Ti^{4+} (г), Si^{4+} (д), Mn^{4+} (е) в количестве 2,0 ат. %

На рис. 4 и 5 приведены зависимости структурных (однородный параметр деформации ромбической, δ_R , и ромбоэдрической, δ_{R3} , фаз), керамических (плотность, ρ , и температура спекания, $T_{сп}$) и электрофизических характеристик (относительная диэлектрическая проницаемость поляризованных образцов, $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$, тангенс угла диэлектрических потерь, $\tan \delta$, коэффициент электромеханической связи радиальной моды колебаний, K_p , механическая добротность, Q_m , скорость звука, V_1^E , модуль Юнга, Y_{11}^E , удельное электрическое сопротивление, ρ_v , температура Кюри, T_K) от содержания модификаторов в исследуемых ТР.

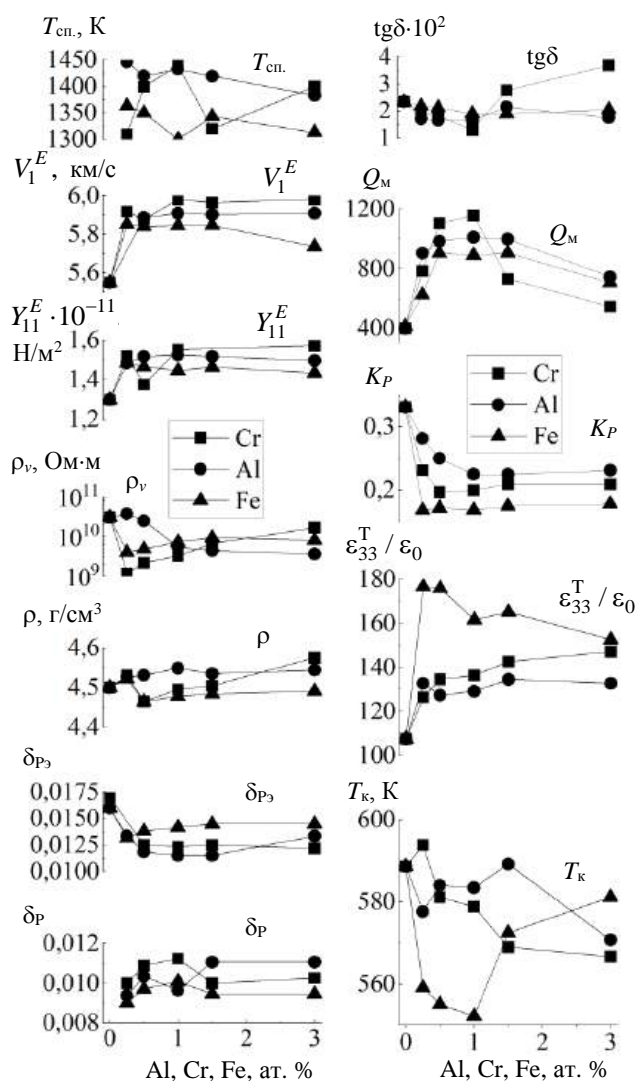


Рис. 4. Зависимость керамических, структурных и электрофизических характеристик исследуемого ТР от содержания 3-валентных модификаторов Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}

Поведение электрофизических характеристик подчиняется известной логике зависимости от параметров структуры (δ_R , δ_{R3}). Небольшие аномалии

в характере изменения параметров при малых x , по-видимому, связаны с аналогичными аномалиями на кривых $\delta(x)$ и $\rho(x)$, т. е., кроме структурных характеристик на электрофизические свойства влияет и плотность керамики. В свою очередь, её колебания при малых концентрациях могут быть следствием сложного распределения модификатора в структуре.

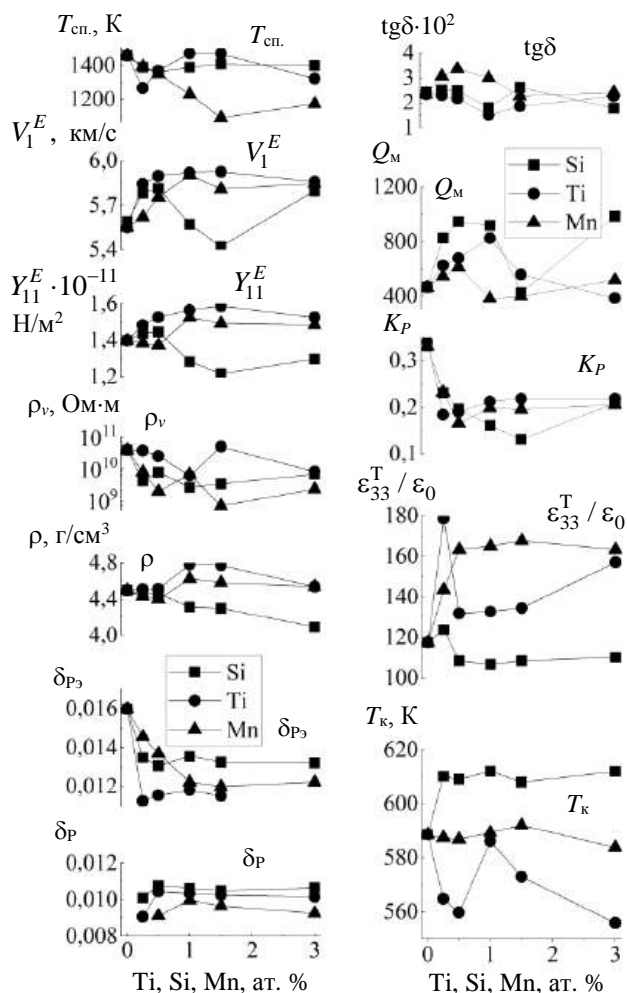


Рис. 5. Зависимость керамических, структурных и электрофизических характеристик исследуемого ТР от содержания 4-валентных модификаторов Ti^{4+} , Si^{4+} , Mn^{4+}

Сравнение свойств ТР, модифицированных 3-валентными элементами, показало следующее. Введение модификаторов вызывает сходные изменения характеристик, при этом наиболее сильные отмечаются в случае модифицирования железом. Это, вероятно, связано с тем, что из всех перечисленных модификаторов железо, как уже отмечалось ранее, имея больший, чем Nb радиус, приводит к отличным по сравнению с Cr и Al, изменениям структуры. Аномалии в ходе параметров при малых концентрациях модификаторов связаны с аналогичными аномалиями δ_R , δ_{R3} . Срав-

нивая действие Cr и Al, видим, что в большей степени изменяются параметры в первом случае, хотя размер Cr близок Nb. Но действие Al в определенной мере нивелируется, с одной стороны, образованием ЖФ (алюминаты различного состава), с другой — сложным распределением его в структуре исходного ТР. Остановимся более детально на сопоставлении свойств ТР с встроившимися в структуру (на месте В) Cr^{3+} и Fe^{3+} . Введение таких акцепторных модификаторов должно было бы при n -типе проводимости исходной системы привести к увеличению ρ_v . Тем не менее, в обоих случаях ρ_v падает. Объяснение такому факту может быть дано исходя из специфики кристаллохимического строения ТР с ионами переменной валентности, прежде всего, Nb, склонных при повышенных температурах к восстановлению и, как следствие, образованию в ТР вакансий. ТР с Cr^{3+} и Fe^{3+} обладают более высокими значениями однородного параметра деформации элементарной ячейки преобладающей ромбической фазы. Во всем концентрационном интервале $\delta_{\text{P(Cr)}} > \delta_{\text{P(Fe)}}$, при этом изменения δ_r в обоих случаях немонокотны: до 1 ат. % модификатора δ_r растет, далее (> 1 ат. % модификатора) — падает. С таким поведением δ_r коррелируют изменения Q_m . Общая тенденция в обоих случаях ведёт к увеличению Q_m , при этом до 1 ат. % модификатора Q_m растет и $Q_{\text{m(Cr)}} > Q_{\text{m(Fe)}}$, далее (> 1 ат. % модификатора) Q_m падает и $Q_{\text{m(Cr)}} < Q_{\text{m(Fe)}}$. $\text{tg}\delta$ в случае Fe^{3+} — падает, в случае Cr^{3+} — растет. Таким образом, по действию на указанные параметры (δ_r , Q_m , $\text{tg}\delta$) рассматриваемые модификаторы могут быть отнесены к группе сегнетожестких. Но возрастание $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$ (с максимумом при 0,2 ат. % модификатора) и падение T_k указывает на "сегнетомягкость" этих элементов. Таким образом, поведение анализируемых модификаторов неоднозначно. Отмечается некий "дуализм" при их воздействии на две

группы электрофизических параметров (Q_m , $\text{tg}\delta$ и $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$, T_k). Снижение K_p в обоих случаях модифицирования является следствием смещения ТР на фазовой диаграмме системы $(\text{Na,Li})\text{NbO}_3$.

В группе 4-валентных модификаторов сравнение свойств модифицированных ТР затруднено из-за неодинакового характера вхождения вводимых элементов в решетку.

В табл. 2 приведены электрофизические параметры разработанных материалов. Представленные ТР имеют низкие значения относительной диэлектрической проницаемости, высокие значения механической добротности и скорости звука при сохранении достаточно высокой пьезоактивности и могут быть использованы в высокочастотных преобразователях устройств оборонного комплекса (высокочувствительных моночастотных резонаторах, работающих на толщинных колебаниях, ультразвуковых линиях задержки, эксплуатируемых в диапазоне 15—30 МГц и др.).

Высокая скорость звука позволяет упростить технологию изготовления пьезоэлементов за счет увеличения их толщины при работе на высоких частотах. Низкий удельный вес этих материалов ($\sim 4,5$ г/см³) позволяет использовать их в устройствах, в которых весовые характеристики являются решающими.

Заключение

Полученные результаты целесообразно использовать при разработке высокочастотных преобразователей устройств оборонного комплекса (высокочувствительных моночастотных резонаторах, работающих на толщинных колебаниях, ультразвуковых линиях задержки, эксплуатируемых в диапазоне 15—30 МГц, в устройствах, где весовые характеристики являются решающими).

Таблица 2

Электрофизические параметры разработанных материалов

Валентности М-катионов	М-катионы	Электрофизические параметры						
		T_k , К	ρ , г/см ³	$\text{tg}\delta \cdot 10^2$	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	K_p	Q_m	V_1^E , км/с
3	Al	578	4,53	1,20	120	0,21	950	5,90
	Fe	551	4,47	1,50	150	0,16	820	5,85
	Cr	562	4,49	1,00	130	0,18	1090	5,96
4	Ti	580	4,70	1,42	125	0,21	800	5,87
	Si	612	4,30	1,70	100	0,16	900	5,50
	Mn	590	4,58	2,90	155	0,21	340	5,87

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ). Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета "Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел".

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко О. Ю., Резниченко Л. А., Шилкина Л. А., Разумовская О. Н., Дудкина С. И., Гаджиев Г. Г., Каллаев С. Н., Омаров З. М. Электрофизические и тепловые свойства бессвинцовых ниобатных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2008. № 4. С. 60—80.
2. Ивлиев М. П., Раевская С. И., Кравченко О. Ю., Резниченко Л. А., Раевский И. П. Влияние модифицирования литием на устойчивость сегнетоэлектрического состояния в пьезоэлектрических керамических материалах на основе NaNbO_3 // Конструкции из композиционных материалов. 2008. № 4. С. 80—87.
3. Ивлиев М. П., Раевская С. И., Кравченко О. Ю., Резниченко Л. А., Раевский И. П. Влияние модифицирования и гетероэлектронными ионами на диэлектрические свойства пьезоэлектрических керамических материалов на основе ниобата натрия // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 1. С. 61—68.
4. Андрияшин К. П., Павленко А. В., Вербенко И. А., Турик А. В., Дудкина С. И., Резниченко Л. А. Бессвинцовые сегнетоэлектрические материалы с широким спектром показателей механической добротности, диэлектрической и пьезоэлектрической активности // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 2. С. 53—59.
5. Садыков Х. А., Вербенко И. А., Резниченко Л. А., Шевцова С. И., Павленко А. В., Шилкина Л. А. Эффекты простого и комбинированного модифицирования ниобатных материалов, не содержащих токсичные элементы // Конструкции из композиционных материалов. 2013. № 3. С. 45—55.
6. Павленко А. В., Вербенко И. А., Резниченко Л. А., Шилкина Л. А., Дудкина С. И. Влияние оксида никеля на диэлектрические, пьезоэлектрические параметры композиционных материалов на основе ниобатов щелочных металлов // Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 1. С. 60—64.
7. Андрияшин К. П., Андрияшина И. Н., Павленко А. А., Шилкина Л. А., Резниченко Л. А. Влияние постоянного электрического поля на электрофизические свойства функциональных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 4. С. 63—66.
8. Абубакаров А. Г., Шилкина Л. А., Андрияшина И. Н., Андрияшин К. П., Вербенко И. А., Резниченко Л. А., Нагаенко А. В., Зейлингер С. А., Садыков Х. А. Влияние термодинамической предистории на микроструктуру сегнетоактивных ниобатных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2017. № 3(147). С. 53—69.
9. Saito Y., Takao H., Tani T. et al. Lead-free piezoceramics // Nature. 2004. V. 432(4). P. 84—87.
10. Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А., Сахненко В. П., Клевцов А. Н., Дудкина С. И., Шилкина Л. А., Дергунова Н. В., Рыбачев А. Н. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна пьезоэлектрических материалов. — Ростов-на-Дону: МП "Книга", 2001—2002. Т. 1, 2. — 800 с.
11. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды. — Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 г., № 1316-Р.
12. Directive 2002/95/EU of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electronic equipment // Official Journal of the European Union. L. 37. 2003. V. 46. P. 19—23.
13. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment // Official Journal of the European Union. L. 174. 2011. V. 54. P. 88—110.
14. О Стратегии национальной безопасности РФ до 2020 года. — Указ Президента РФ от 12.05.2009 № 537 (ред. от 01.07.2014).
15. Резниченко Л. А. Фазовые состояния и свойства пространственно-неоднородных сегнетоактивных сред с различной термодинамической предисторией: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Ростов-на-Дону, 2002. — 42 с.
16. Фесенко Е. Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. — М.: Атомиздат, 1972. — 248 с.
17. Кингери У. Д. Введение в керамику. — М.: Изд-во лит-ры по строительству. Изд. 2, перераб. / Пер. с англ. 1970. — 500 с.
18. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезоэлектрические. Технические условия. Введ. 01.01.88. — 140 с.

Lead-free composite ferroactive materials for defense complex structures

S. I. DUDKINA, L. A. SHILKINA, V. A. ALESHIN, K. P. ANDRYSHIN,
I. N. ANDRYSHINA, I. A. VERBENKO, L. A. REZNICHENKO
Southern Federal University, Research Institute of Physics, Rostov-on-Don, Russia

Presents the results of studying the properties of the solid solutions based on the sodium-lithium niobates modified with 3- and 4-valent ions. It is shown that the introduction of these modifiers causes similar changes in the characteristics, nonmonotonic with an increase in the content of the modifiers, which is due to their crystal chemical structure, and may also be a consequence of their complex distribution in the structure. The obtained materials can be used in high-frequency converters of the defense complex devices.

Keywords: sodium-lithium niobates, modification, structure, microstructure, electrophysical parameters.

УДК 622.32; 622.33; 622.84
DOI: 10.52190/2073-2562_2023_2_31
EDN: APWGHD

Применение новых материалов в горной промышленности

А. Н. КАЛУШЕВ, канд. техн. наук; А. Ю. ДУБРОВИН
ООО «НПП «Аквасинт», г. Пермь, Россия

К. А. КАЛУШЕВ
ПАО «Лукойл», Москва, Россия

Приведены результаты разработки теплоизолирующего покрытия на основе полимерного связующего с высоким наполнением полыми микросферами (до 70 % объема). Дано сравнение с популярными марками пенополиуретана. Показана возможность применения материала Аквизол-159 для теплоизоляции трубопроводов на примере нефтегазовой отрасли. Представлены конкретные технические решения для разных задач на этих трубопроводах, описана технология нанесения покрытия, даны результаты расчетов и экспериментов. Предложены варианты использования Аквизол-159 с армированием для решения проблем технологической безопасности в угольных, нефтедобывающих и иных шахтах.

Ключевые слова: теплоизоляционное покрытие, микросферы, полимерное связующее, трубопроводы, прочность, долговечность, технологическая безопасность.

Рост потребления минеральных ресурсов на планете привёл к необходимости разработки месторождений в тяжёлых климатических условиях, на больших глубинах, под водой на шельфе, в условиях повышенной загазованности подземных выработок. При этом всё серьёзнее ставятся вопросы технологической и экологической безопасности работ.

Возникающие проблемы неизбежно требуют применения новых материалов, которые позволяют регулировать их основные параметры и одновременно являются доступными широкому кругу отечественных предприятий.

Разработка материала Аквизол-159

Несмотря на большую многолетнюю историю (более 50 лет) использования сферопластиков в нашей стране, этот материал практически неизвестен широкой публике, так как использовал для

решения задач повышения обороноспособности страны. Но объективно данный материал является продукцией двойного назначения, поскольку имеет огромные потенциальные возможности создания многопланового спектра композиционных материалов с заранее заданными свойствами и для гражданского применения. Работы в этом направлении в стране проводились с середины 1960-х г. Накоплен уникальный опыт. Прогнозный срок службы таких материалов, определенный по результатам ускоренных климатических и натурных испытаний, составляет не менее 50 лет. Разработаны и практически применяли более 40 рецептур сферопластиков. В 1982 г. был разработан и испытан материал для работы под водой до глубины 12 км (глубже самой глубокой Марианской впадины в мировом океане).

Одним из важных направлений по созданию новых материалов является разработка теплоизоляционных покрытий (ТИП). Ставится задача энергосбережения, и защита производственного пространства от избыточного теплопритока. Например, на участках с вечной мерзлотой, а также для сбережения поверхности почвы.

На сегодняшний день промышленность использует неорганические и органические материалы для ТИП, а также их комбинации. Например, ввод в действие изменения 3 СНиП П-3-79 "Строительная теплотехника" предусматривает 2- и 3-кратное увеличение теплового сопротивления

Калушев Александр Николаевич, научный консультант.

E-mail: alexandr.kalushev@gmail.com

Дубровин Андрей Юрьевич, руководитель проекта Аквизол-159.

E-mail: kamapak@mail.ru

Калушев Константин Александрович, старший менеджер.

E-mail: Konstantin.kalushev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19 января 2023 г.

© Калушев А. Н., Дубровин А. Ю., Калушев К. А., 2023

ограждающих конструкций вновь строящихся зданий и обусловил разработку и появление в строительстве ряда новых материалов и технологий теплоизоляции. В частности, распространение получили пенополистирол, пенополиуретан, маты на основе базальтовых волокон и т. д. Каждый новый материал имеет свои преимущества и недостатки.

Анализ производственных и технологических особенностей новых материалов, проведенный ООО "НПП "Аквасинт", привёл к необходимости разработки ТИП, максимально удовлетворяющих требования добывающей промышленности, а именно, иметь высокую долговечность и прочность, низкие плотность, теплопроводность, горючесть, удовлетворительную технологичность применения как в заводских условиях, так и на месторождениях полезных ископаемых.

В результате был получен материал Аквизол-159 [1], который представляет собой механическую смесь полых микросфер и полимерного связующего. При этом микросферы имеют размер 2—500 мкм и могут быть стеклянными, керамическими и полимерными, а насыщение ими связующего может достигать до 70 % по объёму. В каче-

стве связующего предпочтение отдано эпоксидной смоле ЭД-20 и её модификациям.

Поскольку широкое применение в промышленности получил пенополиуретан, то в таблице приведены их сравнительные характеристики на основе данных [2] с Аквизол-159.

Кроме того, согласно ускоренным климатическим испытаниям, срок службы Аквизол-159 составляет не менее 50 лет при нулевом влагопоглощении. При этом допускается эксплуатация в морской воде на глубине до 2 км. Пожароопасность: трудновозгораемый, самозатухающий, а при введении в рецептуру антипиренов — негорючий (Г1) согласно [3].

Аквизол-159 обладает лучшими параметрами по прочности и близкими по теплопроводности в сравнении с двумя видами ППУ (см. таблицу). По прочим же эксплуатационным параметрам он находится вне конкуренции. Достоинством нового материала является возможность подбора параметров под решаемую задачу путём варьирования фракционным составом микросфер и их процентным насыщением связующего. На рис. 1 представлен образец материала с полимерными (фенолформальдегидными) микросферами.

Характеристики	Материал		
	Микроячеистые (МПУ-101)	Жесткие вспененные (ППУ-350)	Аквизол-159
Плотность, кг/м ³	580	50	400
Предел прочности при растяжении, МПа	7,1	0,2	20—30
Предельная деформация при растяжении, %	490	10	8
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,093	0,028	0,052—0,07
Коэффициент Пуассона	0,32	0,35	0,33



Рис. 1. Испытания образцов на стенде

Необходимо добавить, что цвет материала может быть изменён по требованию заказчика.

Технология применения Аквизол-159 на трубопроводах

В большинстве технологических процессов применяют трубопроводы, по которым циркулирует или теплоноситель, или перерабатываемое сырьё (пульпа на горно-металлургическом комбинате "Норильский Никель", нефтегазовые промыслы). Во всех случаях необходима теплоизоляция, которая отличалась бы долговечностью и эффективностью. Для решения технологических задач использования Аквизол-159 была применена опытная установка по смешению и подаче компонентов на изолируемое изделие в периодическом режиме. В качестве объекта исследования взята стальная труба диаметром 159 мм и длиной 6000 мм, а также полиэтиленовая труба большего диаметра в качестве пресс-формы длиной 600 мм. Нагнетание материала осуществлялось в межтрубное пространство для формирования ТИП толщиной 20 мм. Время заполнения оценивали по формуле:

$$T = \frac{\mu}{P} \left(\frac{l}{R} \right)^2 k$$

где μ — вязкость массы, Па·с;
 P — давление в чаше, Па;
 l — длина пресс-формы, м;
 R — внутренний радиус пресс-формы, м;
 k — геометрический коэффициент.

Расчёты показали ожидаемое время формирования трубы длиной 6000 мм в непрерывном режиме приблизительно 40 минут. На рис. 2 представлена изготовленная труба.



Рис. 2. Образец теплоизолированной трубы Д 159

Авторы считают данное время приемлемым, поскольку оно конкурентоспособно в сравнении с технологией нанесения других видов ТИП (пенополиуретан, минеральная вата). Для прокачки нефти с высокой вязкостью от скважины до пункта сбора применяется её нагрев. Был выполнен расчёт потери температуры нефти при прокачке её на 40 км, диаметре трубы 213 мм и толщине ТИП Аквизол-159, равном 45 мм. Параметры нефти: $P = 780 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,015 \text{ Па·с}$, $T_{\text{нач.}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Расчёт проведен по методике [4, 5]. Коэффициент теплоотдачи от теплоизоляции к грунту определяли по формуле Форхгеймера-Гребера. Расчёт показал падение температуры в трубопроводе до $63,5 \text{ }^\circ\text{C}$, что найдено приемлемым на научно-техническом совете ООО "Лукойл-Коми" [6].

Также в период 16–22 октября 2019 г. ООО "Центр технического сервиса" ("ЦТС"), ООО "ЛУКОЙЛ-Пермь" провели опытно-промышленные испытания антикоррозионного тепло-гидрозащитного покрытия Аквизол-159 производства ООО "НПП "Аквасинт". Было просверлено отверстие диаметром 4 мм на трубопроводе, затем нанесено покрытие Аквизол-159. В дальнейшем в трубопроводе с рабочим давлением 3,2 МПа было подано давление 4 МПа. По истечении 3 суток давление повысили до 5,8 МПа. Результаты положительные.

Проведенные опытно-промышленные испытания подтвердили, что:

- покрытие Аквизол-159 соответствует требованиям ТУ32.99.59-001-92352132-2019;
- при этом, попытки снятия с трубы покрытия Аквизол-159 после испытаний также подтвердили его высокую прочность и стойкость к любым внешним и внутренним механическим воздействиям;
- ООО "ЛУКОЙЛ-Пермь" и ООО "ЦТС" считают возможным применение покрытия
- Аквизол-159 как средство для ремонта дефектов по телу трубопроводов в подземном исполнении;
- покрытие Аквизол-159 рекомендовано для применения ООО "ЛУКОЙЛ-Пермь" при рабочем (эксплуатационном) давлении в трубопроводах, не превышающем 3,2 МПа.

Кроме испытаний участков трубопроводов, Компания НПП "Аквасинт" разработала и успешно апробировала технологическую схему тепло-гидроизоляции и ремонта в полевых условиях наиболее проблемной зоны трубопроводов — зон сварных швов (стыков) труб.

Кроме того, консультации со специалистами ООО "ЛУКОЙЛ-инжиниринг", г. Пермь, выявили наличие эксплуатационных проблем с насосно-компрессорными трубами (НКТ), которые пред-

ставляют собой вакуумный термокейс. По таким НКТ идёт закачка в пласт перегретого пара с $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в целях разжижения нефти перед её подъёмом на поверхность с глубин более 1000 м. Авторами было предложено техническое решение по изоляции НКТ материалом Аквизол-159 с защитой его от деструкции в связи с повышенной температурой среды [7]. Выполнены расчёты по падению температуры пара на глубине 1000 м, которая составила примерно $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Практический эксперимент был поставлен на площадке ООО "Лукойл-Коми", где перегретый пар подаётся на устье скважины. На рис. 3 показаны два участка с врезанными трубами, имеющими ТИП Аквизол-159 с дополнительной термозащитой.



Рис. 3. Смонтированный образец на $220\text{ }^{\circ}\text{C}$

Эксплуатация в течение 30 дней и последующая разборка с дефектовкой показали полную сохранность ТИП на образце с $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, образец с $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4) претерпел изменение цвета ТИП, но сохранил свои защитные свойства [8].



Рис. 4. Смонтированный образец на $350\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для реализации описанных примеров использования Аквизол-159 авторами была разработана установка для непрерывного смешения компонентов и нагнетания на изделие для его изоляции или

в пресс-форму, что определяется конкретной задачей. Установка имеет отдельные потоки связующего, отвердителя и микросфер, поступающих после дозирования в соответствующие смесители. Этим достигается увеличение живучести приготовленной массы, повышение надёжности, и ремонтпригодность установки [9]. Одновременно разработана документация на подобную установку в мобильном исполнении (на шасси КамАЗ) для ремонтных работ ТИП трубопроводов на местности.

Проведенные ООО "Аквасинт" исследования и конструкторские проработки показали возможность более широкого применения материала Аквизол-159.

Применение Аквизол-159 в шахтах. Теплоизоляция

Имеется уникальная шахта, где добывается высоковязкая нефть, — это п. Ярега, Республика Коми. Для обеспечения текучести нефти в породе, прилегающую к выработке, нагнетается пар высокой температуры $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стены шахты облицованы деревянными досками (40 мм), имеющими врезки вентиля для приёма самотекущей нефти (рис. 5).



Рис. 5. Выработка шахты Ярега

В результате в шахте постоянно держится температура $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше, что крайне неблагоприятно для персонала. Исследования, проведенные ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг", "ПермНИПИнефть", г. Пермь, показали превышение нормативов (рис. 6).

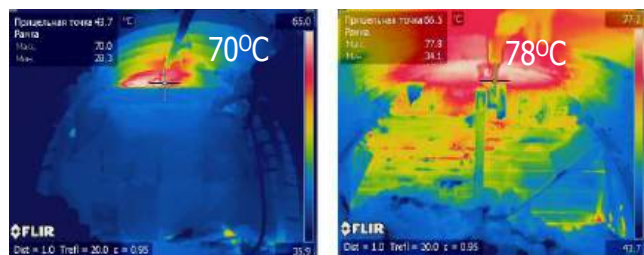


Рис. 6. Тепловизионная съёмка изоляционной перемычки

Облицовочные доски периодически выходят из строя и требуют замены. Поверхность досок, обращённая к породе, находится в постоянном контакте с нефтью и подвергается разрушению.

На основании протокола ВКС, организованной Академией Горных Наук с участием филиала ООО "Лукойл-Инжиниринг" "ПермьНИПИнефть", ООО "НПП "Аквасинт", ООО "АРУС", ООО НПО "Стрим" от 19.02.2021 г., Москва и протокола № 363 Технического совета ООО "Лукойл-Коми" от 24.06.2021 г. решено, постепенную замену досок на панели из материала Аквизол-159. При этом толщина облицовки может быть уменьшена из-за более низкой теплопроводности нового материала. Панели могут быть отлиты в заводских условиях нужной формы и размеров, доставлены к месту сборки местным транспортом из-за небольшого веса. Также панели могут быть снабжены закладными элементами для установки запорной арматуры или других приспособлений. Сборка панелей проводится склеиванием этим же материалом, приготовленным на месте в малогабаритном смесителе.

Полагаем, что создание герметичной теплоизолирующей облицовки шахты позволит улучшить условия труда и уровень техники безопасности. Очевидно, что данное предложение может быть применимо и для других подземных производств.

Применение Аквизол-159 в шахтах. Капсулы жизни

Правила безопасности в угольных шахтах, вступившие в силу с 1.01.2015 г., предусматривают обустройство в шахтах пунктов коллективного спасения персонала (ПКСП) в качестве дополнительного средства самоспасения людей. В работе [10] подробно изложена проблема и представлены пути её решения.

ООО "НПП "Аквасинт" считает целесообразным использование в качестве материала ограждающих конструкций ПКСП ("Капсула жизни") материала Аквизол-159, армированного тканой металлической сеткой из нержавеющей проволоки. ПКСП может быть собран на месте, иметь любую форму и габариты.

Обсуждаемая капсула по сути является оболочечной конструкцией с вязкоупругим полимерным наполнителем. Таким образом, для расчёта могут быть использованы методики, разработанные для зарядов твёрдого топлива ракетных двигателей [11].

Авторы считают, что армирование ТИП значительно повышает стойкость конструкции к ударной волне при взрыве, блокирует пробитие метал-

лическими элементами и фрагментами породы. После проведения расчётов можно выбрать оптимальную форму капсулы и толщину её стенок. Материал при качественной сборке панелей или других элементов обеспечивает полную герметичность жизненного пространства и защиту от температуры до 220 °С длительное время. Для защиты от большей температуры необходимы специальные дополнительные решения.

Материал Аквизол-159 возможно армировать различными материалами и их сочетаниями. Например, проведен эксперимент по проверке проникновения гвоздя 100 мм под нагрузкой 100 кг через два слоя тонкой стальной сетки разных номеров. Гвоздь насквозь не проходит, а наличие вязкого материала (Аквизол-159) ещё больше тормозит проникновение.

Выводы

Разработан полимерный материал с высокими прочностными и теплозащитными свойствами. Показаны примеры его применения в добывающей промышленности, в том числе в шахтах. Разработано оборудование для изготовления материала и изделий из него.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТУ 32.99.59-001-92352132-2019 "Аквизол 159" для изоляции.
2. Левин С. Р., Аликин В. Н., Елдашев Ю. А. и др. Разработка и исследование энергосберегающих и подземных строительных конструкций и материалов. — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006. — 198 с.
3. Сертификат НГ Росс RU.32132.04СПЖ0.OC01.00268.
4. Руководящий документ 39-30-139-79. Методика теплового и гидравлического расчёта магистральных трубопроводов при стационарных и нестационарных режимах перекачки ньютоновских неьютоновских нефтей в различных климатических условиях. — Уфа: Изд-во ВНИИСПНефть, 1979. — 55 с.
5. Исаев С. И., Кожин И. А., Кофанов В. И. и др. Теория массообмена: Учеб. для вузов / Под ред. Леонтьева А. И. — М.: Высшая школа, 1979. — 495 с.
6. Протокол № 363 Технического совета "Лукойл-Коми" от 24.06.2021 г., г. Ужгород. — 5 с.
7. Дубровин А. Ю., Дубровина О. В., Калусев А. Н. и др. Насосно-компрессорная труба с теплоизоляционным покрытием. Патент РФ № 2780036. Заявл. 10.06.2022. Оpubл. 19.09.2022.
8. Протокол ВКС организованной Академией Горных Наук с участием филиала ООО "Лукойл-Инжиниринг" "ПермьНИПИ нефть", ООО "НПП "Аквасинт", ООО "Арус", ООО НПО "Стрим" от 19.02.2021 г., Москва. — 5 с.
9. Власов В. В., Дубровин А. Ю., Дубровина О. В. и др. Способ получения и нанесения сферопластика на трубы и устройства для его производства непрерывно циклическим способом. Патент РФ № 2770942 РФ. Заявл. 22.10.2020. Оpubл. 25.04.2022.

10. Черепов А. А., Ерусланов А. П., Ярош А. С. и др. Концепция создания пунктов коллективного спасения персонала при аварийной ситуации. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2015. № 2. С. 6—15.

11. Аликин В. Н., Маланин В. В., Соколовский М. И. и др. Математическое моделирование теплового и напряжённо-деформированного состояния оболочечных конструкций с наполнителем. — Пермь: ОАО "НИИУМС", 2007. — 113 с.

Application of new materials in mining industry

A. N. KALUSHEV, A. Yu. DUBROVIN

LLC "NPP "Aquasint", Perm, Russia

K. A. KALUSHEV

PJSC "LUKOIL", Moscow, Russia

The results of the development of a thermal insulation coating are presented of development of a heat-insulating coating based on polimeric binder with dence filling with hollow microspheres (up to 70 % of volume). The article compares the coating with popular types of polyurethane foam. It illustrates the possibility to utilize Aquisol — 159 for heat-insulation of oil and gas pipelines. The article provides for specific technical solutions related to those pipelines, describes the technology of coating and delivers the results of calculations and experiments. It proposes options to utilize reinforced Aquisol-159 for solving issues of technical safety for coal, oil producing and other mines.

Keywords: heat-insulating coating, microspheres, polimeric binder, pipelines, strength, durability, technological safety.

Влияние схемы армирования углепластика на изменение физико-механических свойств при воздействии СВЧ электромагнитного поля

^{1,2} И. В. ЗЛОБИНА, канд. техн. наук; ¹ Н. В. БЕКРЕНЕВ, д-р техн. наук

¹ Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

А. П. БЕЛОГЛАЗОВ

ООО «НИАГАРА», Москва, Россия

Л. П. ТАИРОВА, канд. техн. наук

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

Выполнены исследования влияния СВЧ электромагнитного поля на напряжения и деформации конструкционного углепластика с различными схемами армирования. При испытаниях опытных образцов со схемой армирования 0° установлено увеличение разрушающих напряжений в среднем на 17 % относительно контрольных. Отмечается статистически значимое снижение коэффициента вариации разрушающих напряжений и модуля для опытных образцов по сравнению с контрольными, существенно меньший эффект по изменению величины модуля.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углепластики, межфазный слой, физико-механические свойства, схема армирования, СВЧ электромагнитное поле, упрочнение.

Разработка и внедрение перспективных авиационных и космических аппаратов, ветроэнергетических установок требуют опережающего создания новых высокопрочных и легких материалов, в частности, полимерных композиционных (ПКМ) и совершенствования технологий формообразования конструктивных элементов из них [1–4].

В качестве связующих в ПКМ используют различные термо- и реактопласты. При этом более 60 % объема производства ПКМ формируется на основе термореактивных связующих, имеющих хорошую текучесть и лучшие смачивающие свойства по сравнению с термопластичными. Техни-

ческими требованиями к изделиям выдвигаются повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, особенно имеющих сложные формы, которые оказывают значительное влияние на распределение напряжений в объеме материала [5].

Вследствие значительного различия в механических и теплофизических свойствах компонентов ПКМ при их отверждении возникают дефекты, связанные с усадкой связующего, что приводит к снижению физико-механических свойств [6, 7]. Это вызывает необходимость дополнительного усиления конструкции в некоторых опасных участках, что приводит к увеличению веса [8]. Поэтому широко применяют различные технологические методы, в частности, физическая модификация [9]. Анализ выполненных в России и за рубежом исследований показывает, что одним из перспективных направлений физического модифицирования изделий из ПКМ является воздействие СВЧ электромагнитного поля на различных стадиях технологического цикла [10–12]. Авторы и некоторые другие исследователи [13–17] считают целесообразной СВЧ-обработку ПКМ на этапе финишной технологической операции в составе конечного изделия, что позволит исключить влия-

Злобина Ирина Владимировна, доцент, научный сотрудник.

E-mail: irinka_7@mail.ru

Бекренев Николай Валерьевич, профессор.

E-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Белоглазов Александр Павлович, директор.

E-mail: apb53@inbox.ru

Таирова Людмила Павловна, старший научный сотрудник.

E-mail: com-or@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.

© Злобина И. В., Бекренев Н. В., Белоглазов А. П., Таирова Л. П., 2023

ние операций механической обработки и сборки на достигнутые эффекты.

Одним из путей обеспечения требуемых характеристик изделий в сложных условиях эксплуатации является разработка оптимальных схем армирования ПКМ для каждого типа нагрузений, определяемых условиями эксплуатации. Возможность проектирования структуры материала и ее формирование одновременно с созданием изделия является одним из важнейших преимуществ армированных тканями и волокнами композитов [5]. В связи с этим исследование влияния схемы армирования на эффективность СВЧ-модифицирования ПКМ представляет определенный научный и практический интерес. Однако, информации по данному вопросу недостаточно для объективной оценки. Известны работы [18], свидетельствующие о значительном влиянии ориентации углеродных волокон относительно вектора Е-волны СВЧ электромагнитного поля. В частности, показано, что при ориентации углеродных волокон параллельно вектору Е-волны происходит практически полное ее отражение, что соответствует отсутствию какого-либо СВЧ-влияния на структуру и свойства ПКМ, поскольку в объеме материала не происходят термические и волновые процессы, вызванные поглощенной СВЧ-мощностью. При перпендикулярной ориентации относительно вектора Е-волны ориентации волокон отражается не более 60 % падающей мощности, поглощается около 33 %, проходит через материал 7 %. Таким образом, в этом случае можно ожидать значительного проявления СВЧ-воздействия на структуру ПКМ. Поскольку ПКМ обладают различной схемой армирования, то, очевидно, возможны различные эффекты при их СВЧ-облучении. Однако данные результаты были получены при СВЧ-воздействии на отверждающиеся системы при нахождении связующего в жидком и вязко-текучем состоянии. Воздействие СВЧ электромагнитного поля на ПКМ с отвержденной матрицей авторами работы [18] не рассматривали.

Цель исследований — изучение влияния схемы армирования углепластика на его характеристики прочности и жесткости после СВЧ-модифицирования в отвержденном состоянии.

Методика исследования и оборудование

Объектами исследования являлись образцы-полоски размерами 170×20×2 мм со схемами армирования $\pm 60^\circ$ относительно продольной оси и

однаправленные образцы с продольным направлением волокон. Все образцы испытывали на растяжение. Образцы, уложенные по типу укладки $\pm 60^\circ$ изготавливали из препрега, полученного пропиткой связующим, представленным раствором эпоксидных и фенолформальдегидных смол в спирто-ацетоновой смеси (ЭНФБ) однаправленной ленты (волокно углеродное Тогау Т-700). Образцы, уложенные по типу укладки 0° , изготавливали из препрега, полученного пропиткой связующим ЭНФБ нитей Тогау М-46JB. Испытания проводили на электромеханической испытательной машине FP-10. Концы образцов подкрепляли пластинками из стеклотекстолита, приклеенными клеем на основе цианоакрилата, что обеспечивало уменьшение концентрации напряжений в захватах и вблизи захватов. Для измерения деформаций во время нагружения для образцов $\pm 60^\circ$ использовали тензодатчики тип ТКФ01-5-200 с базой 5 мм: 2 продольных датчика в центре каждой из сторон образца и один поперечный рядом с продольным на одной из сторон. Тензодатчики приклеивали клеем быстрого отверждения на основе цианоакрилата. Для измерения деформации образцов с продольной укладкой волокон использовали бесконтактный лазерный измеритель деформаций. Измеряли только продольные деформации на базе 45 мм (расстояния между точками, по взаимному смещению которых во время нагружения вычисляли деформации).

Испытывались две группы образцов: контрольные и опытные. В каждой группе было по 5 образцов. СВЧ-обработку осуществляли на экспериментальной установке, созданной на базе излучателя "Жук-2-02" производства ООО НПП "АгроЭко-Тех" (г. Обнинск, Калужская обл.) при плотности потока энергии $(17\text{—}18) \times 10^4$ мкВт/см² в течение 2 мин. Образцы располагали горизонтально (перпендикулярно вектору Е-волны). Согласно исследованиям [17] на этих режимах для углепластиков получена максимальная эффективность СВЧ-обработки по повышению физико-механических свойств.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены зарегистрированные во время испытания зависимости средних продольных и поперечных деформаций от средних напряжений образцов со схемой армирования $\pm 60^\circ$, на рис. 2 — однаправленных образцов (схема армирования 0°).

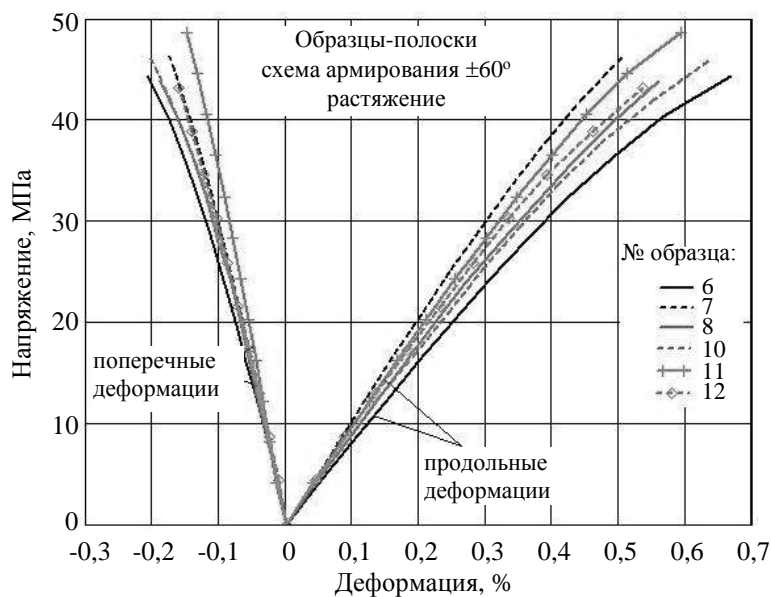


Рис. 1. Экспериментальные зависимости для средних продольных и поперечных деформаций контрольных (6, 7) и опытных (8, 10, 11, 12) образцов с армированием $\pm 60^\circ$ при испытаниях на растяжение

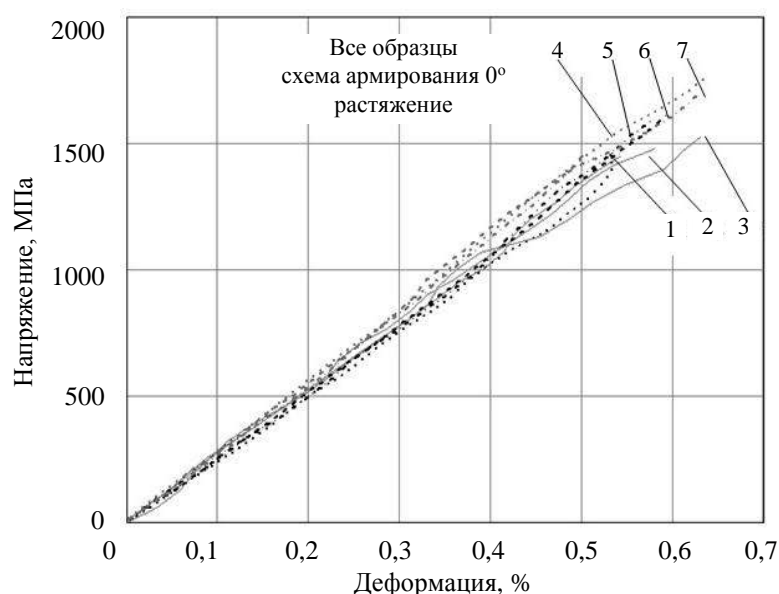


Рис. 2. Диаграммы деформирования контрольных (линии 1—3) и опытных (штриховые линии 4—7) образцов

Значения характеристик упругости образцов определяли на начальном линейном участке нагружения с использованием линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов при средних напряжениях 0—25 МПа. Приведенные данные не позволяют отметить различия модулей упругости образцов в исходном состоянии и после облучения, вычисленных как по одинаковой, так и по разным толщинам. Разрушающие напряжения контрольных образцов составили 45,3—50,0 МПа, опытных — 46,8...49,8 МПа. Модули упругости — 8,52...10,17 и 8,8...9,52 ГПа, соответственно. Не наблюдается различий и других экспериментально определенных характеристик, превосходящих разброс экспериментальных данных. При этом отмечается, что разбросы значений исследованных параметров для опытных образцов несколько ниже, чем контрольных: размах вариации

напряжений — 4,7 и 3 МПа, модулей упругости — 1,65 и 0,72 ГПа соответственно. Коэффициенты вариации составили по напряжениям 10 и 7 %, по модулям упругости — 8 и 3,8 % соответственно. Отмечается, что разбросы экспериментальных данных превышают предполагаемое влияние СВЧ-воздействия на напряжения и деформации.

При испытаниях на растяжение образцов со схемой армирования $\pm 60^\circ$ относительно оси действия нагрузки причиной разрушения являются напряжения растяжения поперек волокон. Модуль упругости поперек волокон вносит наибольший вклад в модуль упругости образцов. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что облучение электромагнитным полем СВЧ не оказывает влияния на прочность и жесткость исследованного углепластика при растяжении поперек волокон.

Диаграммы деформирования образцов со схемой армирования $\pm 0^\circ$ линейны до нагрузок, примерно равных 0,5 от разрушающей, затем начинаются небольшие отклонения от линейности, сопровождающиеся потрескиванием, которое говорит о начале разрушения отдельных наиболее слабых волокон. Степень отклонения от линейности перед разрушением различна для разных образцов. Модули упругости образцов определяли на начальном линейном участке $\sim(0-0,5)$ от разрушающих напряжений с использованием линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов при напряжениях. Однако модули упругости, определенные при увеличении конца участка аппроксимации до $\sim(0,7-0,9)$ от разрушающих напряжений, для большинства образцов незначительно отличаются от модулей, определенных на участках $\sim(0-0,5)$ от разрушающих напряжений.

Разрушающие напряжения в однонаправленных контрольных образцах составили 1511—1590 МПа, в опытных — 1659...1854 МПа. Для модулей упругости получены результаты, соответственно: 263...267 ГПа и 269,2...280,5 ГПа.

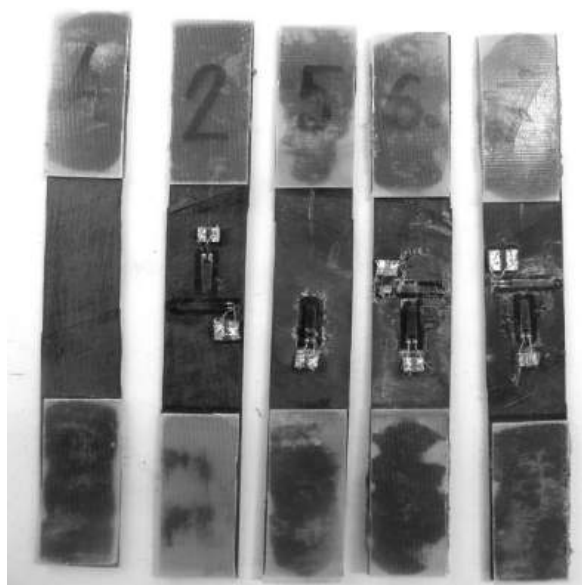
Констатируется, что модули упругости опытных образцов незначительно (на 3,5—4 %) выше модулей упругости контрольных образцов не только на начальном участке, но, что значительно важнее — жесткость этих образцов выше при напряжениях, близких к разрушающим. Диаграммы деформирования для них сохраняют линейность практически до разрушения, а разрушающие напряжения выше, чем у контрольных образцов на 17 %.

Анализ области повреждения образцов (рис. 3) выявил следующие особенности.

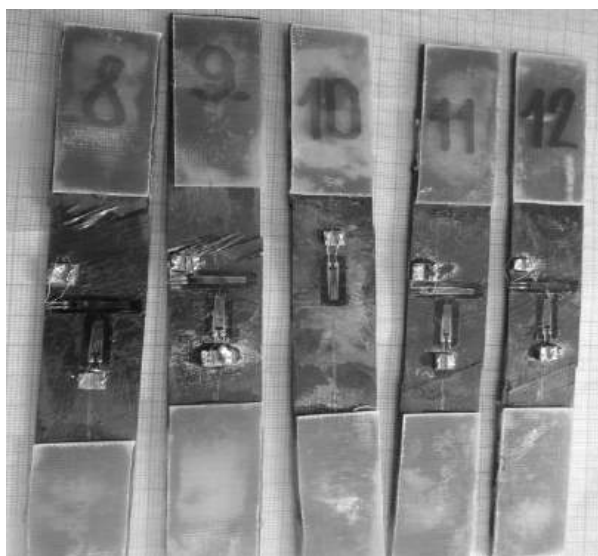
В большинстве случаев зона разрушения образцов с армированием $\pm 60^\circ$ представляет собой трещину, параллельную волокнам, иногда сопровождавшуюся расслоением. Сопоставление вида зоны разрушения с величиной разрушающего напряжения не позволяет установить связь между ними. Характер разрушения контрольных и опытных образцов с армированием 0° примерно одинаков.

Таким образом, воздействие СВЧ электромагнитного поля способствует увеличению прочности границы раздела "волокно-матрица", в однонаправленных образцах, т. к. именно эта граница удерживает волокна в связующем и перераспределяет напряжения между волокнами после возникновения обрывов на слабейших участках волокон. Это способствует меньшему снижению жесткости после начала накопления повреждений и увеличению прочности композита в целом. При испытаниях образцов со схемой армирования $\pm 60^\circ$ эффект СВЧ-обработки не проявился, по видимому, в связи с тем, что для этих образцов причиной разрушения явилось достижение предела прочности на растяжение связующего, который меньше, чем прочность границы раздела "волокно-матрица".

Результаты испытаний контрольных и опытных образцов со схемами армирования $\pm 60^\circ$ и 0° можно считать соответствующими данным [18], т. к. при ориентации волокон $\pm 60^\circ$ их расположение близко к направлению вектора Е-волны и материалом поглощается лишь незначительная часть падающей мощности, что не обеспечивает существенного нагрева связующего и его размягчения.



а



б

Рис. 3. Вид контрольных образцов с армированием $\pm 60^\circ$ (а) и вид опытных образцов с армированием $\pm 60^\circ$ после испытаний на растяжение (б)

В работе показано [17], что основным механизмом СВЧ-влияния на изменение свойств отвержденных ПКМ является временный переход связующего в результате нагрева в пластичное состояние, что создает условия для его текучести под влиянием волновой составляющей поля, заполнения микродефектов и повышения площади контактного взаимодействия матрица—волокно. По указанным выше причинам данный механизм практически не проявляется, за исключением снижения разброса прочностных и упругих характеристик. В случае однонаправленных образцов во время обработки они располагались так, что армирующие волокна были перпендикулярны вектору Е-волны, значительная доля СВЧ-мощности поглощалась материалом, что способствовало значимому проявлению предлагаемого авторами механизма.

Заключение

Выполненные исследования подтвердили значимое влияние обработки СВЧ электромагнитным полем отвержденных углепластиков. При этом установлено, что проявление эффекта зависит от схемы армирования ПКМ: наибольший эффект (+17 %) показан при использовании однонаправленных образцов, ориентированных в процессе обработки перпендикулярно направлению вектора Е-волны СВЧ электромагнитного поля; при армировании $\pm 60^\circ$ полученные изменения не выходят за пределы статистических ошибок.

Установленные различия связаны как с преимущественным достижением предела прочности на растяжение связующего у образцов с армированием $\pm 60^\circ$, который меньше, чем прочность границ раздела волокно—матрица (разрушение по ним характерно для однонаправленных образцов), так и с различием в доле поглощенной СВЧ-мощности, которая минимальна у образцов с первой схемой армирования.

В связи с различными применяющимися на практике схемами армирования углепластиков и других ПКМ полученные результаты необходимо учитывать при разработке технологических схем СВЧ-модифицирования изделий из них.

Работа проведена в рамках выполнения проекта по гранту РНФ № 23-29-00526 "Аналитическая модель регламентированного по критерию повышения механических свойств нагрева в СВЧ электромагнитном поле отвержденных полимерных композиционных материалов, армированных тканями и волокнами различной природы".

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520—530.
2. Shivi K. Polymer Composites in Aviation Sector. A Brief Review Article // International J. Engineering Research & Technology (IJERT). 2017. V. 6. Iss. 6. P. 518—525.
3. Колобков А. С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7. С. 38—44.
4. Дориomedов М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7. С. 29—37.
5. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. Изд. 2. — СПб.: Научные основы и технологии, 2010. — 822 с.
6. Сатдинов Р. А., Вешкин Е. А., Постнов В. И. и др. Конструктивно-технологические совершенствования в создании пространственно-сложных конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2020. № 9. С. 68—77.
7. Studentsov V. N., Pyataev I. V. Effect of vibration in processes of structure formation in polymers // Russian J. Applied Chemistry. Pleiades Publishing, Ltd. 2014. V. 87. № 3. P. 352—354. DOI: 10.1134/S1070427214030173.
8. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // Известия Высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2(42). С. 79—89.
9. Василевич Ю. В., Горелый К. А., Сахonenко С. В., Иванов С. Н. Влияние химической усадки связующего в процессе отверждения на образование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композита // Теоретическая и прикладная механика: межведомственный сборник научно-методических статей. Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет. 2016. Вып. 31. С. 67—72.
10. Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник. — Саратов: Научная книга, 2011. — 560 с.
11. Clark D., Sutton W. Microwave processing of materials. National Materials Advisory board. — Washington: National Academy Press, 1994. — 150 p. DOI: 10.1146/ANNUREV.MS.26.080196.001503.
12. Thuery J. Microwave: Industrial, Scientific, and Medical Applications. — Boston: Artech House Publishers, 1992. — 475 p.
13. Menéndez J. A., Arenillas A., Fidalgo B. et al. Microwave heating processes involving carbon materials // Fuel Processing Technology. 2010. V. 91. Iss. 1. P. 1—8. DOI: 10.1016/J.FUPROC.2009.08.021.
14. Kim T., Jaegun L., Kun-Hong L. Microwave heating of carbon-based solid materials // Carbon Letters. 2014. V. 15. № 1. P. 15—24.
15. Kwak M. Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Process Development and Material Evaluation. A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy // Imperial College London Department of Aeronautics. 2016. — 150 p. DOI: 10.25560/39284.
16. Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural // Solid State Phenomena. 2016. V. 870. P. 101—106.
17. Злобина И. В., Бекренев Н. В. О механизме повышения механических характеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ электромагнитного поля // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22. № 2. С. 158—169.

18. Jing Zhou, Yingguang Li, Mengchen Zhang, Eyan Xu, Tao Yang. Effect of lay-up configuration on the microwave absorption properties of carbon fiber reinforced polymer composite

materials // Materials Today Communications. 2021. V. 26. P. 101960. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101960>.

Influence of the carbon fiber reinforcement scheme on the change of physical and mechanical properties under the influence of a microwave electromagnetic field

^{1,2} I. V. ZLOBINA, ¹ N. V. BEKRENEV

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

² National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

A. P. BELOGLAZOV

LLC "NIAGARA", Moscow, Russia

L. P. TAIROVA

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The influence of the microwave electromagnetic field on the stresses and strains of structural carbon fiber reinforced plastic with various reinforcement schemes has been studied. When testing prototypes with a 0° reinforcement scheme, an increase in breaking stresses by an average of 17 % relative to the control ones was found. There is a statistically significant decrease in the coefficient of variation of destructive stresses and modulus for prototypes compared to control ones, a significantly smaller effect on changing the modulus value.

Keywords: polymer composite materials, carbon plastics, interfacial layer, physical and mechanical properties, reinforcement scheme, microwave electromagnetic field, hardening.

Теоретические аспекты калибровки и оценки погрешностей волоконно-оптической системы диагностики полимерных композитов

М. Ю. ФЕДОТОВ, канд. техн. наук

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Российская инженерная академия, Москва, Россия

Рассмотрены теоретические и методические особенности калибровки волоконно-оптической системы встроенного контроля полимерных композитов интегрированными волоконно-оптическими датчиками на основе волоконных брэгговских решеток. Установлено, что для повышения достоверности данных оптического контроля целесообразно применение квадратичной модели оптического контроля. Показано, что процесс калибровки является неотъемлемой составляющей при создании системы встроенной диагностики полимерных композитов и заключается в экспериментальном определении значений коэффициентов чувствительности к деформации и температуре с учетом моделей оптического контроля. Описаны основные методы оценки погрешностей контроля полимерных композитов интегрированными волоконно-оптическими датчиками через погрешности коэффициентов чувствительности, калибровочную погрешность для нелинейной системы уравнений. Установлено, что применение рассмотренных методов и их адаптация к конкретным полимерным композитам и конструкциям позволит в перспективе создать эффективную систему одновременной диагностики деформации и температуры.

Ключевые слова: полимерный композит, встроенный контроль, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, метод двух волокон, модель оптического контроля, коэффициент чувствительности, калибровка, погрешность данных контроля.

Одним из наиболее перспективных методов контроля деформации и температуры полимерных композитных материалов (ПКМ) и конструкций на их основе является оптический метод [0], позволяющий за счет интеграции в структуру материала волоконно-оптических датчиков (ВОД), например волоконных брэгговских решеток (ВБР), определять данные параметры как в процессе стендовых и иных испытаний образцов, конструктивных элементов, так и, в перспективе, конструкций в реальных условиях эксплуатации. Опрос таких систем в зависимости от применяемого оборудования может осуществляться с необходимой частотой, чаще всего 1 Гц, например, для строительных композитных конструкций, включая элементы армирования мостов, промышленных зданий

и т. п., и 100 Гц для композитных образцов и элементов конструкций авиационной техники. Существуют и более высокоскоростные системы опроса для специальных применений, где частота опроса может составлять от единиц кГц и выше, однако, стоимость такого оборудования существенно больше.

Рассматривая методы одновременного контроля деформации и температуры композитных конструкций, стоит выделить метод двух волокон [2], как наиболее простой и технологичный для практических применений. Метод заключается в том, что для создания указанной системы диагностики целесообразно применять ВОД на основе ВБР, сформированных на близкорасположенных в ПКМ волоконных световодах (ВС), имеющих различное легирование, а, следовательно, различную чувствительность и к деформации, и к температуре, либо к одному из этих параметров. Данный метод хорошо работает, если, во-первых, правильно подобрана пара ВС, во-вторых, определены необходимые параметры ВБР, такие, как соответствующие коэффициенты чувствительности к температуре и деформации, резонансные длины

Федотов Михаил Юрьевич, главный конструктор проекта, академик Российской инженерной академии (РИА), заместитель президента РИА.

E-mail: fedonovmyu@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9 марта 2023 г.

© Федотов М. Ю., 2023

волн ВБР, а также известны погрешности определения этих параметров.

Свободные ВБР (неинтегрированные в ПКМ), достаточно хорошо описаны [3], т. е. установлена связь между изменением резонансной длины волны ВБР и деформацией или изменением температуры. Однако, как показывает практика, при встраивании ВБР в ПКМ значения коэффициентов чувствительности, а следовательно, и контролируемых параметров (деформации и температуры), и погрешностей их определения существенно меняются. Таким образом, качество и достоверность данных такой системы контроля сильно зависит от эффективности передачи деформации от ПКМ, в который интегрированы ВОД, к чувствительному элементу — ВБР. Особенности адгезии ВС (или его защитного покрытия (ЗП), например, акрилатного, полиимидного или иного) к ПКМ являются фактором, который может ухудшить качество измерений [4]. Это связано с тем, что ВС и ПКМ, в который они интегрированы, обычно имеют различные свойства, например, продольный модуль упругости, и, следовательно, напряжение в них не будут одинаковыми, когда приложена нагрузка. Таким образом, для того, чтобы измерять реальные деформации (удлинения) и температуру в структуре ПКМ необходимо проводить процедуру калибровки, т. е. осуществлять соответствие изменения состояния ПКМ с данными от ВБР, а также определять погрешность данных оптического контроля.

Цель работы — систематизация информации и анализ методологии калибровки и оценки погрешностей интегрированной в ПКМ волоконно-оптической системы одновременного контроля деформации и температуры.

Методология калибровки системы встроенного контроля полимерных композитов интегрированными волоконно-оптическими датчиками

Теоретические аспекты калибровки волоконно-оптических датчиков для встроенного контроля полимерных композитов

Обычно зависимость изменения резонансной длины волны ВБР от механической деформации и температуры описывают линейной моделью оптического контроля [5]

$$b = K_T T + K_\varepsilon \varepsilon, \quad (1)$$

где $b = \Delta\lambda / \lambda_0$ — относительное изменение резонансной длины волны ВБР от исходного значения, λ_0 , отно-

сительно которого считается отклонение $\Delta\lambda$, до текущего значения λ_i в i -й момент времени;

ε — деформация;

$T = T_i - T_0$ — изменение температуры от исходного значения T_0 , относительно которого считается отклонение, до текущего значения, T_i в i -й момент времени;

K_T, K_ε — коэффициенты чувствительности ВБР к температуре и деформации соответственно.

Из формулы (1) следует, что коэффициенты чувствительности ВБР к температуре, K_T , и к деформации, K_ε , независимы. Для объяснения нелинейной зависимости поведения смещения отраженного спектра ВБР, а следовательно, и резонансной длины волны ВБР, при различных температурах и деформациях авторы [6] используют коэффициент перекрестной чувствительности, K_C . С учетом этого обстоятельства формула (1) примет вид

$$b = K_T T + K_\varepsilon \varepsilon + K_C \varepsilon T. \quad (2)$$

В формуле (2) изменение значения коэффициента K_ε при разной температуре или коэффициента K_T при разной механической деформации объединены в один коэффициент перекрестной чувствительности K_C . Тогда (2) можно записать в виде

$$\begin{aligned} b &= (K_T + K_{T\varepsilon})T + (K_\varepsilon + K_{\varepsilon T})\varepsilon = \\ &= K_T T + K_\varepsilon \varepsilon + (K_{T\varepsilon} + K_{\varepsilon T})T\varepsilon = \\ &= K_T T + K_\varepsilon \varepsilon + K_C \varepsilon T. \end{aligned} \quad (3)$$

Следовательно, применительно к методу двух волокон для каждого точечного ВОД, включающего две близкорасположенные ВБР, сформированные на разнолегируемых ВС, было бы правильнее измерять не четыре величины ($K_T, T, K_\varepsilon, \varepsilon$), согласно формуле (1), с соответствующими погрешностями ($\delta K_T, \delta T, \delta K_\varepsilon, \delta \varepsilon$), т. е. суммарно восемь параметров, а шесть параметров ($K_T, T, K_\varepsilon, \varepsilon, K_C, \varepsilon T$), согласно формуле (2), с погрешностями ($\delta K_T, \delta T, \delta K_\varepsilon, \delta \varepsilon, \delta K_C, \delta \varepsilon T$), т. е. в этом случае всего двенадцать параметров.

Формулы (2), (3) точнее описывают характеристики ВБР. Это можно показать математически. Пусть имеется некоторая функция двух перемен-

ных $B(T, \varepsilon)$. Если разложить ее в ряд Тейлора в окрестности нуля до первого порядка малости аргументов, то получится

$$B(T, \varepsilon) \approx B(0, 0) + \varepsilon B^{(0,1)} + TB^{(1,0)} + T\varepsilon B^{(1,1)} + O(T)^2 + O(\varepsilon)^2, \quad (4)$$

где $B^{(i,j)}$ обозначают частные производные функции в точке $(0, 0)$, $b(T, \varepsilon) = B(T, \varepsilon) - B(0, 0)$, при этом частные производные эквивалентны коэффициентам чувствительности K по соответствующей величине; $O(T)^2$, $O(\varepsilon)^2$ — остаточные члены при разложении функции $B(T, \varepsilon)$ в ряд Тейлора до первого порядка малости.

Перекрестная чувствительность задается производной $B^{(1,1)}$

$$B^{(1,1)} \varepsilon T = \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\frac{\partial B}{\partial T} T \right) \varepsilon = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial B}{\partial \varepsilon} \varepsilon \right) T = K_C \varepsilon T. \quad (5)$$

Перекрестные производные в (5) математически эквивалентны и обозначены через один коэффициент K_C , который должен быть измерен экспериментально, при этом предполагается, что $\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} = \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} = 0$.

Чем выше порядок разложения, тем выше точность аппроксимации (имеется в виду разложение в ряд Тейлора до третьего, и более высших порядков). Однако при увеличении порядка разложения в ряд Тейлора, появляется все большее количество параметров, которые надо учитывать, что значительно усложняет процесс контроля. Для примера приведем разложение до второго порядка малости

$$B(T, \varepsilon) \approx B(0, 0) + \varepsilon B^{(0,1)} + \frac{1}{2} \varepsilon^2 B^{(0,2)} + TB^{(1,0)} + T\varepsilon B^{(1,1)} + \frac{1}{2} T^2 B^{(2,0)} + O(T + \varepsilon)^2, \quad (6)$$

где $O(T + \varepsilon)^2$ — остаточный член при разложении функции $B(T, \varepsilon)$ в ряд Тейлора до второго порядка малости.

Формула (6) содержит уже 5 параметров, имеющих соответствующие погрешности, т. е. 10 параметров для одной интегрированной ВБР. Таким образом, для одного точечного ВОД по методу двух волокон в теории нужно учитывать уже 20 параметров.

Одновременный контроль (раздельное измерение) температуры и деформации методом двух волокон на основе формул (2) и (3) может быть

выполнены аналитически, в отличие от разложений более высоких порядков, в случае которых необходимо применять только численные методы. При этом общий вид полинома при разложении в ряд Тейлора функции двух переменных (деформации и температуры) до произвольного порядка N имеет вид

$$b(T, \varepsilon) = B(T, \varepsilon) - B(0, 0) = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^{N-n} K_{n,k} \varepsilon^k T^n + O(T + \varepsilon)^{N+1}, \quad (7)$$

где $K_{n,k} = B^{(n,k)}(0, 0) / k!n!$.

Формула (7) представляет собой общий вид разложения и может быть использована для поиска оптимальной степени аппроксимационного полинома с точки зрения обеспечения требуемого уровня достоверности контроля с учетом имеющихся вычислительных ресурсов.

Методические аспекты калибровки волоконно-оптических датчиков для встроеного контроля полимерных композитов

Вопросы калибровки ВОД на основе ВБР в той или иной степени отражены в публикациях. Как правило, методически калибровка ВОД, установленных как на металлические, так и на композитные образцы или конструкции, схожа. Качество калибровки, прежде всего, определяется надежностью клеевого соединения.

Так в работе [7] описана установка для калибровки тензодатчиков ВБР в диапазоне деформаций (60—600) мкм/м, приведены результаты калибровки ВБР, установленных на образец из алюминиевого сплава АА6082-Т6, в диапазоне от -10 до 10 мкм/м. Особенности применения ВБР, в т. ч. оценка влияния ЗП на точность их калибровки при создании систем диагностики металлических конструкций, рассмотрены в [8].

В системах оптического контроля, интегрированных в ПКМ, все немного сложнее. Так, в работе [9] было показано, что в зависимости от схемы армирования и типа ЗП чувствительность ВОД на основе ВБР к деформации можно регулировать, при этом в первом приближении для однонаправленных ПКМ чувствительность к продольной деформации можно считать такой же, как и у поверхностно размещенных ВОД, следовательно, повторная калибровка ВОД после процесса интеграции не требуется. Однако на практике такой вывод не всегда уместен [10].

Рассмотрим более подробно методические аспекты калибровки ВОД на основе ВБР для встроеного контроля полимерных композитов.

Для проведения калибровки ВОД, интегрированных в образцы из ПКМ, целесообразно применить следующее оборудование.

- *Многоканальное устройство опроса ВОД* необходимо для сбора и обработки данных от ВОД, интегрированных в образцы из ПКМ. Такое устройство может быть выполнено как в стойном, так и в промышленном исполнении. Частота опроса ВОД — не менее 100 Гц при разрешении по спектру $\sim 1\text{—}5$ пм. Данные технические характеристики обусловлены необходимостью обеспечения требуемого уровня достоверности контроля.

- *Испытательный стенд* необходим для проведения стендовых статических и динамических испытаний образцов из ПКМ с интегрированными ВОД. Технические характеристики стенда могут варьироваться в широких пределах с учетом требований, предъявляемым к конкретным материалам и изделиям. С учетом того, что в реальных условиях композитные конструкции подвержены одновременному воздействию механических и тепловых нагрузок, стенд также целесообразно оснащать термокамерой с необходимым диапазоном изменения температуры, например, как правило, для конструкционных углекомполитов от -60 до 120 °С. При этом важно, чтобы была предусмотрена возможность регулировки как скорости механического нагружения, так и изменения температуры, в т. ч. с временной задержкой,

обеспечивающей равномерность механического нагружения и нагревания/остывания образцов. Отдельно стоит отметить, что стенд должен быть оснащен современными средствами тензометрии, а также технологическими отверстиями/разъемами для обеспечения возможности вывода ВС для подключения к опросному устройству.

С учетом информации из указанных авторами источников, а также результатов экспериментальных исследований [11], методика калибровки ВОД, интегрированных в образцы из ПКМ и позволяющих осуществлять контроль как деформации, так и температуры, сводится к следующему.

1. Проводят подготовительные операции, включающие сборку стенда для проведения калибровки (рис. 1), установку образца в захваты испытательной машины, определение диапазонов и скоростей изменения температур и деформации в соответствии с программой и методикой испытаний конкретного образца из ПКМ.

2. На поверхность образца из ПКМ на уровне ВОД деформации наклеивают тензорезисторы или устанавливают экстензометр для измерений деформации в направлениях, соответствующих направлениям измерения ВОД.

3. Подключают выводы ВОД к устройству опроса, экстензометр — к калибровочной системе испытательного стенда.

4. Запускают программное обеспечение (ПО) для сбора и обработки данных от ВОД.

5. Определяют коэффициент чувствительности ВОД в составе образца из ПКМ к деформации K_ϵ .

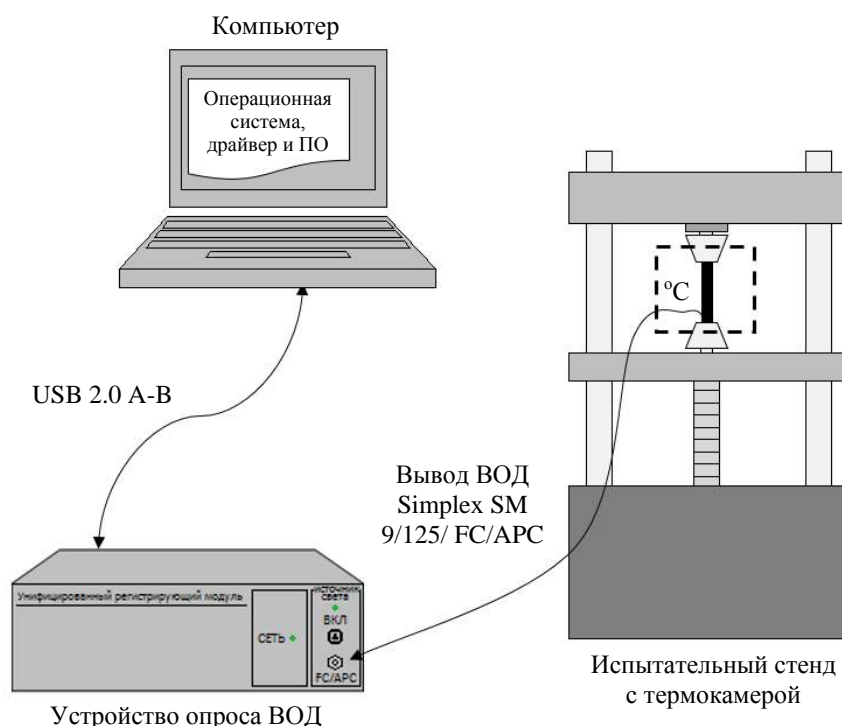


Рис. 1. Структурная схема проведения калибровки ВОД, интегрированных в образцы из ПКМ

Для этого проводят циклическое нагружение/разгружение образца из ПКМ, при этом происходит "адаптация" интегрированного ВОД к материалу (например, компенсация микропроскальзываний). При этом могут происходить эффекты гистерезиса и изменения коэффициента чувствительности ВОД к деформации [12—14], связанные с зависимостью смещения резонансной длины волны ВБР от прикладываемой нагрузки, например, на растяжение/сжатие. Так, по мнению авторов [13], скорость приложения нагрузки должна составлять ~ 1 мм/мин.

На рис. 2 приведены характерные зависимости изменения резонансной длины волны от числа циклов разгрузки/нагрузки образца из ПКМ.

Примечательно, что первый цикл имеет большое отличие от последующих циклов. Также авторы данной работы рекомендуют определять предельную деформацию образца из ПКМ, соответствующую среднему значению предела прочности при нагружении (растяжении, сжатии и т. д.) для проверки линейности/нелинейности оптической системы диагностики. Таким образом, для определения K_ε проводят циклы нагружения/разгрузки образцов из ПКМ, измеряют зависимости смещения резонансных длин волн ВБР в зависимости от приложенной нагрузки,

определяют коэффициенты деформационного полинома по методу наименьших квадратов, который приводит в соответствие значения механических деформаций и изменений резонансных длин волн ВБР по спектру. В работах как российских, так и зарубежных ученых используются, как правило, степень полинома второй степени.

Стоит отметить, что определение K_ε проводят при постоянной, например, комнатной температуре, т. к. варьирование температуры может привести к изменению адгезии ВС к ПКМ и степени передачи деформации, а, следовательно, и самого коэффициента K_ε . Таким образом, при одновременном воздействии деформации и температуры в исходной системе уравнений метода двух волокон для максимальной минимизации ошибки нужно учитывать еще и температурную зависимость коэффициента K_ε — перекрестный коэффициент чувствительности K_C .

$$\begin{cases} \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = K_{T1}\Delta T + K_{\varepsilon1}\Delta\varepsilon \\ \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = K_{T2}\Delta T + K_{\varepsilon2}\Delta\varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

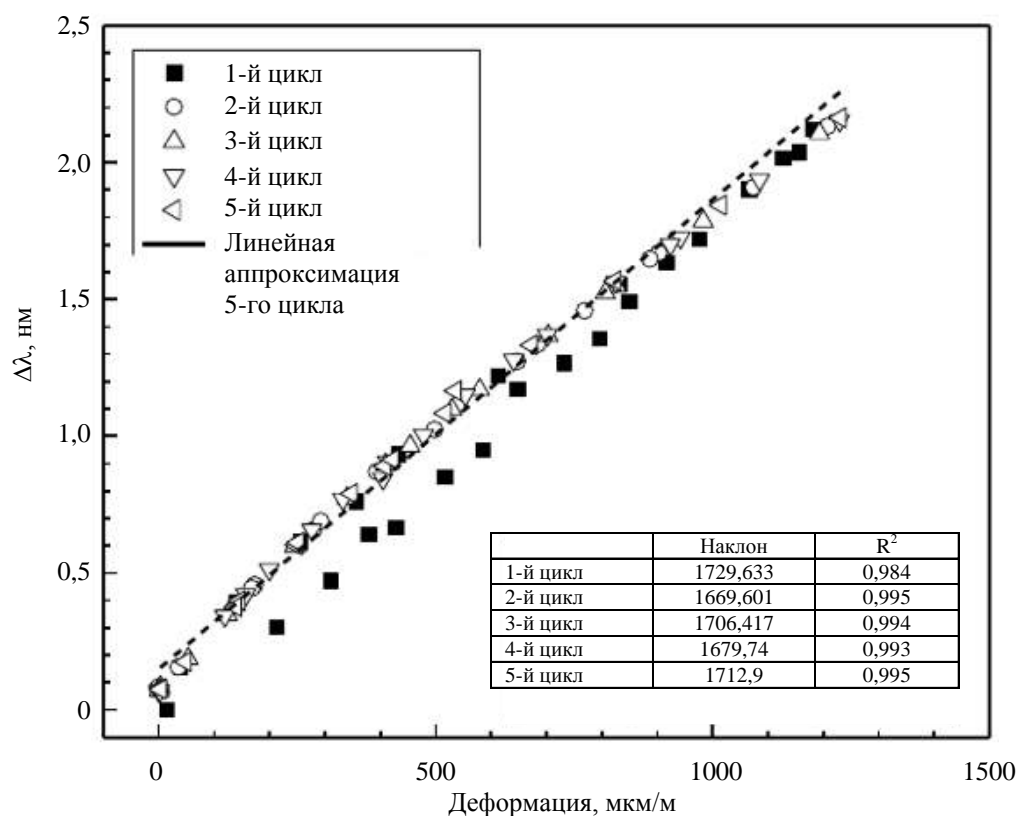


Рис. 2. Зависимость изменения резонансных длин волн ВБР от механической нагрузки на различных циклах нагружения [13]

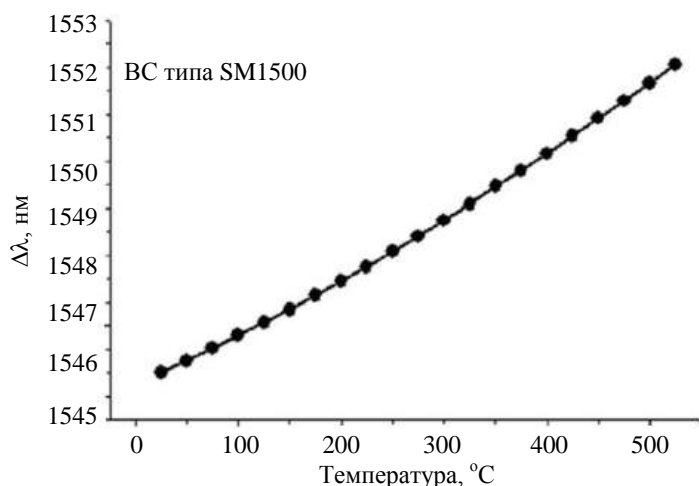


Рис. 3. Зависимость изменения резонансных длин волн ВБР от температуры для свободного волокна типа SM1500

6. Определяют коэффициент чувствительности ВОД в составе образца из ПКМ к температуре K_T . Изменение резонансной длины волны ВБР от температуры может быть аппроксимировано линейной функцией, однако аппроксимация с помощью полинома второй степени более точная. Например, в работах [15, 16] показано, что функция изменения резонансной длины волны ВБР, сформированных на ВС типа SM1500, с ростом температуры монотонно возрастает по квадратичному закону (рис. 3).

Хотя, при диапазоне температур до 200 °C зависимость с высокой степенью точности линейна. Однако следует учитывать то обстоятельство, что при интеграции ВОД в ПКМ данная зависимость может иметь нелинейный характер с учетом особенностей технологических режимов формования и диапазона рассматриваемых рабочих (исследуемых) температур.

Таким образом, для определения K_T проводят циклы нагревания/охлаждения образцов из ПКМ, измеряют зависимости смещения резонансных длин волн ВБР в зависимости от приложенной температуры, определяют коэффициенты температурного полинома по методу наименьших квадратов, который приводит в соответствие значения температур и изменений резонансных длин волн ВБР по спектру.

Методология оценки погрешностей волоконно-оптических датчиков для встроенного контроля полимерных композитов

Оценка погрешности данных контроля через погрешности коэффициентов чувствительности

Для проведения оценок ошибок измерения температуры и деформации необходимо обратиться

к теории ошибок [17]. Определяемые температура и деформация являются решением некоторого уравнения, т. е. являются функциональными зависимостями в математическом смысле от некоторых параметров, т. е. получаются в результате косвенных измерений этих параметров. Практически для определения погрешности используют метод оценки погрешности косвенных измерений [17]. Пусть произвольная физическая величина Y определена через функциональную зависимость

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (9)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — некоторые прямоизмеряемые физические величины.

Тогда, если каждая из этих физических величин определена с какой-то погрешностью $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$, то максимальная погрешность в определении величины Y на основании формулы (9) и разложения в ряд Тейлора до первого порядка (полный дифференциал), а также учета того факта, что знак погрешностей может совпадать со знаком соответствующей частной производной

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} \delta x_i \right|. \quad (10)$$

Погрешность, рассчитанная по формуле (10), является максимально возможной, что практически маловероятно. В теории ошибок доказывается, что наиболее вероятную погрешность результата косвенных измерений можно находить по формуле

$$\delta Y = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (11)$$

Если выразить определяемые решения, например, для метода двух волокон, в случае линейной

зависимости смещения спектра ВБР от температуры и деформации в общем виде

$$\begin{aligned} T &= F_T(K_{T1}, K_{T2}, K_{\varepsilon1}, K_{\varepsilon2}, b_1, b_2); \\ \varepsilon &= F_\varepsilon(K_{T1}, K_{T2}, K_{\varepsilon1}, K_{\varepsilon2}, b_1, b_2), \end{aligned} \quad (12)$$

где $b_{1,2} = \Delta\lambda_{1,2} / \lambda_{1,2}$, то согласно (11) погрешность результата косвенных измерений данных величин можно оценить по следующим формулам

$$\begin{aligned} \delta T &= \left[\left(\frac{\partial F_T}{\partial K_{T1}} \delta K_{T1} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_T}{\partial K_{T2}} \delta K_{T2} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_T}{\partial K_{\varepsilon1}} \delta K_{\varepsilon1} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_T}{\partial K_{\varepsilon2}} \delta K_{\varepsilon2} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_T}{\partial b_1} \delta b_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F_T}{\partial b_2} \delta b_2 \right)^2 \right]^{1/2}; \\ \delta \varepsilon &= \left[\left(\frac{\partial F_\varepsilon}{\partial K_{T1}} \delta K_{T1} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_\varepsilon}{\partial K_{T2}} \delta K_{T2} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_\varepsilon}{\partial K_{\varepsilon1}} \delta K_{\varepsilon1} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_\varepsilon}{\partial K_{\varepsilon2}} \delta K_{\varepsilon2} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_\varepsilon}{\partial b_1} \delta b_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F_\varepsilon}{\partial b_2} \delta b_2 \right)^2 \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\delta K_{T1}, \delta K_{T2}, \delta K_{\varepsilon1}, \delta K_{\varepsilon2}, \delta b_1, \delta b_2$ — абсолютные погрешности в определении соответствующих физических величин, а знак " ∂ " означает частную производную по аргументу. В формулах (12) и (13) в качестве аргументов функций F_T, F_ε используются средневзвешенные величины всех коэффициентов, а также их погрешности, которые можно определять методом наименьших квадратов (МНК) из экспериментов для каждого конкретного реального образца. В отличие от [5], где авторы полагают $\delta K_{T1} = \delta K_{T2} = \delta K_T$, $\delta K_{\varepsilon1} = \delta K_{\varepsilon2} = \delta K_\varepsilon$, в нашем случае, по-видимому, нельзя будет проводить подобное упрощение без увеличения погрешности.

Оценка погрешности данных контроля через калибровочную погрешность

Как следует из (13) процесс калибровки конкретного образца достаточно трудоемкий, особенно в случае учета коэффициентов при высших степенях и перекрестных произведениях температуры и деформации (6). Можно значительно упростить этот процесс и сделать его достаточно лег-

ким для любой степени аппроксимационного полинома. Для этого надо измерить погрешность $\delta b_{\text{МНК}}$, которая является среднеквадратическим отклонением по экспериментальным значениям функции b при калибровке после аппроксимации по МНК. Средние коэффициенты чувствительности, определенные по методу МНК, можно считать заданными константами без погрешности. В этом случае в (12) погрешностью будут обладать только параметры $b_{1,2}$. При этом полная формула, учитывающая погрешность прибора измерения $\delta b_{\text{ПР}}$, выглядит так:

$$\delta b_{1,2} = \left(\delta b_{\text{МНК}1,2}^2 + \delta b_{\text{ПР}1,2}^2 \right)^{1/2}. \quad (14)$$

В итоге полная формула для оценки погрешности упрощается, т. к. вклад от погрешностей чувствительностей уже учтен при нахождении погрешности $\delta b_{\text{МНК}}$

$$\begin{aligned} \delta T &= \left[\left(\frac{\partial F_T}{\partial b_1} \delta b_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F_T}{\partial b_2} \delta b_2 \right)^2 \right]^{1/2}; \\ \delta \varepsilon &= \left[\left(\frac{\partial F_\varepsilon}{\partial b_1} \delta b_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F_\varepsilon}{\partial b_2} \delta b_2 \right)^2 \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Формула (14) содержит два члена, сравнивая вклад от которых в полную погрешность (15), можно определить необходимую степень аппроксимационного полинома (разложения по Тейлору), при котором погрешность всего измерения будет определяться в основном только погрешностью прибора измерения.

Оценка погрешности данных контроля для нелинейной системы уравнений

В общем случае, система уравнений метода двух волокон нелинейна. Эта нелинейность может получаться при использовании более высоких порядков аппроксимационного полинома, что делает невозможным получение явного вида решений типа (12). Оценить погрешность измерений температуры и деформации предлагается следующим образом. Пусть задана система уравнений

$$\begin{cases} b_1 = f_1(\{K\}, T, \varepsilon) \\ b_2 = f_2(\{K\}, T, \varepsilon) \end{cases} \quad (16)$$

где $\{K\}$ — $K_{n,k} \forall n, k$ — набор коэффициентов чувствительностей в формуле аппроксимационного полинома (7). Погрешность определения па-

параметров $b_{1,2}$, а также все коэффициенты $K_{n,k} \forall n, k$ определяются из МНК по экспериментальным данным.

Неопределенность параметров $\delta b_{1,2}$ приводит к соответствующему сдвигу решений (16) δT , $\delta \varepsilon$

$$\begin{cases} b_1 + \delta b_1 = f_1(\{K\}, T + \delta T, \varepsilon + \delta \varepsilon) \\ b_2 + \delta b_2 = f_2(\{K\}, T + \delta T, \varepsilon + \delta \varepsilon) \end{cases} \quad (17)$$

Раскладывая данные параметры до первого порядка малости по варьируемым коэффициентам получаем из (17)

$$\begin{cases} \delta b_1 = \frac{\partial f_1}{\partial T} \delta T + \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon} \delta \varepsilon \\ \delta b_2 = \frac{\partial f_2}{\partial T} \delta T + \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} \delta \varepsilon \end{cases} \quad (18)$$

Решение (18)

$$\begin{cases} \delta T = \frac{\delta b_1 \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} - \delta b_2 \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon}}{\frac{\partial f_1}{\partial T} \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_2}{\partial T} \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon}} \\ \delta \varepsilon = \frac{\delta b_2 \frac{\partial f_1}{\partial T} - \delta b_1 \frac{\partial f_2}{\partial T}}{\frac{\partial f_1}{\partial T} \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_2}{\partial T} \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon}} \end{cases} \quad (19)$$

Так как $\delta b_{1,2}$ независимы и случайны, то по аналогии с выводом формулы (11) можно записать итоговые формулы для оценки погрешностей:

$$\begin{cases} \delta T = \pm \frac{\left[\left(\delta b_1 \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} \right)^2 + \left(\delta b_2 \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon} \right)^2 \right]^{1/2}}{\frac{\partial f_1}{\partial T} \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_2}{\partial T} \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon}} \\ \delta \varepsilon = \pm \frac{\left[\left(\delta b_2 \frac{\partial f_1}{\partial T} \right)^2 + \left(\delta b_1 \frac{\partial f_2}{\partial T} \right)^2 \right]^{1/2}}{\frac{\partial f_1}{\partial T} \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_2}{\partial T} \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon}} \end{cases} \quad (20)$$

Выводы

В работе подробно рассмотрена методология оптического контроля полимерных композитов с помощью интегрированных ВОД на основе ВБР. Показано, что для контроля деформации и температуры, например, по методу двух волокон, на

практике применяется как линейная, так и квадратичная модель оптического контроля. Данные модели формируются путем разложения функции относительного изменения резонансной длины волны ВБР от деформации и температуры в ряд Тейлора до первого (линейная модель) или второго (квадратичная модель) порядка малости. Это обусловлено тем, что разложение функции в соответствующий ряд до более высоких порядков нецелесообразно ввиду сложности определения деформации и температуры численными методами. В обоих моделях значимыми параметрами, напрямую влияющими на достоверность оптического контроля с помощью ВОД, являются соответствующие коэффициенты чувствительности к деформации и температуре, при этом, в случае квадратичной модели, дополнительно может быть учтен перекрестный коэффициент чувствительности, характеризующий изменение коэффициента чувствительности к деформации при изменении температуры, также, как и изменение коэффициента чувствительности к температуре при изменении деформации.

Важным аспектом повышения достоверности оптического контроля является процесс калибровки, заключающийся в экспериментальном определении значений коэффициентов чувствительности к деформации и температуре с учетом описанных моделей. Проведен анализ и систематизирована информация из открытых источников, сформулированы требования к оборудованию и представлена обобщенная методика проведения калибровки ВОД, интегрированных в ПКМ.

Рассмотрены основные методы оценки погрешностей контроля ПКМ оптическим методом с использованием интегрированных ВОД на основе ВБР, в том числе и для системы нелинейных уравнений.

Адаптация описанных методов калибровки ВОД и оценки погрешностей контроля к условиям эксплуатации конкретных конструкций из ПКМ позволит разработать эффективную методику одновременного контроля деформации и температуры композитных конструкций, применение которой на практике позволит в перспективе перейти от эксплуатации конструкции по заданному ресурсу к эксплуатации по фактическому состоянию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беловолов М. И., Беловолов М. М., Семенов С. Л. и др. Разработка волоконно-оптических датчиков контроля технических характеристик и оценки работоспособности композитных узлов изделий авиационной и ракетно-космической техники (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 3(159). С. 45—53.
2. Федотов М. Ю., Будагин О. Н., Козельская С. О., Терентьев В. С. Методы одновременного контроля деформации

ции и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 2(158). С. 44—51. EDN: UGQFVR.

3. Kersey A. D., Davis M. A., Patrick H. J., Leblanc M. Fiber grating sensors // IEEE J. Lightwave Tech. 1997. V. 15(8). P. 1442—1463.

4. Her S.-C., Huang C.-Y. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors // Sensors. 2011. V. 11(7). P. 6926—6941. DOI: 10.3390/s110706926.

5. Sivanesan P., Sirkis J. S., Murata Y., Buckley S. G. Optimal wavelength pair selection and accuracy analysis of dual fiber grating sensors for simultaneously measuring strain and temperature // Optical Engineering. 2002. V. 41(10). P. 2456—2463. DOI: 10.1117/1.1505638.

6. Farahi F., Webb D. J., Jones J. D., Jackson D. A. Simultaneous measurement of temperature and strain: cross-sensitivity considerations // J. Lightwave Technology. 1990. V. 8(2). P. 138—142. DOI: 10.1109/50.47862.

7. Boccaccio P., Donà R., Zoccoli A. Calibration of a Fiber Bragg Grating as Ultra-Sensitive Strain Gauge // LNL Annual Report, Appl. Gen. and Interdisc. Phys. Instrumentation. 2010. P. 191—192.

8. Richter-Trummer V., Tavares S. M., Peixoto D. F. et al. Calibration of Fibre Bragg Grating (FBG) Sensors and Their Use for Welding Monitoring: 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference J. Ambrosio et al. (eds.) Lisbon, Portugal, 7—11 September 2009. — 14 p.

9. Richter-Trummer V., Peixoto D., Moreira P. M. G. P. et al. Calibration of FBG sensors for measurement of temperature and strain using thermal stresses, paper S0103_P0382, 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Porto/Portugal, 20—24 July 2009.

10. Kehlenbach M., Horoschenkoff A., Trutzel M. N., Betz D. Performance of fiber optic Bragg grating sensors in CFRP

structures // Smart Structures and Materials 2001: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. SPIE. 2001. V. 4328. P. 199—208.

11. Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О. Математическое моделирование и экспериментальные результаты контроля ПКМ волоконно-оптическими датчиками с учетом воздействия факторов, имитирующих реальные условия эксплуатации // Контроль. Диагностика. 2019. № 4. С. 12—19. DOI: 10.14489/td.2019.04.pp.012-019. EDN: FRINRZ.

12. Pereira G., Faria H., Frias C., Frazao O., Marques A. T. Study and calibration of FBG sensors for the accurate strain monitoring of COPV // ECCM15 — 15TH European conference on composite material. 2012. — 9 p.

13. Pereira G., Frias C., Faria H., Frazão O., Marques A. T. On the improvement of strain measurements with FBG sensors embedded in unidirectional composites // Polymer Testing. 2013. V. 32(1). P. 99—105. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2012.09.010.

14. Pereira G., Frias C., Faria H., Frazão O., Marques A. T. Study of strain-transfer of FBG sensors embedded in unidirectional composites // Polymer Testing. 2013. V. 32(6). P. 1006—1010. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.05.006.

15. Mahakud R., Kumar J., Prakash O., Dixit S. K. Study of the nonuniform behavior of temperature sensitivity in bare and embedded fiber Bragg gratings: experimental results and analysis // Applied Optics. 2013. V. 52(30). P. 7570—7579. DOI: 10.1364/AO.52.007570.

16. Flockhart G. M. H., Maier R. R. J., Barton J. S. et al. Quadratic behavior of fiber Bragg grating temperature coefficients // Applied Optics. 2004. V. 43(13). P. 2744—2751. DOI: 10.1364/ao.43.002744.

17. Аксенова Е. Н., Гасников Н. К., Калашников Н. П. Методы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений в лабораториях физического практикума: Учеб.-метод. пособие. — М.: МИФИ, 2009. — 24 с.

Theoretical aspects of calibrating and estimating errors of fiber-optic diagnostics system of polymer composites

M. Yu. FEDOTOV

Institute of Automation and Electrometry of SB of RAS, Novosibirsk, Russia
Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia

Theoretical and methodological features are considered of the calibration of a fiber-optic system for the embedded testing of polymer composites by integrated fiber-optic sensors based on fiber Bragg gratings. It has been established that in order to increase the reliability of optical testing data, it is advisable to use a quadratic model of optical testing. It is shown that the calibration process is an integral part of the development of a system of embedded diagnostics of polymer composites and consists in the experimental determination of the values of the sensitivity coefficients to deformation and temperature, taking into account optical testing models. The main methods for estimating the errors in the testing of polymer composites by integrated fiber-optic sensors through the errors of the sensitivity coefficients, the calibration error, for a nonlinear system of equations are described. It has been established that the application of the considered methods and their adaptation to specific polymer composites and structures will make it possible in the future to create an effective system for the simultaneous diagnosis of deformation and temperature.

Keywords: polymer composite, embedded testing, fiber-optic sensor, fiber Bragg grating, two-fiber method, optical testing model, sensitivity coefficient, calibration, testing data error.

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». 2023. Вып. 2 (170). С. 1—52.

Компьютерная верстка *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

Подписано в печать 17.05.2023. Формат 60х84 1/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,2.
Тираж 250 экз. Заказ 2014. Свободная цена.
Адрес редакции: 125424, Москва,
Волоколамское ш., д. 77,
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».
www.ntskompas.ru; E-mail: izdanie@ntskompas.ru
Отпечатано: 101000, Москва,
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX, ком. 15, 16
ООО «Спиди-Принт.ру»
Индекс 80089.