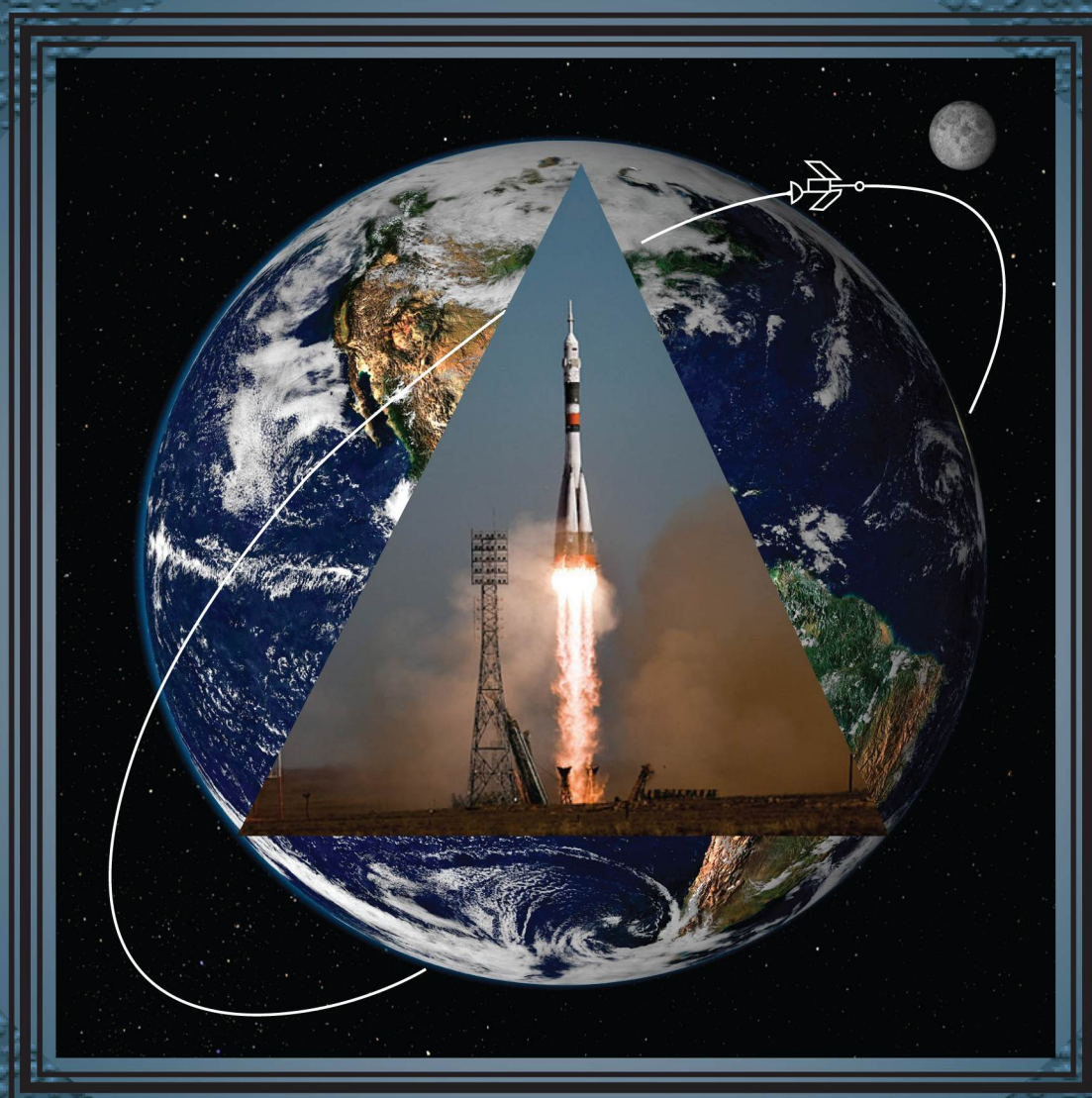


# КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

# 4



Москва 2022





## 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](mailto: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 4 (168)

Издается с 1981 г.

Москва 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

*Калашиников С. Т., Болтаев П. И.* Определение уточненной расчетной зависимости и сопоставление экспериментальных и расчетных значений критических нагрузок боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость, при укладке слоев в пакете продольно-кольцевым способом..... 3

*Валов И. И., Калашиников С. Т.* Исследование процесса импульсного нагружения экспериментальной гидродинамической установки, содержащей элементы конструкции из композиционного материала ..... 6

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ

*Янковский А. П.* Моделирование термоупругопластического динамического деформирования армированных пологих оболочек..... 11

*Острик А. В., Ким В. В., Острик М. А.* Численное моделирование деформирования и разрушения конструкций из бетонных композитов при нестационарном нагружении ..... 21

### КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Макарьев Д. И., Резниченко А. Н., Дудкина С. И., Резниченко Л. А.* Высокоанизотропные материалы на основе титаната свинца..... 29

### КЛЕИ, РЕЗИНЫ, ПОКРЫТИЯ И МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Порозова С. Е., Лебедева К. Н., Старков Д. А.* Модификация поверхности порошка как способ улучшения его распределения в материале наплавки..... 34

### ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

*Шевченко Н. В.* Нано- и микроразмерные продукты утилизации взрывчатых веществ и ракетного топлива (Обзор) ..... 39

### КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

*Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С., Чернова В. В.* Анализ параметров сигналов акустической эмиссии, локализованных при статическом нагружении образцов из углепластика с ударным повреждением..... 52

*Федотов М. Ю.* Исследование физических параметров волоконных световодов с брэгговскими решетками для создания системы диагностики композитных конструкций ..... 62

**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 «ЦНИИСМ»; **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. Калашников**, 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»), 2022;
- © Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), 2022;
- © Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), 2022

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 629.76/78.002.3

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_4\_3

EDN: ADRYGQ

## Определение уточненной расчетной зависимости и сопоставление экспериментальных и расчетных значений критических нагрузок боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость, при укладке слоев в пакете продольно-кольцевым способом

С. Т. КАЛАШНИКОВ, канд. техн. наук; П. И. БОЛТАЕВ, д-р техн. наук  
Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

*Дано определение уточненной расчетной зависимости несущей способности боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость, при укладке однонаправленных слоев продольно-кольцевым способом. Осуществлено сопоставление экспериментальных и расчетных значений критических нагрузок упомянутых боралюминиевых оболочек. При этом показано, что разработанная ранее методика согласования расчетных и экспериментальных значений несущей способности слоистых оболочек из композиционных материалов хорошо работает и для боралюминиевых оболочек, у которых пакет толщины оболочки набран продольно-кольцевым способом. Это подтверждается статистической обработкой по параметру  $K$ , представляющему собой отношение критической нагрузки, полученной в эксперименте, к расчетной. Разброс экспериментальных и расчетных значений по коэффициенту имеет также малую величину, как и для оболочек, пакет которых набран кольцевым способом. Использование определенной уточненной расчетной зависимости снижает статистические характеристики коэффициента  $K$  и позволяет проектанту-расчетчику более обоснованно подходить к определению коэффициента безопасности конструкции летательных аппаратов.*

**Ключевые слова:** уточненная расчетная зависимость, критическая нагрузка, боралюминиевая оболочка, корректирующая функция, коэффициент согласия  $K$ , пакет толщины оболочки, продольно-кольцевой способ.

Поведение критической нагрузки боралюминиевой цилиндрической оболочки, работающей на устойчивость, существенно зависит от соотношения числа однонаправленных слоев оболочки, набранных продольно-кольцевым способом и последовательности их укладки в пакете [1].

Ранее была получена уточненная расчетная зависимость несущей способности боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость от геометрических и структурных параметров, пакет которых набран кольцевым способом [2].

В данной работе, на основе ранее разработанной методики согласования расчетных

и экспериментальных значений несущей способности слоистых оболочек из композиционных материалов [3] показана возможность получения уточненной расчетной зависимости и сделано сопоставление экспериментальных и расчетных значений критических нагрузок боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость, при укладке слоев в пакете продольно-кольцевым способом.

Используя ранее разработанную методику [3], корректирующую функцию, найденную методом наименьших квадратов, по данным таблицы опишем уравнением:

$$\lg K^* = -0,17568 \lg \frac{R}{H} - 0,05149 \lg \frac{L}{R} + 0,21223, \quad (1)$$

или в компактном виде

$$K^* = 1,63 \left( \frac{R}{H} \right)^{-0,17568} \left( \frac{L}{R} \right)^{-0,05149}, \quad (2)$$

где  $K^*$  — корректирующая функция.

**Калашников Сергей Тимофеевич**, старший научный сотрудник, руководитель отдела фундаментальных проблем аэрокосмических технологий.

E-mail: ofpat@mail.ru, sergiot@bk.ru

**Болтаев Петр Иванович**, старший научный сотрудник отдела фундаментальных проблем аэрокосмических технологий.

E-mail: ofpat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21 июня 2022 г.

© Калашников С. Т., Болтаев П. И., 2022

Параметры оболочки:

$R$  — радиус,

$H$  — толщина,

$L$  — длина.

Используя (2) и расчетную зависимость (3), взятую из работы [4]

$$q = \frac{1}{R\lambda_n^2} \left[ a_{33} - \frac{a_{13}^2 a_{22} + a_{23}^2 a_{11} - 2a_{12} a_{23} a_{13}}{a_{11} a_{22} - a_{12}^2} \right], \quad (3)$$

получим, уточненную зависимость, которая имеет вид

$$q_p^* = 1,63 \left( \frac{R}{H} \right)^{-0,17568} \left( \frac{L}{R} \right)^{-0,05149} \times \frac{1}{R\lambda_n^2} \left( a_{33} - \frac{a_{13}^2 a_{22} + a_{23}^2 a_{11} - 2a_{12} a_{23} a_{13}}{a_{11} a_{22} - a_{12}^2} \right), \quad (4)$$

где  $a$  — коэффициенты анизотропии;

$\lambda_n$  — параметр нагрузки.

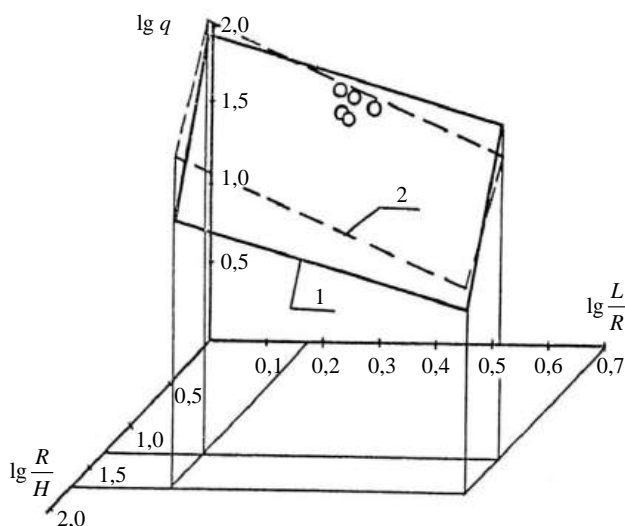
На рисунке показано сопоставление расчетных и экспериментальных значений критических нагрузок оболочек, пакет которых спроектирован продольно-кольцевой укладкой слоев. При этом слои в пакете уложены таким образом, когда продольные слои, или лучше их назвать осевые слои, уложены в средней части пакета, а кольцевые слои расположены по периферии пакета симметрично

относительно срединной поверхности оболочки. Как показано в работе [1], именно подобная схема расположения слоев обеспечивает максимальное значение критической нагрузки. Результаты расчета и эксперимента сведены в таблицу, в которой в качестве иллюстрации представлена шестая оболочка, пакет которой спроектирован чередованием продольных и кольцевых слоев с соотношением числа слоев  $\varphi = 0,333$ . Значение критической нагрузки у нее значительно меньше по сравнению с другими оболочками, пакет которых спроектирован как указано ранее.

Проведенные расчеты по определению статистических характеристик коэффициента согласия  $K_1$  по зависимости (4) показывают хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений. Статистические характеристики коэффициента согласия  $K_1$  имеют следующие значения:

- среднее значение  $\overline{K_1} = 0,99638$ ;
- коэффициент вариации  $v_{k_1} = 0,0183$ .

Малое значение коэффициента вариации  $v_{k_1} = 1,83\%$  говорит о том, что при продольно-кольцевой укладке слоев в пакете уточненная расчетная зависимость очень хорошо описывает закономерность поведения экспериментальных значений критических нагрузок. Несмотря на хорошее описание уточненной расчетной зависи-



**Сопоставление расчетных и экспериментальных значений критических нагрузок оболочек при  $\psi = 0,4$  и  $\varphi = 0,21-0,44$ :**

1 — расчетная зависимость, представленная в виде плоскости от геометрических параметров  $L/R$ ;  $R/H$  (3);  
2 — уточненная расчетная зависимость, представленная также в виде плоскости от геометрических параметров  $L/R$ ;  $R/H$  (4), скорректированная по экспериментальным данным таблицы;  $\psi$  — коэффициент армирования;  
 $\varphi$  — соотношение числа слоев

**Укладка слоев по варианту, указанному ранее**

№ п/п	$N$	$\varphi$	$\psi$	$R/H$	$L/R$	$H$ , мм	$q_p$ , МПа	$q_{\Sigma}$ , МПа	$K$	$K^*$	$q_p^*$ , МПа	$K_1 = \frac{q_{\Sigma}}{q_p^*}$	$(K_1 - \overline{K_1})^2$
1	19	0,210	0,400	21,74	2,87	0,147	22,300	20,0	0,8969	0,8989	20,045	0,99776	0,0000019
2	1918	0,316	0,427	22,17	2,96	0,145	21,520	19,2	0,8922	0,8944	19,247	0,99756	0,0000014
3	18	0,222	0,386	21,70	3,22	0,157	19,161	17,1	0,8924	0,8939	17,128	0,99837	0,0000040
4	18	0,333	0,428	23,42	2,97	0,144	18,885	16,2	0,8578	0,8857	16,726	0,96855	0,0007750
5	15	0,444	0,430	23,70	2,96	0,143	18,970	17,1	0,9014	0,8840	16,770	1,01968	0,0005430
6*		0,333	0,345	22,73	2,96	0,179	17,590	14,0	0,7959	0,8905	15,664	0,89377	

мости (4) поведения экспериментальных значений критических нагрузок, она имеет некоторый недостаток. Проблема в том, что корректирующая функция (2) найдена на малом числе испытаний при изменении параметров  $L/R$  и  $R/H$  в сравнительно небольшом диапазоне. Для более надежного определения вида корректирующей функции (2) необходим дополнительный экспериментальный материал в более широком диапазоне изменения указанных безразмерных параметров  $L/R$  и  $R/H$ . В данной работе экспериментальный материал был взят из работы [5].

Сопоставляя статистические характеристики коэффициента согласия  $K_1$  с аналогичными его значениями, полученными в работе [2], следует отметить, что оболочки с продольно-кольцевой укладкой слоев в пакете по описанной схеме, обладают большей кучностью случайных отклонений отдельных значений критических нагрузок. И в подтверждение исследований, проведенных в работе [1], обладают большим значением критической нагрузки по сравнению с укладкой слоев в пакете методом чередования. Теоретические расчеты дают это превышение при коэффициенте армирования  $\psi = 0,4$  около 7 %, экспериментальные данные — около 8 %.

Таким образом, полученная уточненная расчетная зависимость и проведенное сопоставление экспериментальных и расчетных значений критических нагрузок боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость при укладке слоев в пакете продольно-кольцевым способом, и выводы, полученные в работе [2], убедительно подтвер-

ждают хорошую сходимость теоретических положений методики согласования расчетных и экспериментальных значений несущей способности слоистых оболочек из композиционных материалов, изложенной в работе [3]. Ее использовании помогает проектанту-расчетчику более обоснованно и с большей надежностью провести инженерные расчеты при назначении необходимого эксплуатационного значения коэффициента безопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болтаев П. И., Романов М. Р. Исследование схем проектирования тонкостенных цилиндрических оболочек из боралюминия, работающих на устойчивость при внешнем давлении // Техника, экономика, информация. Сер. "Техника. Конструкции из композиционных материалов". 1981. Вып. 2. С. 41—48.
2. Калашников С. Т., Болтаев П. И. Уточненная расчетная зависимость несущей способности боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость, от геометрических и структурных параметров // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 4. С. 10—13.
3. Болтаев П. И. Методика согласования расчетных и экспериментальных значений несущей способности слоистых оболочек из композиционных материалов // Технология. Сер. "Конструкции из композиционных материалов". 1987. Вып. 1. С. 47—52.
4. Болтаев П. И. Основные уравнения анизотропной цилиндрической оболочки // Конструкции из композиционных материалов. 2008. № 1. С. 3—11.
5. Ершов Н. П., Милейко С. Т. Сопоставление несущей способности оболочек из алюминий-магниевого сплава, боралюминия и стеклопластика // Материалы межотраслевых научно-технических конференций, совещаний, семинаров и выставок. — М.: Всероссийский институт межотраслевой информации. 1976. Вып. 3(6). С. 100—106.

## Definition of a refined calculated dependence and correlation of experimental and computed values of critical loads of boron/aluminum shells, imparting stability, with layers longitudinally-annularly laid down in a bundle

S. T. KALASHNIKOV, P. I. BOLTAYEV

South Urals Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the RAS,  
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

*The paper presents the definition of a refined calculated dependence of the load-carrying capacity of boron/aluminum shells, imparting stability, with longitudinally-annularly laid down unidirectional layers. Experimental and calculated values of critical loads of the above mentioned boron/aluminum shells are correlated. In so doing, it is shown that an earlier developed methodology used to correlate calculated and experimental values of the load-carrying capacity of layered composite shells works properly also for boron/aluminum shells, the thickness of which bundles is longitudinally-annularly set up. The fact is proved by statistical processing under  $K$ , that represents a ratio of a critical experimental load to a calculated one. The scatter of experimental and calculated data in the ratio is similarly low as for shells, which bundle is annularly set up. The application of the refined calculated dependence lowers statistical characteristics of the coefficient  $K$  and allows a designer-analyst define a safety coefficient of structures of flight vehicles more reasonably.*

**Keywords:** refined calculated dependence, critical load, boron/aluminum shell, correction function, coefficient of agreement  $K$ , bundle of the shell thickness, longitudinally-annularly laying down.

УДК 532.5.031

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_4\_6

EDN: AQECBS

## Исследование процесса импульсного нагружения экспериментальной гидродинамической установки, содержащей элементы конструкции из композиционного материала

<sup>1,2</sup> И. И. ВАЛОВ, канд. физ.-мат. наук; <sup>2</sup> С. Т. КАЛАШНИКОВ, канд. техн. наук<sup>1</sup> Миасский филиал ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,  
г. Миасс, Челябинская область, Россия<sup>2</sup> Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрОРАН,  
г. Миасс, Челябинская область, Россия

*Предложено решение задачи определения поля давлений в жидкости при экспериментальной отработке движения объектов под водой. Приведена методика расчетов по определению поля давлений на стенки емкости при интенсивном развитии в жидкости сферической газовой полости. Наличие твердых стенок емкости учитывается путем размещения на них фиктивных источников с интенсивностью, обеспечивающей выполнение условия непротекания. Выведен закон развития газового пузыря, аналогичный уравнению Рэлея, масса газа в пузыре определяется в соответствии с уравнением Сен-Венана. Давление в интересующей исследователя точке емкости находится с использованием интеграла Коши-Лагранжа. Построенная методика дает возможность оценить нагрузки на стенки экспериментального стенда из композиционного материала в случае возникновения нештатной ситуации.*

**Ключевые слова:** гидродинамический эксперимент, поле давлений в жидкости, стенки из композиционного материала.

При проектировании экспериментальных установок для изучения вопросов движения исследовательских подводных аппаратов, исследовательских роботов, отработки элементов конструкций подводных трубопроводов [1, 2] необходимо учитывать риск возникновения нештатных ситуаций, связанных с отказом материальной части.

Возможными случаями являются разрушение двигательной установки, приводящей в движение модель подводного аппарата, или прорыв трубопровода. Результатом таких случаев является то, что за короткий отрезок времени в ограниченную область внутри жидкости высвобождается достаточно большая масса газа, что приводит к значительному повышению давления внутри экспериментальной установки.

Поиск точного решения большинства практических задач гидродинамики, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений (как правило, в форме задачи Коши или

уравнений Навье-Стокса), сопряжен с большими трудностями, поэтому специалисты часто обращаются к численным методам решения. При этом для практика-экспериментатора, сталкивающегося с необходимостью в сжатые сроки спланировать и провести серию экспериментов, актуальна задача описания исследуемого процесса инженерной математической моделью, допускающей меньшую точность решения по сравнению с решением, полученным с помощью более точных сеточных методов, но позволяющей предсказать характер исследуемого процесса, диапазоны и периоды нарастания измеряемых величин, а также за короткое время без применения кластерных технологий просчитать несколько вариантов с различными условиями эксперимента. В рассматриваемом случае исследователю желательно владеть методикой оценки возникающих давлений, чтобы обоснованно выбрать параметры заряда энергоузла, неприводящие в случае отказа к разрушению модельной установки, а также обоснованно выбрать запас прочности стенок при проектировании новых экспериментальных стендов.

Авторы предлагают в качестве инженерной математической модели расчета силового нагружения экспериментальной установки рассмотреть гидробассейн, имеющий форму параллелепипеда длиной  $L_1$ , шириной  $L_2$  и заполненного водой на высоту  $H$ , в случае интенсивного развития в нем единичной газовой полости. При этом для визуализации эксперимента и возможности проведения

---

**Валов Илья Игоревич**, доцент, научный сотрудник отдела фундаментальных проблем аэрокосмических технологий.  
E-mail: vii\_1982@mail.ru

**Калашников Сергей Тимофеевич**, старший научный сотрудник, руководитель отдела фундаментальных проблем аэрокосмических технологий.  
E-mail: ofpat@mail.ru, sergiot@bk.ru

*Статья поступила в редакцию 1 июля 2022 г.*

© Валов И. И., Калашников С. Т., 2022



видеосъемки часть стенок гидробассейна выполнена из композиционного материала — стеклопакета, армированного металлическими нитями (рис. 1).

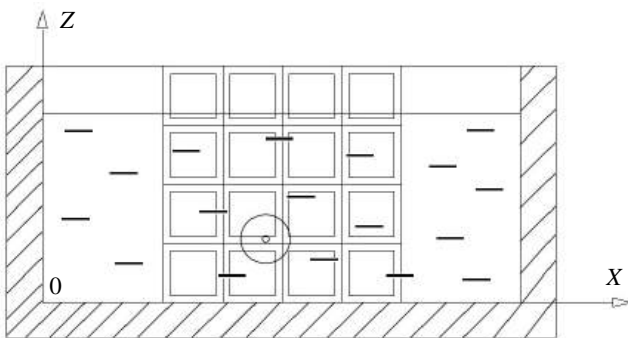


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для снижения искажений в процессе видеосъемки толщина стеклопакета выбрана минимально необходимой для обеспечения безопасности стенда с учетом возможных нештатных ситуаций. Модель пригодна для проведения в короткий срок серии расчетов на обычном персональном компьютере.

### Постановка задачи и методы решения

Задача решается при следующих допущениях:

- жидкость невязкая и несжимаемая, её движение потенциальное. В начальный момент времени жидкость находится в состоянии покоя;
- газовая полость развивается, сохраняя сферическую форму;
- изменением уровня жидкости в экспериментальной установке пренебрегаем.

Введем прямоугольную систему координат, направив ось  $Z$  вверх и расположив начало координат в одном из углов нижней плоскости экспериментальной установки.

Саму газовую полость будем рассматривать как особенность — источник. Обильность такого источника  $Q$  определяется объемом жидкости, переносимым через контрольную поверхность (пусть это сфера известного радиуса) в единицу времени. Так как сделано предположение о невязкой и несжимаемой жидкости  $Q = \frac{dV}{dt}$ , потенциал источника

имеет вид:  $\Phi = \frac{1}{4\pi r} \frac{dV}{dt}$ . Здесь  $r$  — расстояние от центра особенности до точки, значение потенциала в которой нас интересует,  $V$  — объем полости [3].

Условие непротекания на границе области  $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$  ( $n$  — вектор нормали) удовлетворим сле-

дующим образом: учтем изменение радиуса газовой сферы ( $a$  — радиус газовой полости,  $\dot{a}$  — скорость его изменения), разместив на каждом участке цилиндрической поверхности площадью  $dS$  (нижнее основание и боковые стенки) фиктивный элементарный источник с обильностью [4]:

$$dQ = \frac{dS \left( \vec{n}, \frac{\vec{r}_1}{r_1} \right)}{4\pi r_1^2} \frac{dV}{dt} = \frac{a^2 \cdot \dot{a} \cdot dS \left( \vec{n}, \frac{\vec{r}_1}{r_1} \right)}{r_1^2}.$$

Обозначим  $C(x_C, y_C, z_C)$  — координаты центра газовой полости;  $A(x_A, y_A, z_A)$  — координаты точки, значение давления в которой рассматриваем.

Тогда:

$r_1 = \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2}$  — расстояние от центра газовой полости до точки с координатами  $(x, y, z)$ , расположенной на границе области;

$r_2 = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2}$  — расстояние от точки с координатами  $(x, y, z)$ , расположенной на границе области, до точки, значение потенциала (и давления) в которой рассматриваем;

$r_3 = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2}$  — расстояние от центра сферической полости до точки  $A(r_A, \varphi_A, z_A)$ .

Тогда после всех преобразований итоговый потенциал течения в рассматриваемой области, учитывающий влияние источника — газовой полости и фиктивных источников на стенках экспериментальной установки, запишем как [3, 4]:

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{a^2 \dot{a}}{r_3} + \int_0^{L_2} \int_0^H \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{x_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{x_C^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dydz + \\ & + \int_0^{L_2} \int_0^H \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{L_1 - x_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(L_1 - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dydz + \\ & + \int_0^{L_1} \int_0^H \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{y_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + y_C^2 + (z - z_C)^2}} \right] dx dz + \\ & + \int_0^{L_1} \int_0^H \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{L_2 - y_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + (L_2 - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dx dz + \\ & + \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{z_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + z_C^2}} \right] dx dy. \end{aligned}$$

Давление в произвольной точке области  $A(r_A, \varphi_A, z_A)$  может быть найдено из интеграла Коши-Лагранжа [5]:

где  $P_{ст}$  — гидростатическое давление на глубине расположения газовой полости;  
 $\rho$  — плотность жидкости.

$$\frac{P - P_{ст}}{\rho} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right)^2, \quad (1) \quad \text{Проводя дифференцирование, получаем:}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = & \frac{2a\dot{a}^2 + a^2\ddot{a}}{r_3} + \int_0^{L_2} \int_0^H \left[ \frac{2a\dot{a}^2 + a^2\ddot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{x_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{x_C^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dydz + \\ & + \int_0^{L_2} \int_0^H \left[ \frac{2a\dot{a}^2 + a^2\ddot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{L_1 - x_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(L_1 - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dydz + \\ & + \int_0^{L_1} \int_0^H \left[ \frac{2a\dot{a}^2 + a^2\ddot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{y_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + y_C^2 + (z - z_C)^2}} \right] dx dz + \\ & + \int_0^{L_1} \int_0^H \left[ \frac{2a\dot{a}^2 + a^2\ddot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{L_2 - y_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + (L_2 - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dx dz + \\ & + \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \left[ \frac{2a\dot{a}^2 + a^2\ddot{a}}{(r_1 + r_2)} \frac{z_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + z_C^2}} \right] dx dy, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial r} = & - \frac{a^2 \dot{a}}{r_3^2} - \int_0^{L_2} \int_0^H \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)^2} \frac{x_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{x_C^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dydz - \\ & - \int_0^{L_2} \int_0^H \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)^2} \frac{L_1 - x_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(L_1 - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dydz - \\ & - \int_0^{L_1} \int_0^H \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)^2} \frac{y_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + y_C^2 + (z - z_C)^2}} \right] dx dz - \\ & - \int_0^{L_1} \int_0^H \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)^2} \frac{L_2 - y_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + (L_2 - y_C)^2 + (z - z_C)^2}} \right] dx dz - \\ & - \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \left[ \frac{a^2 \dot{a}}{(r_1 + r_2)^2} \frac{z_C}{4\pi r_1^2 \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + z_C^2}} \right] dx dy. \end{aligned}$$

Данные об изменении  $a(t)$ ,  $\dot{a}(t)$ ,  $\ddot{a}(t)$ , необходимые для проведения расчета по формуле (1), при известном законе изменения давления в газовой полости  $P_d(t)$  могут быть получены при решении уравнения Релея [6], описывающего процесс развития одиночной сферической полости в объеме невязкой, несжимаемой и лишенной капиллярных свойств жидкости:

$$\ddot{a}a^2 + \frac{3}{2}\dot{a}^2 = \frac{P_d(t)}{r} - F(t).$$

В правой части уравнения Релея в члене  $F(t)$  учитывается действие фиктивных источников, расположенных на стенках экспериментальной установки.

Давление в газовой полости  $P_d(t)$  определим из уравнения состояния идеального газа:

$$P_d(t) = \frac{3mR_gT}{4\pi a^3}, \text{ где } R_g \text{ — газовая постоянная; } T \text{ —}$$

температура газа в полости;  $m(t) = m_0 + \int_0^t G dt$  — масса газа в полости;  $G$  — расход поступающего в полость газа.

## Результаты

Расчет проведем для установки длиной 6 м (принята за характерный линейный размер  $R$ ), шириной 2 м, заполненной водой на 4 м. На рис. 2 приведены графики расходов газа для трех расчетных случаев.

Графики давления в ближайшей к источнику точке, расположенной на стенке экспериментальной установки, представлены на рис. 3.

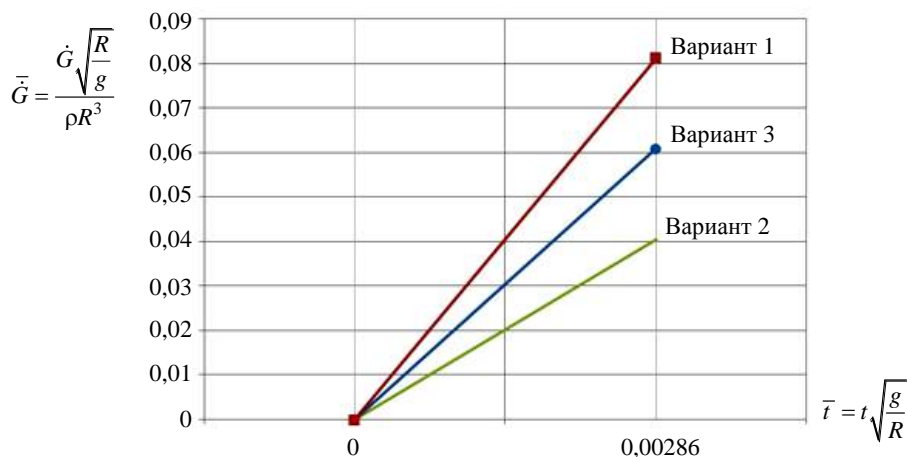


Рис. 2. Графики расходов энергоуэла

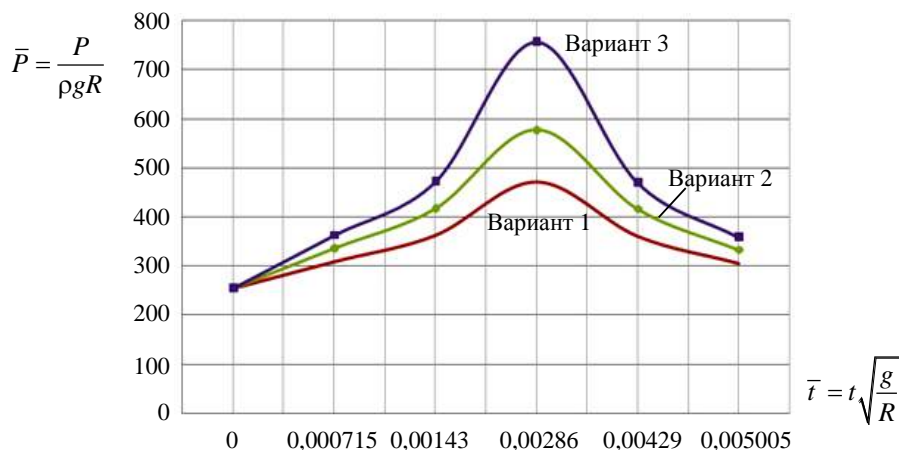


Рис. 3. Давление на стенке экспериментальной установки

### Заключение

Приведенная методика расчета дает возможность определить поле давлений при интенсивном развитии находящейся под водой газовой полости и нагрузки на экспериментальную установку.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярь В. Г., Пегов В. И. Гидродинамика баллистических ракет подводных лодок. — Миасс: КБ им. акад. В. П. Макеева, 2004. — 256 с.
2. Дегтярь В. Г., Пегов В. И. Гидродинамика подводного старта ракет. — М: Машиностроение-Полет, 2009. — 448 с.
3. Милн-Томпсон Л. М. Теоретическая гидродинамика. — М: Мир, 1964. — 660 с.
4. Чижиумов С. Д. Основы гидродинамики: учеб. пособие. — Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО "КнАГТУ", 2007. — 106 с.
5. Седов Л. И. Механика сплошной среды. — М: Наука, 1970. Т. 2. — 568 с.
6. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. — М: Физматгиз, 1963. Т. 1. — 584 с.

## Study of impulsive loading of experimental hydrodynamic facility with composite structural elements

<sup>1,2</sup>I. I. VALOV, <sup>2</sup>S. T. KALASHNIKOV

<sup>1</sup> Miass Branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Chelyabinsk State University", Miass, Chelyabinsk Region, Russia

<sup>2</sup> South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of the UB RAS, Miass, Chelyabinsk Region, Russia

*The solution to the problem has been proposed is focused on determination of a pressure field in a liquid at experimental testing of object motion under water. A calculation method is proposed to determine a pressure field on the walls of a reservoir during intensive development of a spherical gas cavity in the liquid. The presence of solid reservoir walls is taken into account by placing fictitious sources on them with intensity ensuring that the non-leakage condition is met. The law of a gas bubble development is derived, similar to the Rayleigh equation; gas mass in the bubble is determined by the Saint-Venant equation. Pressure at the reservoir point of the researcher interest is determined by the Cauchy-Lagrange integral. The developed method permits to evaluate loads on composite walls of a test bench in case of an emergency situation.*

**Keywords:** hydrodynamic experiment, pressure field in a liquid, composite walls.



УДК 539.4

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_4\_11

EDN: AVMNZB

## Моделирование термоупругопластического динамического деформирования армированных пологих оболочек

А. П. ЯНКОВСКИЙ, д-р физ.-мат. наук

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

*Сформулирована начально-краевая задача термоупругопластического деформирования армированных гибких пологих оболочек при динамическом нагружении. Слабое сопротивление таких тонкостенных конструкций поперечному сдвигу моделируется неклассической теорией изгиба Амбарцумяна. Геометрическая нелинейность задачи учитывается в приближении Кармана. Температура пологих оболочек по толщине задается полиномом 7-го порядка. Решение поставленной связанной нелинейной двумерной задачи построено с использованием явной схемы шагов по времени. Исследовано неизотермическое деформирование ортогонально-армированных стеклопластиковых и металлокомпозитных удлиненных цилиндрических панелей, фронтально нагруженных воздушной взрывной волной. Показано, что в отличие от гибких армированных пластин композитные пологие оболочки при их динамическом нагружении взрывного типа необходимо рассчитывать с учетом теплового отклика в них. Цилиндрические искривленные панели деформируются более интенсивно при их нагружении со стороны выпуклой лицевой поверхности.*

**Ключевые слова:** пологие оболочки, армирование волокнами, термоупругопластичность, динамическое деформирование, геометрическая нелинейность, теория изгиба Амбарцумяна, явная численная схема.

Изделия из композиционных материалов (КМ) часто подвергаются воздействию высокоинтенсивных механических и тепловых нагрузок [1—8], при которых компоненты композиции могут деформироваться неупруго [3, 4, 7, 9—13].

Актуальной является проблема моделирования термоупругопластического поведения тонкостенных элементов КМ-конструкций, в частности пологих оболочек и искривленных панелей. Решение данной задачи находится в стадии становления [3, 4, 7, 11, 13—17].

Механические свойства материалов зависят от температуры [9, 18], поэтому в работе [17] была разработана математическая модель неизотермического упругопластического деформирования армированного термочувствительного материала и проведены расчеты динамики поперечно нагружаемых пластин из таких КМ. В [17] показано, что упругопластический расчет металлокомпозитных гибких пластин следует проводить с учетом теплового отклика, а стеклопластиковые пластины

можно рассчитывать, не учитывая возникающее при этом температурное поле (в силу малого нагрева таких КМ-конструкций). Известно, что при динамическом нагружении материалов и изделий источником тепловыделения является диссипация механической энергии, зависящая от уровней напряжений и скоростей деформаций [19]. Так как при поперечных осцилляциях частота колебаний пологих оболочек существенно больше, чем пластин той же толщины и тех же размеров в плане, изготовленных из тех же материалов, то и скорости деформаций в таких искривленных тонкостенных КМ-конструкциях существенно больше, чем в аналогичных КМ-пластинах. Поэтому тепловыделение в пологих оболочках может оказаться существенно большим, чем в пластинах, и результаты работы [17] уже нельзя будет переносить на искривленные КМ-панели и пологие КМ-оболочки.

Для учета ослабленного сопротивления тонкостенных элементов армированных конструкций поперечным сдвигам и расчета волновых процессов в них, как правило, используют неклассические теории Рейсснера [1, 3, 6, 7, 20], Амбарцумяна [17, 21, 22] и Редди [5, 23]. Численные решения нелинейных динамических задач теории пластин и оболочек обычно строят с использованием явных

**Янковский Андрей Петрович**, ведущий научный сотрудник лаборатории "Физика быстротекущих процессов".  
E-mail: lab4nemir@rambler.ru; yankovsky\_ap@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2022 г.

© Янковский А. П., 2022

[3, 17, 22] или неявных [4, 24] алгоритмов шагов по времени.

Данное исследование посвящено моделированию термоупругопластического динамического поведения армированных пологих оболочек в рамках теории изгиба Амбарцумяна. Для интегрирования связанной термомеханической задачи используется явная численная схема.

### Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим гибкую пологую КМ-оболочку толщиной  $2h$ , с которой связана ортогональная система координат  $x_i$  таким образом, что отсчетная поверхность  $x_3 = 0$  — срединная ( $|x_3| \leq h$ ), а координатные линии  $x_1$  и  $x_2$  совпадают с линиями главной кривизны этой поверхности (рис. 1, где в силу ее малости искривленность оболочки не изображена). Конструкция перекрестно армирована (возможно пространственно)  $K$  семействами непрерывных волокон с плотностями армирования  $\omega_k$  ( $1 \leq k \leq K$ ). В направлении  $x_3$  структура квазиоднородна.

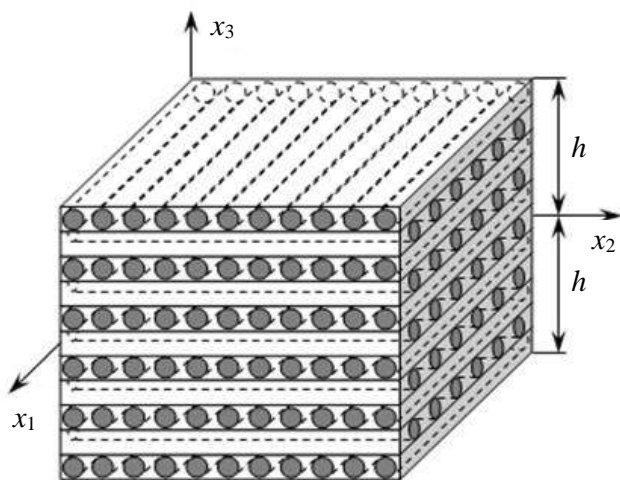


Рис. 1. Элемент ортогонально-армированной полой оболочки

С каждым  $k$ -м семейством арматуры связана локальная ортогональная система координат  $x_i^{(k)}$ , причем ось  $x_1^{(k)}$  сориентирована вдоль траектории волокна и задается углами сферической системы координат  $\theta_k$  и  $\varphi_k$  (рис. 2). Направляющие косинусы  $l_{ij}^{(k)}$  между осями  $x_i^{(k)}$  и  $x_j$  ( $i, j = 1, 3$ ,  $1 \leq k \leq K$ ) вычисляются по формулам (1.21) из [17].

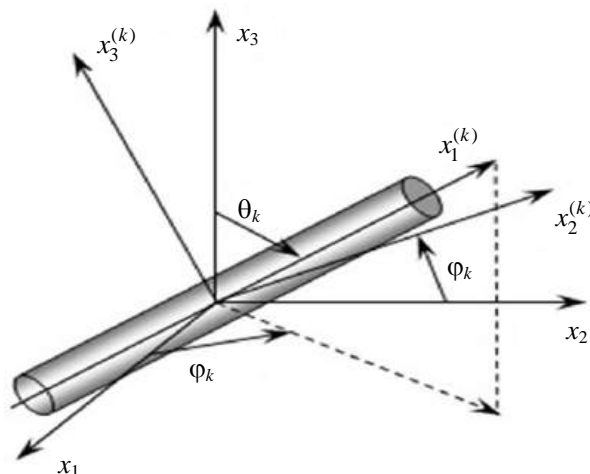


Рис. 2. Локальная ортогональная система координат, связанная с волокном  $k$ -го семейства

Предполагаем, что наличием внешних касательных сил на лицевых поверхностях конструкции можно пренебречь, и в случае пространственного армирования выполняются требования, указанные в замечании в [17]. (В случае плоскоперекрестных структур армирования (см. рис. 1) эти требования заведомо выполняются.) Тогда, используя результаты работ [17, 21, 22], усредненные деформации композиции  $\varepsilon_{ij}$  и перемещения точек гибкой полой оболочки  $U_i$  в рамках теории Амбарцумяна можно записать:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}(t, \mathbf{r}) = & \frac{1}{2} (\partial_i u_j + \partial_j u_i) - x_3 \partial_i \partial_j w + \\ & + \frac{x_3}{3h^2} (3h^2 - x_3^2) (\partial_i \varepsilon_{j3}^0 + \partial_j \varepsilon_{i3}^0) + \\ & + \delta_{ij} \frac{w}{R_i} + \frac{1}{2} \partial_i w \partial_j w, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i3}(t, \mathbf{r}) = & \frac{h^2 - x_3^2}{h^2} \varepsilon_{i3}^0(t, \mathbf{x}), \\ \mathbf{x} \in G, \quad |x_3| \leq h, \quad t \geq t_0, \quad i, j = 1, 2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_i(t, \mathbf{r}) = & u_i(t, \mathbf{x}) - x_3 \partial_i w + \frac{2x_3}{3h^2} (3h^2 - x_3^2) \varepsilon_{i3}^0, \\ U_3(t, \mathbf{r}) = & w(t, \mathbf{x}), \quad i = 1, 2, \quad \mathbf{x} \in G, \\ |x_3| \leq h, \quad t \geq t_0, \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2), \quad \mathbf{r} = (x_1, x_2, x_3), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $w$  — прогиб;  
 $u_i$  — тангенциальные перемещения точек отсчетной поверхности ( $x_3 = 0$ ) в направлениях  $x_i$ ;  
 $\varepsilon_{i3}^0$  — деформации поперечных сдвигов в точках той же поверхности;

- $R_i$  — радиусы главной кривизны срединной поверхности;  
 $t_0$  — начальный момент времени  $t$ ;  
 $\partial_i$  — оператор частного дифференцирования по координате  $x_i$  ( $i = 1, 2$ );  
 $\delta_{ij}$  — символ Кронекера;  
 $G$  — область, занимаемая КМ-конструкцией в плане.

В соотношениях (1) и (2) неизвестными являются двумерные функции  $w$ ,  $u_i$  и  $\varepsilon_{i3}^0$  ( $i = 1, 2$ ).

В данной работе исследуется термомеханическое поведение полой КМ-оболочки как гибкой тонкостенной системы, поэтому нормальное напряжение  $\sigma_{33}(t, \mathbf{r})$  с приемлемой для инженерных приложений точностью можно линейно аппроксимировать по координате  $x_3$  [1]:

$$\sigma_{33}(t, \mathbf{r}) = \frac{\sigma_{33}^{(+)}(t, \mathbf{x}) - \sigma_{33}^{(-)}(t, \mathbf{x})}{2h} x_3 + \frac{\sigma_{33}^{(+)}(t, \mathbf{x}) + \sigma_{33}^{(-)}(t, \mathbf{x})}{2}, \quad (3)$$

$$\mathbf{x} \in G, \quad |x_3| \leq h, \quad t \geq t_0,$$

где  $\sigma_{33}^{(\pm)}(t, \mathbf{x}) \equiv \sigma_{33}(t, \mathbf{x}, \pm h)$  — известные из силовых граничных условий напряжения на нижней (–) и верхней (+) лицевых поверхностях.

К равенствам (1)–(3) нужно добавить двумерные уравнения движения гибкой полой оболочкой (см. (4) в [22]) и определяющие соотношения для КМ, которые связывают усредненные скорости напряжений в композиции  $\dot{\sigma}_{ij}$ , скорости деформаций  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  и температуру конструкции  $\Theta$ . Исходя из результатов работы [17], в текущий момент времени  $t$  эти соотношения целесообразно записать в матричной форме

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{B} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{p}, \quad (4)$$

где

$$\boldsymbol{\sigma} \equiv (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{12})^T, \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} \equiv (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, 2\varepsilon_{23}, 2\varepsilon_{31}, 2\varepsilon_{12})^T;$$

$6 \times 6$ -матрица  $\mathbf{B}$  и шестикомпонентный вектор-столбец  $\mathbf{p}$  вычисляются по формулам (1.18) в [17]; точка — производная по времени  $t$ ;  $T$  — операция транспонирования. Элементы матрицы  $\mathbf{B}$  и вектора  $\mathbf{p}$  зависят от характеристик материалов композиции, их термомеханического состояния и струк-

туры КМ (плотностей  $\omega_k$  и углов  $\theta_k$ ,  $\varphi_k$  армирования). Так как в данном исследовании зависимостью пластических свойств компонентов композиции от скорости их деформирования пренебрегаем, то в используемых здесь соотношениях из работы [17] необходимо учитывать, что  $\tau_H^{(k)} \equiv 0$ ,  $1 \leq k \leq K$  (см., например, равенства (1.8) и (1.9) в [17]).

Согласно выражениям (5), исходя из третьего уравнения линейаризованной системы (4), определим скорость линейной поперечной деформации КМ-конструкции

$$\dot{\varepsilon}_{33} = b_{33}^{-1} (\dot{\sigma}_{33} - p_3 - b_{31} \dot{\varepsilon}_{11} - b_{32} \dot{\varepsilon}_{22} - 2b_{34} \dot{\varepsilon}_{23} - 2b_{35} \dot{\varepsilon}_{31} - 2b_{36} \dot{\varepsilon}_{12}), \quad (6)$$

где  $b_{3i}$ ,  $p_3$  ( $i = \overline{1, 6}$ ) — компоненты матрицы  $\mathbf{B}$  и вектора  $\mathbf{p}$  в равенстве (4); скорость  $\dot{\varepsilon}_{33}$  определяется из (3) дифференцированием по  $t$ . Производные  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  в правой части формулы (6) вычисляются путем дифференцирования по времени соотношений (1), а значит могут быть выражены через двумерные функции  $w$ ,  $\dot{w}$ ,  $\dot{u}_i$  и  $\dot{\varepsilon}_{i3}^0$  ( $i = 1, 2$ ).

Как и в работе [17], аппроксимируем температуру  $\Theta$  по толщине конструкции полиномом  $L$ -го порядка

$$\Theta(t, \mathbf{r}) - \Theta^0 = \sum_{l=0}^L \Theta_l(t, \mathbf{x}) x_3^l, \quad (7)$$

$$\mathbf{x} \in G, \quad |x_3| \leq h, \quad t \geq t_0,$$

где  $\Theta^0 = \text{const}$  — температура естественного состояния полой оболочки;  
 $\Theta_l$  ( $0 \leq l \leq L$ ) — искомые двумерные функции.

Для полной постановки связанной задачи термоупругопластического деформирования искривленной КМ-панели к равенствам (1)–(7) следует добавить уравнения теплового баланса. Метрика в полой оболочке с приемлемой точностью может быть отождествлена с метрикой на плоскости [21], поэтому в качестве двумерных уравнений теплопроводности рассматриваемой КМ-конструкции можно воспользоваться формулами (3.11), (3.13), (3.14) и (3.18) из [17]. Кроме того, необходимо использовать соответствующие механические (см. (13), (14) в [22]) и теплофизические (см. (3.20) в [17]) граничные условия, а также начальные условия при  $t = t_0$  (см. (15) в [22] и (3.22) в [17]).

Для интегрирования сформулированной нелинейной задачи используем явную численную схему, т. е. решение будем определять в дискретные

моменты времени  $t_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ). При этом предполагаем, что при  $t = t_m$  уже известны значения следующих функций [17, 22]:

$$\begin{aligned} w(\mathbf{x}) &\equiv w(t_m, \mathbf{x}), \quad u_l(\mathbf{x}) \equiv u_l(t_m, \mathbf{x}), \\ \gamma_l(\mathbf{x}) &\equiv \gamma_l(t_m, \mathbf{x}), \quad \sigma_{ij}^m(\mathbf{r}) \equiv \sigma_{ij}(t_m, \mathbf{r}), \\ \sigma_{33}^{(\pm)}(\mathbf{x}) &\equiv \sigma_{33}^{(\pm)}(t_m, \mathbf{x}), \quad U^{(r)}(\mathbf{x}) \equiv U^{(r)}(t_n, \mathbf{x}), \\ q_i(\mathbf{r}) &\equiv q_i(t_n, \mathbf{r}), \\ \Theta_s^m(\mathbf{x}) &\equiv \Theta_s(t_m, \mathbf{x}), \quad \dot{\Theta}_s^{n-1}(\mathbf{x}) \equiv \dot{\Theta}_s(t_{n-1}, \mathbf{x}), \\ q_\infty^{(\pm)}(\mathbf{x}) &\equiv q_\infty^{(\pm)}(t_n, \mathbf{x}), \quad \sigma_{ij}^{(k)}(\mathbf{r}) \equiv \sigma_{ij}^{(k)}(t_m, \mathbf{r}), \\ \varepsilon_{ij}^{(k)}(\mathbf{r}) &\equiv \varepsilon_{ij}^{(k)}(t_m, \mathbf{r}), \quad \chi^{(k)}(\mathbf{r}) \equiv \chi^{(k)}(t_m, \mathbf{r}), \\ l &= 1, 2, \quad i, j = \overline{1, 3}, \quad m = n - 1, n, \quad 0 \leq r \leq L - 2, \\ 0 &\leq s \leq L, \quad 0 \leq k \leq K, \quad \mathbf{x} \in G, \quad |x_3| \leq h, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\gamma_l(t, \mathbf{x}) \equiv \frac{8}{5} \varepsilon_{l3}^0 - \partial_l w, \quad U^{(r)}(t, \mathbf{x}) \equiv \int_{-h}^h U(t, \mathbf{r}) x_3^r dx_3, \quad (9)$$

$$l = 1, 2, \quad 0 \leq r \leq L - 2;$$

$U$  — удельная внутренняя энергия материала оболочки;

$\sigma_{ij}^{(k)}$ , — напряжения и деформации в  $k$ -й фазе композиции ( $k = 0$  — связующее,  $k \geq 1$  — арматура  $k$ -го семейства);

$\chi^{(k)}$  — параметр упрочнения (Одквиста) того же материала;

$q_i$  — компоненты вектора теплового потока в композиции;

$q_\infty^{(\pm)}$  — заданные тепловые потоки через нижнюю (–) и верхнюю (+) лицевые поверхности;

$\gamma_l$  — введенные для удобства новые кинематические переменные;

$t_n$  — текущий дискретный момент времени;

$t_m$  — текущее или предыдущее значение времени.

В механической составляющей рассматриваемой задачи производные по времени  $t$  аппроксимируем центральными конечными разностями на трехточечном шаблоне  $\{t_{n-1}, t_n, t_{n+1}\}$ . Это позволяет построить явную схему численного интегрирования. После замены вторых производных по  $t$  от кинематических переменных  $w$ ,  $u_i$  и  $\gamma_i$  в двумер-

ных уравнениях движения гибкой полой оболочкой их конечно-разностными аналогами, учитывая выражения (2), (3), (9) и обозначения, аналогичные (8), будем иметь [22]:

$$\begin{aligned} \frac{2h\rho}{\tau^2} \left( w^{n+1} - 2w^n + w^{n-1} \right) &= \\ &= \sum_{l=1}^2 \left[ \partial_l \left( F_{l3} + \sum_{j=1}^2 F_{lj} \partial_j w^n \right) + R_l^{-1} F_{ll} \right] + \sigma_{33}^{(+)} - \sigma_{33}^{(-)}, \\ \frac{2h\rho}{\tau^2} \left( u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1} \right) &= \sum_{j=1}^2 \partial_j \left( F_{ij} - F_{j3} \partial_i w^n \right) + \\ &+ R_i^{-1} F_{i3} - \left( \sigma_{33}^{(+)} - \sigma_{33}^{(-)} \right) \partial_i w^n, \\ \frac{2h^3\rho}{3\tau^2} \left( \gamma_i^{n+1} - 2\gamma_i^n + \gamma_i^{n-1} \right) &= \sum_{j=1}^2 \partial_j M_{ij} - F_{i3}, \\ \mathbf{x} \in G, \quad i &= 1, 2, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \omega_0 + \sum_{k=1}^K \rho_k \omega_k, \quad \omega_0 = 1 - \sum_{k=1}^K \omega_k, \\ F_{ij}(t, \mathbf{x}) &= \int_{-h}^h \sigma_{ij}(t, \mathbf{r}) dx_3, \\ F_{i3}(t, \mathbf{x}) &= \int_{-h}^h \sigma_{i3}(t, \mathbf{r}) dx_3, \\ M_{ij}(t, \mathbf{x}) &= \int_{-h}^h \sigma_{ij}(t, \mathbf{r}) x_3 dx_3, \quad i, j = 1, 2; \end{aligned} \quad (11)$$

$\rho_0, \rho_k$  — объемные плотности связующей матрицы и волокон  $k$ -го семейства;

$\tau = \text{const} > 0$  — шаг по времени.

Внешними массовыми нагрузками в уравнениях (10) пренебрегаем. Осредненные напряжения  $\sigma_{ij}$  в выражениях (11) определяются через напряжения в материалах композиции  $\sigma_{ij}^{(k)}$  ( $i, j = \overline{1, 3}, 0 \leq k \leq K$ ) по структурным соотношениям, полученным в [17].

По формулам (11) при учете предположений (8) в рассматриваемый момент времени  $t_n$  вычисляются внутренние силовые факторы  $F_{ij}$ ,  $F_{i3}$  и  $M_{ij}$ , которые входят в правые части уравнений (10). Учитывая необходимые граничные условия [22], из (10) по явной схеме можно определить значения неизвестных функций  $w^{n+1}$ ,  $u_i^{n+1}$  и  $\gamma_i^{n+1}$  при  $t = t_{n+1}$ .



Теплофизическую составляющую исследуемой связанной задачи также будем интегрировать по явной схеме, но на двухточечном шаблоне по времени  $\{t_n, t_{n+1}\}$ . После соответствующей дискретизации двумерные уравнения теплопроводности при учете соотношений (7), (9) и обозначений вида (8) примут вид [17]:

$$\frac{\rho}{\tau} \left( U^{(m)} - U^{(m)} \right) = -\partial_1 Q_1^{(m)} - \partial_2 Q_2^{(m)} - \bar{Q}_3^{(m)} + W^{(m)}, \quad (12)$$

$\mathbf{x} \in G, \quad 0 \leq m \leq L-2, \quad n=0, 1, 2, \dots;$

$$\begin{aligned} & -\sum_{l=0}^L (-1)^l h^{l-1} \left( l \lambda_{33}^{(-)} + h \alpha^{(-)} \right) \Theta_l(t, \mathbf{x}) = \\ & = \alpha^{(-)} \left( \Theta_{\infty}^{(-)} - \Theta^0 \right) + q_{\infty}^{(-)}(t, \mathbf{x}), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{l=0}^L h^{l-1} \left( l \lambda_{33}^{(+)} + h \alpha^{(+)} \right) \Theta_l(t, \mathbf{x}) = \\ & = \alpha^{(+)} \left( \Theta_{\infty}^{(+)} - \Theta^0 \right) - q_{\infty}^{(+)}(t, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in G, \quad t \geq t_0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & C_0 \sum_{i=0}^L H(i+m) \Theta_i + \frac{C_1}{2} \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^L H(i+j+m) \Theta_i \Theta_j + \\ & + \frac{C_2}{3} \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^L \sum_{l=0}^L H(i+j+l+m) \Theta_i \Theta_j \Theta_l = \\ & = U^{(m)}(t, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in G, \quad t \geq t_0, \quad 0 \leq m \leq L-2, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} H(s) & \equiv \frac{h^{s+1}}{s+1} \left[ 1 - (-1)^{s+1} \right], \\ Q_i^{(m)}(t, \mathbf{x}) & \equiv \int_{-h}^h q_i(t, \mathbf{r}) x_3^m dx_3 \quad (i = \overline{1,3}), \\ \bar{Q}_3^{(m)}(t, \mathbf{x}) & \equiv \int_{-h}^h \partial_3 q_3(t, \mathbf{r}) x_3^m dx_3 = \\ & = h^m \left[ q_3^{(+)} - (-1)^m q_3^{(-)} \right] - m Q_3^{(m-1)}(t, \mathbf{x}), \end{aligned} \quad (15)$$

$$W^{(m)}(t, \mathbf{x}) \equiv \int_{-h}^h \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} x_3^m dx_3,$$

$$C_l(\mathbf{x}) \equiv \frac{1}{\rho} \sum_{k=0}^K c_l^{(k)} \rho_k \omega_k(\mathbf{x}) \quad (l=0, 1, 2),$$

$$\lambda_{33}^{(\pm)} \equiv \lambda_{33}|_{\Theta=\Theta(t, \mathbf{x}, \pm h)}, \quad q_3^{(\pm)} \equiv q_{\infty}^{(\pm)};$$

$\lambda_{33}$  — коэффициент теплопроводности КМ в направлении  $x_3$ , который вычисляется по структурным соотношениям из [25] (см. формулы (2.2) и (2.3) в [17]);

$\alpha^{(\pm)}$  — коэффициент теплоотдачи со стороны нижней (–) и верхней (+) лицевых поверхностей;

$\Theta_{\infty}^{(\pm)}$  — температуры окружающей среды со стороны тех же поверхностей оболочки;

$c_l^{(k)}$  — коэффициент разложения удельной теплоемкости  $k$ -го материала композиции  $c_k(\Theta - \Theta^0)$  по формуле (при учете термочувствительности):

$$\begin{aligned} c_k(\Theta - \Theta^0) & = c_0^{(k)} + c_1^{(k)}(\Theta - \Theta^0) + \\ & + c_2^{(k)}(\Theta - \Theta^0)^2, \quad 0 \leq k \leq K. \end{aligned} \quad (16)$$

Соотношения (13) представляют собой тепловые граничные условия, заданные на лицевых поверхностях КМ-оболочки и преобразованные с использованием представления для температуры (7). Равенство (14) связывает двумерные величины  $U^{(m)}$  (9) с коэффициентами разложения (7) при учете выражений (16). Уравнения (13) и (14) выполняются в любой момент времени  $t$ .

Используя (15) и учитывая предположения (8), в данный момент времени  $t_n$  можно определить правые части в (12), после чего при учете необходимых граничных (заданных на контуре  $\Gamma$ , ограничивающем область  $G$ ) и начальных тепловых

условий [17] по явной схеме вычисляем  $U^{(m)}$  в следующий момент времени  $t_{n+1}$ . Затем при  $t = t_{n+1}$  из уравнений (13) и (14), в которых правые части известны, с учетом (15) определяем коэффициенты разложения температуры  $\Theta_l^{n+1}(\mathbf{x})$ ,  $0 \leq l \leq L$  (7). Если материалы композиции термочувствительны, т. е.  $c_1^{(k)} \neq 0$  и/или  $c_2^{(k)} \neq 0$ ,  $0 \leq k \leq K$  (16), то система уравнений (13) и (14) является нелинейной. Линеаризовать ее можно, используя метод переменных теплофизических параметров, который аналогичен методу переменных параметров упругости. В остальном предложенный численный метод (10) и (12) с учетом равенств (1), (6), (11), (15) и структурных соотношений (см. (4) и (15)), полученных в [17, 25], реализуется совершенно так же, как и в [17, 22].

В работе [17] было показано, что шаг по времени  $\tau$  в уравнениях (10) и (12) следует выбирать исходя из необходимого условия устойчивости Куранта [3].

### Обсуждение результатов расчетов

Рассмотрим неизотермическое упругопластическое динамическое изгибное деформирование относительно тонких удлиненных цилиндрических КМ-панелей ( $1/R_1 \equiv 0$ ,  $R_2 \equiv R = \text{const}$ ):

$G: |x_1| \leq a, |x_2| \leq b, a = 3b; 2h = 2 \text{ см}, b = 50 \text{ см}$  ( $h/b = 1/50$ ). Стрела подъема конструкций над продольными (в направлении  $x_1$ ) кромками  $f = 10 \text{ см}$ . При этом радиус оболочки  $R$  вычисляется по формуле:  $R = (b^2 + f^2)/(2f), 0 \leq f < 0,4b$  [21, 22]. Кромки панелей жестко закреплены:  $w = 0, u_i = 0, \gamma_i = 0, \mathbf{x} \in \Gamma, t \geq t_0$  (см. равенства (2), (9) и (10)). До момента времени  $t_0$  конструкции покоятся ( $w = 0, u_i = 0, \gamma_i = 0, \mathbf{x} \in G, t = t_0, i = 1, 2$ ) в естественном состоянии при температуре  $\Theta = \Theta^0 = 20^\circ \text{C}$  ( $\mathbf{x} \in G, |x_3| \leq h, t = t_0$ ). При  $t = t_0 = 0$  пологие оболочки нагружаются избыточным давлением  $p(t)$ , вызванным приходом воздушной взрывной волны [24]:

$$\begin{aligned} \sigma_{33}^{(+)} - \sigma_{33}^{(-)} &\equiv p(t) = \\ &= \begin{cases} p_{\max} t / t_{\max}, & 0 \leq t \leq t_{\max}, \\ p_{\max} \exp[-\alpha(t - t_{\max})], & t > t_{\max}, \end{cases} \quad (17) \\ \alpha &= -\ln(0,01)/(t_{\min} - t_{\max}) > 0, \\ t_{\min} &\gg t_{\max}, \quad p(t_{\min}) = 0,01 p_{\max}, \end{aligned}$$

где смысл параметров  $p_{\max}, t_{\max}, t_{\min}$  и  $\alpha$  очевиден и подробно описан в [22]. Согласно данным экспериментов [24], в расчетах принято  $t_{\max} = 0,1 \text{ мс}$  и  $t_{\min} = 2 \text{ мс}$ . Из выражений (17) следует, что при  $p_{\max} > 0$  панели нагружаются со стороны нижней (вогнутой) лицевой поверхности, а при  $p_{\max} < 0$  — со стороны верхней (выпуклой) поверхности.

Предполагается, что теплообмен конструкций с окружающей средой через лицевые поверхности

осуществляется в условиях естественной конвекции ( $\alpha^{(\pm)} = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  [26],  $q_{\infty}^{(\pm)} \equiv 0$ ) при температуре воздуха  $\Theta_{\infty}^{(\pm)} = \Theta^0$  (см. (13)). На торцевых поверхностях оболочек заданы граничные условия I рода, причем температура поддерживается равной  $\Theta^0$ .

Конструкции изготовлены из эпоксидной смолы [10] и усилены стекловолокнами [9] (стеклопластик) или из магниевого сплава ВТ65 [18] и армированы стальной проволокой У8А [9] (металлокомпозиция). Упругопластическое деформирование материалов фаз композиций при их активном нагружении и фиксированной температуре  $\Theta$  характеризуется билинейной диаграммой:

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

где  $\sigma, \varepsilon$  — напряжение и деформация при осевом растяжении–сжатии;

$E^{(k)} = E^{(k)}(\Theta), E_s^{(k)} = E_s^{(k)}(\Theta)$  — модули упругости и линейного упрочнения  $k$ -й фазы композиции;  $\sigma_s^{(k)} = \sigma_s^{(k)}(\Theta)$  — условный предел текучести того же материала. Физико-механические характеристики компонентов композиций приведены в таблице, где  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $\alpha$  — коэффициент линейного температурного расширения,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $c$  — удельная теплоемкость. В скобках указано значение температуры ( $\Theta, ^\circ \text{C}$ ), при котором определена соответствующая характеристика.

Физико-механические характеристики компонентов композиций [9, 10, 18]

Характеристика материала	Эпоксидная смола	Стекланные волокна	Магнийевый сплав ВТ65 (Мг)	Стальная проволока У8А
$\rho, \text{ кг/м}^3$	1210,0 (20) 1208,0 (40)	2520,0 (20) 2519,6 (80)	1800,0 (20) 1796,2 (100)	7800,0 (20) 7791,8 (100)
$E, \text{ ГПа}$	2,8 (20) 2,3 (40)	86,8 (20) 86,3 (80)	43,0 (20) 38,5 (100)	210,0 (20) 195,0 (100)
$\nu$	0,33 (20) 0,333 (40)	0,25 (20) 0,254 (80)	0,330 (20) 0,334 (100)	0,3 (20) 0,305 (100)
$\sigma_s, \text{ МПа}$	20 (20) 18 (40)	4500 (20) 4400 (80)	267 (20) 219 (100)	3968 (20) 3971 (200)
$E_s, \text{ ГПа}$	1,114 (20) 0,783 (40)	6,230 (20) 5,168 (80)	0,379 (20) 0,367 (100)	6,973 (20) 5,014 (200)
$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	0,243 (20) 0,240 (40)	0,89 (20) 0,86 (80)	117,23 (20) 121,42 (100)	42,7 (20) 41,7 (100)
$\alpha \cdot 10^6, \text{ К}^{-1}$	68,1 (20) 70,3 (40)	2,5 (20) 2,6 (80)	20,9 (20) 22,6 (100)	12,3 (20) 13,2 (100)
$c, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$	1,54 (20) 1,60 (40)	0,800 (20) 0,839 (80)	1,032 (20) 1,054 (100)	0,485 (20) 0,488 (100)

Для всех физико-механических характеристик в расчетах использованы линейные зависимости от  $\Theta$ , аппроксимированные по данным, приведенным в таблице.

По координатам  $x_1$  и  $x_2$  введена равномерная сетка с шагами  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = b/50$ ; шаг по времени задан значением  $\tau = 0,25$  мкс. Необходимые условия устойчивости построенной явной численной схемы при таком способе дискретизации выполняются с запасом (см. (5.3) в [17]).

Панели усилены двумя ( $K = 2$ ) семействами волокон, уложенных в направлениях  $x_1$  и  $x_2$  (см. рис. 1) с плотностями армирования  $\omega_1 = 0,1$  и  $\omega_2 = 0,3$ . При этом углы армирования (см. рис. 2) имеют значения  $\theta_1 = \theta_2 = \pi/2$ ,  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = \pi/2$ .

На рис. 3 изображены колебания максимальных значений температуры  $\Theta_m(t) = \max_r \Theta(t, r)$  ( $|x_1| \leq a$ ,  $|x_2| \leq b$ ,  $|x_3| \leq h$ ) в рассматриваемых КМ-конструкциях.

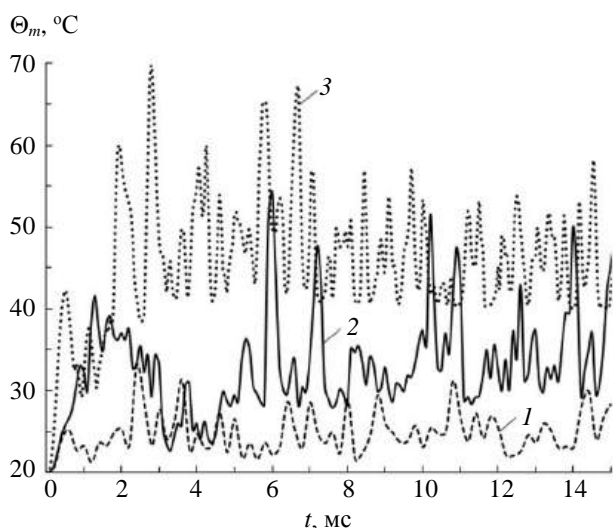


Рис. 3. Зависимость от времени наибольшего значения температуры в относительно тонких армированных пологих оболочках, нагруженных со стороны разных лицевых поверхностей

Согласно результатам, полученным в [17], в разложении (7) было принято  $L = 7$ . Кривые 1 и 2 на рис. 3 рассчитаны для стеклопластиковой панели при  $p_{\max} = 8$  МПа и  $p_{\max} = -8$  МПа (см. (17)) соответственно. Поведение этих кривых показывает, что в процессе осцилляций такой пологой КМ-оболочки, нагруженной снизу, температура в ней может превосходить  $33^\circ\text{C}$  (см. кривую 1 при  $t \approx 2,4$  мс), а при нагружении сверху — достигать почти  $55^\circ\text{C}$  (см. кривую 2 при  $t \approx 6$  мс).

Напомним, что согласно расчетам, проведенным в [17], стеклопластиковая пластина с такой же структурой армирования и с такими же характерными размерами при  $p_{\max} = 4$  МПа нагревается не более чем до  $33,5^\circ\text{C}$ . При указанном уровне нагружения КМ-пластины наибольшие значения интенсивности деформаций компонентов ее композиции достигают примерно таких же значений, как и в случае пологой стеклопластиковой оболочки, нагруженной снизу ( $p_{\max} = 8$  МПа), чему соответствует кривая 1 (см. рис. 3).

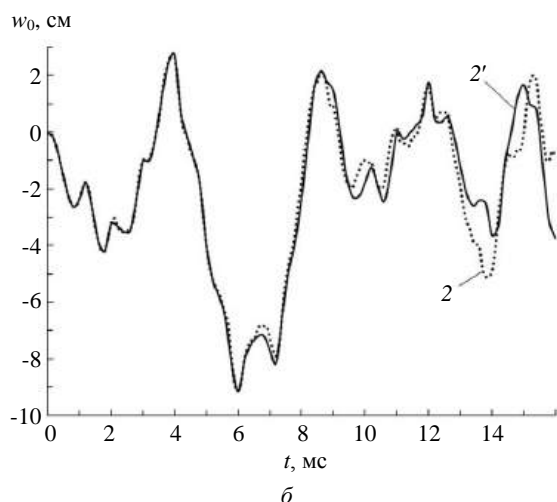
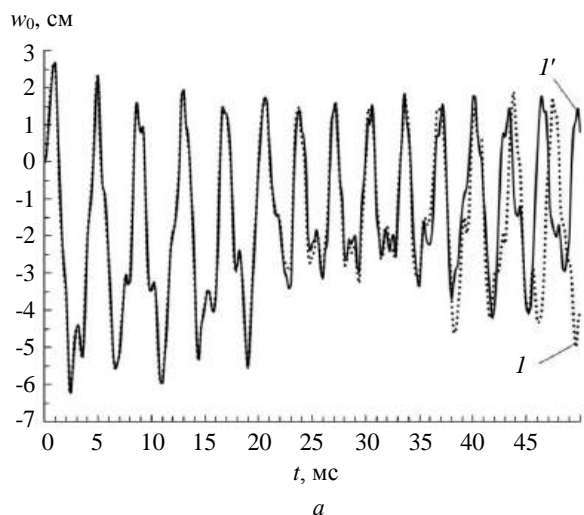
В работе [17] было показано, что в случае исследования динамического поведения стеклопластиковых пластин их можно рассчитывать без учета теплового отклика в них, так как они нагреваются незначительно — не более чем на  $13,5^\circ\text{C}$ . Однако расчеты, выполненные по формулам настоящего исследования, демонстрируют необходимость учета температурных полей в стеклопластиковых искривленных панелях при их нагружении воздушной взрывной волной.

Так, на рис. 4 изображены осцилляции прогиба центральной точки искривленной стеклопластиковой панели ( $w_0(t) \equiv w(t, 0, 0)$ ), полученные при  $p_{\max} = 8$  МПа (рис. 4, а) и при  $p_{\max} = -8$  МПа (рис. 4, б). Кривые 1 и 2 на рис. 4 определены при тех же условиях, что и на рис. 3, а кривые 1' и 2' на рис. 4 приведены для сравнения и соответствуют упругопластическому расчету [22], при котором тепловой отклик в КМ-конструкции не учитывается.

Сравнение кривых 1, 1' и 2, 2' показывает, что с увеличением времени  $t$  зависимости  $w_0(t)$ , полученные с учетом и без учета температурного поля в динамически нагружаемой стеклопластиковой искривленной панели, все больше различаются. В силу этого еще в большей степени с течением времени различаются и деформированные состояния компонентов композиции такой конструкции, рассчитанные с учетом и без учета теплового отклика в ней (соответствующие зависимости здесь не изображены).

Согласно поведению кривых 1 и 1' на рис. 4, а, наибольший по модулю прогиб цилиндрической стеклопластиковой панели, нагруженной снизу, достигается при  $t \approx 2,4$  мс и имеет значение  $\max_t |w_0(t)| = 6,19$  см. Для кривых же 2 и 2' на рис. 4, б аналогичная величина  $\max_t |w_0(t)| = 9,14$  см достигается при  $t \approx 6$  мс. Следовательно, в обоих случаях нагружения КМ-панели (сверху или снизу) наибольший по модулю прогиб цен-

тральной точки достигается после ее прощелкивания вниз (в сторону вогнутости) в моменты времени, когда внешняя нагрузка практически уже не действует, т. е. при  $t > t_{\min} = 2$  мс (см. (17)). Более интенсивное прощелкивание наблюдается при нагружении стеклопластиковой панели сверху — со стороны ее выпуклой лицевой поверхности (см. рис. 4, б).



**Рис. 4. Осцилляции прогибов центральной точки тонкой стеклопластиковой цилиндрической искривленной панели, нагруженной со стороны вогнутой (а) и выпуклой (б) лицевых поверхностей, рассчитанные с учетом и без учета теплового отклика**

В силу этого обстоятельства и максимальные значения интенсивности деформации компонентов композиции такой конструкции при ее нагружении сверху оказываются примерно на 20—40 % больше, чем при нагружении снизу. Поэтому-то в процессе осцилляций стеклопластиковая панель в первом случае нагревается больше, чем во втором

(см. кривые 1 и 2 на рис. 3), причем максимальные значения температуры достигаются именно в моменты прощелкивания КМ-конструкции.

Выше обсуждались результаты расчетов, выполненных для полой оболочки из стеклопластика. Аналогичные расчеты, проведенные для металлокомпозитной искривленной панели при  $p_{\max} = \pm 30$  МПа, показали, что такая конструкция при ее динамическом нагружении нагревается существенно больше, чем стеклопластиковая панель при сопоставимых уровнях деформаций их компонентов композиции. Так, кривая 3 на рис. 3 характеризует зависимость  $\Theta_m(t)$ , полученную для полой Mg–У8А-оболочки, нагруженной снизу ( $p_{\max} = 30$  МПа). Зависимость  $\Theta_m(t)$  для металлокомпозитной панели, нагруженной сверху ( $p_{\max} = -30$  МПа) на рис. 3 не изображена, чтобы его не перегружать, так как на интервале времени  $0 \leq t \leq 25$  мс максимумы зависимости  $\Theta_m(t)$  при этом достигают значений  $160^\circ\text{C}$ . Такой значительный нагрев некоторых точек металлокомпозитной полой оболочки в процессе ее осцилляций как при нагружении снизу, так и при нагружении сверху приводит к тому, что зависимости  $w_0(t)$ , рассчитанные для такой конструкции с учетом и без учета теплового отклика в ней, различаются в еще большей степени, чем для стеклопластиковой панели (см. кривые 1, 1' на рис. 4, а и 2, 2' на рис. 4, б). Соответствующие зависимости  $w_0(t)$  для полой Mg–У8А-оболочки здесь не изображены.

Можно предположить, что высокий уровень температуры, достигаемый при осцилляции металлокомпозитной панели, обусловлен тем, что в расчетах предполагалось: на лицевых поверхностях конструкции реализуется теплообмен с окружающим воздухом в условиях естественной конвекции ( $\alpha^{(\pm)} = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Так как при нагрузках взрывного типа тонкостенная КМ-конструкция колеблется в поперечном направлении с большой частотой (см. кривые на рис. 4), то, возможно, теплообмен на ее лицевых поверхностях нужно рассматривать в условиях не естественной, а вынужденной конвекции. В связи с этим были проведены дополнительные расчеты со значениями коэффициентов теплоотдачи  $\alpha^{(\pm)} = 300$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (см. (13)), что соответствует вынужденной конвекции для газов [26]. Полученные при этом значения  $\Theta_m(t)$  отличаются от рассчитанных ранее — в условиях естественной конвекции (см. кривые на рис. 3) — только в чет-



вертой значащей цифре. Следовательно, увеличение в 10 раз коэффициента теплоотдачи на лицевых поверхностях исследуемых КМ-конструкций практически не сказывается на результатах расчетов их термомеханического поведения на рассматриваемых интервалах времени ( $0 \leq t \leq 50$  мс). Это означает, что на таких, относительно малых временных интервалах тепловые процессы в искривленных КМ-панелях являются практически адиабатическими — кондуктивная составляющая процесса теплопроводности в них пренебрежимо мала.

### Выводы

Проведенный анализ термоупругопластического динамического поведения армированных гибких пологих оболочек показал, что в отличие от случая изгибаемых КМ-пластин [17] искривленные панели как металлокомпозитные, так и стеклопластиковые необходимо рассчитывать с учетом теплового отклика в них. Относительно тонкие стеклопластиковые пологие оболочки при этом дополнительно нагреваются на 13—35 °С (аналогичные же гибкие стеклопластиковые пластины — не более чем на 14 °С [17]), а металлокомпозитные искривленные панели в отдельных точках нагреваются на 50 °С и более (металлокомпозитные же пластины — только на 30—32 °С [17]). Наиболее активное тепловыделение и, как следствие, соответствующее большее влияние температуры наблюдается при динамическом нагружении пологих армированных оболочек со стороны выпуклой лицевой поверхности.

При нагружении искривленных КМ-панелей воздушной взрывной волной со стороны любой из их лицевых поверхностей наблюдается прощелкивание таких конструкций в сторону вогнутой лицевой поверхности, которое наступает позже времени прекращения действия внешнего избыточного давления. Величина прогиба при таком прощелкивании в случае нагружения конструкции со стороны выпуклой лицевой поверхности значительно больше, чем при нагружении со стороны вогнутой поверхности, что и обуславливает более активное тепловыделение в первом случае. Максимальные значения температуры достигаются именно в моменты прощелкивания КМ-панелей.

*Работа выполнена в рамках  
государственного задания  
(№ госрегистрации 121030900260-6).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Богданович А. Е.** Нелинейные задачи динамики цилиндрических композитных оболочек. — Рига: Зинатне, 1987. — 295 с.
2. **Куликов Г. М.** Термоупругость гибких многослойных анизотропных оболочек // Изв. РАН. МТТ. 1994. № 2. С. 33—42.
3. **Абросимов Н. А., Баженов В. Г.** Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. — Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. — 400 с.
4. **Kazanci Z.** Dynamic response of composite sandwich plates subjected to time-dependent pressure pulses // International J. Non-Linear Mechanics. 2011. V. 46. P. 807—817.
5. **Андреев А.** Упругость и термоупругость слоистых композитных оболочек. Математическая модель и некоторые аспекты численного анализа. — Saarbrücken (Deutschland): Palmarium Academic Publishing, 2013. — 93 p.
6. **Vasiliev V. V., Morozov E.** Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements. — Amsterdam: Elsevier, 2013. — 412 p.
7. **Соломонов Ю. С., Георгиевский В. П., Недбай А. Я., Андришин В. А.** Прикладные задачи механики цилиндрических оболочек. — М.: Физматлит, 2014. — 408 с.
8. **Димитриенко Ю. И.** Механика композитных конструкций при высоких температурах. — М.: Физматлит, 2019. — 448 с.
9. Композиционные материалы. Справочник / под ред. Карпиноса Д. М. — Киев: Наук. думка, 1985. — 592 с.
10. Справочник по композитным материалам: В 2-х кн. Кн. 1 / под ред. Любина Дж.; / Пер. с англ. Геллера А. Б., Гельмонта М. М.; Под ред. Геллера Б. Э. — М.: Машиностроение, 1988. — 448 с.
11. **Vena P., Gastaldi D., Contro R.** Determination of the effective elastic-plastic response of metal-ceramic composites // International J. Plasticity. 2008. V. 24. P. 483—508.
12. **Leu S.-Y., Hsu H.-C.** Exact solutions for plastic responses of orthotropic strain-hardening rotating hollow cylinders // International J. Mechanical Sciences. 2010. V. 52. P. 1579—1587.
13. **Brassart L., Stainier L., Doghri I., Delannay L.** Homogenization of elasto-(visco) plastic composites based on an incremental variational principle // International J. Plasticity. 2012. V. 36. P. 86—112.
14. **Qatu M. S., Sullivan R. W., Wang W.** Recent research advances on the dynamic analysis of composite shells: 2000—2009 // Composite Structures. 2010. V. 93. P. 14—31.
15. **Alderliesten R. C., Benedictus R.** Modelling of impact damage and dynamics in fibre-metal laminates (a review) // Int. J. Impact Eng. 2014. V. 67. P. 27—38.
16. **Ахундов В. М.** Инкрементальная каркасная теория сред волокнистого строения при больших упругих и пластических деформациях // Механика композитных материалов. 2015. Т. 51. № 3. С. 539—558.
17. **Янковский А. П.** Моделирование термоупруговязкопластического деформирования гибких армированных пластин // ПММ. 2022. Т. 86. № 1. С. 121—150. DOI: 10.31857/S003282352201009X.
18. **Безухов Н. И., Бажанов В. Л., Гольденблат И. И., Николаенко Н. А., Синюков А. М.** Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / под ред. Гольденблата И. И. — М.: Машиностроение, 1965. — 567 с.
19. **Грешнов В. М.** Физико-математическая теория больших необратимых деформаций металлов. — М.: Физматлит, 2018. — 232 с.
20. **Reissner E.** On transverse vibrations of thin shallow elastic shells // Quarterly of Applied Mathematics. 1955. V. 13. № 2. P. 169—176.

21. Амбарцумян С. А. Общая теория анизотропных оболочек. — М.: Наука, 1974. — 446 с.
22. Янковский А. П. Моделирование динамического упругопластического поведения гибких армированных плоских оболочек // Конструкции из композиционных материалов. 2018. № 2. С. 3—14.
23. Reddy J. N. Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis / 2<sup>nd</sup> ed. — New York: CRC Press, 2004. — 831 p.
24. Houlston R., DesRochers C. G. Nonlinear structural response of ship panels subjected to air blast loading // Computers & Structures. 1987. V. 26. № 1/2. P. 1—15.
25. Янковский А. П. Моделирование процессов теплопроводности в пространственно-армированных композитах с произвольной ориентацией волокон // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 32—38.
26. Луканин В. Н., Шатров М. Г., Камфер Г. М. и др. Теплотехника: учеб. для вузов / под ред. Луканина В. Н. 4-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 2003. — 671 с.

## Simulation of thermoelastic-plastic dynamic deformation of reinforced shallow shells

A. P. YANKOVSKII

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russia

*The initial-boundary problem of thermoelastic-plastic deformation of reinforced flexible shallow shells under dynamic loading is formulated. The weak resistance of such thin-walled structures to transverse shear is modeled by Ambartsumyan's non-classical theory of bending. The geometric non-linearity of the problem is taken into account in the Karman approximation. The temperature of shallow shells in thickness is approximated by a 7th order polynomial. The solution of the formulated coupled nonlinear two-dimensional problem is constructed using an explicit scheme of time steps. The non-isothermal deformation of orthogonally reinforced fiberglass and metal-composite elongated cylindrical panels, which are frontally loaded with an air blast wave, has been studied. It is shown that, in contrast to flexible reinforced plates, composite shallow shells under explosive dynamic loading must be calculated taking into account the thermal response in them. Cylindrical curved panels deform more intensively when they are loaded from the convex front surface.*

**Keywords:** shallow shells, fiber reinforcement, thermoelastic-plasticity, dynamic deformation, geometric nonlinearity, Ambartsumyan's bending theory, explicit numerical scheme.

УДК 539.4

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_4\_21

EDN: AZQVOE

## Численное моделирование деформирования и разрушения конструкций из бетонных композитов при нестационарном нагружении

А. В. ОСТРИК, д-р техн. наук; В. В. КИМ, канд. физ.-мат. наук  
Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

М. А. ОСТРИК  
Технологический университет им. А. А. Леонова, г. Королев, Московская обл., Россия

*Предложена численная модель деформирования и разрушения бетонных композитов на основе представления неоднородной среды совокупностью взаимодействующих континуумов. Проведено численное моделирование деформирования и разрушения конструкций типа контеймента из бетонов, усиленных арматурной сталью или углеродными волокнами. Получено, что разработанные численные модели позволяют рассчитывать методом конечно-размерных частиц характеристики нестационарного поведения конструкций из бетонных композитов вплоть до их полного разрушения.*

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, углеродный бетон, нестационарные нагрузки, определяющие уравнения бетонных композитов, метод конечно-размерных частиц, деформирование и разрушение контеймента.

Композитные материалы (КМ) на основе бетона широко используют для изготовления несущих конструкций в сооружениях различного назначения. Вместо арматурной стали, которая традиционно служит для изготовления железобетона (ж/б), в качестве материала арматуры для усиления бетона стали применять [1] высокомодульные полимерные КМ на основе углеродных (в так называемом углеродном бетоне — Carbon Concrete Composite) [2], базальтовых [3] и других волокон (стекловолокон и арамидных нитей).

Базальтопластиковая арматура — сравнительно дешевая и легкая ( $1,9 \text{ г/см}^3 \leq \rho_{rf} \leq 2,2 \text{ г/см}^3$ ), но существенно уступает арматурной стали по жесткости (в 3—4 раза) и прочности.

В углепластиковой арматуре нити углеродного волокна переплетены. Она значительно легче ( $1,6 \text{ г/см}^3 \leq \rho_{rf} \leq 2,0 \text{ г/см}^3$ ), чем арматурная сталь, но более жесткая и прочная. Вследствие этого, удельная несущая способность углеродного бетона в пять—шесть раз больше, чем у ж/б, а плотность в три—четыре раза меньше. Кроме того,

в отличие от арматурной стали углепластиковая и базальтопластиковая арматуры не ржавеют.

Новым направлением использования армирования бетона высокомодульными КМ является их применение при ремонтных работах промышленных объектов [4, 5]. Ответственные несущие конструкции из бетона (фундамент, колонны, фермы) ремонтируемых строительных объектов обклеивают или армируют по поверхности по специальной технологии углеродной лентой, что сокращает сроки ремонта и обеспечивает продолжение их надежной эксплуатации на 15—20 лет.

Бетонные композиты (БК) — это анизотропные КМ с ярко выраженной неоднородностью структуры, обусловленной различием деформационных и прочностных свойств бетона и высокомодульного материала арматуры. Экспериментальное определение механических характеристик анизотропного БК требует проведения представительного набора испытаний для каждого конкретного материала. Результаты испытаний зависят от типа бетона, геометрии и материала армирования, объема содержания арматуры и вида нагружения.

Как и для других КМ, одним из подходов, сокращающих объем необходимых исследований, является определение свойств БК в целом по свойствам входящих в него компонентов с известными характеристиками, т. е. нахождение эффективных деформационно-прочностных характеристик БК, рассматриваемого как однородная в среднем среда [6, 7].

Более общим не зависящим от процедуры усреднения и применимым не только для упругого

Острик Афанасий Викторович, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: ostrik@icp.ac.ru

Ким Вадим Валерьевич, старший научный сотрудник.

E-mail: kim@icp.ac.ru

Острик Мария Афанасьевна, студентка.

E-mail: maria.ostrik@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20 июня 2022 г.

© Острик А. В., Ким В. В., Острик М. А., 2022

поведения компонентов представляется подход, когда модель БК строится на основе численного моделирования совместной работы компонентов материала с соответствующими условиями (как правило, непрерывности перемещений и напряжений или формулировкой условий проскальзывания) на их контактных границах. Возникающие при этом задачи со множеством контактных границ оказываются затруднительными даже для современного уровня вычислительной техники.

В качестве альтернативного подхода может служить подход на основе представления гетерогенной среды как совокупности континуумов, в которой поведение каждого континуума также рассматривается отдельно, а между ними устанавливаются некоторые соотношения, обеспечивающие их совместное поведение [8]. При этом проблема численного решения многоконтактной задачи снимается, но возникают сложности с заданием (определением) моделей и законов взаимодействия между различными континуумами (компонентами гетерогенной среды).

### Численная модель бетонных композитов

Применительно к БК в качестве континуумов служат бетон и арматура. Предположим, что их совместное поведение обеспечивается работой в общем деформационном поле. Поведение бетона описывается ранее разработанной нестационарной численной моделью деформирования и разрушения бетона [9, 10]. Арматура представляется системой из трех взаимно перпендикулярных множеств упругопластических (для сталей) или нелинейно упругих хрупко разрушающихся (для высокомодульных КМ) стержней. В результате получается модель анизотропного разрушающегося БК.

Рассчитанные компоненты тензора напряжений  $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_{rz}$  (рассматривается осесимметричная задача в цилиндрической системе координат  $(r, z, \theta)$ ) в бетонном континууме преобразуются при переходе от цилиндрической системы координат к системе координат, связанной с осями ортотропии стержневой арматурной системы

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_r \cos^2(\varphi) + \sigma_z \sin^2(\varphi) + \sigma_{rz} \sin(2\varphi), \\ \sigma_z &= \sigma_r \sin^2(\varphi) + \sigma_z \cos^2(\varphi) - \sigma_{rz} \sin(2\varphi), \\ \sigma_\theta &= \sigma_\theta, \quad \sigma_{rz} = (\sigma_z - \sigma_r) \sin(2\varphi) / 2 + \sigma_{rz} \cos(2\varphi),\end{aligned}\quad (1)$$

где угол  $\varphi$  между рассматриваемыми системами координат считается в каждой точке рассчитываемой конструкции из уравнения (начальное распре-

деление угла  $\varphi$  определяется геометрией конструкции из БК)

$$\partial\varphi / \partial t = (\partial V_z / \partial r - \partial V_r / \partial z) / 2.$$

В соответствии с преобразованиями (1) находятся и компоненты тензора скоростей деформации в системе координат, связанной с осями ортотропии арматуры, а затем определяются соответствующие им приращения деформаций в арматурных стержнях. По приращениям деформации находим новое напряженное состояние стержневой системы  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ , где 1, 2, 3 — оси ортотропии континуума арматуры. Далее вычисляются усредненные суммарные компоненты тензора напряжений БК в осях ортотропии

$$\begin{aligned}\sigma_{1\Sigma} &= \sigma_r(1 - \psi) + \psi p_1 \sigma_1, \\ \sigma_{2\Sigma} &= \sigma_z(1 - \psi) + \psi p_2 \sigma_2, \\ \sigma_{3\Sigma} &= \sigma_\theta(1 - \psi) + \psi p_3 \sigma_3, \quad \sigma_{12\Sigma} = \sigma_{rz}(1 - \psi),\end{aligned}$$

где  $\psi$  — объемная доля армирования БК;

$p_{1,2,3}$  — доли армирования в направлениях осей ортотропии ( $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ ).

Для определения компонент усредненного тензора напряжений в БК в исходной цилиндрической системе координат  $(r, z, \theta)$  делается обратное преобразование по формулам, аналогичным (1), с заменой угла  $\varphi$  на  $-\varphi$

$$\begin{aligned}\sigma_{r\Sigma} &= \sigma_{1\Sigma} \cos^2(\varphi) + \sigma_{2\Sigma} \sin^2(\varphi) - \sigma_{12\Sigma} \sin(2\varphi), \\ \sigma_{r\Sigma} &= \sigma_{1\Sigma} \sin^2(\varphi) + \sigma_{2\Sigma} \cos^2(\varphi) + \sigma_{12\Sigma} \sin(2\varphi), \\ \sigma_{\theta\Sigma} &= \sigma_{3\Sigma}, \quad \sigma_{rz} = (\sigma_{1\Sigma} - \sigma_{2\Sigma}) \sin(2\varphi) / 2 + \sigma_{12\Sigma} \cos(2\varphi).\end{aligned}\quad (2)$$

Компоненты (2) тензора напряжений и используются в уравнениях динамики и энергии анизотропного БК в цилиндрической системе координат.

В уравнения состояния бетона входит его текущая плотность  $\rho_{con}$ , в то время как из уравнения неразрывности определяется плотность  $\rho$  материала в целом. Жесткость арматуры значительно превышает жесткость пористого бетона. Поэтому при определении  $\rho_{con}$  допустимо предположить несжимаемость арматуры ( $\rho_{rf} = \text{const}$ ). Тогда текущие значения объемного содержания арматуры  $\psi$  и плотности бетона  $\rho_{con}$  рассчитываются по соотношениям (массовое содержание компонентов БК не меняется при деформировании:  $m = \text{const}$ ,  $m$  — массовое содержание арматуры)

$$\psi = \frac{\rho}{\rho_{rf}} m, \quad \rho_{con} = \frac{1 - m}{1 - \psi} \rho.$$



Расчет деформирования и разрушения контаймента с  $h/R=1/10$  (рис. 1, а) из чистого бетона, ж/б и углеродного бетона под действием нестационарного внутреннего давления проводили методом конечно-размерных частиц в ячейке [11]. Параметры армирования принимали равными  $\psi_0 = 0,3$ ;  $p_1 = 0,1$ ;  $p_2 = p_3 = 0,45$  ( $\psi_0$  — начальная объемная доля армирования). Нестационарная нагрузка предполагалась равномерно распределенной по внутренней поверхности конструкции с временным профилем давления  $P = P(t)$ , показанным на рис. 1, б (времена нарастания и спада нагрузки 100 мкс и 900 мкс, соответственно). Значение амплитуды давления составляло  $P_{\max} = 20$  бар, что близко по величине для воздействия на стенку при взрыве газовой водородовоздушной смеси [12]. Также были выполнены расчеты для значений  $P_{\max} = 100$  бар и 1000 бар, соответствующие более мощным взрывам.

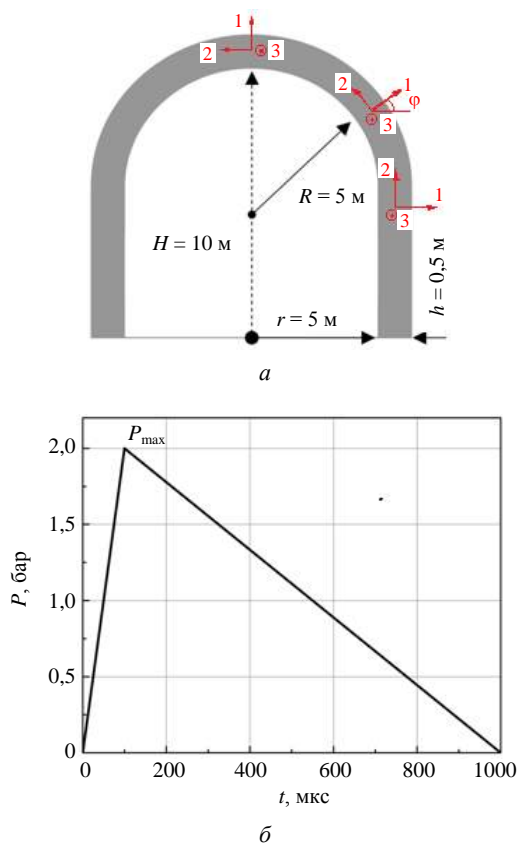


Рис. 1. Начальная геометрия конструкции (а) и временной профиль давления (б)

Предложенную численную модель БК можно рассматривать, как первое приближение для предварительных расчетов поведения конструкции при её разработке и поиске рациональных параметров

армирования. На завершающем этапе обоснования прочности необходим учет конкретного распределения армирующего материала в БК, поскольку в рассматриваемой модели проводили усреднение напряжений по сечениям и, вследствие этого пренебрегается дискретностью, обусловленной различием механических свойств компонентов. Чем более равномерно распределен армирующий материал в БК, тем достовернее будут результаты, получаемые по описанной модели.

### Результаты расчетов

Сооружения типа контаймента широко распространены. Помимо контайментов АЭС [10], это бронекамеры, различные виды защитных хранилищ и фортификационных сооружений (например, ДОТы (долговременные огневые точки)) [13, 14]. Основная трудность численного моделирования такого типа конструкций заключается в наличии малого параметра: отношения толщины конструкции  $h$  к её максимальному из двух других характерных размеров  $R$  ( $h/R \leq 1/10$ ). При  $h/R \leq 1/20$  можно использовать хорошо разработанную динамическую теорию тонких оболочек. Случай  $1/20 \leq h/R \leq 1/10$  оказывается наиболее неудобным для численного моделирования нестационарного деформирования и разрушения конструкций.

На рис. 2—7 представлены распределения параметра поврежденности бетона  $D$  в меридиональном сечении стенки контаймента для трех рассматриваемых видов материалов. Значение  $D = 1$  соответствует полному разрушению бетона в данной точке конструкции; при этом армирующий материал ж/б, согласно модели, находится в состоянии пластического течения.

Результаты для амплитуды давления  $P_{\max} = 20$  бар представлены на рис. 2 и 3.

Видно, что для всех трех материалов значения параметра  $D$  не превышают величины  $D = 0,2$ , и конструкция сохраняет свою функциональность, как защита вплоть до момента времени 1 мс. По цветовому распределению параметра  $D$  на момент времени  $t = 1$  мс можно сделать вывод, что армирование приводит к локализации зон с наибольшими повреждениями вблизи внешней поверхности купола контаймента, тогда как в случае чистого бетона поврежденность распределена более равномерно в этой части сооружения.

На рис. 4—7 представлены результаты численного моделирования для давлений  $P_{\max} = 100$  бар и  $P_{\max} = 1000$  бар.

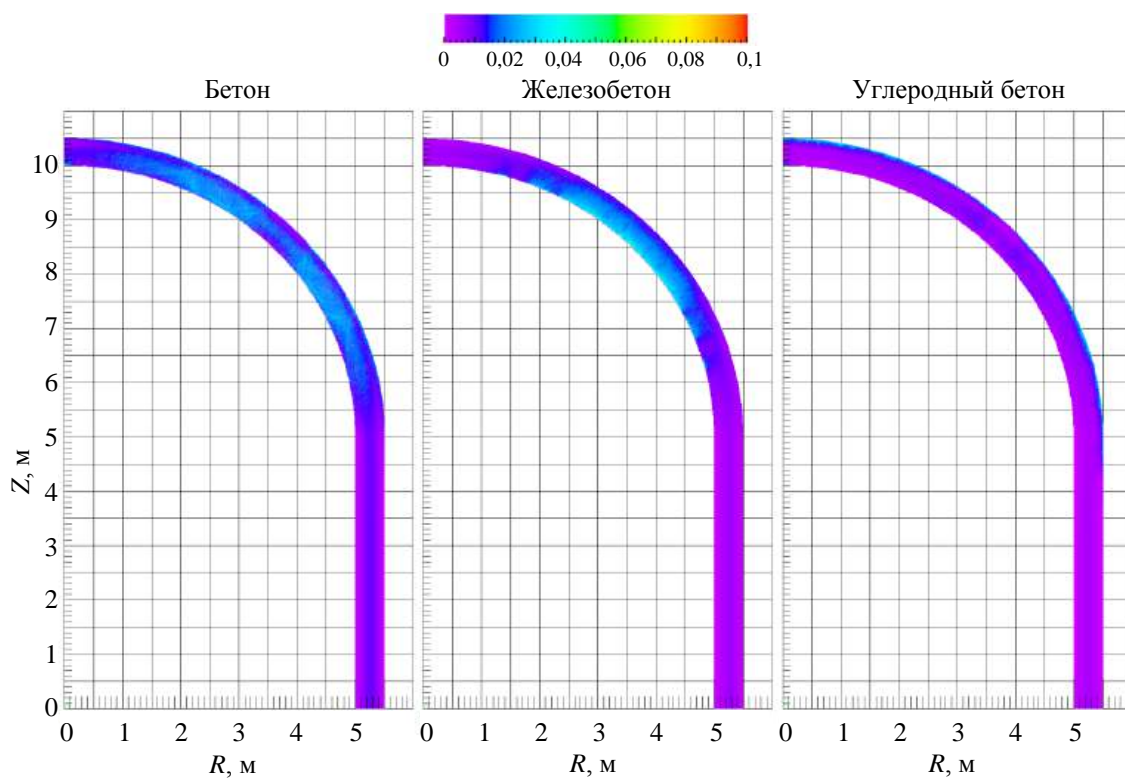


Рис. 2. Распределение параметра поврежденности  $D$  в конструкциях из бетона, ж/б и углеродного бетона на момент времени 0,5 мс для  $P_{\max} = 20$  бар

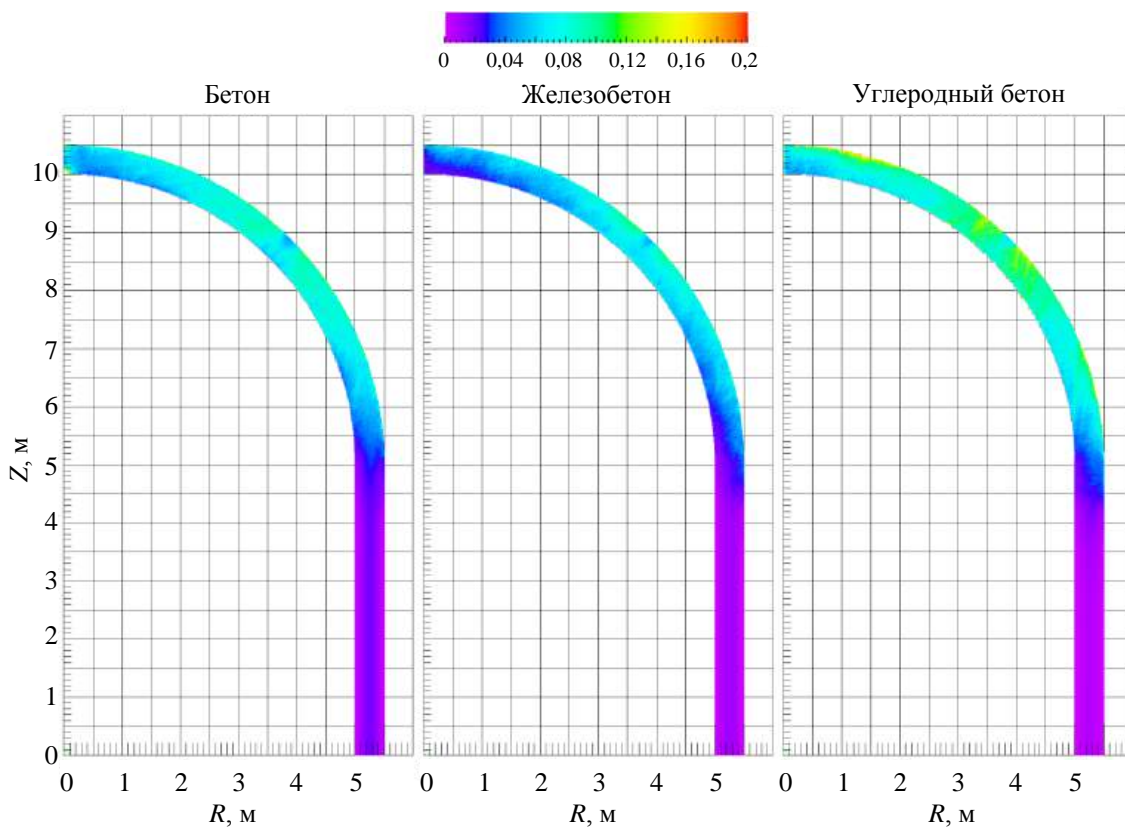


Рис. 3. Распределение параметра поврежденности  $D$  в конструкциях из бетона, ж/б и углеродного бетона на момент времени 1 мс для  $P_{\max} = 20$  бар

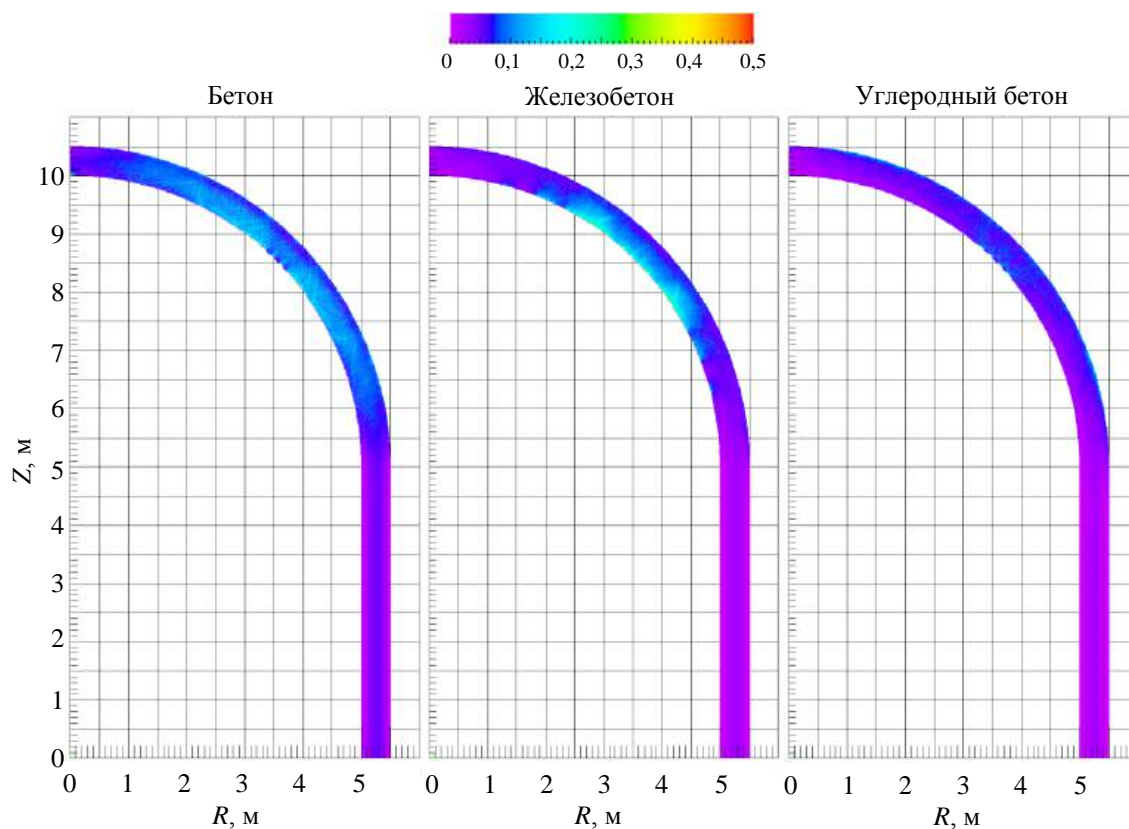


Рис. 4. Распределение параметра поврежденности  $D$  в конструкции из бетона, ж/б и углеродного бетона на момент времени 0,5 мс для  $P_{max}=100$  бар

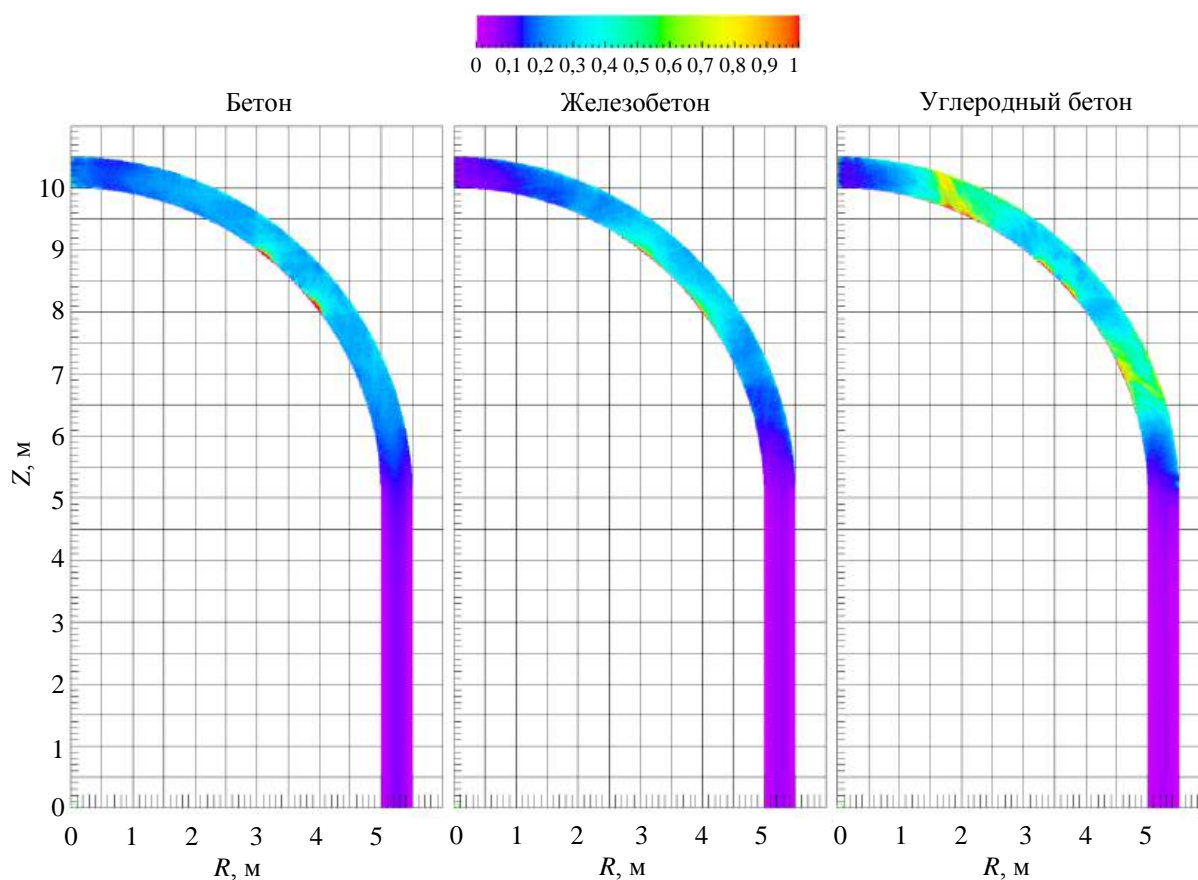


Рис. 5. Распределение параметра поврежденности  $D$  в конструкции из бетона, ж/б и углеродного бетона на момент времени 1 мс для  $P_{max}=100$  бар

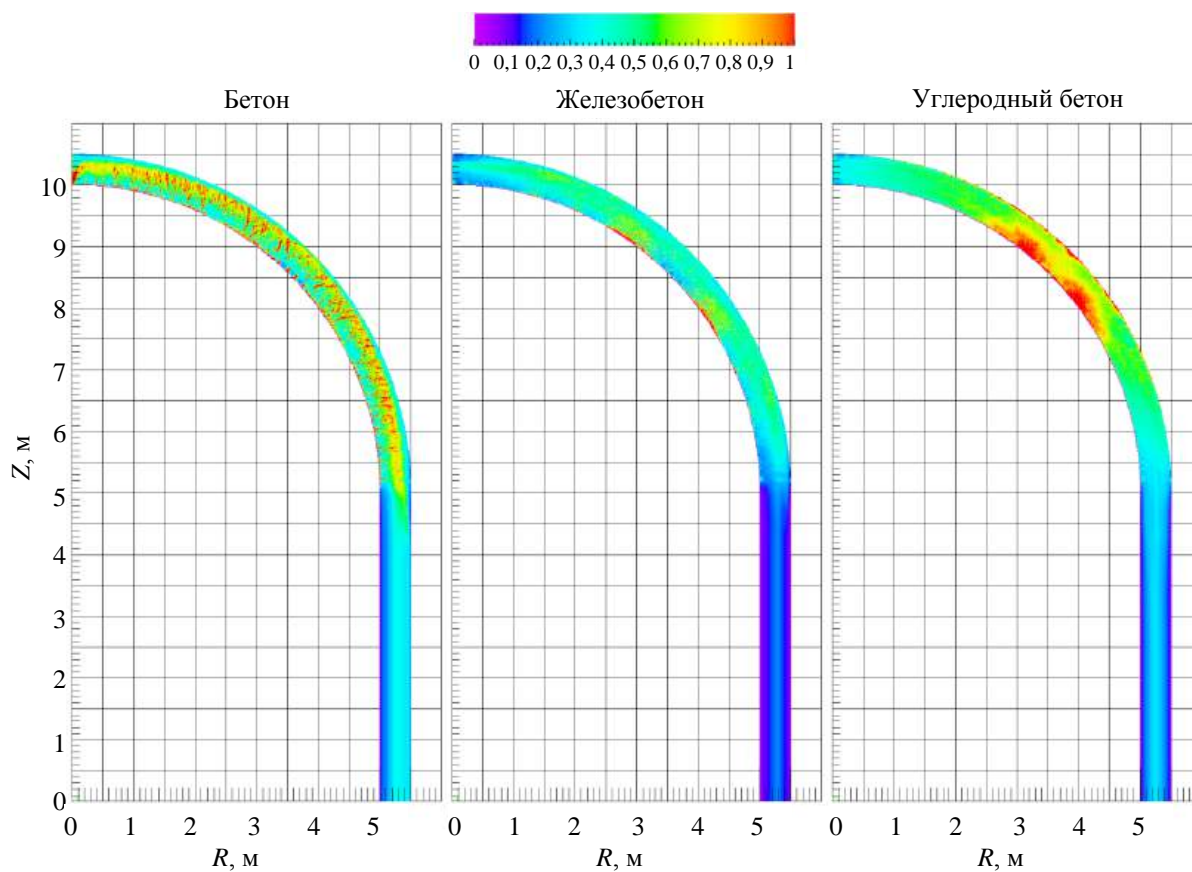


Рис. 6. Распределение параметра поврежденности  $D$  в конструкции из бетона, ж/б и углеродного бетона на момент времени 0,5 мс для  $P_{max} = 1000$  бар

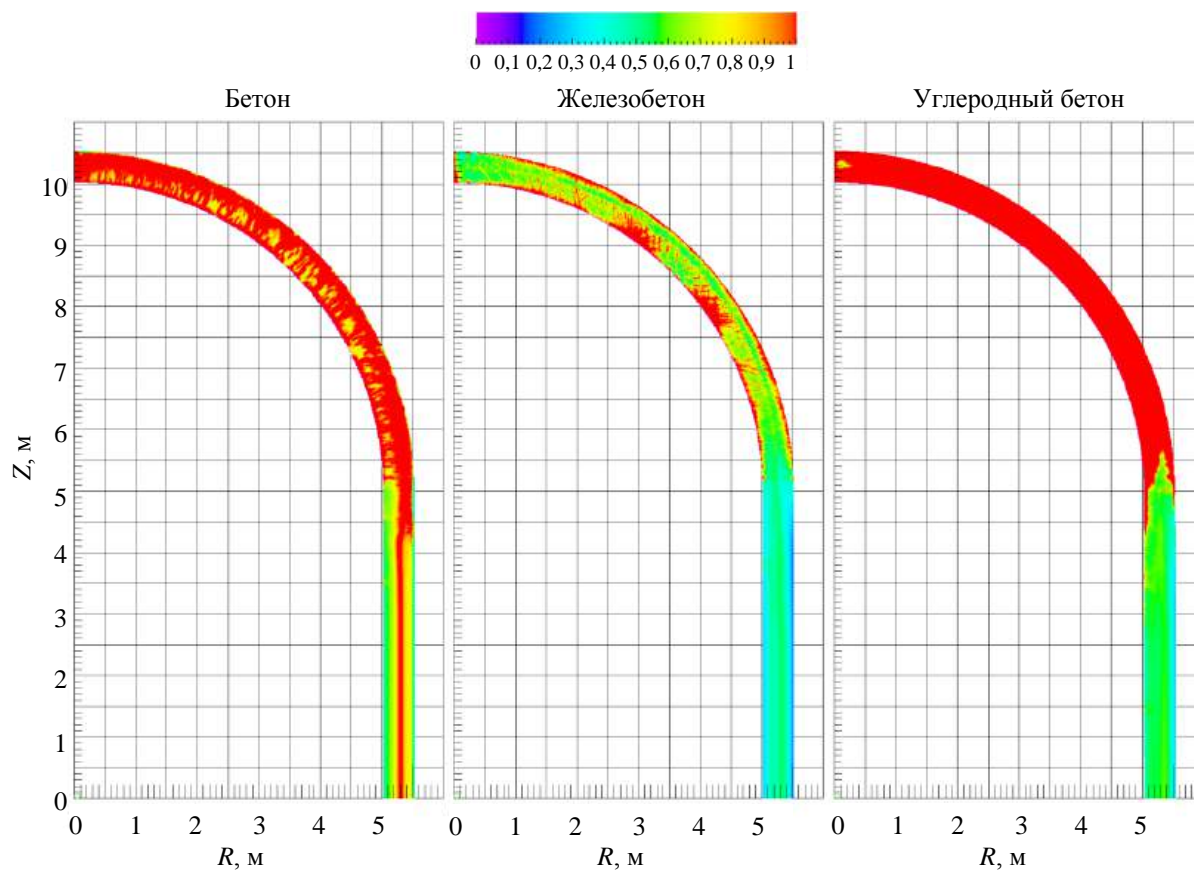


Рис. 7. Распределение параметра поврежденности  $D$  в конструкции из бетона, ж/б и углеродного бетона на момент времени 1 мс для  $P_{max} = 1000$  бар

Рассмотрим характерные отличия в распределении зон повреждения контаймента из чистого бетона и КБ (ж/б и углеродного бетона) (см. рис. 6, 7), соответствующих нагружению с  $P_{\max} = 1000$  бар. В случае чистого бетона уже к моменту времени  $t = 0,5$  мс во всем куполе образуется равномерно распределенная система радиально расходящихся трещин с  $D = 1$ , что говорит о полном разрушении сферической части конструкции контаймента. К моменту времени  $t = 1$  мс боковую цилиндрическую стенку также можно считать разрушенной.

В то же время при  $t = 0,5$  мс основная часть повреждений в контайменте из ж/б сконцентрирована лишь вблизи внутренней поверхности купола. К моменту времени  $t = 1$  мс в толще купола образуется система перекрестных трещин с  $D = 1$ , что также подтверждает разрушение свода контаймента. Поврежденность в цилиндрической части конструкции не превышает критических значений до момента окончания воздействия  $t = 1$  мс.

В случае бетона, армированного углеродным волокном, при  $t = 0,5$  мс разрушения также локализованы в средней части сферического купола, но они охватывают более значительную область конструкции. Ко времени  $t = 1$  мс разрушается весь свод купола, но вертикальная цилиндрическая часть контаймента остается неразрушенной.

В итоге, в рассматриваемом случае армированные конструкции оказываются существенно более прочными к воздействию нестационарного внутреннего давления. Контаймент из ж/б превосходит по прочности идентичную по размерам и геометрии армирования конструкцию из углеродного бетона, но последняя почти в два раз легче.

Приведенные результаты расчетов показывают, что предложенная численная модель БК позволяет рассчитывать тонкостенные ( $h/R \leq 1/10$ ) конструкции из анизотропных армированных бетонов с учетом их разрушения и упругопластического течения в материалах арматуры.

### Выводы

Предложенная численная модель деформирования и разрушения БК позволяет рассчитывать характеристики нестационарного поведения конструкций из бетонов, усиленных арматурной сталью или арматурой из полимерных КМ на основе высокомодульных волокон, вплоть до полного разрушения БК.

Проведенные расчеты показывают высокую численную устойчивость метода конечно-размерных частиц, что позволяет прогнозировать нелинейное нестационарное поведение конструкций из БК вплоть до их полного разрушения.

Как показывают результаты расчетов, контаймент из ж/б оказывается прочнее, чем идентичная по размерам и геометрии армирования конструкция из углеродного бетона, однако последняя почти вдвое легче.

Разработанный комплекс ЭВМ-программ может быть полезен для предварительных расчетов поведения конструкции из БК при её разработке и поиске рациональных параметров армирования, а также в случае отсутствия детальных данных об исследуемом сооружении.

*Работа выполнена в рамках*

*Темкарты № 0089-2019-0001*

*(№ госрегистрации ААА-А19-119071190040-5)*

*и Договора № 1770641334821000 1380/226/3866-Д*

*(этап 2022), а также при финансовой поддержке*

*РНФ (соглашение № 21-72-20023).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Окольников Г. Э., Герасимов С. В. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве // Строительство и архитектура. 2015. № 3. С. 14—21.
2. Böhm R., Thieme M., Wohlfahrt D., Wolz D. S., Richter B., Jäger H. Reinforcement Systems for Carbon Concrete Composites Based on Low-Cost Carbon Fibers // Fibers. 2018. № 6. — 56 p.
3. Zhang J., Zhao Y., Li H. Effect of Basalt Fibers on Mechanical Properties of High-Performance Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials // In: Mechtcherine V., Slowik V., Kabele P. (eds) Strain-Hardening Cement-Based Composites. SHCC 2017. RILEM Bookseries, V. 15. P. 7.
4. Хаютин Ю. Г., Чернявский В. Л., Аксельрод Е. З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2002. № 6. С. 17—19.
5. Назмеева Т. В., Параничева Н. В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2. С. 19—22.
6. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. — М.: Мир, 1982. — 348 с.
7. Победра Б. Е. Механика композиционных материалов. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 338 с.
8. Куропатенко В. Ф. Модели механики сплошных сред. — Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2007. — 302 с.
9. Острик А. В., Ким В. В. Расчетные модели нестационарного деформирования и разрушения бетонов (обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2020. Вып. 4(160). С. 11—24.
10. Острик А. В., Ким В. В., Острик М. А. Численное моделирование деформирования и разрушения контаймента АЭС при ударе двигателей падающего самолета // Конструкции из композиционных материалов. 2021. Вып. 4(164). С. 14—21.
11. Ким В. В., Ломоносов И. В., Острик А. В., Фортков В. Е. Метод конечно-размерных частиц в ячейке для численного моделирования высокоэнергетических импульсных воздействий на вещество // Математическое моделирование. 2006. Т. 18. № 8. С. 5—11.



12. Бакланов Д. И., Голуб В. В., Иванов К. В., Кривокрыотов М. С. Переход горения в детонацию в канале с диаметром меньше критического диаметра существования стационарной детонации // ТВГ. 2012. Т. 50. Вып. 2. С. 258—263.

13. Универсальное огневое сооружение "Горчак" // Оружие России. Приложение к журналу "Военный парад", 2002. С. 255.

14. Ермолаев А. А. Войсковые фортификационные сооружения. — М.: Воениздат, 1984. — 375 с.

## **Numerical modeling of deformation and fracture of constructions made of concrete composites under non-stationary loading**

A. V. OSTRIK, V. V. KIM

Institute for Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka,  
Moscow region, Russia

M. A. OSTRIK

Leonov Technological University, Korolev, Moscow Region, Russia

*It was obtained that numerical model developed allows us to calculate the characteristics of non-stationary behavior of constructions made of concrete composites till their total destruction using finite-size particles method*

**Keywords:** concrete, reinforced concrete, carbon concrete, non-stationary loading, defining equations of concrete composites, the method of finite-size particles, deformation and destruction of the containment.

УДК 538.95

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_4\_29

EDN: BMBRAG

## Высокоанизотропные материалы на основе титаната свинца

Д. И. МАКАРЬЕВ, канд. физ.-мат. наук; А. Н. РЕЗНИЧЕНКО;

С. И. ДУДКИНА; Л. А. РЕЗНИЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

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

*Изучены возможности управления анизотропией пьезоэлектрических коэффициентов материала ПКР-70, разработанного на основе титаната свинца в НИИ физики ЮФУ. Показано, что анизотропию пьезомодулей подобных материалов можно повысить выбором определенных модификаторов и режимов поляризации. Представленные в работе результаты целесообразно принимать во внимание при разработке, изготовлении и использовании подобных материалов и устройств с их участием в электронной технике.*

**Ключевые слова:** титанат свинца, электрофизические параметры, анизотропия пьезоэлектрических коэффициентов, применение.

Возможность использования сегнетопъезоке-  
рамик (СПК) в качестве активных элементов раз-  
личных электроакустических устройств, ультра-  
звуковых дефектоскопических комплексов,  
приборов медицинской диагностики, систем не-  
разрушающего контроля объектов, в том числе,  
испытывающих экстремальные внешние воздей-  
ствия (прежде всего повышенные температуры),  
выдвигает определенные требования к характери-  
стикам их пьезоактивного состояния.

В качестве таковых выступают высокие анизо-  
тропия пьезомодулей  $d_{33}/|d_{31}| \geq 3$  и коэффициентов  
электромеханической связи толщинной и радиа-  
льной мод колебаний  $K_t/K_p \geq 3$  и температуры Кюри,  
 $T_k \geq 300$  °С, обеспечивающие достаточно широкий  
рабочий интервал температур.

В НИИ физики Южного федерального универ-  
ситета разработана серия таких СПК на основе  
титаната свинца, электрофизические характе-  
ристики которых приведены в таблице.

**Электрофизические параметры сегнетопъезокерамических материалов  
с высокой анизотропией пьезоэлектрических коэффициентов**

Материалы	Электрофизические параметры									
	$T_k, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	$\text{tg}\delta \cdot 10^2$ ( $E = 50$ В/см)	$K_p$	$K_t$	$ d_{31} $ , пКл/Н	$d_{33}$ , пКл/Н	$ g_{31} $ , мВ·м/Н	$g_{33}$ , мВ·м/Н	$Q_M$
ПКР-40	440	180	1,0	0,07	0,44	5,0	52	3,2	33	2000
Японский аналог	460	190	—	0,10	0,43	—	—	—	—	1050
ПКР-69	350	170	2,2	0,04	0,57	3,5	90	2,3	60	50
ПКР-70	324	120	2,1	0	0,64	0	114	0	108	8
Японский аналог	260	255	2,3	0	0,51	0	—	0	—	18

**Макарьев Дмитрий Иванович**, старший научный сотруд-  
ник.

E-mail: dmakarev@rambler.ru

**Резниченко Анна Никифоровна**, научный сотрудник.

E-mail: anrez@sfedu.ru

**Дудкина Светлана Ивановна**, научный сотрудник.

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

**Резниченко Лариса Андреевна**, заведующая отделом интел-  
лектуальных материалов и нанотехнологий, главный научный  
сотрудник.

E-mail: lareznichenko@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 29 августа 2022 г.

© Макарьев Д. И., Резниченко А. Н., Дудкина С. И.,  
Резниченко Л. А., 2022

Материал ПКР-40 при низкой диэлектрической  
проницаемости  $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$  и высокой механической  
добротности ( $Q_M = 2000$ ) обладает повышенной  
анизотропией пьезоэлектрических параметров  
( $K_t/K_p \geq 6$ ,  $d_{33}/|d_{31}| \geq 10$ ), способствующей подавле-  
нию нежелательных колебаний. Кроме того, он от-  
личается высокой температурной стабильностью  
резонансной частоты толщинной моды колебаний:  
изменение резонансной частоты  $f_{3t}$  в интервале тем-  
ператур от  $-60$  до  $+85$  °С составляет  $0,20$ — $0,25$  %.  
По сочетанию параметров ПКР-40 превосходит  
японский аналог и может эффективно использован в  
высокочастотных широкополосных фильтрах.



Материалы ПКР-69 и ПКР-70 по сравнению с лучшими известными зарубежными разработками имеют более низкие величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$  и более высокие значения коэффициента электромеханической связи  $K_t$  и температуры Кюри. ПКР-70 имеет, кроме того, более низкую механическую добротность  $Q_{M(t)}$ . Указанные преимущества способствуют улучшению эксплуатационных характеристик устройств неразрушающего контроля и медицинской техники (повышают чувствительность и разрешающую способность). Высокие значения пьезомодуля  $d_{33}$  материалов ПКР-69 и ПКР-70 в сочетании с низким (или нулевым)  $|d_{31}|$  обеспечивают большой объемный пьезоэффект и позволяют на его основе создать более эффективные пьезоприемники с высоким уровнем фактора приема.

Применение материалов ПКР-69 и ПКР-70 позволит произвести эффективное импортозамещение широкополосных импульсных ультразвуковых преобразователей в устройствах для гидроакустики, неразрушающего контроля и медицинской техники, а также можно использовать данные материалы для других безрезонансных применений. Анализ работ [1—5] по исследованию высокой анизотропии пьезомодулей показал, что она может быть обусловлена малым значением анизотропии диэлектрических проницаемостей, зависимостью пьезосвойств от величины поляризующего поля, влиянием модификаторов, ориентационным строением доменной структуры, формирующейся различным образом при использовании разных режимов поляризации и дефектной ситуацией, развивающейся при этом в материалах.

В некоторых работах [6] по изучению поведения анизотропии реальных материалов на основе титаната свинца указывалось на наличие порогового значения поляризующего поля, при приложении которого анизотропия таких материалов становилась бесконечной, не возвращаясь к конечным значениям в процессе дальнейшего увеличения поляризующего поля.

Цель исследования — подтверждение (или опровержение) данного утверждения, рассмотрение возможности повышения анизотропии пьезомодулей указанным способом, а также выявление влияния модификаторов на анизотропию сегнето-керамики ПКР-70.

#### Объекты, методы получения и исследования образцов

В качестве объекта исследования выбран материал ПКР-70, разработанный в НИИ физики ЮФУ (таблица) и полученный двухстадийным твердофазным синтезом из сырьевых компонентов высо-

кой степени чистоты с последующим спеканием по обычной керамической технологии [7]. Электрофизические характеристики материала определяли в соответствии с [8].

#### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости  $K_t$ ,  $K_p$ , а на рис. 2 — зависимости  $d_{33}$  и  $|d_{31}|$ , а также их отношения от величины поляризующего поля образцов ПКР-70 при изменении поля от 2,5 до 6,5 кВ/мм. Режим поляризации описан в [9].

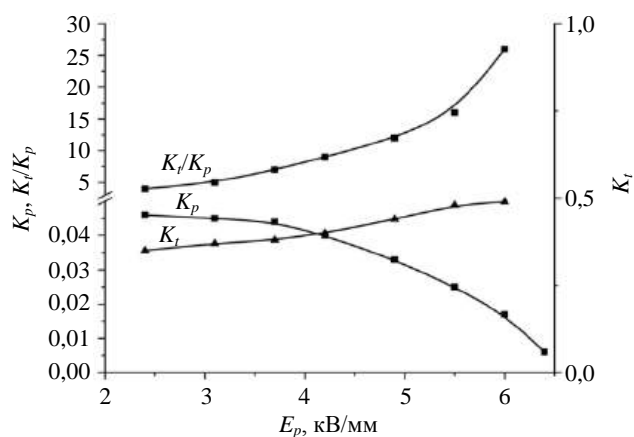


Рис. 1. Зависимость величины коэффициентов электро-механической связи  $K_t$  и  $K_p$  и их отношения  $K_t/K_p$  от величины поляризующего поля  $E_p$  образцов ПКР-70

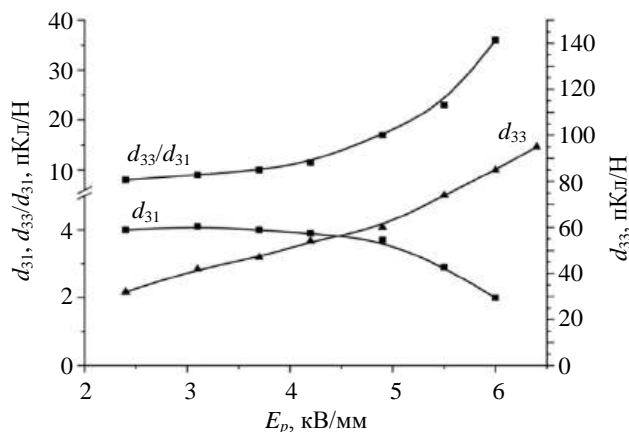
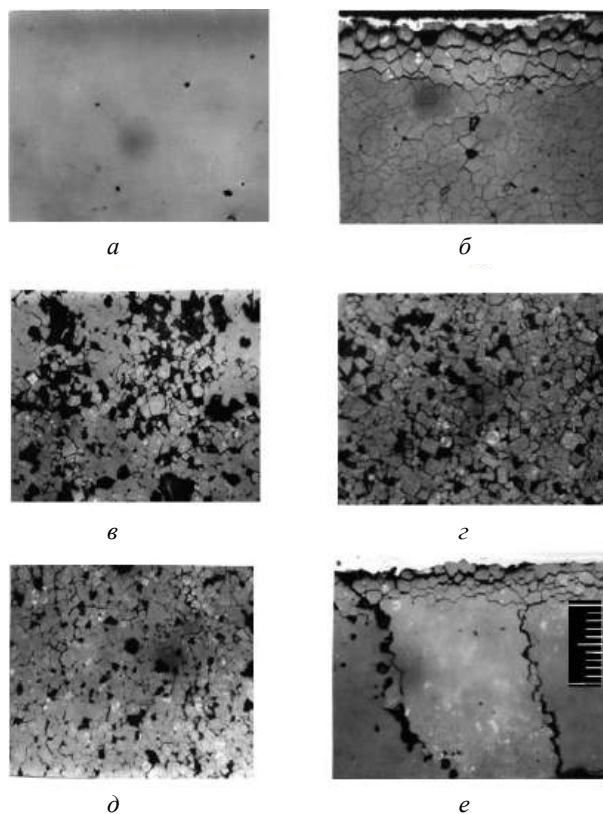


Рис. 2. Зависимость величины пьезомодулей  $d_{33}$  и  $|d_{31}|$  и их отношения  $d_{33}/|d_{31}|$  от величины поляризующего поля  $E_p$  образцов ПКР-70

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что  $K_t$ ,  $K_t/K_p$ ,  $d_{33}$ ,  $d_{33}/|d_{31}|$  растут, а  $K_p$  и  $|d_{31}|$  — уменьшаются с ростом величины поляризующего поля. При поле  $E_p = 7$  кВ/мм  $K_p$  и  $|d_{31}|$  обращаются в ноль и анизотропия, соответственно, становится бесконечной. Таким образом, можно утверждать, что для материала ПКР-70 поляризующее поле является основной величиной, формирующей его сверхвысокую пьезоэлектрическую анизотропию.

Как уже отмечено, на величину анизотропии физических свойств данного материала могут влиять как микро-, так и мезо-, и макростроение вещества, определяющие реальную (дефектную) картину кристаллической структуры и зёрненного ландшафта материала. На рис. 3 показаны микро-структуры СПК ПКР-70.



**Рис. 3. Микроструктуры СПК ПКР-70:**

*а* — непolarизованный образец; *б–е* — различные образцы, поляризованные в поле  $E_n$ , превышающем 6 кВ/мм (1 дел. = 10 мкм)

Хорошо видно, что в результате поляризации в высоких полях в керамике ПКР-70 образуется анизотропная система трещин, направленных преимущественно вдоль направления поляризуемого поля, что ведет к образованию композитоподобных структур, напоминающих по своим свойствам и строению композиты связностью 1–3 и 2–2 [10, 11], а также смесевые композиты [12], и как следствие, к бесконечной анизотропии объектов. Модифицирование керамики ПКР-70 оксидами алюминия, олова и ниобия демпфирует процесс трещинообразования, и анизотропия материала остается конечной при поляризации в постоянных полях.

Известно, что многократное переключение поляризации может существенно изменить доменную структуру СПК [13, 14], следовательно,

может оказывать значительное влияние на пьезоэлектрические свойства материала. В связи с этим, проведено исследование влияния динамической усталости на пьезосвойства ПКР-70. Эксперименты показали, что материал ПКР-70, спеченный по обычной технологии, обладает незначительной устойчивостью к данному воздействию и разрушается уже при числе циклов переключения  $N = 10^4$ . Однако, образцы материала ПКР-70, спеченные по обычной технологии с различными модифицирующими добавками, более устойчивы к данному воздействию и выдерживают более  $10^5$  циклов. При этом такие образцы не обладают бесконечной анизотропией пьезомодулей ( $d_{33}/|d_{31}|$ ). Были исследованы зависимости анизотропии сегнетокерамики ПКР-70 с различными модификаторами от числа циклов переключения поляризации. Метод заключается в сравнении анизотропии коэффициентов электромеханической связи до и после воздействия. Для этого производили предварительное измерение коэффициентов электромеханической связи толщиной и радиальной мод колебаний образцов, после чего образцы располяризовывали путем нагрева до температуры, превышающей точку Кюри. Затем образцы помещали в установку переключения поляризации, где выдерживали определенное время, в течение которого производили нужное количество переключений. После отключения установки у образцов оставалась некоторая поляризация, при наличии которой измеряли их анизотропию. Затем образцы поляризовали в полиэтилсилоксановой жидкости до максимально возможных значений поляризации, после чего вновь измеряли анизотропию коэффициентов электромеханической связи. Таким методом исследовали материал ПКР-70, приготовленный по обычной керамической технологии и модифицированный  $Al_2O_3$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $SnO_2$  с процентным содержанием модификаторов 0,5; 1,0; 1,5; 2,0. В качестве контрольных точек брали числа переключения поляризации  $10^4$  и  $10^5$  раз.

Результаты эксперимента приведены на рис. 4–6, где показаны относительные изменения анизотропии пьезоэффекта образцов. Видно, что для образцов, модифицированных  $Al_2O_3$ , отношения анизотропии элементов до и после воздействия линейно увеличиваются с ростом концентрации модификатора, причем для процентных содержаний 0,5 и 1,0 % относительная анизотропия уменьшалась с увеличением числа переключений поляризации, при 2 %-ном содержании модификатора наблюдался некоторый рост анизотропии.

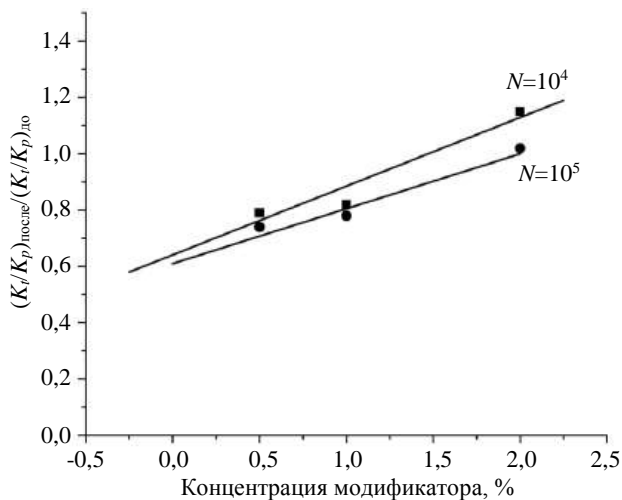


Рис. 4. Относительное изменение  $K/K_p$  образцов после воздействия циклической переполаризацией с  $N = 10^4$  и  $10^5$  от концентрации модификатора  $Al_2O_3$

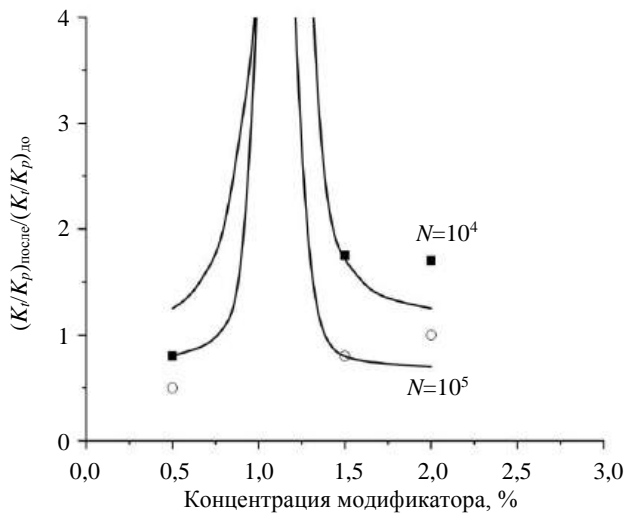


Рис. 5. Относительное изменение  $K/K_p$  образцов после воздействия циклической переполаризацией с  $N = 10^4$  (квадраты) и  $10^5$  (кружки) от концентрации модификатора  $Nb_2O_5$

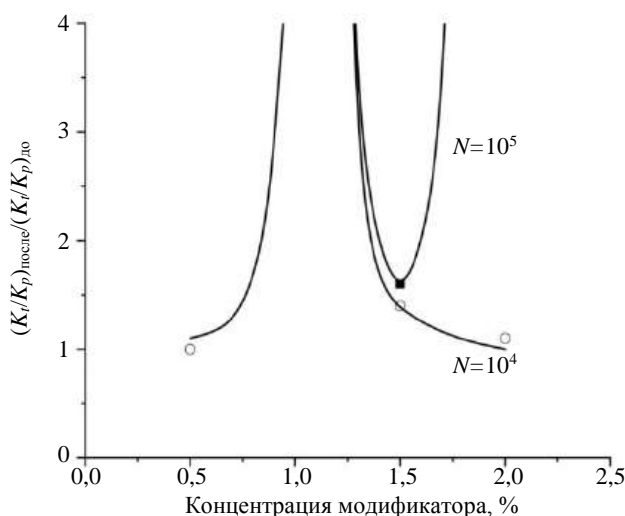


Рис. 6. Относительное изменение  $K/K_p$  образцов после воздействия циклической переполаризацией с  $N = 10^4$  (квадраты) и  $10^5$  (кружки) от концентрации модификатора  $SnO_2$

У элементов, модифицированных  $Nb_2O_5$  и  $SnO_2$ , при концентрации модификатора, равной 1,0 % в результате воздействия появлялась бесконечная анизотропия при числе циклов переключения  $10^4$  и  $10^5$ , причем у керамики, модифицированной  $SnO_2$ , бесконечная анизотропия наблюдалась также при концентрации модификатора 2,0 % и числе переключений поляризации  $N = 10^5$ .

Анализ полученных результатов показал, что воздействие многократной переполаризации изменяет анизотропию пьезоэффекта образцов модифицированного материала ПКР-70, при этом образцы, модифицированные оксидами олова и ниобия с содержанием модификатора ~ 1,0 %, приобретают бесконечную анизотропию пьезоэффекта.

Таким образом, показана возможность управлять анизотропией пьезоэффекта в материалах типа ПКР-70 на основе титаната свинца выбором модификаторов и режимов поляризации.

### Заключение

Представленные в работе результаты целесообразно принимать во внимание при разработке, изготовлении и использовании подобных материалов и устройств с их использованием в электронной технике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № (0852-2020-0032)/(БА30110/20-3-07ИФ), тема НИР "Экологически чистые материалы для инновационных multifunctional систем: от цифрового дизайна к производственным технологиям". Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета "Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел".

### ЛИТЕРАТУРА

1. Turik A. V., Topolov V. Yu., Chernobabov A. I., Bondarenko E. I. Nature of anisotropy of lead titanate piezoelectric coefficients // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 1993. V. 57. P. 1027—1030.
2. Тополов В. Ю., Турик А. В., Чернобабов А. И. О механизмах возникновения большой пьезоэлектрической анизотропии в сегнетоэлектриках на основе титаната свинца // Кристаллография. 1994. Т. 39. № 5. С. 884—888.
3. Topolov V. Yu., Turik A. V., Chernobabov A. I. On the piezoelectric anisotropy in modified  $PbTiO_3$  ceramics // Ferroelectrics. 1994. V. 154. № 1—4. P. 271—276.
4. Гринев Л. Д., Алешин В. А., Разумовская О. Н., Сервули В. А., Шилкина Л. А., Мирошниченко Е. С. Вли-

яние электрического поля на свойства поликристаллических твердых растворов на основе  $\text{PbTiO}_3$  // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1990. Т. 54. № 4. С. 772—775.

5. Mendiola G., Alemany C., Pardo I. Poling reversal effects on piezoelectricity of calcium modified lead titanate ceramics // Ferroelectrics. 1989. V. 94. P. 209—214.

6. Дулькин Е. А., Гребенкина Л. И., Макарьев Д. И., Клевцов А. Н., Гавриляченко В. Г. Бесконечная анизотропия пьезоэффекта в сегнетокерамике на основе  $\text{PbTiO}_3$  // Письма в Журнал технической физики. 1999. Т. 25. Вып. 22. С. 21—25.

7. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. — М.: Энергия, 1976. — 336 с.

8. IEEE Standard on Piezoelectricity ANSI/IEEE Std. 176-1987. 1988. New-York. DOI: 10.1109/IEEESTD.1988.79638.

9. Макарьев Д. И., Рыбняк А. Н., Маяк Г. М. Возможность создания цифровых пьезоматериалов на основе смесевых композитов "пьезокерамика-полимер" // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. Вып. 7. С. 22—27.

10. Topolov V. Y., Isaeva A. N. Modified reception parameters of 1—3 composites based on ferroelectric crystals // Technical Physics. 2022 (in print).

11. Isaeva A. N., Topolov V. Y., Bowen C. R., Roscow J. I. Twelve modified figures of merit of 2—2-type composites based on relaxor-ferroelectric single crystals // Materials Chemistry and Physics. 2022. V. 279. P. 125691.

12. Makarev D. I., Shvetsova N. A., Reznichenko A. N., Lugovaya M. A. Anisotropy of electromechanical parameters of a single-layer composite of the piezoceramic — polymer system // Ferroelectrics. 2021. V. 575. № 1. P. 29—32.

13. Бородин В. З., Экнадиосянц Е. И., Расторопов С. Б., Пинская А. Н. Влияние электрического поля на доменную структуру модифицированного титаната свинца // Неорганические материалы. 1992. Т. 28. № 9. С. 1964—1966.

14. Экнадиосянц Е. И., Пинская А. Н., Бородин В. З. Влияние электрических полей на доменную структуру сегнетоэлектриков типа  $\text{BaTiO}_3$  // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1984. Т. 48. № 6. С. 1111—1116.

## Highly anisotropic materials based on lead titanate

D. I. MAKARIEV, A. N. REZNICHENKO, S. I. DUDKINA, L. A. REZNICHENKO

Sciences Research Institute of Physics Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

*In this work, the possibilities of controlling the anisotropy of the piezoelectric coefficients of the PKR-70 material developed on the basis of lead titanate at the Research Institute of Physics of the Southern Federal University were studied. It is shown that the anisotropy of the piezoelectric modules of such materials can be increased by choosing certain modifiers and polarization modes. The results presented in the paper should be taken into account in the development, manufacture and use of such materials and devices with their participation in electronic technology.*

**Keywords:** lead titanate, electrophysical parameters, anisotropy of piezoelectric coefficients, application.

УДК 669.058.66

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_4\_34

EDN: CDHMCK

## **Модификация поверхности порошка как способ улучшения его распределения в материале наплавки**

С. Е. ПОРОЗОВА, д-р техн. наук; К. Н. ЛЕБЕДЕВА

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Д. А. СТАРКОВ

АО «ОДК — Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

*Исследована микроструктура полученного лазерной наплавкой композиционного покрытия на основе нихрома, содержащего модифицированные оксидами хрома добавки  $ZrO_2$  и  $TiO_2$ . Показано, что как модифицированный, так и немодифицированный порошки  $TiO_2$  всплывают на поверхность наплавки, образуя практически сплошной слой. Порошок марки TZ-3Y-E концентрируется внутри наплавленного слоя вокруг образующихся крупных пор. Введение в состав наплавляемой шихты добавки  $ZrO_2$ —5 масс. %  $Y_2O_3$  приводит к равномерному распределению агломератов нанопорошка по границам зерен.*

**Ключевые слова:** порошковая лазерная наплавка, композиционное покрытие, модификация поверхности, керамические порошки, нихром, микроструктура, диоксид титана, диоксид циркония.

В процессе эксплуатации газотурбинные двигатели (ГТД) подвергаются воздействию статических, динамических и циклических нагрузок в условиях высоких температур и агрессивных сред [1].

Работа ГТД в сложнапряженных условиях приводит к тому, что на его поверхности образуются риски, трещины, забоины и вмятины, в результате чего прочностные характеристики конструкции ухудшаются и двигатель выводят из эксплуатации [2, 3]. Для восстановления поверхности и повышения прочностных свойств, а значит, для увеличения срока службы высокоответственных деталей двигателя применяют лазерную порошковую наплавку [4] чистых металлических порошков или их композиций [5—7].

Перспективными материалами, повышающими износостойкость деталей, являются композиционные материалы на основе нихрома с добавкой различных керамических порошков. В качестве упрочняющих фаз таких покрытий могут быть ис-

пользованы, например, диоксиды титана и циркония. В сравнении с металлическими порошками плотность керамических значительно ниже. Зачастую плохая адгезия наплавляемого металла к поверхности керамических порошков не позволяет получать композиционные покрытия с равномерным распределением компонентов. Модифицирование поверхности керамического порошка является одним из вариантов улучшения адгезии, в результате чего равномерность распределения порошковой добавки в наплавке повышается [8]. Проведенные ранее авторами исследования показали положительное влияние нанесения оксидов никеля и металлического никеля на порошок диоксида титана на пористость композиционного покрытия на основе нихрома, полученного лазерной наплавкой [9].

Цель работы — исследование микроструктуры полученного лазерной наплавкой композиционного покрытия на основе нихрома, содержащего добавки диоксидов циркония и титана, модифицированные оксидами хрома.

### **Экспериментальная часть**

В качестве подложки использовали пластины из стали марки 12X18H10T (ГОСТ 1133–71) размерами 100×50×3 мм. В качестве наплавляемого материала — жаропрочный никелевый порошок марки ПХ20Н80 (нихром) (ГОСТ 13084–88) со средним размером частиц 40—80 мкм. В табл. 1. приведены характеристики использованных керамических порошков.

---

**Порозова Светлана Евгеньевна**, доцент, профессор кафедры "Механика композиционных материалов и конструкций" аэрокосмического факультета.

E-mail: sw.porozova@yandex.ru

**Лебедева Ксения Николаевна**, магистрант второго курса кафедры "Механика композиционных материалов и конструкций" аэрокосмического факультета.

E-mail: kseny1305@gmail.com

**Старков Дмитрий Александрович**, инженер отдела разработки перспективных технологий ремонта.

E-mail: dmitri.melo@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 16 июля 2022 г.*

© Порозова С. Е., Лебедева К. Н., Старков Д. А., 2022

Таблица 1

## Общая характеристика керамических порошков

Маркировка	1	2	3
Состав порошков	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> —5 масс. % Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> —5 масс. % Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Характеристики			
Марка порошка	ТУ 6-09-3811-79 Марка ОСЧ 7-3	TZ-3Y-E TOSOH CORPORATION (Япония)	Лабораторный порошок (НЦ ПМ, ПНИПУ, г. Пермь)
Фазовый состав	Рутил	T+M	T+M
Содержание оксида иттрия, масс. %	—	5	5
Содержание моноклинной модификации, %	—	23	17
Форма агломератов	Осколочная	Сферическая	Осколочная
Средний размер частиц, нм	200—250	64	14

Примечание. Т — тетрагональная модификация; М — моноклинная модификация ZrO<sub>2</sub>.

Удельную поверхность порошков определяли методом тепловой десорбции азота на приборе СОРБИ 4.1 (ЗАО "МЕТА", г. Новосибирск). Средний размер частиц рассчитывали по известной формуле [10].

Фазовый состав порошков изучали методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии) на многофункциональном спектрометре Senterra (Bruker, Германия) при длине волны излучающего лазера 532 нм. Содержание моноклинной модификации в порошках № 2 и 3 определяли по соотношению интенсивности пиков моноклинной и тетрагональной модификации [11—13] по следующей формуле:

$$f_m = \left[ I_m^{181} + I_m^{192} \right] / \left[ 0,97 \left( I_t^{148} + I_t^{264} \right) + I_m^{181} + I_m^{192} \right],$$

где верхние индексы относятся к комбинационному смещению характеристических пиков, а нижние индексы соответственно показывают принадлежность пика к моноклинной или тетрагональной фазе.

Для получения необходимой сыпучести перед проведением наплавки присадочный порошок просушивали в печи при температуре 180—200 °С в течение 2 ч. Лазерную наплавку выполняли на обрабатываемом центре при мощности лазера 700—800 Вт в защитной среде аргона при скоро-

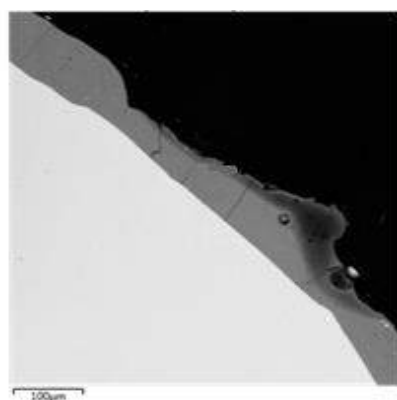
сти наплавки 100—150 мм/мин, количество дорожек — 5, количество слоев — 3. Подача порошка происходила в среде гелия. Расход аргона и гелия — 6...8 и 3...5 л/мин соответственно.

Шлифование образцов проводили на абразивных шкурках со степенью зернистости от 400 до 2000, дальнейшее полирование — с помощью алмазных паст. Для выявления микроструктуры проводили травление полированных микрошлифов реактивом, содержащим HNO<sub>3</sub>, HCl и глицерин в соотношении 1:3:6 в соответствии с методическими рекомендациями [14]. Микроструктуру образцов исследовали с помощью цифрового инвертированного микроскопа Axiovert 40MAT (Carl Zeiss, Германия).

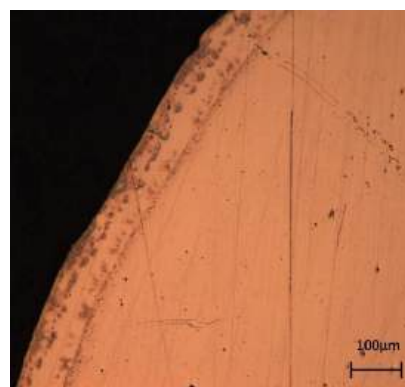
Микротвердость наплавки по Виккерсу определяли с точностью ± 24 HV на микротвердомере DuraScan 20 (Австрия).

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а представлена микроструктура наплавленного покрытия с содержанием 5 масс. % TiO<sub>2</sub>. Порошок TiO<sub>2</sub> не подвергали модификации. Весь TiO<sub>2</sub> в процессе наплавки оказался на поверхности, образуя почти сплошной слой.



а



б

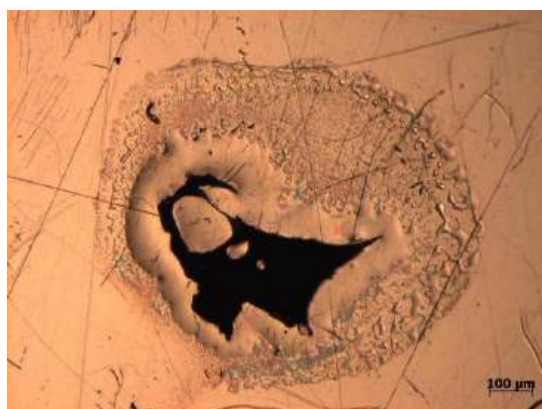
Рис. 1. Микроструктура лазерной наплавки композиционного покрытия на основе никрома, содержащего: а — 5 масс. % TiO<sub>2</sub>; б — 0,5 масс. % модифицированного TiO<sub>2</sub>



Для получения композиционного покрытия с равномерным распределением компонентов была предпринята попытка модифицирования керамических порошков водным раствором соли хрома с дальнейшей термообработкой на воздухе при 700 °С в течение 1 ч по методике, описанной ранее [15]. После модификации, проведена КР-спектроскопия, в результате которой установлено, что на поверхности порошка диоксида титана образуются оксидные соединения хрома  $\text{CrO}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и соединений промежуточных фаз.

По результатам исследования микроструктуры композиционного покрытия с добавлением модифицированного диоксида титана (рис. 1, б) отмечено, что порошок диоксида титана по-прежнему всплывает на поверхность слоя лазерной наплавки. Взаимодействия керамического порошка с материалом основы не происходит, адгезия компонентов отсутствует, в результате чего порошок  $\text{TiO}_2$  сосредоточен по границе лазерной наплавки.

На рис. 2 представлена микроструктура композиционного покрытия с содержанием 0,5 масс. %  $\text{ZrO}_2$  (порошок № 2), полученного лазерной наплавкой. Порошок диоксида циркония концентрируется по границам дефектов наплавки, полностью ограничивая дефект. По данным КР-спектроскопии на поверхности порошка диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия марки TZ-3Y-E, после пропитки водным раствором  $\text{CrO}_3$  и прокаливания идентифицируются пики  $\text{CrO}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и соединений промежуточных фаз [15].



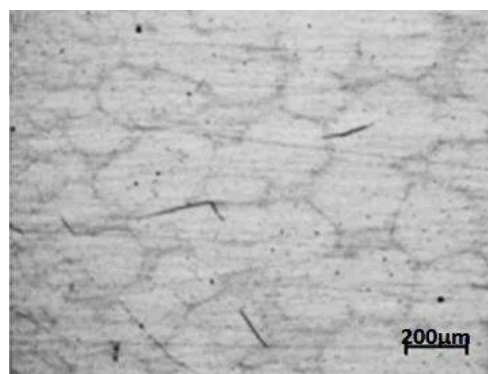
**Рис. 2. Микроструктура лазерной наплавки композиционного покрытия на основе никрома, содержащего 0,5 масс. %  $\text{ZrO}_2$**

Наличие очень крупных пор в наплавленном слое в этом случае может быть связано в том числе и с тем, что сферы порошка № 2 внутри полые [15], т. е. возможно их разрушение произошло в процессе наплавки.

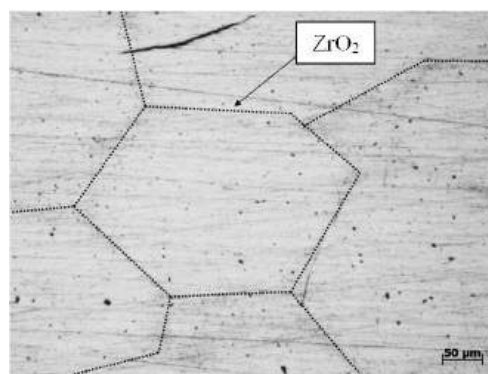
По результатам исследования КР-спектров порошка диоксида циркония, синтезированного в

Научном центре порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета (НЦ ПМ ПНИПУ)  $\text{ZrO}_2$ —5 масс. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , идентифицируются пики  $\text{CrO}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , а так же при наличии превращаемой тетрагональной фазы диоксида циркония происходит взаимодействие  $\text{CrO}_3$  со стабилизатором, оксидом иттрия, с образованием высокотемпературного соединения  $\text{YCrO}_4$ .

При исследовании микроструктуры наплавленного слоя наблюдается равномерное распределение керамического порошка по границам зёрен наплавки (рис. 3, а). На увеличенном изображении (рис. 3, б) дополнительно проведены линии по границам зерен для наилучшего визуального восприятия.



а



б

**Рис. 3. Микроструктура лазерной наплавки композиционного покрытия:**

а — общий вид шлифа; б — увеличенное изображение зоны наплавки

Такое распределение порошка свидетельствует о том, что  $\text{YCrO}_4$  достаточно равномерно покрывает поверхность агломератов порошка № 3 и обладает адгезией к материалу основы. В процессе наплавки происходит взаимодействие получившегося в результате модификации поверхности высокотемпературного соединения  $\text{YCrO}_4$  с материалом основы (нихромом), равномерно распределенные в расплаве агломераты порошка в процессе кри-



сталлизации нихрома выделяются по границам зерен, а не всплывают на поверхность наплавленного слоя.

В табл. 2 представлена микротвердость зоны термического воздействия и непосредственно зоны лазерной наплавки.

Таблица 2

Микротвердость зоны лазерной наплавки

Порошок	Содержание керамического порошка, %	Твердость, HV	
		наплавка	зона термического воздействия
№ 1	0,5	196—207	227—246
№ 2	0,5	199—219	230—244
№ 3	0,5	195—212	230—245

По результатам исследования микротвердости покрытий, полученных лазерной наплавкой, (см. табл. 2) выяснили, что распределение керамического порошка не оказывает существенного влияния. Такие данные легко могут быть объяснены незначительным количеством добавки и тем, что при небольшой толщине наплавленного слоя при измерении сложно избежать влияния краевых эффектов.

### Заключение

Исследования проводили на порошках диоксида титана и циркония, химические характеристики которых достаточно близки, т. е. в некоторых случаях порошок диоксида циркония может быть заменен на более распространенный порошок диоксида титана. Показано, что при отсутствии модифицирующей добавки порошок диоксида титана всплывает на поверхность наплавки, образуя при содержании 5 масс. % практически сплошной слой. Модификация порошка  $\text{TiO}_2$  оксидами хрома не изменяет его поведение.

Модификация порошка № 2 (TZ-3Y-E), представляющего собой полые микросферы из наночастиц [16], приводит к тому, что порошок концентрируется внутри наплавленного слоя вокруг образующихся крупных пор.

Введение в состав наплавляемой шихты порошка № 3 приводит к распределению агломератов нанопорошка в межзеренном пространстве матрицы наплавленного слоя. По-видимому, этот эффект связан с взаимодействием расплава с поверхностным слоем  $\text{YCrO}_4$ , отсутствующим у порошка № 1 и не зафиксированным в порошке № 2.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Климов В. Г., Жаткин С. С., Баранов Д. А. Использование высокотемпературных никелевых припоев в качестве износостойких наплавов на торец пера лопатки турбины // Изв. Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 1(2). С. 229—233.
2. Бирюков В. П. Повышение долговечности работы пар трения скольжения при лазерной наплавке порошковых материалов // Тяжелое машиностроение. 2013. № 9. С. 14—17.
3. Берtrand Ф., Мовчан И., Самодурова М. Н., Джигун Н. С. Лазерная наплавка как перспективный метод упрочнения штамповой оснастки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2016. Т. 14. № 2. С. 44—52.
4. Афанасьева Л. Е., Раткевич Г. В. Лазерная наплавка покрытия  $\text{NiCrBSiFe-WC}$  с помощью многоканального лазера // Письма о материалах. 2018. Т. 8. № 3. С. 268—273.
5. Гусев А. А., Гусева Г. В. Наплавка чистого металлического порошка импульсным лазерным излучением // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 6. С. 254—259.
6. Григорьянц А. Г., Новиченко Д. Ю., Смуров И. Ю. Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала // Изв. вузов. Машиностроение. 2011. № 7. С. 38—46.
7. Григорьянц А. Г., Мисюров А. И., Шиганов И. Н., Третьяков Р. С., Ставертий А. Я. Исследование пористости покрытий из кобальтовых и никелевых сплавов, наплавленных лазерным излучением // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 6. С. 165—173. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-240.
8. Лебедева К. Н., Порозова С. Е., Старков Д. А. Исследование микроструктуры композиционного покрытия: мат. Междунар. науч.-практ. конф. "Машиностроение: инновационные аспекты развития". — Санкт-Петербург: НИЦ МС. 2022. № 5. С. 52—54.
9. Порозова С. Е., Старков Д. А. Влияние добавки диоксида титана на пористость наплавленного материала на основе порошка жаропрочного никелевого сплава // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 1. С. 3—6.
10. Gregg S. J., Sing K. S. W. Adsorption, surface area and porosity. — New York: Academic Press, 1982. — 304 p.
11. Kumari L., Du G. H., Li W. Z. Synthesis, microstructure and optical characterization of zirconium oxide nanostructures // Ceramics International. 2009. V. 35. P. 2401—2408.
12. Ghosh A., Suri A. K., Pandey M., Thomas S., Rama Mohan T. R., Rao B. T. Nanocrystalline zirconia-yttria system—a Raman study // Materials Letters. 2006. V. 60. P. 1170—1173.
13. Liang B., Ding C., Liao H., Coddet C. Study on structural evolution of nanostructured 3 mol % yttria stabilized zirconia coatings during low temperature ageing. // J. European Ceramic Society. 2009. V. 29. P. 2267—2273.
14. Васьулъ Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов / Пер. с нем. — М.: Металлография, 1988. — 320 с.
15. Порозова С. Е., Старков Д. А., Лебедева К. Н. Модификация поверхности ультрадисперсных порошков  $\text{ZrO}_2$  оксидными соединениями хрома // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 2. С. 5—12.
16. Порозова С. Е., Кульметьева В. Б., Поздеева Т. Ю., Шоков В. О. Роль агломератов нанопорошков в формировании структуры и свойств керамических материалов // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2020. № 4. С. 4—13.

## **Powder surface modification as a way to improve it's distribution in the surfacing material**

S. E. POROZOVA; K. N. LEBEDEVA

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

D. A. STARKOV

JSC "UEC-Perm Engines", Perm, Russia

*The microstructure of the composite coating obtained by laser cladding based on nichrome containing  $ZrO_2$  and  $TiO_2$  additives modified with chromium oxides has been studied. It is shown that the modified and unmodified  $TiO_2$  powder floats to the surface of the surfacing, forming an almost continuous layer when exposed. TZ-3Y-E grade powder is concentrated inside the deposited layer around large pores formed. The introduction of  $ZrO_2$ -5 wt. %  $Y_2O_3$  into the composition of the deposited mixture leads to a uniform distribution of nanopowder agglomerates along the grain boundaries.*

**Keywords:** powder laser cladding, composite coating, surface modification, ceramic powders, nichrome, microstructure, titanium dioxide, zirconium dioxide.

## Нано- и микроразмерные продукты утилизации взрывчатых веществ и ракетного топлива (Обзор)

Н. В. ШЕВЧЕНКО

АО «Петровский научный центр «ФУГАС», Москва, Россия

*Исследованы способы получения, характеристики и свойства нано- и микроразмерных продуктов утилизации высокоэнергетических конденсированных материалов. Утилизацию осуществляли путем детонационного синтеза и сжигания, при котором в качестве сырья использовали взрывчатые вещества (ВВ), артиллерийский порох и смесевое твердое ракетное топливо (СТРТ). Используя набор аналитических методов для изучения свойств наноструктур, были проведены исследования первичных продуктов утилизации, а также выделенных детонационных микроалмазов (ДНА) и микроалмазов (МД) после химической очистки. Наряду с ДНА, заметными компонентами детонационной шихты являются онионоподобные луковичные структуры. Использование промышленных взрывчатых веществ на основе гексогена, содержащего алюминий в форме АИХ-2, значительно снижает получение ДНА. При утилизации отдельных взрывчатых составов или артиллерийского пороха в исследованных продуктах зафиксировано появление новых структурных образований — нанолент. При сжигании зарядов АИХ-2 и СТРТ были получены и исследованы продукты утилизации, которые представлены оксидами металлов, основным из которых является  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .*

**Ключевые слова:** утилизация, взрывчатые вещества, твердое ракетное топливо, детонационный синтез, нано- и микрочастицы.

Совершенствование экономически обоснованных, ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий утилизации боеприпасов и ракетного топлива способно обеспечить возврат в хозяйственный оборот значительный объем материальных ресурсов.

При этом комплексное использование высокоэнергетических конденсированных материалов, совмещенное с демилитаризацией вооружений и военной техники, открывает возможности использования новых направлений для развития глубокой промышленной утилизации. Данный подход предполагает инновационное применение взрывчатых веществ и смесового твердого ракетного топлива с истекшим сроком гарантированного хранения. Разработка методов переработки и глубокое понимание профиля энерговыделения, сопровождающего эти процессы, необходимы для реализации этих структурных и эксплуатационных свойств, обеспечивающих получение новых материалов с высокой добавленной стоимостью.

В этой связи наиболее распространенные составы складированных боеприпасов и твердого ракетного топлива, в подавляющем большинстве содержащие тринитротолуол, гексоген и другие взрывчатые вещества, требуют безопасного извлечения сырья в форме, приемлемой для последующего применения. Данный процесс, совмещенный с использованием современных методов утилизации, основанных на применении детонационного синтеза и сжигания, обеспечивает эффективное получение высокотехнологичной нано- и микроразмерной продукции. Доступные для безопасного извлечения из боеприпасов взрывчатые вещества являются эффективным сырьем для детонационного синтеза при получении нано- и микрочастиц углерода. Существует возможность включения в данный процесс металлов, в том числе наноразмерных, широко используемых в твердом ракетном топливе. Утилизация данной продукции может быть направлена на обеспечение получения наноструктурированных металлических частиц, оксидов и нитридов.

Синтез инициированных взрывом мелкодисперсных частиц алмаза при фазовом переходе графита, вызванного ударной волной, был продемонстрирован за рубежом более полувека назад [1]. Впоследствии этот способ усовершенствовали

Шевченко Николай Владимирович, главный специалист.  
E-mail: shevvnano@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 июля 2022 г.

© Шевченко Н. В., 2022

путем применения специальных ампул для взрывчатых составов, а также за счет использования металлического порошка в качестве охлаждающих смесей [2]. Аналогичные работы в области динамического синтеза алмазных частиц были проведены в России, где впервые осуществлен безампульный детонационный синтез наноалмазов с применением взрывной камеры [3]. Результаты работ, их поддержка и детальное обсуждение, подтвердили перспективы получения и использования продуктов детонационного синтеза [4—9], что способствовало выявлению возможных способов прямого применения высокоэнергетических материалов из расщепляемых боеприпасов для получения нано- и микроразмерных продуктов утилизации [10—12]. Повышенный интерес к данному направлению утилизации был обеспечен разработкой технологии и высокопроизводительного оборудования гидрокавитационного извлечения ВВ из боеприпасов повышенного могущества, включая составы, содержащие гексоген [13, 14]. Данный способ, возможно, является одним из наиболее эффективных путей безопасного получения доступного сырья для промышленных взрывчатых материалов и детонационного синтеза.

Развитие нанотехнологического производства, основанного на применении технологии детонационного синтеза, столкнулось с ограничениями по объему потребления получаемой продукции и стоимостью промышленных взрывчатых материалов, используемых в производстве. Тенденции развития этих работ определяются потенциалом роста реального коммерческого спроса на детонационные нано- и микроразмерные алмазы, а также возможностями формирования конкурентоспособной по цене ресурсной базы. Реализация этого производства возможна при комплексном использовании высокоэнергетических конденсированных взрывчатых материалов, полученных путем промышленной утилизации продукции военного назначения, а также при эффективном государственном финансировании этого вида работ.

В целях глубокой переработки ресурсов и получения высокотехнологичных продуктов промышленной утилизации боеприпасов и твердого ракетного топлива были исследованы способы синтеза, характеристики и свойства нано- и микрочастиц, получаемых детонационным синтезом и сжиганием.

### Материалы и методы

В качестве исходных компонентов взрывчатых веществ применяли составы тринитротолуола

(ТНТ —  $C_3H_6N_6O_6$ ) и гексогена ( $C_7H_4N_8O_6$ ) в литых и прессованных смесях с использованием утилизируемых промышленных форм данных соединений, а также ВВ, извлекаемые из гексогенсодержащих составов АИХ-1, АИХ-2 и пороховой фракции, полученной при расщеплении артиллерийского выстрела. Детонационный синтез утилизируемых составов проводили в взрывной камере ВК-10 объемом  $100\text{ м}^3$ , частично заполненной охлаждающей жидкостью. В качестве газовой среды использовали парогазовые продукты предыдущих подрывов. Для исследований по детонационному синтезу применяли навески смесевых ВВ до 7,5 кг в тротиловом эквиваленте.

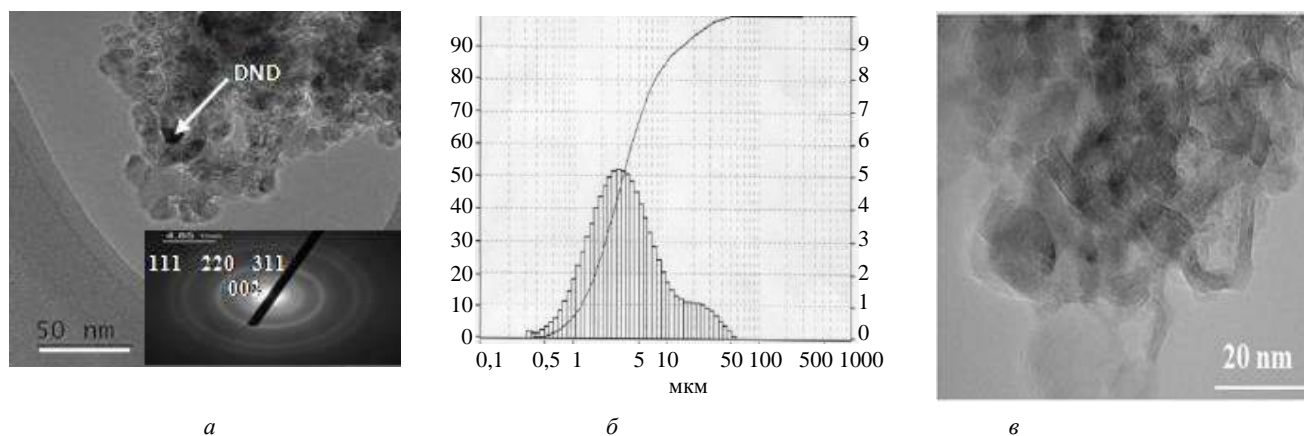
Для проведения комплексных анализов использовали шихту из продуктов детонационного синтеза утилизируемых ВВ и продукты сжигания гексогенсодержащего состава АИХ-2 и СТРТ, содержащие мелкодисперсный алюминий. Характеристические особенности и свойства полученных микропорошков шихты и очищенных микро- и наноразмерных частиц исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, комбинационного рассеяния света (КРС), светорассеивания, и других методов комплексного анализа [11, 15—18].

### Результаты исследований

#### *Продукты детонационного синтеза ТНТ/АИХ-1*

Проведенные работы по детонационному синтезу с использованием утилизируемых смесевых составов тротил—гексогена (в форме АИХ-1) показали эффективное образование наноалмазной шихты. Полученный в ВК-10 продукт представлял собой мелкодисперсный порошок черного цвета, содержащий в своем составе  $sp^3$ -частицы ДНА, а также онионоподобные и другие  $sp^2$ -структуры углерода (рис. 1).

Первичные частицы ДНА в шихте состояли из алмазного ядра размером менее 10 нм (рис. 1, а), агломерированного через внешние  $sp^2$ -оболочки. Содержание наноалмазного углерода в полученной смеси составляло 45—70 % и зависело от состава используемого взрывчатого вещества и условий синтеза. Измерение размера первичных частиц шихты, проведенное с использованием рассеяния света, показало распределение размера структурных образований в диапазоне 0,5—10 мкм, максимум которого составлял менее 5 мкм (рис. 1, б).



**Рис. 1. Состав наноалмазной шихты:**

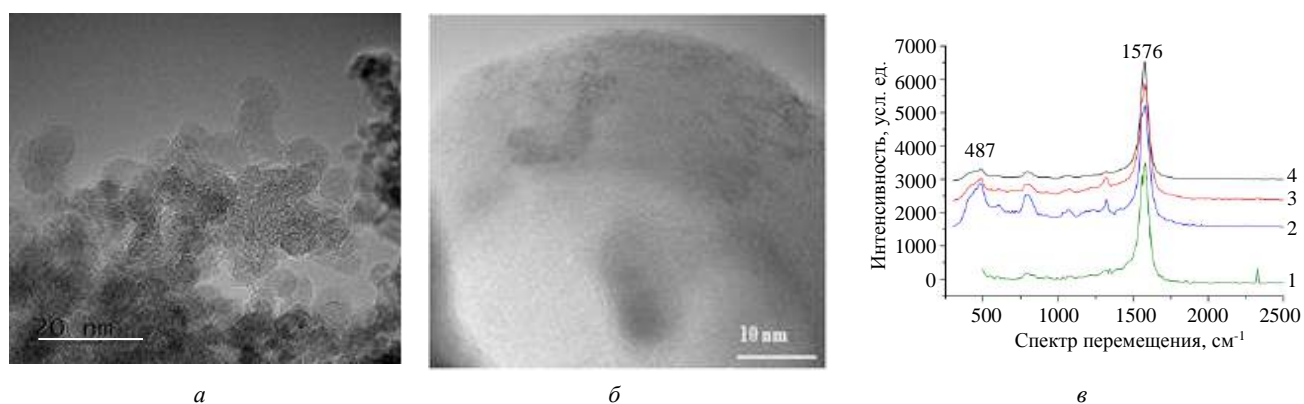
*a* — наноалмазные частицы в составе шихты из объема взрывной камеры, на вставке дифракция электронов с углеродными индексами; *б* — распределение частиц наноалмазной шихты по размерам; *в* — шихта из парогазовой фазы взрывной камеры, содержащая наноленты

Характерной особенностью шихты, полученной из парогазовой фазы взрывной камеры, наряду с присутствием наноалмазных, луковичных частиц (онионов), а также аморфных форм углерода, было наличие 6—12-слойных ленточных структур — нанолент (рис. 1, *в*). Эти образования, вероятно, представляют собой протяженные (до 100 нм) структуры с наноразмерными характеристиками [4, 19]. Данные структуры подвержены полному термическому окислению при 430 °C в потоке воздуха, что указывает на проявление окисления  $sp^2$  углеродной фазы.

Наряду с ДНА, одними из наиболее проявляющихся компонентов шихты являются онионы луковичные структуры (рис. 2, *а, б*). Возможно, данные частицы являются вторичными продуктами термической графитизации наноалмазов, происходящей одновременно с их образова-

нием в ходе детонационного синтеза. Подобным образом онионоподобные луковичные структуры получают экспериментально в вакууме или в инертном газе при температуре выше 1400 °C [20].

Онионы легко выявляются в продуктах детонационного синтеза путем регистрации спектров КРС шихты, особенно при возбуждении в УФЛ-области спектра (рис. 2, *в*). Исследованные продукты изучаемого процесса имели максимум КРС при 1576  $cm^{-1}$ , что прямо указывает на появление онионоподобных форм углерода на поверхности исследуемых наноалмазных частиц [21]. Частичная очистка шихты обработкой концентрированной HCl, нагревание с HCl, обработка комплексо-нами, существенно не меняют характер и интенсивность КРС (рис. 2, *в*, 1, 2, 3), что свидетельствует о прочном взаимодействии онионов с поверхностью исследуемого материала.



**Рис. 2. Электронная микроскопия образцов:**

*a* — онионы в составе шихты; *б* — онионы из парогазовой фазы взрывной камеры; *в* — КРС возбуждение UV ( $\lambda_{ex} = 224$  nm) наноалмазной шихты, 1 — контроль, 2 — обработка HCl, 3 — нагревание с HCl, 4 — обработка комплексом

### Исследование характеристик и свойств наноалмазных продуктов утилизации

С помощью кислотной баротермической очистки шихты, полученной из утилизированных составов ВВ, не содержащих алюминий, выделены детонационные наноалмазы. Проведены исследования характеристик данных частиц. Сравнительный рентгенофазный анализ шихты и ДНА показал, что самыми значительными компонентами, представленными в шихте, являются алмазный и неалмазный углерод, характеризующийся величиной и формой основных пиков на рентгенограмме (рис. 3, а, 1, 2).

В области малых углов рентгеновской дифракции (рис. 3, а, 1) проявляются вещества, содержащие  $sp^2$ -формы углерода, включающие графит, онионы и сажевые частицы. Химическая очистка шихты удаляет перечисленные формы углерода, выделяет детонационные алмазы, о чем свидетельствуют форма и величина пика на кривой (рис. 3, а, 2). Одновременно с этим химическая очистка удаляет зольные примеси, представленные оксидами металлов, проявляющимися на кривой (рис. 3, а, 1) между углеродными  $sp^2$ - и  $sp^3$ -формами.

Типичная дифрактограмма и полученные результаты расчетов свидетельствуют о присутствии кристаллитов с характерными размерами  $r = 4,3$  нм. Электронно-микроскопические и рентгенофазные исследования позволили оценить морфологию наночастиц (рис. 3, б), их агрегатную структуру, свойственную для ДНА. Применение комбинационного рассеяния света в ходе исследований ДНА (рис. 3, в) выявило основной пик интенсивности в области  $1325\text{ см}^{-1}$ , что является ин-

дивидуальным признаком наноалмазного углерода. Значительно менее интенсивно проявляется пик в области  $1580\text{ см}^{-1}$ , вероятно, связанный с  $sp^2$ -аморфными углеродными формами. На основе положения алмазной линии формы кривой КРС проведена оценка размеров кристаллита исследованных наночастиц. Выявленное значение размера составляет менее 5 нм, что хорошо согласуется с показателями дифракции рентгеновского излучения.

Полученные значения характеристик для очищенных ДНА, свидетельствуют о возможности синтеза и выделения ДНА из продуктов утилизируемых ВВ, соответствующего требованиям продукции, приемлемой для последующего применения.

### Характеристики и свойства детонационных микроалмазов

Проведенные исследования по детонационному синтезу при базовых соотношениях компонентов утилизируемого ВВ с использованием различных составов газовой среды в взрывной камере (ВК), а также применение охлаждающих оболочек для ВВ, подтвердили эффективное образование ДНА. Наряду с этим, при использовании тринитротолуола в качестве ВВ, погруженного в охлаждающую среду, удалось обнаружить появление алмазных частиц микронного размера. Полученный порошок первичной детонационной шихты микроалмазов имел черный цвет, но после термоокислительной и кислотной очистки были выделены частицы микронного размера с характерным алмазным блеском (рис. 4, а).

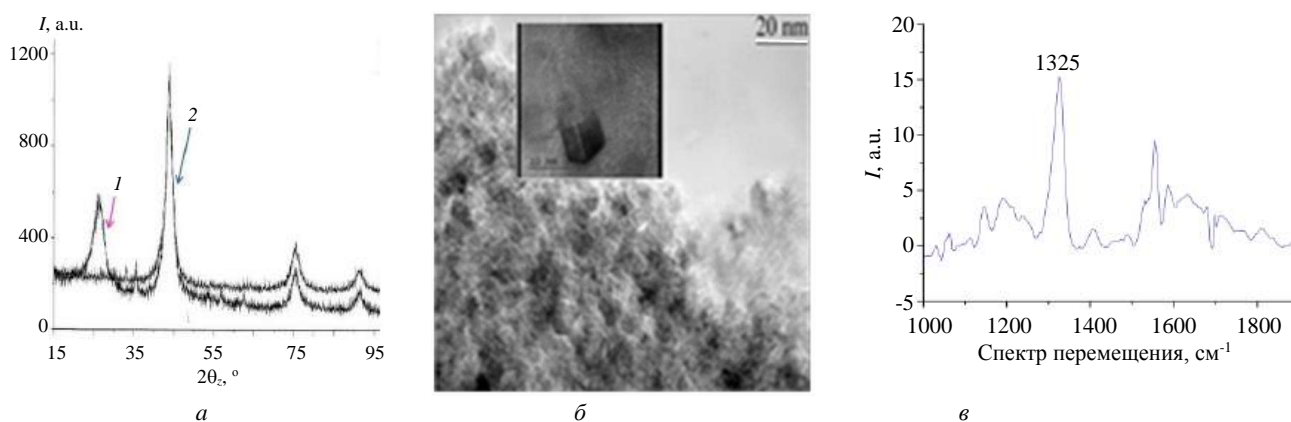


Рис. 3. Дифракционный фазовый анализ:

а — шихта — 1 и ДНА после химической очистки — 2; б — электронная микроскопия ДНА после химической очистки, вставка — отдельная частица ДНА; в — КРС характеристики ДНА при возбуждении UV ( $\lambda_{\text{ex}} = 224\text{ нм}$ )



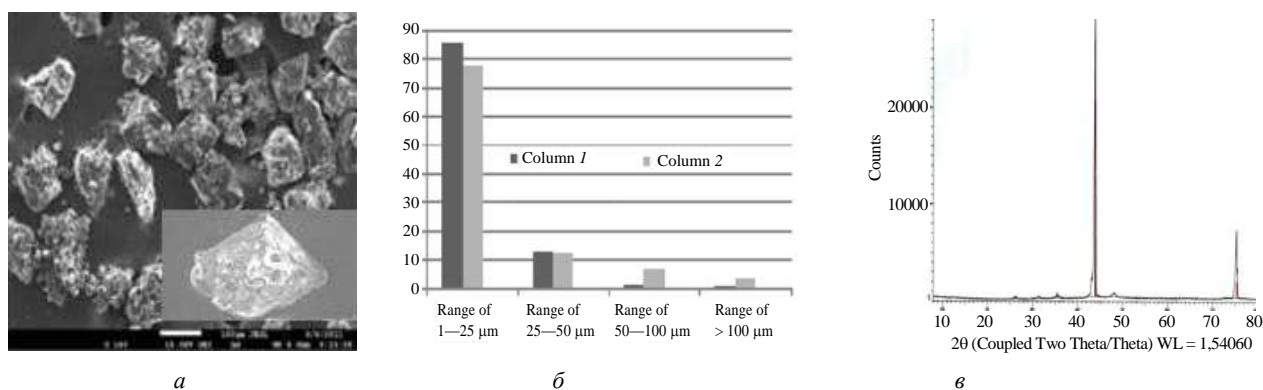


Рис. 4. Электронная микроскопия:

*a* — микроалмазы детонационные, на вставке микроалмаз; *б* — распределение частиц микроалмазов по размерам (%), 1 — оптические измерения, 2 — электронномикроскопические измерения; *в* — дифракционный фазовый анализ микроалмаза

С помощью регистрации светорассеяния удалось установить распределение по размерам частиц микродисперсного порошка алмаза и его свойства (рис. 4, б). Оптические и электронно-микроскопические исследования позволили оценить форму и характерные особенности, включая разновидности граней детонационных микропорошков алмазов. Основная масса кристаллов распределена в диапазоне до 25 мкм (рис. 4, б). Дифракционная картина микроалмазов имеет более совершенную форму по сравнению с наноалмазами, а характер дифракционного пика указывает на присутствие кристаллитов обладающих существенно значимыми размерами по сравнению с ДНА (рис. 4, в). Узкие дифракционные пики на кривых дифракции свидетельствуют о практически бездефектных кристаллах с идеальной структурой. Расчеты показывают, что размер кристаллитов составляет порядка 100 нм. Проведенные рентгенофазовый и электронно-дифракционный анализы образцов свидетельствуют о минимальном содержании примесей графита, а также карбидов металлов в химически очищенных микроалмазах. По данным сканирующей электронной микроскопии, примеси тяжелых элементов Mn, Fe, Ni и W составляли менее 0,5 масс. %.

Результаты, полученные при утилизации взрывчатых веществ, выявили возможность получения микрокристаллов алмаза путем детонационного синтеза в охлаждающей среде. Появление микрочастиц алмаза в шихте было зафиксировано с помощью оптической и электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и комбинационного рассеяния света. Условия детонационного синтеза обеспечивают образование частиц алмазной фазы размером порядка двух процентов от массы используемого взрывчатого вещества в диапазоне размеров до двух десятков микрон, которые имеют четкие края и характерный блеск в оптическом

диапазоне. Дальнейшие исследования позволят получить более подробные характеристики синтезированных алмазных микрочастиц и определить направления их применения.

Сравнительный анализ исследованных характеристик детонационных нано- и микроалмазов, полученных в ходе утилизации ВВ: распределение по размеру частиц, размеров кристаллитов, удельной площади поверхности и ряда других показателей, выявил общие свойства и главные индивидуальные особенности рассматриваемых образований (табл. 1).

Таблица 1

## Характеристики детонационных нано- и микроалмазов

Выделенная форма углерода	Размер кристаллита, нм	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная площадь поверхности, г/м <sup>2</sup>
ДНА	4,3	3,15	280—350
МА	≥100,0	3,41	12—17

В ходе проведенных исследований установлено, что для наноалмазных частиц свойственны размеры кристаллитов порядка 4,3 нм при удельной площади поверхности 280—350 м<sup>2</sup>/г. Для микроалмазов выявлены размеры кристаллита порядка 100 нм и более с удельной площадью поверхности 12—17 м<sup>2</sup>/г. Полученные результаты значений регистрируемых параметров, их анализ, указывают на возможность отнесения исследованных частиц, соответственно, к нано или микрообъектам, что также подтверждается электронной микроскопией. Установленные значения характеристик детонационных алмазов, очищенных от зольных примесей, свидетельствуют о возможном выделении различных структурных форм алмазов в зависимости от требований и назначения продукции, получаемой в ходе утилизации боеприпасов.



### Исследование поликристаллических алмазных продуктов утилизации смеси графит—гексоген

В ходе исследований зависимости характеристик продуктов детонационного синтеза от состава утилизируемых ВВ были получены и выделены поликристаллические алмазы. Данные частицы образовывались при применении прессованных зарядов гексогена (в форме АІХ-1) и коллоидного графита в концентрации 20 %. Полученный результат, по-видимому, подобен ранее проведенным исследованиям по применению промышленных форм гексогена в составе графитовых смесей для получения поликристаллического алмаза [8]. Содержание детонационного алмаза в шихте, полученной из утилизованного ВВ, составляло 15—20 % от концентрации исходного графита. После термоокислительной обработки шихты в потоке воздуха и кислотной очистки было установлено, что выделенные частицы распределяются в диапазоне от 0,01—20 мкм и состоят из поликристаллических блоков (рис. 5, а). Электронная микроскопия выявила размеры индивидуальных поликристаллических блоков в диапазоне 10—200 нм разнообразной формы, имеющих ряд отличий от кристаллических детонационных микроалмазов.

Согласно результатам рентгеновской дифракции, индивидуальные свойства данных частиц имели размеры кристаллитов порядка 12—15 нм и характеризовались своеобразной формой дифракционной кривой, существенно отличающейся от

кривой детонационных микроалмазов (рис. 5, б). Данное явление, по-видимому, связано с поликристаллической структурой, имеющей множество поверхностей отражения, характерных для данных структурных образований. В полученных поликристаллических алмазах, наряду с кубической алмазной фазой, присутствуют включения, содержащие гексогональную фазу алмаза — лонсдейлит (рис. 5, б, в). Данный политип алмаза выявлен в импактных и синтетических алмаз-лонсдейлитных образованиях, свойства которых часто регистрируются в виде дефектов упаковки кристаллической структуры [22, 23]. В микроалмазах, получаемых при детонации тротила в охлаждающей жидкости, наблюдаются аналогичные включения при добавлении в тротил содержащее ВВ 30 % гексогена в форме АІХ-1 (рис. 5, в). Проведенные электронно-микроскопические исследования детонационных микроалмазов указывают на присутствие в образце слоистой алмаз-лонсдейлитной структуры, главным образом представленной кубическим алмазом с чередующимися включениями лонсдейлита, обладающего гексогональной фазой. Это также подтверждается регистрацией данной фазы дифракцией электронов (рис. 5, в). Полученные результаты указывают на проявление и возможное существование в исследованных образцах включений гексогональной фазы  $sp^3$ -углерода, не связанных с собственными дефектами кубической упаковки и динамическими воздействиями на кристаллиты алмазных структур [24].

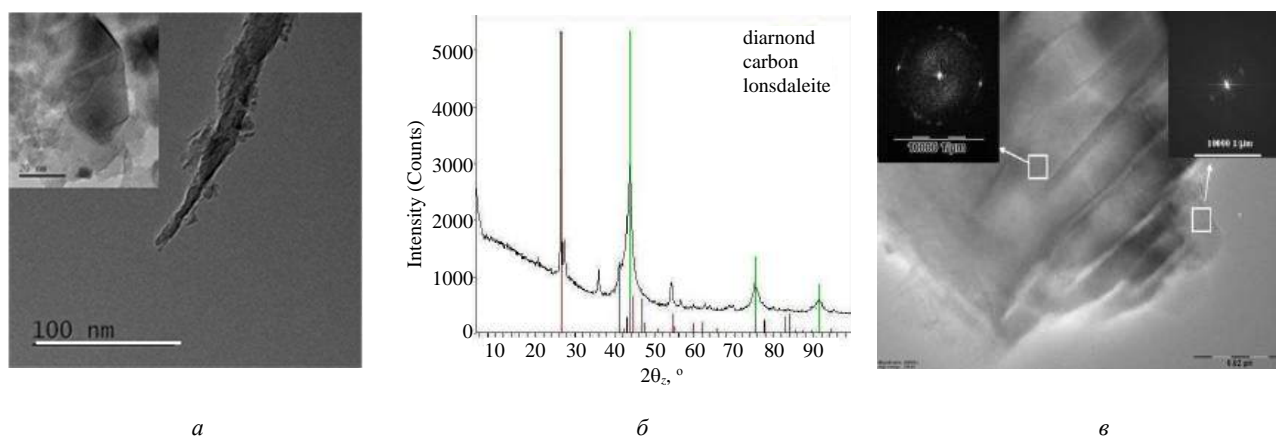


Рис. 5. Электронная микроскопия:

- а — поликристаллические детонационные микроалмазы, на вставке частица поликристаллического микроалмаза;
- б — дифракционный фазовый анализ поликристаллических микроалмазов: микроалмаз (зеленый), графит (коричневый), лонсдейлит (серый);
- в — микрокристаллическая частица алмаза, на вставке дифракция электронов, слева кубический алмаз, на вставке справа включение лонсдейлита

### Продукты детонационного утилизации артиллерийского пороха

Утилизация артиллерийского выстрела обеспечивает получение не только ВВ из снаряда, но и пороховой фракции, извлекаемой из метательного заряда. Проведенные исследования качественного и количественного состава полученного продуктов детонационного синтеза пороховой фракции выявили ряд характерных особенностей, главным из которых является значимое присутствие 6–12-слойных ленточных структур — нанолент (nanoribbons) (рис. 6, а). Аналогичные образования показаны автором в парогазовых продуктах детонационного синтеза шихты ДНА. Сведений о свойствах и характеристиках данных образований недостаточно, что требует дальнейших детальных исследований. По-видимому, возможным аналогом подобных нанолент являются углеродные наноструктуры, получаемые при химическом синтезе из карбидов [25].

Проведение баротермической очистки шихты позволило выделить, а с помощью электронной микроскопии охарактеризовать образующиеся при детонации  $sp^3$ -углеродные наночастицы (рис. 6, б). Основой структуры получаемого алмаза является кубическая форма, однако при изменении утилизируемого состава содержание сопутствующих включений гексагональной  $sp^3$ -формы (лонсдейли-

та) может достигать 10 %. Полученные наночастицы алмаза имели константу кристаллической решетки, равную  $(0,3573 \pm 0,0005)$  нм, при пикнометрической плотности  $3,15$  г/см<sup>3</sup>. Стоит отметить, что выход наноалмазной фазы данного продукта составляет менее 2,5 % от использованного порохового сырья.

### Продукты утилизации смесевых взрывчатых композиций АІХ-2 и смесевое твердого ракетного топлива, содержащих АІ

#### Продукты детонационного синтеза состава TNT / АІХ-2

При утилизации смесового ВВ, содержащего в своем составе тротил—гексоген в форме АІХ-2 с мелкодисперсным алюминием, отмечены отличительные особенности компонентного состава образующейся шихты содержащей детонационные наноалмазы,  $sp^2$ -углерод, а также оксиды железа и алюминия, включая корунд (рис. 7, а). Присутствие алюминия, рост его концентрации в смесовом ВВ, оказывали влияние на индивидуальный состав шихты (рис. 7, б). При определенных соотношениях утилизируемых компонентов ВВ, наряду с  $sp^3$ -углеродом и  $sp^2$ -формами, регистрировалось появление частиц фуллеренов  $C_{60}/C_{70}$ , (рис. 7, в).

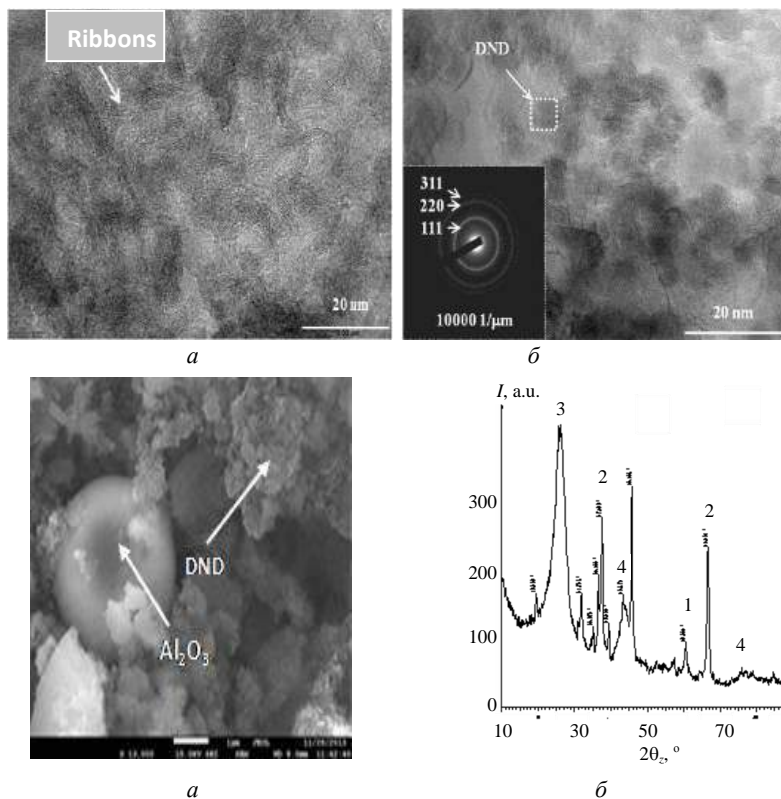


Рис. 6. Электронная микроскопия:

а — наноленты (nanoribbons), полученные в шихте детонационным синтезом из артиллерийского пороха; б — ДНА после химической очистки шихты, полученной детонационным синтезом из артиллерийского пороха, вставка — дифракция электронов ДНА с  $sp^3$ -углеродными индексами

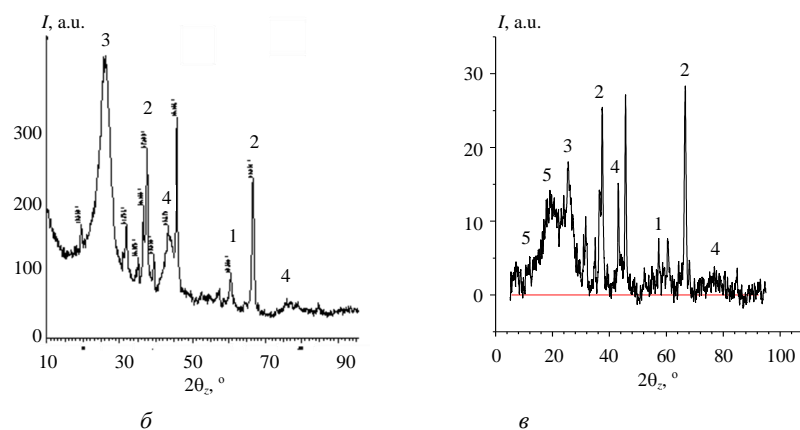


Рис. 7. Электронная микроскопия:

а — электронная микроскопия детонационной шихты с ДНА и частицами  $Al_2O_3$ , полученной из смесового ВВ, содержащего в своем составе тротил—АІХ-2; б — дифрактограмма шихты содержащая: 1 —  $\alpha-Al_2O_3$  (корунд), 2 —  $Al_2O_3$ , 3 — графит, 4 — ДНА; в — фуллерены в составе продуктов утилизации тротил—АІХ-2: 1 —  $\alpha-Al_2O_3$ , 2 —  $Al_2O_3$ , 3 — графит, 4 — ДНА, 5 — фуллерены  $C_{60}/C_{70}$

Данный эффект отмечен при концентрации алюминия до 10 % в составе ВВ. Использование утилизируемой формы гексогена (АІХ-2), при его содержании 15 % и выше, полностью прекращало образование ДНА. При меньших концентрациях наблюдался аномально низкий выход наноалмазов с высоким содержанием оксидов алюминия и зольных металлов в шихте, что критически снижало качество наноалмазной продукции. Влияние концентрации алюминия в составах ВВ, на снижение содержания наноалмазов в продуктах утилизации, вероятно связано со значительным ростом температуры среды, что вызывает глубокие изменения условий во взрывной камере, препятствующие детонационному синтезу (табл. 2).

Таблица 2

Состав шихты при утилизации ВВ, содержащих алюминий

Состав ВВ, вес. %, Тротил/Гексоген/АІ	50/50/0	48/48/4	45/45/10	38/38/14
Содержание ДНА в шихте, вес. %	65,0	23,0	10,0	—
Содержание оксидов АІ в шихте, вес. %, $Al_2O_3/\alpha-Al_2O_3$	—	15/20	6/18	69/21
Содержание фуллеренов $C_{60}/C_{70}$ , вес. %	—	2,5	3,0	—

Полученные результаты показали ограниченные возможности применения гексогена в составе АІХ-2 для детонационного синтеза, что одновременно указывает на бесперспективность ис-

пользования СТРТ в качестве компонента смешанного ВВ для производства наноалмазов, так как продукция характеризуется высоким содержанием мелкодисперсного оксида алюминия.

### Утилизационные продукты сжигания АІХ-2

Для получения утилизируемого материала проводилось выжигание составов АІХ-2 из корпуса снаряда, на специальной площадке полигона (рис. 8, а).

Использование подготовленных для расснаряжения партии артиллерийских снарядов осуществлялось путем нанесения горючего материала на место извлеченного из корпуса изделия взрывателя. Зажигание проводилось специальным огнепроводным шнуром, последовательно для каждого из утилизируемых изделий. После завершения горения и остывания изделия, продукты сгорания извлекались из корпусов и использовались для анализов.

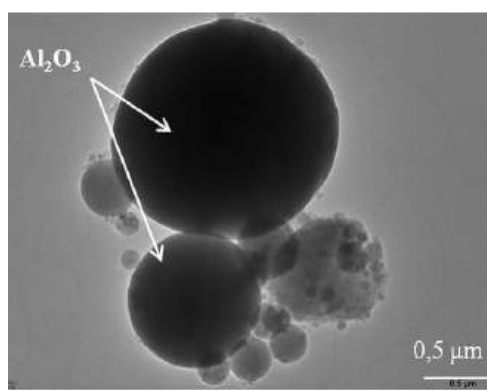
Проведенный рентгенодифракционный анализ позволил установить качественный и количественный состав продуктов сжигания составов АІХ-2 (табл. 3).

Полученный утилизационный материал представлен частицами шарообразной формы в микронном диапазоне размеров (см. рис. 8, б).

Анализ продуктов сжигания показал, что они по своему составу преимущественно состояли из различных форм оксида алюминия, главными из которых были  $\gamma-Al_2O_3$  и  $\alpha-Al_2O_3$ . Оксиды железа и других металлов были представлены в значительно меньшей степени.



а



б

Рис. 8. Выжигание взрывчатых веществ:

а — из корпуса снаряда; б — электронная микроскопия продуктов сжигания взрывчатых веществ

Таблица 3

Состав продуктов сжигания АІХ-2

Наименование продуктов	$\gamma-Al_2O_3/\alpha-Al_2O_3$	$Fe_3O_4/F_2O_3$	$CuO/Cu_2O$
Содержание, %	59,4/29,6	4,1/1,6	2,8/2,5



### Продукты утилизации при сжигании твердотопливных зарядов РС-12М

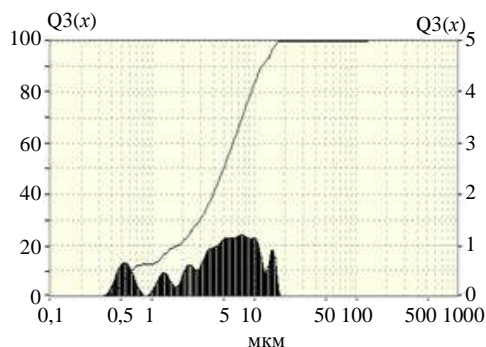
Наиболее совершенной технологией ликвидации твердотопливных зарядов РС-12М, является закрытое сжигание зарядов, сопровождающееся обработкой образующихся продуктов водой и водным нейтрализующим раствором. Экспериментальные исследования морфологии и размера частиц продуктов сжигания показали, что данные образования, содержащие различные форм  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , состоят преимущественно из частиц сферической формы, максимальное количество которых соответствовало размеру частиц порядка 5–10 мкм (рис. 9, а), что подтверждено при исследованиях их гранулометрического состава.

Регистрируемый диапазон изменения размеров частиц 0,4–15 мкм. Данные образования являются полидисперсными структурами. Исследование удельной поверхности продуктов сжигания (в координатах ВЕТ) и расчёты удельной поверхности показали результат  $7,28 \text{ м}^2/\text{г}$ . Полученный размер близок по значению величинам частиц оксида алюминия. Измерение плотности образцов продуктов сжигания выявило плотность порошков продуктов сжигания, соответствующее  $3,77 \text{ г}/\text{см}^3$ , что свидетельствует о присутствии в значительном количестве форм менее плотных, чем корунд.

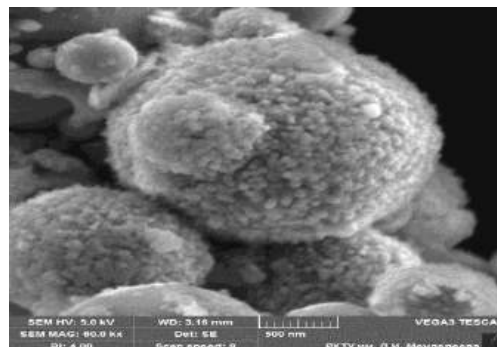
Электронная микроскопия свидетельствует, о том что анализируемые продукты утилизации СТРТ представлены сферическими частицами с размерами в области до 10 мкм (см. рис. 9, б). Их поверхность покрыта более мелкими наноразмерными частицами порядка 20–50 нм. Большая часть данных сферических частиц имеет гладкую, возможно оплавленную поверхность.

Исследование фазового состава конденсированных продуктов сжигания характеризуется наличием основных фаз, таких, как

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ —корунд и суммы трудно идентифицируемых других форм  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Вместе с кристаллическими фазами присутствует аморфная фаза, представленная, по-видимому, аморфными формами оксидов алюминия и кремния. Кристаллические фазы в исследованных продуктах сжигания представлены корундом, содержащимся в концентрации более 50 % и орторомбической формой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Из существующих различных модификаций оксида алюминия в качестве основных продуктов утилизации твердого ракетного топлива регистрируют, главным образом  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , и в значительно меньшем количестве другие формы. Корунд является термодинамически более стабильной модификацией среди оксидов алюминия, что представляет собой значительный научно-технический интерес для использования его в различных областях, таких, как производство металлокерамических фазовых композитов. При этом упрочнение керамики достигается путем добавления низких концентраций металлической фазы [26]. Данные композиты применяют для изнашиваемых деталей и режущих инструментов. Внесение  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в состав композитов придает им превосходные механические свойства, такие, как высокая прочность, твердость, ударная вязкость и стойкость к истиранию [27, 28]. Эти материалы приобретают все большее значение в качестве конструкционного материала для биомедицинских имплантов. Наряду с этим, с помощью 3D-печати была продемонстрирована возможность изготовления пористой керамики из оксида алюминия и карбида кремния. Струйная печать и другие способы нанесения 3D материала [29] предполагают послойную сборку изделий имеющих разнообразную форму. Изготовление трехмерных периодических структур с композиционными элементами предъявляет самые строгие требования к составу и качеству 3D наносимого материала, содержащего  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



а



б

Рис. 9. Электронная микроскопия:

а — распределение по размерам продуктов сжигания зарядов РС-12М;

б — электронная микроскопия продуктов сжигания зарядов РС-12М

Использование корунда в комбинации с различными компонентами, такими, как наноалмазный углерод, служит повышению механических и термических характеристик, а также повышению долговечности композитов, которые можно считать эталонными материалами для XXI в. Извлечение, очистка и целевое использование продуктов утилизации ракетного топлива, в частности оксидов алюминия, может компенсировать часть затрат на утилизацию огромного количества СТРТ и, как следствие, обеспечить решение задач безопасности людей, в том числе проблем, связанных с экологией.

Применение ДНА, получаемых в процессе утилизации, включает эффективное использование данных частиц в качестве композиционного материала в электрохимических металл-алмазных покрытиях, полимерных пленках, мембранах, антифрикционных и противоизносных смазочных присадках, а также в полировальных и шлифовальных композициях [8, 9, 30].

Модификация нанопиллирами и углеродными наночастицами композитных материалов, изготовленных на основе эпоксидной смолы, имеет решающее значение для создания эффективных структур. Данные образования обладают существенными преимуществами, такими, как высокая жесткость, специфическая прочность и низкая усадка материала. Исследования характера влияния включений показывают, что улучшение механических свойств и прочности материалов может быть достигнуто с помощью высокоперспективных наполнителей [31]. Потенциальные свойства углеродных наночастиц, получаемых при утилизации ВВ, определяются уникальными характеристиками поверхностей, высокой механической прочностью, которые при низкой себестоимости производства могут быть легко реализованы в качестве эффективных модификаторов свойств значительного числа композитов [32, 33].

Одним из наиболее перспективных направлений использования наноразмерных углеродных структур является применение исследованных материалов в области преобразования и хранения энергии. Недавние исследования показали, что углеродные наночастицы — онионы, являются идеальным материалом, используемым для создания электродов с повышенной емкостью, обеспечивающих высокую плотность мощности и плотность энергии в электрических устройствах [34—36]. В связи с этим, онионы являются привлекательным материалом для передовых электрохимических применений, таких, как суперконденсаторы или ультраконденсаторы, представляющие собой устройства для быстрого и высокоэффективного хранения энергии. Свойственные

для онионов сочетания уникальной высокой электропроводности, величины площади удельной поверхности и характерных размеров наночастиц, а также возможность крупномасштабного синтеза и химической модификации, сделали этот материал перспективным для целого ряда применений. Продемонстрированы суперконденсаторы с мощностями на объем, которые сопоставимы с электролитическими конденсаторами, но при этом их емкости на четыре порядка выше, чем у промышленных изделий. Микросуперконденсаторы получают электрофоретическим осаждением слоя онионов толщиной в несколько микрометров. Интеграция в микроустройство этих наночастиц, характеризующихся высоким отношением поверхности к объему, улучшает характеристики изделия, обеспечивая эффективный доступ к активному материалу без использования органических связующих. В перспективе увеличение плотности энергии и скорости разряда суперконденсаторов позволит им конкурировать с батареями и обычными электролитическими конденсаторами в ряде применений.

Использование ДНА оказывает заметный эффект на адгезионные свойства ионно-плазменных покрытий [37—39]. Это действие более, чем в полтора раза превышает активность контрольных образцов и активность наноалмазов при электрогальваническом способе нанесения покрытий.

Присутствие наноалмазного углерода в покрытии обеспечивает большое количество  $sp^3$ -связей, которые индуцируют повышенную твердость, необходимую для эффективных трибологических характеристик, и более длительные сроки службы, даже при очень малых толщинах материала.

Эффективное использование ионно-плазменных технологий позволяет осуществлять кластерный перенос наночастиц углеродного материала из катода в состав покрытия и его структурную модификацию. При этом, в ходе напыления обеспечивается структурная организация и фазовые свойства переносимых наноалмазных компонентов. Этот процесс способствует увеличению микротвердости и модификации покрытия путем включения углеродного нанокон компонента в состав материала формируемой кристаллической структурой хрома [40, 41].

Перспективность ионно-плазменных методов нанесения покрытий модифицированных ДНА, обусловлена их эффективностью, экологической безопасностью, высокой чистотой технологических процессов и качеством продукции. Указанные преимущества магнетронного метода распыления обеспечивают создание покрытий с высокой повторяемостью заданного состава, а также высокой стабильностью электромеханических пара-

метров, таких, как удельное сопротивление, микротвердость, трение и другие.

Перспективы использования источников нейтронного излучения не только в фундаментальных исследованиях, но и в сугубо практических целях в ядерной энергетике, материаловедении и медицине, требуют разработки эффективных рефлекторов для формирования и транспортировки излучения потоков нейтронов высокой плотности.

Принципиальным решением для создания новых рефлекторов является использование ультрадисперсной (размерами в субмикронном диапазоне) матрицы из слабопоглощающего материала. Наиболее подходящей структурой для этого является применение детонационных наноалмазов [42]. Для ДНА характерно исключительно низкое поперечное сечение поглощения нейтронов при очень высоком значении когерентного рассеяния, связанного с объемной плотностью, которая выше, чем у других углеродных материалов. Установлено, что характерные размеры доступных наноалмазов находятся в диапазоне оптимальных теоретических значений для применений по рассматриваемому назначению. Было показано, что отражательная способность доступных наноалмазов намного выше, чем у любого альтернативного отражателя [43]. Их эффективность падает в присутствии графитизированных структур, однако это действие исчезает при фторировании ДНА, которое приводит к исчезновению  $sp^2$ -углерода, углерод-водородных связей, кислород-водородных и карбонилсодержащих функциональных групп. В связи с этим, рядом авторов предложен новый класс отражателей на основе разработанных фторированных наноалмазов, которые могут обеспечить непрерывную кривую отражения с высоким альбедо, тем самым минимизировать возможность рассеяния нейтронов через, так называемый, зазор отражения [44]. Высокое диффузионное и квази-зеркальное отражение способствует значительному улучшению производительности источников нейтронов, повышению эффективности доставки нейтронов и, следовательно, обеспечивает условия для стационарных потоков медленных нейтронов в нейтронных приборах. Исследования по данному направлению могут позволить разработать новое поколение нейтронных источников и экспериментальных регистрирующих систем.

Применение поликристаллических алмазных защитных покрытий может обеспечить повышение эффективности и безаварийную эксплуатацию ядерных энергетических реакторов с водяным охлаждением, а также продлить срок активного использования топливных элементов с циркониевым покрытием. Данным способом можно суще-

ственно уменьшить поверхностную коррозию защитных топливных облицовок [45, 46]. Циркониевые сплавы являются стандартными конструкционными материалами, используемыми в активных зонах для защиты от температурных воздействий в сочетании с исключением поглощения кислорода и водорода при базовых и аварийных условиях работы реакторов. Повышение защиты циркониевого слоя покрытиями нанокристаллического алмаза различной толщины может обеспечить продление срока службы ядерной оболочки и, следовательно, усилить эффективность использования ядерного топлива. Данное покрытие может также служить пассивным элементом ядерной безопасности. Таким образом, защита поверхностей циркониевых топливных стержней от коррозии в условиях ядерных реакторов может значительно продлить срок и эффективность использования ядерного топлива [47]. Защитные нанокристаллические слои характеризуются высокой теплопроводностью, обеспечивают экологическую стабильность и проявляют низкую химическую реакционную способность. Как было показано, наноструктурированные поликристаллические углеродные материалы образуют прочные взаимодействия с поверхностью циркониевых теплоделяющих сборок, а также формируют защитное водонепроницаемое покрытие, обладающее более низким окислительным потенциалом, чем циркониевый сплав [48, 49].

Предлагаемое в данной работе новое технологическое решение проблемы производства нано и микроразмерных структур базируется на том, что в качестве исходного сырья возможно использование взрывчатых композиций, получаемых при снаряжении боеприпасов и твердого ракетного топлива. Получение в промышленных масштабах новых форм вещества нано- и микроразмерного формата открывает широкие возможности для применения в нанотехнологических процессах. В связи с этим, создание и использование принципиально новых видов материалов, обладающих уникальными свойствами, позволит резко повысить эффективность продукции, а также снизить затраты на ее производство и эксплуатацию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. DeCarli P. S., Jamieson J. C. Formation of diamond by explosive shock // Science. 1961. V. 133. P. 1821—1823.
2. Cowan G. R., Woodbury N. J., Dunnington B. W., Wood P., Chester W., Holtzman A. Process for synthesizing diamond. US Patent. 1968. № 3. 401, 019.
3. Волков В. В., Даниленко В. И., Елин С. В. Синтез алмаза из углерода в продуктах детонации взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26. № 3. С. 123—125.

4. Greiner N. R., Philips P. S., Johnson J. D. Diamond in detonation soot // *Nature*. 1988. V. 333. P. 440—442.
5. Shenderova O. A., Zhirnov V. V., Brenner D. W. Carbon nanostructures // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2002. V. 27. P. 227—356.
6. Даниленко В. В. Синтез и спекание алмаза взрывом. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 273 с.
7. Shenderova O. A., Gruen D. M. Ultrananocrystalline Diamond synthesis, Properties, and Applications. — Edited by Elsevier, 2012. — 559 p.
8. Даниленко В. В. Взрыв: физика, техника, технология. — М.: Энергоатомиздат, 2010. — 784 с.
9. Vul' A. Ya., Shenderova O. A. Detonations nanodiamond. Science and Applications. 2nd ed.; Eds. Pan Stanford Publishing. 2013. — 321 p.
10. Гордюхин А. А., Горбачёв В. А., Дерибас А. А., Чобанян В. А., Шевченко Н. В. Актуальные проблемы организации промышленного получения детонационного наноматериала из утилизируемых взрывчатых веществ // Информационно-аналитический журнал. Вооружение. Политика. Конверсия. 2009. № 4. С. 34—39.
11. Шевченко Н. В. Перспективы промышленного получения детонационного наноматериала. Междун. науч.-практ. конф. "Промышленная утилизация вооружения, специальной техники и боеприпасов". "ИТЕРПОЛИТЕХ-2012". С. 335—343.
12. Горбачев В. А., Шевченко Н. В., Миронов С. И. Наноалмазные компоненты энергоёмких конденсированных систем. — М.: Издательский дом "Граница". 2022. — 296 с.
13. Тулохонов А. К., Горбачев В. А., Мелешко В. Ю., Гордюхин А. А. Проблемы безопасности и ресурсосбережения промышленной утилизации ракет и боеприпасов. — М.: "Сам Полиграфист", 2015. — 448 с.
14. Горбачев В. А., Гордюхин А. А., Мелешко В. Ю. Теория и практика использования явления кавитации и процессов утилизации зарядов взрывчатых веществ и твердых ракетных топлив. — М.: РАН, 2014. — 255 с.
15. Бланк В. Д., Голубев А. А., Горбачёв В. А., Гордюхин А. А., Дерибас А. А., Чобанян В. А., Шевченко Н. В. Детонационный синтез углеродных материалов при использовании смесей взрывчатых веществ (ВВ) утилизируемых боеприпасов (БП). VI Междун. конф.: Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология. — Троицк. 2009. С. 227.
16. Шевченко Н. В., Горбачев В. А., Чобанян В. А., Сигалаев С. К., Ризаханов Р. Н., Голубев А. А., Кириченко А. Н., Ефремов В. П. Свойства и фазовый состав поверхности детонационных наноалмазов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2016. Т. 59. Вып. 8. С. 440—445.
17. Tomaszewski P. E. Uncertainty in the Grain Size Calculation from X-ray Diffraction Data // *Phase Trans.* 2013. V. 86. P. 260—264.
18. Goudec G., Combau P. Raman Spectroscopy of nanomaterials: How spectra relate to disorder, particle size and mechanical properties // *Progr. Crystal Growth Character. Mater.* 2007. V. 53. P. 1—56.
19. Dahl J. E., Liu S. G., Carlson R. M. K. Isolation and Structure of Higher Diamondoids // *Nanometer-Sized Diamond Molecules*. Science. 2003. V. 299. P. 96—99.
20. Kuznetsov V. L., Chuvilin A. L., Butenko Y. V., Malkov I. L., Titov V. M. Onion-like carbon from ultradisperse diamond // *Chem. Phys. Lett.* 1994. V. 222. P. 343—348.
21. Obratsova E. D., Fum M., Hayshi S., Kuznetsov V. L., Butenkoy Yu. V., Chuvilin A. L. Raman Identification of Onion-Like Carbon // *Carbon*. 1998. V. 36. P. 821—826.
22. Шумилова Т. Г., Майер Е., Исаенко С. И. Природный монокристаллический лонсдейлит // Доклады академии наук. 2011. Т. 441. № 2. С. 236—239.
23. Denisov V. N., Mavrin B. N., Serebryanaya N. R., Blank V. D., Dubitsky G. A., Aksenkov V. V., Kirichenko A. N., Kuzmin N. V., Kulnitskiy B. A., Perezhogin I. A. First-principles, UV Raman, X-ray diffraction and TEM study of the structure and lattice dynamics of the diamond-lonsdaleite system // *Diamond and Related Materials*. 2011. V. 20. P. 951—953.
24. Shevchenko N. V., Sigalov S. K., Visotina E. A., Kazakov V. A., Gorbachev V. A., Rizakhanov R. N. Hexagonal diamond is in detonation nano and microdiamonds. Book of Abstracts. 14<sup>th</sup> International Conference Advanced Carbon Nanostructures. St. Petersburg. 2019. P. 126.
25. Yushin G., Nikitin A., Gogotsi Y. Carbide-Derived Carbon. Nanomaterials Handbook. — Taylor & Francis Group, LLC. 2006. P. 250—293.
26. Palmero P., Sola A., Naglieri V., Bellucci D., Lombardi M., Cannillo V. Elaboration and mechanical characterization of multi-phase alumina-based ultra-fine composites // *J. Mater. Sci.* 2012. V. 47. P. 1077—1084.
27. Bartolomé J. F., Pecharrmán Moya J. S., Martín A., Pastor J. Y., Llorca J. Percolative mechanism of sliding wear in alumina/zirconia composites // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2006. V. 26. P. 2619—2625.
28. Seerden K., Reis N., Evans J., Grant P., Halloran J., Derby B. J. // *J. Am Ceram Soc.* 2001. V. 84. P. 2514.
29. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective // *Compos. Part B*. 2017. V. 110. P. 442—458.
30. Shenderova O. A., Gruen D. M. Ultrananocrystalline Diamond: Syntheses, Properties, and Applications. William Andrew Inc. 2006. — 558 p.
31. Farhana Y., Vijaya P., Rangari K., Vijaya K. Jeelani S. Fabrication and evaluation of carbon nano fiber filled carbon/epoxy composite // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. V. 426. № 1–2. P. 221—228.
32. Сидоров О. И., Осавчук А. Н., Матвеев А. А., Меркулов В. М., Наумов С. П., Антонов Ф. Ф., Сидорова Н. И., Журба А. А., Осипчик В. С., Юртов Е. В., Серцова А. А., Ивашкина В. Н. Модификация эпоксиполимеров наноматериалом. // Пластические массы. 2013. № 10. С. 42—44.
33. Зайчиков Ю. Е., Жегров Е. Ф., Меркулов В. М., Милехин Ю. М., Тепленков В., Архангельский В. В., Беревская Е. Утилизация зарядов твердых ракетных топлив и взрывчатых веществ методом детонационного синтеза алмаза. VII Междун. науч.-практ. конф. "Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов". — М.: Оружие и технологии, 2007. С. 230—235.
34. Bartelmess J., Giordani S. Carbon nano-onions (multi-layer fullerenes): chemistry and applications // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2014. V. 5. P. 1980—1998.
35. Pech D., Brunet M., Durou H., Huang P., Mochalin V., Gogotsi Y. et al. Ultrahigh-power micrometre-sized supercapacitors based on onion-like carbon // *Nat. Nanotechnol.* 2010. V. 5. № 9. P. 651—654.
36. Shevchenko N. V., Gorbachev V. A., Sigalov S. K., Visotina E. A., Efremov V. P. Nanodiamond particles Detonation synthesis of carbon onions and their properties. Book of Abstracts of the 15th International Conference ACNS'2021. — Saint-Petersburg. 2021. P. 161.
37. Ореховская Т. И., Молчан И. С., Тимошков Ю. В. и др. Свойства никелевых композиционных покрытий с ультрадисперсными алмазными частицами различных типов. // Порошковая металлургия. 1999. Т. 22. С. 15—20.
38. Андреев М. А., Кузнецова Г. А., Маркова Л. В., Чекан В. А. Износостойкость композиционных хромовых



покрытий с добавками ультрадисперсных алмазов // Трение и износ. 2001. Т. 22. № 4. С. 423—427.

39. **Andreyev M. A., Kuznetsova T. A., Markova L. V., Chekan V. A.** Influence of the addition of ultradispersed diamonds on the structure of thin nickel ion-plasma coatings // Functional Materials. 2001. № 1. P. 205—208.

40. **Andreyev M. A., Markova L. V., Kuznetsova T. A., Anishchik V.** Ion-beam coatings based on Ni and Cr with ultradispersed diamonds — structure and properties // Vacuum. 2005. V. 78. P. 451—454.

41. **Khrushchov M. M., Marchenko E. A., Levin I. S., Avdyukhinac V. M., Reilyanuc M. D., Shevchenko N. V., Obraztsov E. A.** Structure and Functional Properties of the Coatings Deposited by Sputtering of Targets Based on Chromium and Detonation Nanodiamonds // Russian Metallurgy (Metally) 2020. № 7. P. 786—791.

42. **Nesvizhevsky V. V.** Interaction of neutrons with nanoparticles // Phys. At. Nucl. 2002. V. 65. P. 400.

43. **Lychagin E. V., Muzychka A. Y., Nesvizhevsky V. V., Pignol G., Protasov K. V., Strelkov A. V.** Storage of very cold neutrons in a trap with nanostructured walls // Phys. Lett. B. 2009. V. 679. P. 186—192.

44. **Nesvizhevsky V. V., Köster U., Dubois M., Batisse N., Frezet L., Bosak A. B., Gines L., Williams O.** Fluorinated nanodiamonds as unique neutron reflector // Carbon. 2018. V. 130. P. 799—812.

45. **Fendrych F., Taylor A., Peksa L. et al.** Growth and characterization of nanodiamond layers prepared using the plasma-enhanced linear antennas microwave CVD system // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 374—388.

46. **Kratochvílová I., Škarohlíd J., Ashcheulov P. et al.** // Journal of Materials Processing Technology. 2014. V. 214. № 11. P. 2600—2605.

47. **Motta A. T., Couet A., Comstock R. J.** Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding // Annu. Rev. Mater. Res. 2015. V. 45. P. 311—343.

48. **Ashcheulov P., Škoda R., Taylor A. et al.** Thin polycrystalline diamond films protecting zirconium alloys surfaces: From technology to layer analysis and application in nuclear facilities // Applied Surface Science. 2015. V. 359. P. 621—628.

49. **Škarohlíd J., Ashcheulov P., Škoda R. et al.** Nanocrystalline diamond protects Zr cladding surface against oxygen and hydrogen uptake: Nuclear fuel durability enhancement // Scientific reports. 2017. V. 7. P. 6469—6483.

## Nano and micro-sized utilization products of explosives and solid rocket fuel (Review)

N. V. SHEVCHENKO

JSC "Petrovskiy Scientific Center "FUGAS", Moscow, Russia

*The methods of obtaining, characteristics and properties of nano- and micro-sized products of utilization of high-energy condensed materials were investigated. Disposal was carried out by detonation synthesis and combustion, in which explosives, artillery gunpowder and mixed solid rocket fuel were used as raw materials. Using a set of analytical methods designed to study the properties of nanostructures, measurements were made and the experimental values of the explosive charge and isolated detonation Nanodiamonds (DND) and microdiamonds (MD) are presented. Along with DND, their most manifest components are onion-like structures. The using of hexogen AIX-2 explosive containing aluminum decreases the content of DND significantly. When the explosive composition or artillery gunpowder are used, the appearance of new structural formations, the "nanoribbon", was recorded in the disposal products. In the process of utilization of AIX-2 and mixed solid rocket fuel charges, by the method of burning on ecological utilizer stands, solid fuel combustion products are formed, mainly represented by condensed products. Their composition is represented by aluminum oxides, the main of which is  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (corundum).*

**Keywords:** utilization, explosives, solid rocket fuel, detonation synthesis, nano- and micro-sized particles.

## Анализ параметров сигналов акустической эмиссии, локализованных при статическом нагружении образцов из углепластика с ударным повреждением

Л. Н. СТЕПАНОВА, д-р техн. наук; С. И. КАБАНОВ, канд. техн. наук;  
И. С. РАМАЗАНОВ

Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина, г. Новосибирск, Россия

В. В. ЧЕРНОВА, канд. техн. наук

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

*Проведен контроль процесса разрушения пяти образцов из углепластика Т700 с предварительно нанесенным точечным ударом при их статическом нагружении. Методом акустической эмиссии (АЭ) осуществлялась локация дефектов. С использованием быстродействующей тензометрии определялись напряженно-деформированное состояние (НДС) образцов. Проанализированы основные информативные параметры сигналов АЭ (локация, амплитуда, энергетический параметр MARSE, время нарастания переднего фронта, структурный коэффициент, частота), зарегистрированных антенной, состоящей из пьезо- и волоконно-оптических датчиков. Измерение параметров сигналов АЭ осуществляли в процессе нелинейного изменения механического напряжения, регистрируемого тензодатчиками.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, параметры сигналов, углепластик, пьезо- и волоконно-оптические датчики, статические испытания, тензометрия, тензодатчики.

С расширением области использования композиционных материалов (КМ) в авиации увеличилась потребность в повышении их устойчивости к повреждениям. Причинами разрушения могут быть растрескивания матрицы, разрыв упрочняющих волокон, расслоения, являющиеся следствием ударов, перегрузок, усталости материала, снижающих их прочностные характеристики. В коммерческой авиации объем применения КМ в кон-

струкции летательного аппарата составляет порядка 50 %, а в военных и беспилотных конструкциях — до 80 % [1].

В настоящее время как в зарубежных [2—11], так и в отечественных [12—18] публикациях рассматривается вопрос контроля конструкций авиационно-космической техники из КМ с использованием метода акустической эмиссии (АЭ). Данный метод позволяет в режиме реального времени осуществлять локацию дефектов на начальных стадиях разрушения, автоматизировать процесс измерения, определять степень опасности дефектов.

К числу основных недостатков метода АЭ можно отнести необходимость нагружения исследуемого объекта, низкая помехозащищенность, которая может приводить к появлению ложных сигналов и погрешностям локации. Кроме того, анизотропные свойства КМ оказывают существенное влияние на распространение сигналов АЭ в материале углепластика. Скорость ультразвуковой волны, ее затухание, форма сигналов зависят от направления и схемы укладки армирующих волокон, направления прихода волны. Поэтому работы, связанные с исследованием основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуда, энергетический параметр MARSE, ло-

---

**Степанова Людмила Николаевна**, профессор, начальник сектора по разработке и производству акустико-эмиссионной и тензометрической аппаратуры отделения "Прочность авиационных конструкций".

E-mail: aergruop@ngs.ru, stepanova@stu.ru

**Кабанов Сергей Иванович**, ведущий научный сотрудник сектора по разработке и производству акустико-эмиссионной и тензометрической аппаратуры отделения "Прочность авиационных конструкций".

E-mail: aergruop@ngs.ru

**Рамазанов Илья Сергеевич**, ведущий инженер по разработке акустико-эмиссионной и тензометрической аппаратуры.

E-mail: aergruop@ngs.ru

**Чернова Валентина Викторовна**, доцент кафедры "Электро-техника, диагностика и сертификация"

E-mail: aergruop@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 17 июля 2022 г.

---

© Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С.,  
Чернова В. В., 2022

кация, время нарастания переднего фронта, структурный коэффициент, частота и т. д.) и определением их связи с разрушением образцов в процессе нагружения, являются актуальными [19—22].

В процессе нагружения конструкции определяются координаты источников сигналов АЭ, их энергетическая и частотная составляющие, спектральные характеристики, тип разрушения и оценка степени опасности дефектов [9, 10].

Для композиционных конструкций анализ основных параметров сигналов АЭ важен для определения координат области разрушения и типа дефекта, связанного с состоянием матрицы, волокон или расслоением [14—17]. Разрушение углепластика объекта отражается на изменениях основных параметров сигналов АЭ. Для подтверждения типа дефекта, определенного за счет анализа локализованных сигналов АЭ, осуществляется изготовление шлифов и проводят фрактографии материала композита из этой области [15].

Для снижения массогабаритных характеристик и влияния электромагнитных шумов и помех, уменьшения чувствительности к вибрации, повышения линейности амплитудно-частотной характеристики при контроле композиционных конструкций [2, 3, 23—27] используют волоконно-оптические датчики (ВОД).

Цель работы — определение связи основных информативных параметров сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных антенной, состоящей из пьезо- и волоконно-оптических датчиков, с процессом разрушения образцов из углепластика с ударными повреждениями при статическом нагружении.

### Методика исследования

Выполнены испытания пяти образцов из углепластика Т700 с укладкой из 12 монослоев  $[+45/90/0_6/90/\pm 45]$  с геометрическими размерами  $500 \times 100 \times 2,7$  мм. Концентратор напряжений в виде отверстия диаметром  $d = 14$  мм располагался в центре образцов. На образцы наносили точечные ударные повреждения с энергией 28 Дж. При этом с высоты 0,8 м сбрасывался груз массой 3,54 кг.

Для определения координат источников сигналов АЭ в процессе разрушения образцов на них устанавливали прямоугольную антенну, состоящую из двух преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) типа ПК-01-07 с полосой пропускания (100—700) кГц и двух датчиков ВОД (рис. 1). Датчики подключались к сертифицированной АЭ-системе СЦАД-16.10 (свидетельство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.27. 007А № 40707, регистрационный номер в Государственном ре-

естре средств измерений 45154–10) с "плавающими" порогами селекции [18].

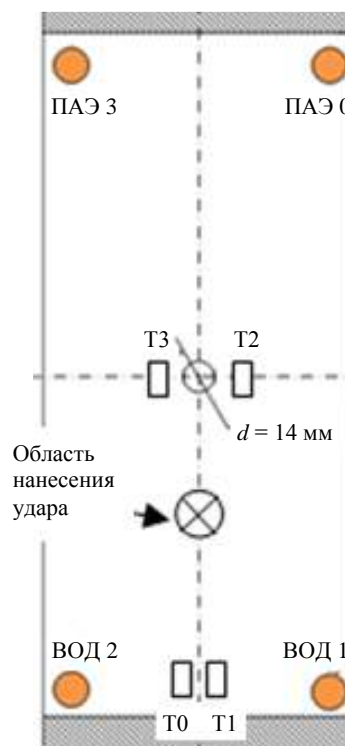


Рис. 1. Схема установки пьезоэлектрических датчиков ПАЭ, волоконно-оптических датчиков ВОД и тензодатчиков Т на образце при нанесении удара

На каждый образец наклеивали четыре проводочных тензодатчика типа ПКС (свидетельство RU. C.28.007.А регистрационный номер № 30935) сопротивлением  $R = 200$  Ом, базой  $L = 12$  мм, коэффициентом тензочувствительности  $K = 2,12$  (см. рис. 1). Деформация регистрировалась быстродействующей микропроцессорной многоканальной тензометрической системой "Динамика-3" (свидетельство RU.C.34.556.А, регистрационный номер № 65494).

Образцы нагружали электрогидравлической машиной MST-100 ступенчатой нагрузкой через интервал, равный  $\Delta P = 20$  кН. Нагрузку на каждой ступени выдерживали до момента времени, при котором наблюдалось снижение активности сигналов АЭ. В процессе испытаний по показаниям тензометрической системы "Динамика-3" определяли особенности изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов. Отмечалось, что при нагрузках более 80 кН в области наклейки тензодатчиков происходили либо скачки, либо нелинейное изменение механических напряжений. Исследовались сигналы АЭ, зарегистрированные при данных изменениях НДС.

Внутренние повреждения материала углепластика влияют на энергетические и частотные характеристики сигналов АЭ. Поэтому при анализе

основных информативных параметров использовали структурный коэффициент. Он соответствует соотношению максимумов вейвлет-преобразования сигнала АЭ в основных частотных диапазонах и характеризует смещение положения частотно-временного максимума энергии, являющегося признаком изменения типа разрушения углепластика. Структурные коэффициенты  $P_{d32}$  и  $P_{d42}$  определяли по формулам [14, 17]:

$$P_{d32}(f) = \frac{\max D_3}{\max D_2}, \quad P_{d42}(f) = \frac{\max D_4}{\max D_2}, \quad (1)$$

где  $D_2, D_3, D_4$  — наборы коэффициентов вейвлет-разложения 2, 3, 4 уровней детализации.

Для расчета структурного коэффициента  $P_{d32}$  были выбраны третий и второй уровни детализации, соответствующие полосам частот 125—250 кГц и 250—500 кГц, а для расчета структурного коэффициента  $P_{d42}$  — четвертый и второй уровни, соответствующие полосам частот 63—125 кГц и 250—500 кГц.

### Полученные результаты и их обсуждение

Первый образец нагружали до полного разрушения, которое произошло при нагрузке  $P = 230$  кН. Максимальное механическое напряжение составило 902 МПа, а изменения параметров сигналов АЭ рассматривали в момент времени, соответствующий скачку механических напряжений, наблюдаемому при нагрузке  $P = 80$  кН. Регистрация сигналов АЭ осуществлялась в моменты времени, предшествующие скачку механического напряжения (табл. 1).

Были выделены четыре временных интервала длительностью по 60 с. В первый интервал времени при нагрузке 70 кН регистрировались сигналы АЭ, при которых в образце не было нелинейных изменений механического напряжения, определенного тензодатчиками. Во второй интервал времени тензодатчиком Т2 регистрировался скачек напряжений при нагрузке, равной 80 кН. В третий интервал времени сразу после скачка механического напряжения регистрировались сигналы АЭ при выдержке нагрузки на уровне 80 кН. В четвертый интервал времени регистрировались сигналы АЭ, локализованные при дальнейшем повышении нагрузки.

В первом интервале времени  $\Delta t_1 = 300—360$  с, включающем нелинейное изменение величины механических напряжений в зоне наклейки тензодатчика Т2, было зарегистрировано значительное повышение энергетического параметра  $MARSE$  (см. табл. 1). Во втором интервале времени  $\Delta t_2 = 360—420$  с в момент скачка механических напряжений и в третьем интервале  $\Delta t_3 = 420—480$  с, появившемся сразу после скачка, наблюдалось уменьшение структурного коэффициента с последующим его повышением при четвертом интервале времени  $\Delta t_4 = 480—540$  с. Следует отметить увеличение медианной частоты на втором временном интервале для сигналов, регистрируемых со всех датчиков. При нагрузке 80 кН, составляющей 35 % от разрушающей, в первом образце происходило разрушение материала углепластика, сопровождающееся изменением механического напряжения, увеличением энергетических и частотных параметров сигналов АЭ.

Таблица 1

Основные информативные параметры сигналов АЭ, наблюдаемые в процессе активного разрушения первого образца

Параметры сигналов АЭ	Временной интервал, с	Регистрирующие датчики сигналов АЭ			
		ПАЭ 0	ВОД 1	ВОД 2	ПАЭ 3
$MARSE$ , мВ·мкс	300—360	113,6	177,2	48,4	216,6
	360—420	231,7	212,3	117,6	494,0
	420—480	38,2	35,9	7,2	154,1
	480—540	58,7	82,7	11,5	261,8
Структурный коэффициент, $P_{d32}$	300—360	4,2	2,9	1,5	4,7
	360—420	3,1	2,3	2,1	3,1
	420—480	3,4	1,5	1,2	2,9
	480—540	4,5	1,8	1,6	3,7
Время нарастания, мкс	300—360	47,4	35,6	13,5	66,0
	360—420	43,4	48,4	35,5	84,9
	420—480	21,6	18,5	3,4	36,6
	480—540	70,1	48,0	3,5	55,9
Медианная частота, кГц	300—360	160,0	201,2	267,9	160,0
	360—420	288,0	241,8	267,5	240,0
	420—480	221,8	301,6	335,9	324,0
	480—540	189,0	251,7	296,2	193,7

Нагружение второго образца выполняли до нагрузки 200 кН. Максимальное напряжение ( $\sigma = 1100$  МПа) было зарегистрировано на последней ступени нагружения. В процессе обработки информации полученная локация сигналов АЭ была разделена на активные области, которые характеризовали процессы разрушения второго образца (рис. 2).

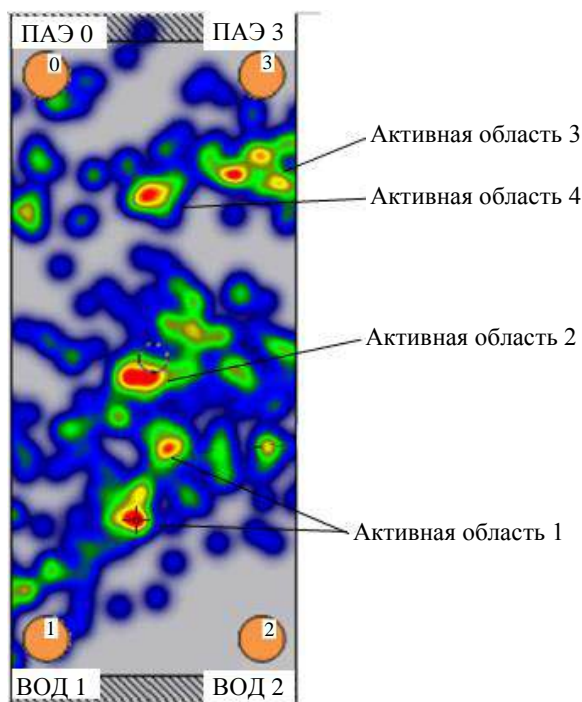


Рис. 2. Обозначение активных областей на локационной картине второго образца

Активная область 1 локации соответствовала расположению предварительно нанесенного ударного повреждения. При этом сигналы АЭ начинали регистрироваться при нагрузке, изменяющейся

от 60 до 140 кН. Активная область 2 локации была расположена в зоне концентратора напряжения (отверстия) и начинала формироваться при увеличении нагрузки до 60 кН. При этом регистрация сигналов АЭ продолжалась до нагрузки 180 кН.

Активная область 3 состояла из сигналов АЭ, локализованных в области установки пьезоэлектрического датчика ПАЭ 3. При визуальном осмотре второго образца видимых дефектов на нем обнаружено не было. Это указывало на то, что источником являлось разрушение клеевого соединения дюралюминиевых захватов второго образца. Между датчиками ПАЭ 0 и ПАЭ 3 была сформирована активная область локации 4, которая характеризовалась расслоением и разрушением верхних монослоев, определяемых визуально.

При увеличении нагрузки второго образца до  $P = 120$  кН в области наклейки тензодатчиков Т2 и Т3 наблюдался скачок механических напряжений и определены основные параметры сигналов АЭ (табл. 2). В первый интервал времени от 650 до 760 с нагрузка была равна 100 кН. Во втором интервале времени от 760 до 790 с регистрировались сигналы АЭ при увеличении нагрузки от 100 до 120 кН. Третий и четвертый интервалы времени соответствовали выдержке нагрузки, равной 120 кН, и переходу на следующую ступень нагружения.

При анализе сигналов АЭ, зарегистрированных всеми каналами АЭ-системы в процессе нагружения второго образца, было установлено, что первый канал АЭ-системы, к которому был подключен датчик ВОД 1, работал нестабильно. Поэтому в табл. 2 он не включен. Зарегистрированные данным каналом сигналы АЭ являлись шумами, поэтому для них информативные параметры не рассматривались.

Таблица 2

Основные информативные параметры сигналов АЭ, наблюдаемые в процессе активного разрушения второго образца

Параметры сигналов АЭ	Временной интервал, с	Регистрирующие датчики сигналов АЭ		
		ПАЭ 0	ВОД 2	ПАЭ 3
MARSE, мВ·мкс	650—760	182,7	15,0	189,7
	760—790	223,1	15,1	231,1
	790—890	228,8	11,6	210,0
	890—950	199,8	11,2	167,0
Структурный коэффициент, $P_{d32}$	650—760	2,36	7,42	2,82
	760—790	2,80	7,13	2,82
	790—890	2,81	3,34	2,94
	890—950	2,50	5,30	2,77
Время нарастания, мкс	650—760	82,1	225,5	90,9
	760—790	87,7	301,9	90,3
	790—890	74,0	357,2	77,6
	890—950	71,5	373,1	74,1
Медианная частота, кГц	650—760	175,5	174,9	160,7
	760—790	163,2	174,1	162,3
	790—890	164,6	188,0	155,3
	890—950	170,7	186,8	163,0

Энергетический параметр *MARSE* сигналов АЭ увеличивался ко второму и третьему интервалам времени, а на четвертом интервале наблюдалось его уменьшение. При этом для сигналов, зарегистрированных датчиками ПАЭ 0 и ПАЭ 3, данное изменение было более заметным, чем для сигналов, зарегистрированных датчиком ВОД 2. Структурные коэффициенты сигналов АЭ, зарегистрированных пьезоэлектрическими датчиками, незначительно увеличивались на втором и третьем интервалах времени нагружения, а медианная частота — уменьшалась (см. табл. 2). У сигналов, зарегистрированных датчиком ВОД 2, отмечалось уменьшение значений структурного коэффициента на втором и третьем интервалах времени, а при переходе к четвертому интервалу — увеличение.

Сопоставление локации с изменениями параметров сигналов АЭ показывает, что активный источник анализируемых сигналов был расположен в областях 1 и 2 (см. рис. 2) рядом с установленным датчиком ВОД 2. Поэтому вывод о типе разрушения был сделан по изменению сигналов, зарегистрированных этим датчиком. Поскольку в соответствии с работами [14—16] уменьшение значения структурного коэффициента характеризует разрушение матрицы, то дальнейшее повышение нагрузки приводило к началу разрушения волокон, о чем свидетельствовало увеличение структурного коэффициента (см. табл. 2).

Максимальная нагрузка при испытании третьего образца составила  $P = 200$  кН. Первые сигналы АЭ были локализованы при увеличении нагрузки до 40 кН. При этом их максимальная суммарная амплитуда была равна 1,6 В. Активная локация сигналов отмечалась при увеличении нагрузки до 100 кН, но значение суммарной амплитуды при этом оставалось равным 1,6 В.

При нагрузке 120 кН в третьем образце происходили изменения структуры материала углепластика, которые приводили к скачкам механических напряжений в области наклейки тензодатчиков Т0, Т1 и Т2 (см. рис. 1). При этом наблюдалось увеличение области локации сигналов АЭ и повышение суммарной амплитуды в два раза (до 3,2 В). Для данного этапа нагружения был выполнен анализ медианных значений основных информативных параметров сигналов АЭ (табл. 3).

Для третьего образца были рассмотрены два структурных коэффициента  $P_{d32}$  и  $P_{d42}$ , которые рассчитывались по формулам (1). Анализ результатов (см. табл. 3) показал, что в полосе частот 63—125 кГц, соответствующей уровню детализации  $D_4$ , энергия сигналов АЭ была больше, чем в полосе частот 125—250 кГц, соответствующей уровню детализации  $D_3$ . Поэтому дальнейший анализ проводили для структурного коэффициента  $P_{d42}$ .

Таблица 3

Основные информативные параметры сигналов АЭ, наблюдаемые в процессе активного разрушения третьего образца

Параметры сигналов АЭ	Временной интервал, с	Регистрирующие датчики сигналов АЭ			
		ПАЭ 0	ВОД 1	ВОД 2	ПАЭ 3
<i>MARSE</i> , мВ·мкс	104—141	119,5	5,0	4,9	118,3
	288—317	97,9	7,3	5,3	99,2
	459—496	109,5	19,5	5,6	141,0
	514—637	84,5	28,7	5,5	111,5
Структурный коэффициент, $P_{d32}$	104—141	6,8	1,5	1,4	5,7
	288—317	7,2	1,9	1,5	6,0
	459—496	6,3	2,1	1,6	6,5
	514—637	6,2	2,0	1,5	6,6
Структурный коэффициент, $P_{d42}$	104—141	11,5	2,3	2,1	11,8
	288—317	10,8	2,7	2,7	10,8
	459—496	10,6	3,1	2,7	14,2
	514—637	11,0	2,9	2,4	15,1
Медианная частота, кГц	104—141	226,0	236,0	281,0	208,0
	288—317	226,0	198,0	196,0	210,0
	459—496	224,0	207,0	201,0	189,0
	514—637	220,0	226,0	224,0	183,0



При нагружении третьего образца локация сигналов АЭ смещалась в область установки пьезоэлектрических датчиков ПАЭ, поэтому тип разрушения определяли по изменению параметров, регистрируемых этими датчиками. Энергетический параметр *MARSE*, рассчитываемый по сигналам с датчиков ПАЭ, на втором интервале уменьшался, а на третьем — увеличивался. Ко второму интервалу времени отмечалось уменьшение структурных коэффициентов сигналов АЭ, зарегистрированных датчиками ПАЭ. На третьем и четвертом интервалах величины структурных коэффициентов увеличивались (см. табл. 3). Таким образом, до скачка механического напряжения в образце происходило разрушение матрицы, а после скачка — были зарегистрированы сигналы, характеризующие начало разрушения волокна [14–16].

Уменьшение параметра *MARSE* на четвертом интервале времени было связано с тем, что он соответствовал выдержке образца при постоянной нагрузке 120 кН, что приводило к снижению активности сигналов АЭ и свидетельствовало о замедлении процесса дефектообразования.

При испытаниях четвертого образца максимальная нагрузка составила 195 кН. Изменение механического напряжения в области наклейки всех тензодатчиков происходило линейно до нагрузки 80 кН. Далее возникал скачок (рис. 3), при этом на тензодатчиках Т0 и Т1 изменение составило более 50 МПа, а на тензодатчиках Т2 и Т3 — не более 5 МПа.

Данная нагрузка характеризовала начало активной локации сигналов АЭ в области отверстия четвертого образца (рис. 4, а). После ее сохранения на этом уровне, механические напряжения начали изменяться нелинейно. При этом осуществлялась локация группы сигналов АЭ в области ударного повреждения (рис. 4, б).

Дальнейшее повышение нагрузки приводило к активной локации сигналов АЭ в области отверстия. После возрастания нагрузки до 180 кН было зарегистрировано уменьшение механических напряжений в области наклейки тензодатчиков Т0 и Т1 в среднем на 24,5 МПа (см. рис. 3). При этом был зарегистрирован новый активный источник сигналов АЭ в верхней части образца, продолжавший оставаться активным до конца испытаний (рис. 4, в).

Выполненный анализ основных информативных параметров сигналов АЭ в областях локации (табл. 4) показал, что наиболее заметные отличия в значениях рассмотренных параметров наблюдались у энергетического параметра *MARSE*. Отмечалось, что в области разрушения энергия сигналов АЭ, зарегистрированных датчиками ПАЭ, была в 1,5 раза больше, чем в области ударного повреждения и отверстия. При этом энергетический параметр *MARSE* сигналов, зарегистрированных датчиками ВОД в области разрушения, наоборот был в 1,5 раза меньше, чем в области ударного повреждения и отверстия. Это соответствовало тому, что разрушения располагались ближе к датчикам ПАЭ 0 и ПАЭ 3 (см. рис. 4, в).

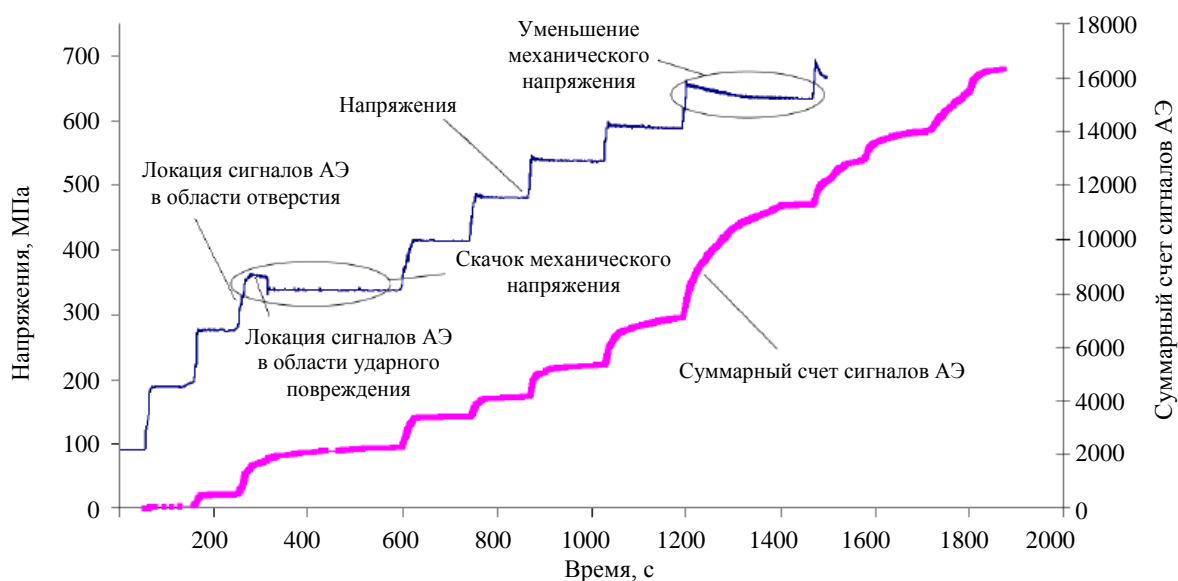


Рис. 3. Экспериментальная зависимость механического напряжения и суммарного счета сигналов АЭ от времени при нагружении четвертого образца

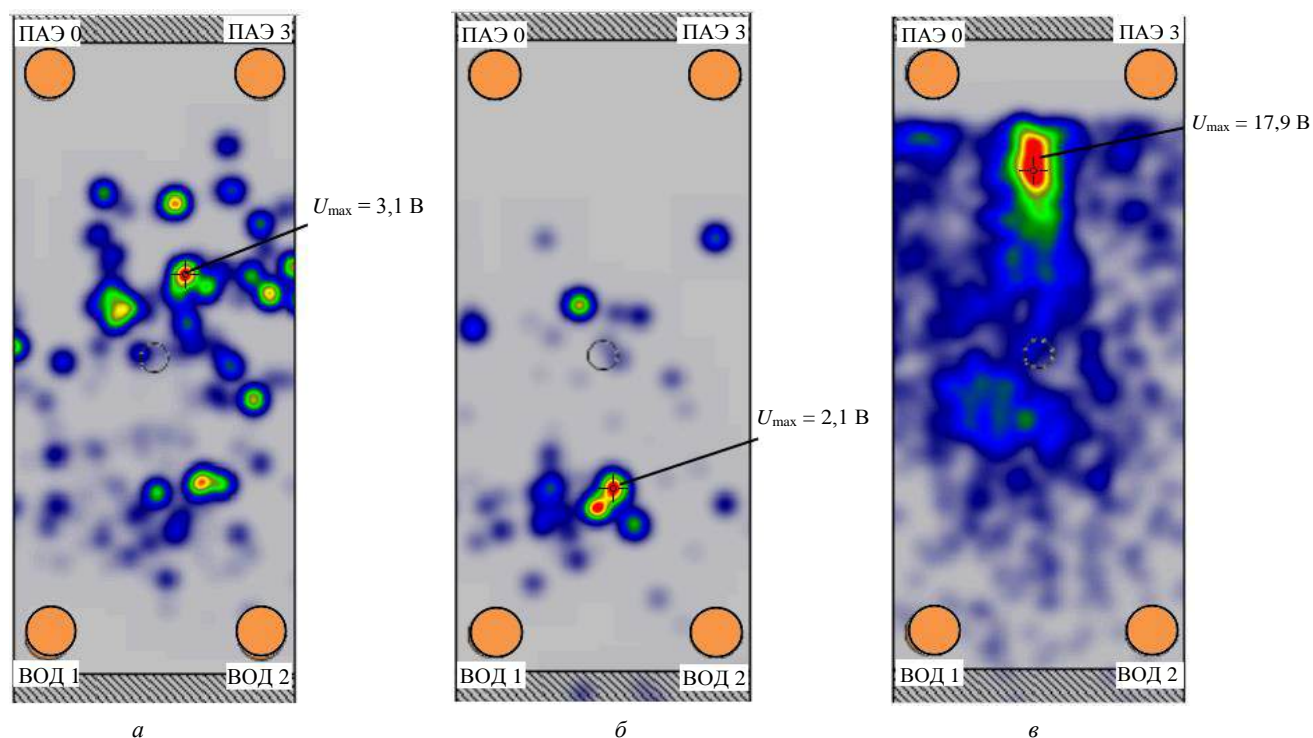


Рис. 4. Локация сигналов АЭ:

*а* — в области концентратора напряжений четвертого образца при повышении нагрузки до 80 кН;  
*б* — в области ударного повреждения при нелинейном изменении механических напряжений;  
*в* — при нагрузке 180 — 220 кН

Таблица 4

Основные информативные параметры сигналов АЭ, наблюдаемые в процессе активного разрушения четвертого образца

Параметры сигналов АЭ	Область локации сигналов АЭ	Регистрирующие датчики сигналов АЭ			
		ПАЭ0	ВОД 1	ВОД 2	ПАЭ3
MARSE, мВ·мкс	Ударное повреждение	376,6	143,1	44,5	364,8
	Отверстие	344,1	105,3	32,2	297,0
	Разрушение (нагрузка от 180 кН)	534,2	74,3	18,4	467,9
Структурный коэффициент, $P_{d32}$	Ударное повреждение	2,3	3,7	4,0	2,7
	Отверстие	2,3	3,7	3,4	2,8
	Разрушение (нагрузка от 180 кН)	2,3	4,6	3,3	2,8
Медианная частота, кГц	Ударное повреждение	226,4	152,5	153,2	211,6
	Отверстие	224,8	155,8	162,7	212,3
	Разрушение (нагрузка от 180 кН)	225,3	147,9	163,8	207,4

Рассмотрены параметры сигналов АЭ в моменты времени, когда наблюдалось нелинейное изменение механических напряжений в материале четвертого образца. Для этого были определены средние значения параметров в четырех временных интервалах. Отмечалось, что в момент време-

ни, соответствующий нелинейному изменению напряжений, структурный коэффициент сигналов от датчика ВОД 1 уменьшался. В соответствии с работами [14—16] уменьшение значения структурного коэффициента при увеличении нагрузки характеризует процесс разрушения матрицы.

Кроме того, в данный момент времени также наблюдалось увеличение энергетического параметра *MARSE*. Датчик ВОД 1 был расположен близко к области ударного повреждения и характеризовал начало разрушений.

Наибольшие изменения механических напряжений были обнаружены в области наклейки тензодатчиков Т2 и Т3 (см. рис. 1), которые располагались у отверстия образца, а нелинейный характер изменения напряжения отмечался в области наклейки тензодатчика Т0. В момент времени  $t = 200\text{—}220$  с, соответствующий увеличению нагрузки до 80 кН, происходило уменьшение механического напряжения, регистрируемого тензодатчиком Т0, что могло быть связано с началом разрушения в области ударного повреждения. Через промежуток времени  $t = 800$  с при нагрузках более 120 кН (и в момент ее выдержки при нагрузке 120 кН) наблюдалось постепенное уменьшение механических напряжений в области наклейки тензодатчика Т0. При достижении нагрузкой величины  $P = 180$  кН через промежуток времени  $t = 1450$  с произошел обрыв данного тензодатчика. При визуальном осмотре было обнаружено разрушение тензодатчиков Т0, Т1 (см. рис. 1) и верхних монослоев четвертого композиционного образца под ними.

Пятый образец был нагружен до 180 кН, а максимальное механическое напряжение составляло 950 МПа и было достигнуто при его разрушении. При испытаниях определяли область локации, со-

ответствующую зоне нанесения ударного повреждения.

При нагрузке, равной 120 кН, и дальнейшем ее увеличении наблюдалось нелинейное изменение механического напряжения материала образца в зоне наклейки тензодатчика Т0. В этой области происходило уменьшение напряжения на 10 МПа. После превышения нагрузкой значения 120 кН на всех тензодатчиках отмечалось уменьшение механических напряжений при выдержке постоянного значения нагрузки на данной ступени нагружения. Поэтому для анализа параметров сигналов АЭ был выбран временной интервал, начиная от нагрузки 100 кН, которая предшествовала нелинейному изменению механических напряжений (табл. 5).

Отмечалось, что энергетический параметр *MARSE* и структурный коэффициент уменьшались при работе во втором временном интервале. При этом энергетические параметры (*MARSE* и амплитуда) продолжали уменьшаться при дальнейшем увеличении нагрузки. Структурный коэффициент на временных интервалах 3 и 4 незначительно изменялся и это сопровождалось уменьшением медианной частоты. Это означало, что энергия сигналов смещалась в область низких частот. При этом в нижней части пятого образца в области установки датчиков ВОД начинался процесс разрушения волокон, о чем свидетельствовало постепенное увеличение параметров *MARSE* и структурного коэффициента [14—16].

Таблица 5

**Основные информативные параметры сигналов АЭ, наблюдаемые в процессе активного разрушения пятого образца**

Параметры сигналов АЭ	Временной интервал, с	Регистрирующие датчики сигналов АЭ			
		ПАЭ 0	ВОД 1	ВОД 2	ПАЭ 3
<i>MARSE</i> , мВ·мкс	444—579	228,1	302,5	15,2	223,3
	579—714	157,2	275,6	7,1	162,9
	714—849	156,9	278,5	6,8	167,1
	849—984	135,7	243,9	7,3	150,8
Структурный коэффициент, $P_{d32}$	444—579	2,03	1,64	3,02	2,13
	579—714	1,94	1,68	4,24	2,10
	714—849	2,34	1,69	4,04	2,36
	849—984	2,32	1,72	3,08	2,39
Структурный коэффициент, $P_{d42}$	444—579	0,89	0,51	3,76	0,86
	579—714	0,84	0,47	3,26	0,81
	714—849	1,19	0,52	4,06	1,01
	849—984	1,41	0,58	3,45	0,97
Медианная частота, кГц	444—579	208,2	225,8	169,4	206,4
	579—714	210,4	226,5	218,4	206,8
	714—849	198,5	225,6	228,8	199,4
	849—984	194,0	225,0	210,8	194,1

## Выводы

Выполнены статические испытания пяти образцов из углепластика T700 с предварительно нанесенными точечными ударами. Контроль процесса разрушения образцов проводили с использованием метода АЭ и тензометрии. Анализировали сигналы, регистрируемые из областей локации, соответствующие активному разрушению углепластика.

Основные информативные параметры сигналов АЭ (локация, амплитуда, энергетический параметр *MARSE*, время нарастания переднего фронта, структурный коэффициент, частота и т. д.) были зарегистрированы при нелинейном изменении механических напряжений. Показано, что наиболее чувствительными к разрушению образцов являлись энергетический параметр *MARSE* и структурные коэффициенты.

При скачках механического напряжения происходило увеличение энергетического параметра *MARSE* и уменьшение структурного коэффициента, что характеризовало разрушение матрицы. Дальнейшее увеличение нагрузки приводило к началу разрушения волокон, о чем свидетельствовало увеличение структурного коэффициента [14—17]. Выполненные исследования позволяют по изменению информативных параметров сигналов АЭ определять тип разрушения и степень опасности локализуемых дефектов в композиционных конструкциях. Это особенно важно при создании бортовых систем диагностики авиационно-космических летательных аппаратов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Кабанов С. И. Методика браковки дефектов в образцах из углепластика по параметрам сигналов акустической эмиссии при статическом и тепловом нагружении // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 6. С. 4—13.
2. Lexmann M., Bueter A., Schwarzaup O. Structural Health Monitoring of composite aerospace structures with Acoustic Emission // J. Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172—193.
3. Kahandawa G. C., Epaachchi J., Wang H. Use of FBG sensors for SHM in aerospace structures // Photonic Sensors. 2012. V. 2. № 3. P. 203—214.
4. Sinan Kalafat, Markus G. R. Sause. Acoustic emission source localization by artificial neural networks // Structural health monitoring. 2015. P. 633—647.
5. Sikdar S., Mirgl P., Bantrjee S., Ostachowicz W. Damage-induced acoustic emission source monitoring in a honeycomb sandwich composite structure // Composites. Part B. 2019. V. 158. P. 179—188.
6. Pappu R. P. Acoustic emission detection using optical fiber sensors for the aerospace applications / Birmingham — Astor Univ. 2011. — 177 p.
7. Markus G. R. Sause. Acoustic emission signal propagation in damaged composite structures // Acoustic Emission. 2013. V. 31. P. 1—18.
8. Markus G. R. Sause. On use of signal features for acoustic emission source identification in fibre-reinforced composites // J. Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 125—136.
9. Aljets D. Acoustic emission location in composite aircraft structures using modal analysis. — University of Glamorgan. 2011. — 163 p.
10. Hill E. K. Neural network burst pressure prediction in tall graphite — epoxy pressure vessels from acoustic emission data // J. Acoustic Emission. 2012. V. 30. P. 167—179.
11. Cardoni M., Giannto A., Giglio M. A low frequency lamb-waves based structural health monitoring of an aeronautical carbon fiber reinforced polymer composite // J. Acoustic Emission. 2014. V. 32. P. 1—20.
12. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Лебедев Е. Ю. Использование метода акустической эмиссии при неразрушающем контроле объектов транспорта // Общероссийский научно-технический журнал "Полет". 2022. № 2. С. 22—34.
13. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Петрова Е. С. Прочностные испытания гофрированного авиационного лонжерона из углепластика // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 3. С. 18—25.
14. Степанова Л. Н., Батаев В. А., Лапердина Н. А., Чернова В. В. Акустико-эмиссионный способ определения типа дефекта структуры образца из углепластика. Патент 2 676 209 РФ. Заявка № 2017145888. Оpubл. 26.12.2018. Бюл. 2018. № 10. С. 17.
15. Степанова Л. Н., Батаев В. А., Чернова В. В. Исследование разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с использованием метода акустической эмиссии и фрактографии // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 26—33.
16. Степанова Л. Н., Рамазанов И. С., Батаев В. А., Чернова В. В. Анализ зависимости параметров сигналов акустической эмиссии от изменения структуры углепластика при прочностных испытаниях образцов // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 2. С. 58—65.
17. Степанова Л. Н., Чернова В. В. Анализ структурных коэффициентов сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении образцов из углепластика с ударными повреждениями // Контроль. Диагностика. 2017. № 6. С. 34—41.
18. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Лебедев Е. Ю. Многоканальное акустико-эмиссионное устройство. Патент № 2 396557 РФ. Заявка № 2008149724. Оpubл. 10.08.2010. Бюл. 2010. № 22. С. 12.
19. Мурашов В. В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. — М.: ООО Издательский дом "Спектр", 2016. — 244 с.
20. Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О., Терентьев В. С. Методы одновременного контроля деформации и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 2. С. 44—51.
21. Сорокин К. В., Мурашов В. В. Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 3(36). С. 90—94.
22. Ахметханов Р. С., Дубинин Е. Ф. Метод анализа акустических сигналов при диагностике композиционных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 2. С. 106—112.
23. Soman R., Wee J., Peters K. Optical Fiber Sensors for Ultrasonic Structural Health Monitoring: A Review // Sensors. 2021. V. 21(21). P. 7345. <https://doi.org/10.3390/s21217345>
24. Sai Y., Zhao X., Hou D., Jiang M. Acoustic Emission Localization Based on FBG Sensing Network and SVR Algorithm // Photonic sensors. 2017. V. 7. № 1. P. 48—54.

25. Бочкова С. Д., Волковский С. Д., Ефимов М. Е., Дейнеко И. Г., Смирнов Д. С., Литвинов Е. В. Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 73—77.

26. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Чернова В. В. Локация сигналов акустической эмиссии от ударных воздействий на образец из углепластика при использовании антенн

из пьезо- и волоконно-оптических датчиков // Дефектоскопия. 2022. № 4. С. 3—13.

27. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С., Чернова В. В., Кузнецов А. Б. Локация сигналов акустической эмиссии в образцах из дюралюминия и углепластика с использованием антенны, состоящей из волоконно-оптических датчиков и пьезопреобразователей // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 2. С. 18—29.

## **Analysis of the parameters of acoustic emission signals localized under static loading of carbon fiber specimens with impact damage**

L. N. STEPANOVA, S. I. KABANOV, I. S. RAMAZANOV

Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin, Novosibirsk, Russia

V. V. CHERNOVA

Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

*The control of the process of destruction of five samples of carbon fiber T700 under static loading with a preliminary applied point impact was carried out. Defects were located by the acoustic emission (AE) method, and the stress-strain state of the samples was determined using strain gauge. The main informative parameters of AE signals (location, amplitude, MARSE energy parameter, rise time of the leading edge, structural coefficient, frequency) recorded by an antenna consisting of piezo- and fiber-optic sensors and corresponding to the process of a nonlinear change in mechanical stress recorded by strain gauges were analyzed.*

**Keywords:** acoustic emission, signal parameters, carbon fiber, piezo- and fiber-optic sensors, static tests, strain gauge, strain gauges.

УДК 620.179.18

DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_4\_62

EDN: CKWORU

## Исследование физических параметров волоконных световодов с брэгговскими решетками для создания системы диагностики композитных конструкций

М. Ю. ФЕДОТОВ, канд. техн. наук

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Россия

*Приведены результаты экспериментальных исследований по созданию эффективной интегрированной системы диагностики композитных конструкций на основе одномодовых кварцевых волоконных световодов (ВС) с акрилатным защитным покрытием (ЗП) со сформированными волоконными брэгговскими решетками (ВБР). В качестве исследуемых физических параметров встроенной оптической системы контроля рассматривались ВБР, нанесенные на оголенные участки ВС методом УФ-записи без восстановления защитного покрытия, с восстановленным методом УФ-отверждения покрытием, с восстановленным термоотверждаемым покрытием. Показано, что для создания эффективной системы диагностики композитных конструкций целесообразно применять ВС с восстановленным ЗП в локальной области расположения ВБР. Способ восстановления ЗП не оказывает существенного влияния на механические и оптические свойства ВС с ВБР, тогда как применение ВС без восстановления ЗП приводит к механическому повреждению ВС в локальной области расположения ВБР либо к неоднородному изменению спектров ВБР в составе материала конструкции, что снижает качество и достоверность диагностики.*

**Ключевые слова:** полимерный композитный материал, встроенная диагностика, композитная конструкция, волоконный световод, волоконная брэгговская решетка, полимерное защитное покрытие, восстановление защитного покрытия, спектр пропускания ВБР.

За последние годы внедрение полимерных композитных материалов (ПКМ) в авиастроении [1, 2], в транспортном строительстве [3, 4], энергетике, дорожной инфраструктуре и иных сферах значительно возросло. Это обусловлено тем, что данный класс материалов характеризуется сочетанием высоких прочностных и эксплуатационных свойств с весовой эффективностью, которые во многом и определили их широкое применение. Так, для создания высоконагруженных, ответственных, крупногабаритных конструкций авиационной техники все больше применяют слоистые конструкционные ПКМ [5] на основе углеродных армирующих наполнителей и эпоксидных матриц различной природы [6]. Не менее активно для конкретных конструктивных решений применяются стеклокомпозиты [7], органокомпозиты [8], а также гибридные ПКМ, сочетающие в себе различные типы армирующих наполнителей и характеризующиеся необходимым комплексом свойств.

Вместе с тем, подобные материалы и конструкции на их основе требуют разработки новых методов неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики, обеспечивающих получение

достоверной информации о фактическом состоянии изделия. Так, в работах [9, 10] приведены результаты исследований малозаметных ударных повреждений композитных конструкций с помощью ультразвукового метода, оптической профилометрии, а также за счет применения ударочувствительного индикаторного покрытия. В [11, 12] рассмотрены некоторые аспекты контроля узлов авиационных конструкций из углекомпозита после ударного воздействия методом акустической эмиссии и тензометрии.

Одним из наиболее перспективных методов НК конструкций из ПКМ является оптический метод, позволяющий с помощью интегрированного массива волоконно-оптических датчиков (ВОД) получать информацию о фактическом напряженно-деформированном состоянии [13, 14]. В качестве чувствительных элементов ВОД в данной работе использованы ВБР, в общем же случае могут быть использованы интерферометры, либо сам ВС с заданной разрешающей способностью по длине (распределенные системы, например, на основе эффекта Мандельштама-Бриллюэна, Рамана, Рэлея) [15].

Однако, оптический метод НК с применением ВОД имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при его практической реализации. Прежде всего речь идет о правильности и обоснованности выбора ВС для создания системы встроен-

---

Федотов Михаил Юрьевич, главный конструктор проекта.

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2022 г.

© Федотов М. Ю., 2022



енной диагностики композитной конструкции. При выборе ВС нужно учитывать его физические параметры [16]: тип ВС (одномодовый, многомодовый, кварцевый, полимерный), геометрические размеры ВС (диаметр, длина), тип ЗП (например, алюминиевое, медное, акрилатное, полиимидное), наличие/отсутствие оголенных участков ВС. Отдельным вопросом является формирование надежного вывода, например с использованием капилляра (ПВХ, фторопласт, капрон). Дополнительными параметрами ВС, предназначенного для интеграции в ПКМ, являются его оптические потери, возникающие вследствие воздействия процесса формирования ПКМ.

При создании интегрированной волоконно-оптической системы диагностики композитных конструкций помимо физических параметров самих ВС также необходимо учитывать физические параметры ВС с ВБР, такие как наличие оголенных участков ВС в зоне нанесения ВБР, а также участков ВС в локальной зоне расположения ВБР с восстановленным ЗП [17], нанесенным методами УФ- или термоотверждения.

Цель данной работы — экспериментальное исследование влияния отсутствия или наличия восстановленного методами УФ- и термоотверждения акрилатного ЗП ВС в локальной зоне расположения ВБР, интегрированных в конструкцию из углекомпози́та, на качество системы встроенной диагностики.

### Объекты и методика исследования

Для проведения экспериментальных исследований использовали одномодовые телекоммуникационные кварцевые ВС (SMF-28) с ВБР, имеющие физические параметры, представленные в табл. 1.

Согласно табл. 1 были подготовлены отрезки ВС длиной 0,4 м в количестве 7 шт. Далее на каждом из 7 ВС методом механического удаления акрилатного ЗП были подготовлены оголенные участки длиной 1 см для формирования ВБР с резонансными длинами волн в диапазоне 1 556—

1 562 нм с шириной спектра на полувысоте 0,2—0,3 нм. Формированием ВБР на указанных ВС осуществлялось на лабораторной установке, построенной на основе интерферометра Ллойда [18], по 1 ВБР на каждый ВС.

Методика проведения эксперимента включала в себя следующую последовательность действий:

- до интеграции в панель из углекомпози́та каждый ВС с ВБР подключали с одной стороны к широкополосному эрбиевому источнику деполаризованного излучения Er-BBLS-14-CL-X, с другой стороны — к спектроанализатору ANDO 6317B с разрешающей способностью ~ 0,02 нм, и регистрировался спектр пропускания ВБР;
- формировали пакет заготовки для прессового формования панели из углекомпози́та на основе однонаправленной углеродной ленты УОЛ-300-2 3К и эпоксидного растворного связующего ЭНФБ-2М, в процессе сборки которого проводилась укладка ВС с ВБР между слоями препрега, вывод ВС для простоты проведения эксперимента осуществляли через торец панели с использованием защитных фторопластовых капилляров. Выводы ВС осуществляли из пресс-формы и закрепляли на металлической оснастке во избежание механических повреждений;
- по типовому режиму для материала УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М осуществлялось прессовое формование пакета заготовки панели с интегрированными ВС с ВБР в пресс-форме;
- к каждому ВС с ВБР в составе изготовленной панели из углекомпози́та УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М последовательно подключали широкополосный эрбиевый источник и спектроанализатор, и осуществлялась аналогичная повторная регистрация спектров пропускания ВБР;
- проводили измерение смещения спектра пропускания каждой ВБР в составе углекомпози́та УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М относительно его положения до интеграции в углекомпози́т, делали заключение об однородности либо неоднородности спектра пропускания каждой ВБР;

Таблица 1

Физические параметры ВС с ВБР

№ ВС (SMF-28) с ВБР	Физические параметры ВС с ВБР
1-1	В акрилатном ЗП которого имеются оголенные участки, на которых сформированы ВБР
1-2	
1-3	
2-1	В акрилатном ЗП которого имеются участки, на которых сформированы ВБР, после чего ЗП этих участков восстановлено с помощью термоотверждаемого полимера
2-2	
3-1	В акрилатном ЗП которого имеются участки, на которых сформированы ВБР, после чего ЗП этих участков восстановлено с помощью УФ-отверждаемого полимера
3-2	

• определяли величину смещения спектра пропускания каждой ВБР, пересчитывали величину относительной деформации материала в зоне расположения ВБР и делали вывод о наличии растягивающих (в случае положительных значений) или сжимающих (в случае отрицательных значений) деформаций в материале, обусловленных технологическим процессом изготовления ПКМ.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Для проведения экспериментальных исследований была разработана следующая схема армиро-

вания панели из углекомпозиата УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М с учетом ВС с ВБР: [0, 90, ВС 1-2, ВС 3-1, ВС 3-2, 0, 90, ВС 1-1, 90, 0, ВС 1-3, ВС 2-1, ВС 2-2, 90, 0].

Указанные типы ВС с ВБР были уложены между слоями препрега углекомпозиата УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М при выкладке панели с габаритами 200×300 мм, включающей в себя 8 монослоев.

Результаты экспериментальных исследований по оценке влияния физических параметров ВС с ВБР на качество системы встроенной диагностики композитной конструкции из углекомпозиата УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М приведены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 1—5.

Таблица 2

Результаты эксперимента

№ п/п	№ ВС с ВБР	Направление ВС с ВБР/направление армирования	Физический параметр ВС с ВБР	Длина волны ВБР, нм	Результат эксперимента	
					Однородность спектра пропускания ВБР	Сдвиг спектра пропускания ВБР, нм
1	1-1	0/[...90, 90...]	ВБР на оголенном участке ВС, без перепокрывтия	1556,5	*	—
2	1-2	0/[...90, 0...]		1557,7	ВБР неоднородно напряжена	-0,50
3	1-3	0/[...0, 90...]		1559,4		-0,60
4	2-1	45/[...0, 90...]	ВБР с перепокрывтием (термоотверждение)	1559,9	ВБР однородно напряжена	-0,46
5	2-2	-45/[...0, 90...]		1561,8		-0,49
6	3-1	45/[...90, 0...]	ВБР с перепокрывтием (УФ-отверждение)	1561,6		-0,37
7	3-2	-45/[...90, 0...]		1561,9		-0,37

\* ВБР разрушена при изготовлении панели из углекомпозиата УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М.

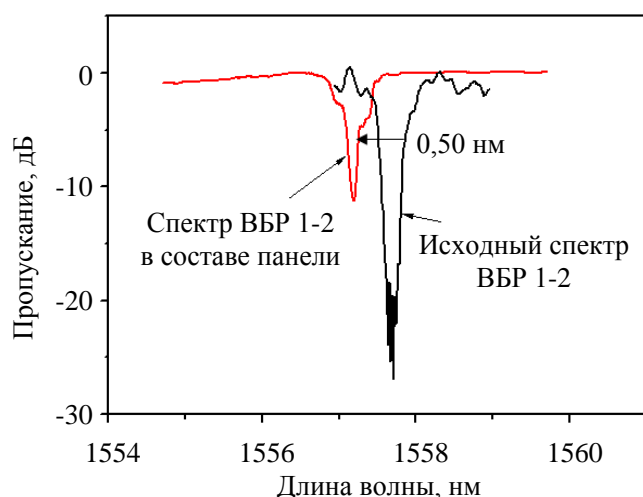


Рис. 1. Сравнение спектров пропускания ВС с ВБР № 1-2 в свободном состоянии и в составе панели

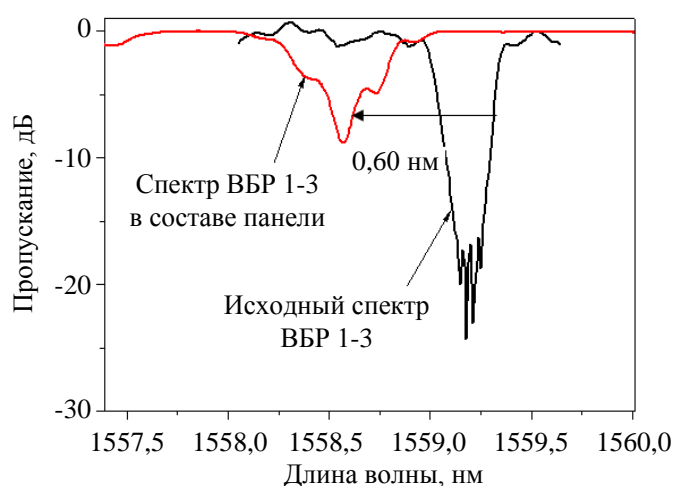


Рис. 2. Сравнение спектров пропускания ВС с ВБР № 1-3 в свободном состоянии и в составе панели

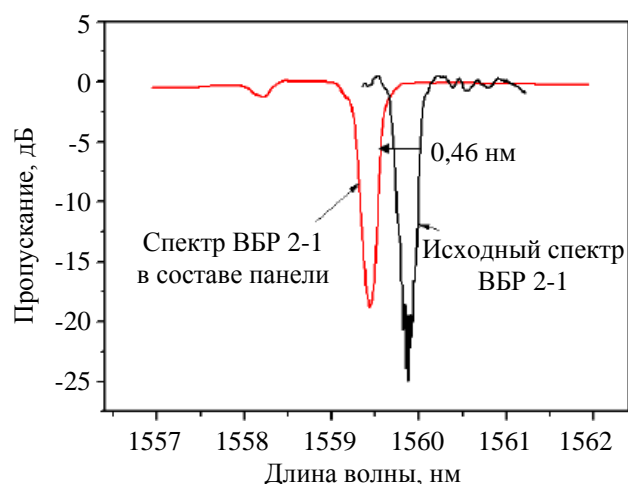


Рис. 3. Сравнение спектров пропускания ВС с ВБР № 2-1 в свободном состоянии и в составе панели

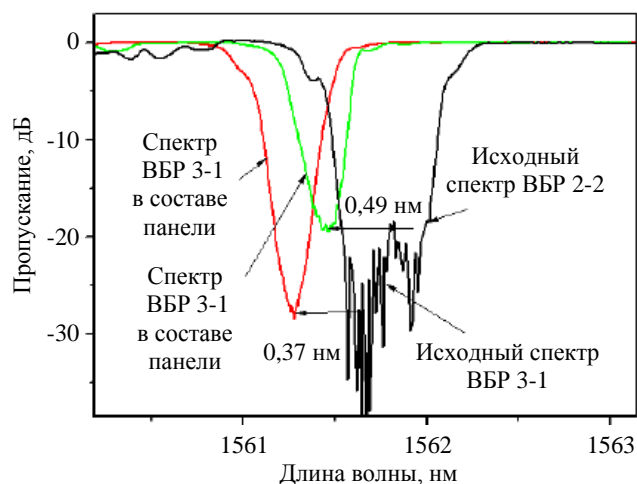


Рис. 4. Сравнение спектров пропускания ВС с ВБР № 3-1 и 2-2 в свободном состоянии и в составе панели

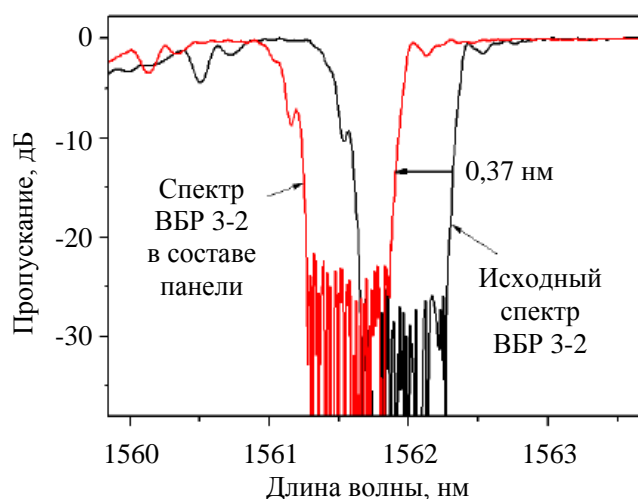


Рис. 5. Сравнение спектров пропускания ВС с ВБР № 3-2 в свободном состоянии и в составе панели

Анализируя результаты экспериментальных исследований, стоит отметить, что рассматриваемые в работе физические параметры ВС с ВБР оказывают существенное влияние на качество системы встроенной диагностики композитных конструкций.

Так, ВС с ВБР 1-1, не имеющий ЗП в локальной зоне расположения ВБР, был разрушен в процессе формирования панели из углекомпози́та УОЛ-300-2 ЗК/ЭНФБ-2М, что свидетельствует о том, что ЗП защищает ВБР от передавливания углеродным армирующим наполнителем и от механического разрушения. Вместе с тем, в рассматриваемом случае, еще одним фактором, повлиявшим на разрушение данной ВБР явилось то, что ВС с ВБР был расположен перпендикулярно направлению армирования обоих прилегающих монослоев углекомпози́та, поэтому правильный выбор укладки ВС с ВБР также влияет на живучесть ВС с ВБР при изготовлении композитных конструкций.

ВС с ВБР 1-2 и 1-3, также не имеющие ЗП в зоне расположения ВБР, тем не менее сохранили свою целостность и работоспособность, здесь стоит подчеркнуть, что данные ВС с ВБР располагались в направлении армирования одного из монослоев углекомпози́та, тогда как второй прилегающий слой располагался перпендикулярно. Однако, как видно из рис. 1 и 2, наблюдается неоднородное изменение спектров пропускания ВБР. При этом смещение резонансных длин волн ВБР 1-2 и 1-3 составило -0,50 нм и -0,60 нм соответственно, что в пересчете на относительную деформацию сжатия — 0,041 % и 0,049 % соответственно. Такая неоднородность спектров чувствительного элемента системы диагностики конструкции в реальных условиях будет варьироваться в широких пределах, что может быть связано с неравномерным напряжением и передавливанием ВБР по всей ее геометрической длине. Это, в свою очередь, приведет к снижению качества и достоверности данных контроля.

ВС с ВБР 2-1 и 2-2 с перепокрытием локальной зоны нанесения ВБР методом термоотверждения располагались в конструкции под углами  $45^\circ$  и  $-45^\circ$  к направлениям армирования прилегающих монослоев углекомпозиата. Спектр пропускания ВС с ВБР 2-1 является однородным — ВБР напряжена равномерно, смещение резонансной длины волны составило  $-0,46$  нм (деформация сжатия —  $0,037\%$ ) (см. рис. 3). Спектр пропускания ВС с ВБР 2-2 также является однородным (см. рис. 4) при уменьшении значения резонансной длины волны ВБР на  $0,49$  нм (деформация сжатия —  $0,040\%$ ).

ВС с ВБР 3-1 и 3-2 с перепокрытием локальной зоны нанесения ВБР методом УФ-отверждения располагались в конструкции по аналогии с предыдущими ВС с ВБР под углами  $45^\circ$  и  $-45^\circ$  к направлениям армирования прилегающих монослоев углекомпозиата. Спектр пропускания ВС с ВБР 3-1 также является однородным — ВБР напряжена равномерно, смещение резонансной длины волны составило  $-0,37$  нм (деформация сжатия —  $0,030\%$ ) (см. рис. 4). Спектр пропускания ВС с ВБР 3-2 (см. рис. 5) также является однородным при уменьшении значения резонансной длины волны ВБР на  $0,37$  нм (деформация сжатия —  $0,030\%$ ).

По результатам экспериментальных исследований по изучению влияния рассматриваемых физических параметров ВС с ВБР на качество системы встроенной диагностики показано, что при изготовлении углекомпозиитной конструкции в результате воздействия температуры ( $\sim 180^\circ\text{C}$ ) и давления формования ( $\sim 0,7$  МПа) в течение 3—4 ч происходит некоторое уменьшение интенсивности пропускания всех интегрированных ВБР, это связано с отжигом наведенного показателя преломления под действием технологического процесса, что на этапе дальнейшей эксплуатации способствует дополнительной стабильности спектральных параметров ВБР при воздействии аналогичных условий. При этом было установлено, что величины однородного смещения резонансных длин волн всех исследованных ВС с ВБР, интегрированных в композитную конструкцию из углекомпозиата УОЛ-300-2 ЗК/ЭНФБ-2М, вне зависимости от направления укладки и схемы армирования изменяются в среднем на  $\sim 0,47$  нм, что соответствует деформации сжатия  $\sim 0,038\%$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что для создания эффективной системы встроенного контроля композитных конструкций целесообразно осуществлять перепокрытие оголенного участка ВС, содержащего ВБР, при этом метод нанесения ЗП фактически не влияет на качество системы встроенной диагностики.

## Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований показано, что при создании волоконно-оптической системы встроенной диагностики композитных конструкций важным аспектом является учет физических параметров ВС с ВБР. Так, экспериментально установлено, что отсутствие ЗП ВС в зоне ВБР с большой вероятностью приводит к его механическому повреждению либо к неоднородному изменению спектра пропускания ВБР, что снижает качество и достоверность системы встроенного контроля композитных конструкций. Говоря о способах восстановления ЗП стоит подчеркнуть, что традиционно применяемые в волоконной оптике способы восстановления ЗП (УФ- или термоотверждаемым полимером) позволяют обеспечить как целостность ВС в зоне ВБР, так и получить однородные спектры пропускания ВБР, позволяющие реализовать на практике надежную систему встроенного контроля композитных конструкций. При этом способ перепокрытия зоны расположения ВБР на ВС не оказывает существенного влияния на результат эксперимента, для практики имеет значение лишь наличие буферного слоя полимера, в идеале наиболее близкого по составу к полимерной матрице ПКМ, защищающего ВС в области ВБР от микроизгибов на нитях волокон армирующего наполнителя ПКМ и распределяющего равномерно механические напряжения, воздействующие на ВБР.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коган Д., Голиков Е., Кузнецов О. и др. Использование перспективных ПКМ для создания авиационных конструкций // Композитный мир. 2021. № 3(96). С. 48—52. EDN: WVFVCB.
2. Шаныгин А. Н., Зиченков М. Ч., Дубовиков Е. А., Крючков Е. И., Кондаков И. О., Фомин Д. Ю. Проблемы и перспективы использования полимерных композиционных материалов в силовых конструкциях планера: мат. Всерос. науч.-техн. конф. "Полимерные композиционные материалы для авиакосмической отрасли". — М.: ВИАМ, 2019. С. 6—22.
3. Бирюков А. Н., Дудурич Б. Б., Казаков Ю. Н., Токарев Н. В. Применение композитных материалов при строительстве, ремонте и реконструкции объектов транспортной инфраструктуры // Строительные и дорожные машины. 2017. № 10. С. 46—52.
4. Смердов Д. Н., Клементьев А. О. Отечественный и зарубежный опыт экспериментальных исследований изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композиционной арматурой // Инновационный транспорт. 2016. № 3(21). С. 65—68.
5. Смотрова С. А., Дунаевский А. И., Евдокимов Ю. Ю. и др. Разработка и изготовление демонстратора силовой конструкции крыла самолета малой авиации из отечественных полимерных композиционных материалов по технологии интегрального формования // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 4. С. 66—72.

ных материалов. 2021. № 3(163). С. 14—18. DOI: 10.52190/2073-2562\_2021\_3\_14. EDN:CWCISG.

6. Мишкин С. И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5(111). С. 87—95. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95. EDN:PYKFHC.

7. Трясунов В. С., Шульцева Е. Л., Баганик А. М., Полякова Ю. В. Свойства стеклопластиков на основе огнестойких полиэфирных смол российского производства марок Аркпол 40 М и Полимер 3088 ТА // Вопросы материаловедения. 2022. № 1(109). С. 147–156. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-147-156. EDN:WRYQLM.

8. Соколов В. В., Гусев С. А., Малнин С. А. и др. Исследование эксплуатационных характеристик намоточных органопластиков на основе волокон Русар-С и Русар-НТ в интересах создания оболочечных конструкций высокого давления // Химическая технология. 2018. Т. 19. № 4. С. 146—154. EDN:XNQSXD.

9. Смотров С. А., Смотров А. В., Иванов В. И. Сравнение выявляемости малозаметных ударных повреждений по результатам выполнения ультразвукового неразрушающего контроля и оптической профилометрии поверхности образцов полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 4(164). С. 43—50. DOI: 10.52190/2073-2562\_2021\_4\_43. EDN:SHMKEJ.

10. Смотров С. А. Обработка технологии обнаружения и регистрации малозаметных ударных повреждений на конструкции летательного аппарата из полимерных композиционных материалов с помощью ударочувствительного индикаторного покрытия // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 2(162). С. 14—19. DOI: 10.52190/2073-2562\_2021\_2\_14. EDN:ENGBLB.

11. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Петрова Е. С., Чернова В. В. Прочностные испытания стыковых узлов авиационных лонжеронов из углепластика с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 3(163). С. 49—56. DOI: 10.52190/2073-2562\_2021\_3\_49. EDN:VMVVUU.

12. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И. и др. Испытания образцов из углепластика с ударными повреждениями с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 7(289). С. 14—25. DOI: 10.14489/td.2022.07.pp.014-025. EDN:ROXUBY.

13. Анискович В. А., Будадин О. Н., Козельская С. О. и др. Интегрирование волоконно-оптических датчиков в композитный цилиндрический корпус из углепластика, изготовленный способом непрерывной намотки // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 2(284). С. 16—23. DOI: 10.14489/td.2022.02.pp.016-023. EDN:TAMZWW.

14. Матвеев В. П., Кошелева Н. А., Сероваев Г. С. Экспериментальные и теоретические результаты, связанные с измерением деформаций, встроенными в материал волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках // Изв. Российской академии наук. Механика твердого тела. 2021. № 6. С. 3—15. DOI: 10.31857/S0572329921060088. EDN:BRLEGB.

15. Гончаров В. А., Федотов М. Ю., Шиёнок А. М. и др. Распределенные оптоволоконные сенсоры для контроля напряженно-температурного состояния конструкций // Вопросы материаловедения. 2016. № 1(85). С. 73—79.

16. Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О. и др. Исследование физических параметров волоконных световодов для диагностики композитных конструкций // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 2(166). С. 47—55. DOI: 10.52190/2073-2562\_2022\_2\_47. EDN:BVRNWA.

17. Мунько А. С., Варжель С. В., Архипов С. В., Забиякин А. Н. Защитные покрытия волоконной решетки Брэгга для уменьшения влияния механического воздействия на ее спектральные характеристики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 241—245. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-241-245. EDN:TPUSLB.

18. Медведков О. И., Королев И. Г., Васильев С. А. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств // Препринт № 6 НЦВО при ИОФ РАН. 2004. — 46 с.

## Researching of the physical parameters of optical fibers with Bragg gratings for create a system of diagnostics composite structures

M. Yu. FEDOTOV

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia  
Russian Engineering Academy, Moscow, Russia

*This article describes the results of experimental researches on the creation of an effective embedded system of diagnostics composite structures based on single-mode quartz optical fibers (OF) with an acrylate protective coating (PC) with formed fiber Bragg gratings (FBG). As the researched physical parameters of the embedded optical diagnostic system, we considered FBGs deposited on the bare areas of the OF by the UV recording method without the restoration of the protective coating, with the coating restored by the UV-curing method, with the restored thermally cured coating. It is shown that in order to create an effective system of diagnostics composite structures, it is expedient to use OF with restored PC in the local area of the FBGs location. The method of restoring the PC does not have a significant effect on the mechanical and optical properties of optical fibers with FBGs, while the use of optical fibers without restoring the PC leads to mechanical damage to the fibers in the local region of the FBG location or to an inhomogeneous change in the FBG spectra in the structure material, which reduces the quality and reliability of diagnosis.*

**Keywords:** polymer composite material, embedded diagnostic, composite structure, optical fiber, fiber Bragg grating, polymer protective coating, protective coating restoration, FBG transmission spectrum.

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». 2022. Вып. 4 (168). С. 1—68.

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

Подписано в печать 14.11.2022. Формат 60x84 1/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,2.  
Тираж 250 экз. Заказ 2003. Свободная цена.  
Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., д. 77,  
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».  
[www.ntckompas.ru](http://www.ntckompas.ru); E-mail: [izdanie@ntckompas.ru](mailto:izdanie@ntckompas.ru)  
Отпечатано: 101000, Москва,  
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.  
ИП Кириченко Алексей Викторович.  
Индекс 80089.