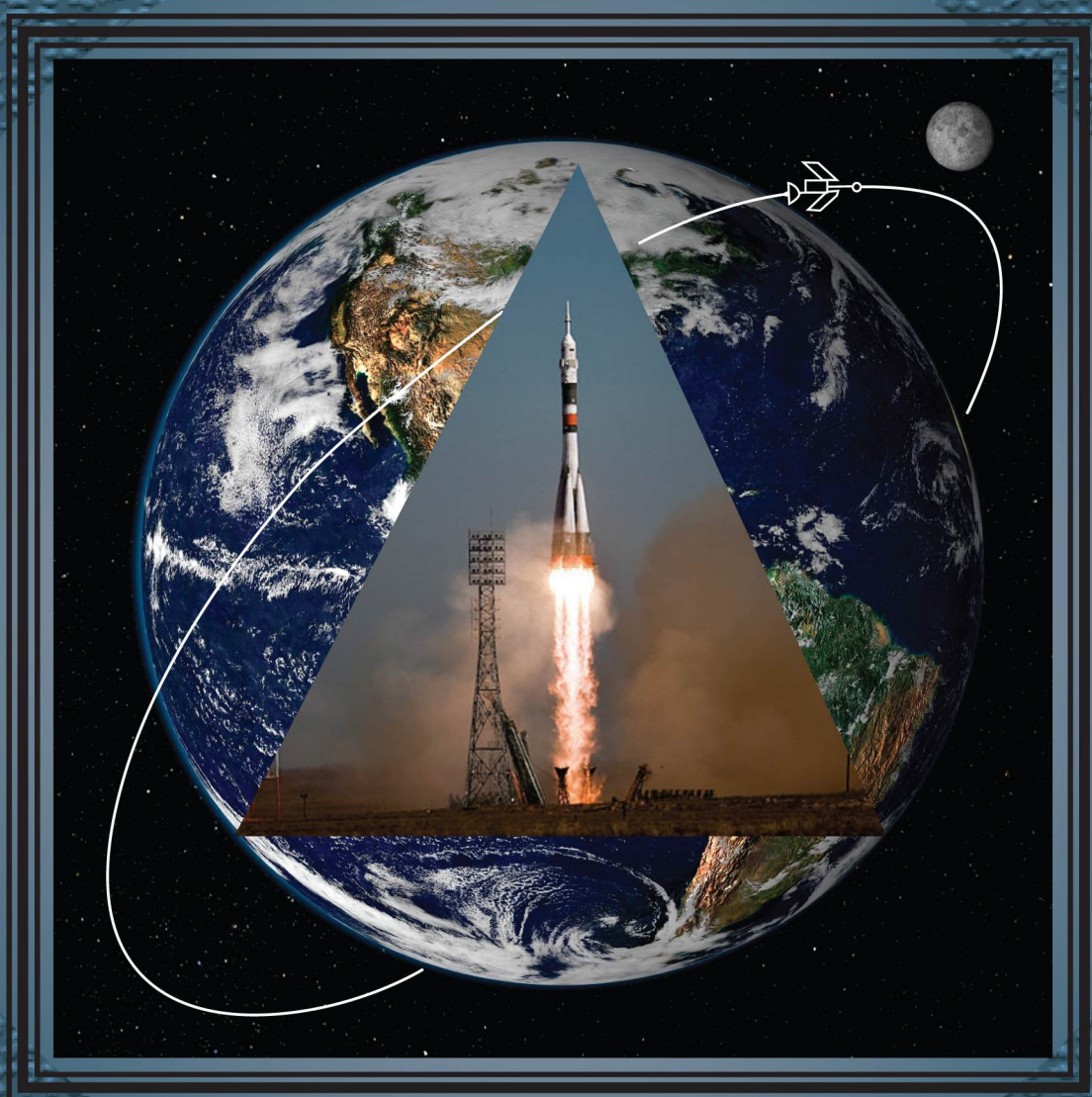


# КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

# 1



Москва 2023





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

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



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79379**  
**Издается с 1984 года**



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Конструкции из композиционных материалов**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80089**  
**Издается с 1981 года**



Научно-технический журнал  
**Информационные технологии в проектировании и производстве**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79378**  
**Издается с 1976 года**



Межотраслевой научно-практический журнал  
**Экология промышленного производства**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80090**  
**Издается с 1993 года**



Научно-практический журнал  
**Вопросы защиты информации**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79187**  
**Издается с 1974 года**

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

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

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

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);  
факс: 8 (495) 491-44-80.  
E-mail: [izdanie@ntckompas.ru](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 1 (169)

Издается с 1981 г.

Москва 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

Барышев А. Н., Федоров Л. В., Ширинов Ю. Ю. Экспериментальное исследование несущей способности штифтового соединения композитного вала с фланцем ..... 3

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Острик А. В., Ким В. В., Острик М. А. Численное 3D-моделирование деформирования и разрушения железобетонных ангаров при нагреве и взрывном нагружении ..... 7

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Русских Г. И., Резянов Ю. М., Башара В. А., Пажитнов А. А. Способ косослойной продольно-поперечной намотки как основа технологии массового производства малогабаритных изделий из стеклопластика ..... 15

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

Оглезнева С. А., Порозова С. Е., Каченюк М. Н., Кульметьева В. Б., Сметкин А. А. О взаимодействии керамического порошка с жаростойким сплавом при формировании и эксплуатации теплозащитного покрытия ..... 22

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Злобина И. В., Бекренев Н. В., Морозов Б. Б., Насонов Ф. А. Кинетика разрушения при межслоевом сдвиге углепластика ВКУ-30 после воздействия СВЧ электромагнитного поля ..... 28

Макарьев Д. И., Резниченко А. Н., Дудкина С. И., Резниченко Л. А. Формирование высокоанизотропного состояния в промышленных сегнетопьезоэлектрических материалах на основе титаната—цирконата свинца путем многократного циклического переключения поляризации ..... 35

### КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

Федотов М. Ю. Исследование и разработка требований к спектральным параметрам волоконных брэгговских решеток для системы диагностики композитных конструкций ..... 40

**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. Калашиников**, канд. техн. наук, АО "ГРЦ Макеева"; **А. Л. Каменева**, д-р техн. наук, доцент, ПНИПУ; **А. Н. Лихачев**, д-р техн. наук, проф., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова; **Е. С. Лукин**, д-р техн. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева; **С. А. Оглезнева**, д-р техн. наук, доцент, ПНИПУ; **А. В. Острик**, д-р техн. наук, проф., ИПХФ РАН; **Л. А. Резниченко**, д-р физ.-мат. наук, проф., НИИ физики ЮФУ; **С. Б. Сапожников**, д-р техн. наук, проф., НОЦ "Нанотехнологии" ЮУГУ; **Б. С. Сарбаев**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; **И. Д. Симонов-Емельянов**, д-р техн. наук, проф., МИРЭА-Российский технологический университет (ИТХТ им. М. В. Ломоносова); **А. Н. Тимофеев**, д-р техн. наук, ОАО "Композит"; **В. И. Халиманович**, канд. физ.-мат. наук; проф., АО "ИСС"; **В. И. Хлыбов**, д-р физ.-мат. наук, АО "ГРЦ Макеева"; **Б. В. Щетанов**, д-р техн. наук, проф., ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ

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

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

- © Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»), 2023;
- © Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), 2023;
- © Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), 2023

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.4

DOI: 10.52190/2073-2562\_2023\_1\_3

EDN: KUHBNY

## Экспериментальное исследование несущей способности штифтового соединения композитного вала с фланцем

А. Н. БАРЫШЕВ, канд. техн. наук

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

Л. В. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук; Ю. Ю. ШИРШОВ, канд. техн. наук

АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов, Московская обл., Россия

*Приведены результаты экспериментального изучения несущей способности штифтового соединения композитной трубы со стальным фланцем. Исследовано влияние количества штифтов и их взаимного расположения на несущую способность соединения.*

**Ключевые слова:** эксперимент, кручение, трубчатый образец, штифтовое соединение, диаграмма деформирования, приводной вал.

Композиционные материалы с полимерной матрицей (ПКМ), армированные высокопрочными волокнами, имеют ряд преимуществ по сравнению с металлами и их сплавами. Такие ПКМ имеют более высокие значения удельной прочности и удельной жёсткости, коррозионной стойкости, и обладают возможностью создания материалов с заданными характеристиками на стадии проектирования. ПКМ используют в транспортном машиностроении, судостроении, что позволяет создавать более лёгкие детали и узлы и приводит к снижению нагрузок на прочие элементы конструкций.

В настоящее время широкое распространение получают судовые гребные валы из ПКМ. Меньшая масса валов из ПКМ по сравнению с металлическими позволяет снизить количество промежуточных опор, более высокие характеристики демпфирования позволяют снизить динамические нагрузки на корпус судна и на двигатель, что положительно сказывается на их ресурсе. Валы из ПКМ имеют более высокие собственные частоты колебаний, что снижает вероятность возникновения резонанса. Определённую сложность при этом

представляет создание надёжного соединения композитного участка вала с металлическими фланцами.

В ряде случаев применяют фланцы, имеющие различные конструктивные элементы (пазы, канавки, выступы), в которые при изготовлении вала намоткой укладывается волокно [1]. Существуют валы гибридной конструкции, представляющие собой цельнометаллический вал с фланцами, цилиндрическая часть которого усилена подмоткой из ПКМ [2]. По сравнению со стальными валами гибридные валы из алюминиевых сплавов и углепластика могут иметь на 60 % меньшую массу [3].

Также для соединения композитной части вала с фланцами применяют клеевое [4, 5] и болтовое (штифтовое) соединения. Клеевые соединения, как правило, применяют при сравнительно невысоких значениях передаваемого крутящего момента, а при высоких значениях нагрузок чаще используются болтовые соединения. При проектировании болтовых соединений композитов с металлическими элементами требуется определение таких параметров, как диаметр крепёжных элементов и расстояние между ними, момент затяжки, количество рядов и взаимное расположение крепёжных элементов, зазор между крепёжным элементом и отверстием [6—8]. Для расчёта несущей способности многоболтового соединения применяют как численные [8], так и аналитические методы [9, 10].

Барышев Антон Николаевич, инженер.

E-mail: baryshevan@bmstu.ru

Федоров Леонид Викторович, старший научный сотрудник.

E-mail: sigma@vpk.npomash.ru

Ширшов Юрий Юрьевич, заместитель начальника отделения.

E-mail: sigma@vpk.npomash.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2022 г.

© Барышев А. Н., Федоров Л. В., Ширшов Ю. Ю., 2023

### Объект и методика испытаний

Изучение несущей способности штифтового соединения проводили на тонкостенных трубча-

тых образцах из углепластика со схемой армирования  $[\pm 45^\circ]$ . Упругие характеристики материала — модуль упругости  $E_1 = 15,95$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu_{12} = 0,615$  — измерены на трубчатых образцах в экспериментах на растяжение. Внутренний диаметр образцов составлял 45 мм, номинальная толщина стенки 2,5 мм.

Испытания проводили на универсальной двухосевой испытательной машине Zwick/Roell Z100 (Германия) (максимальное значение осевой силы  $N = 100$  кН, максимальное значение крутящего момента  $M = 1000$  Нм).

Схема оснастки для испытаний приведена на рис 1.

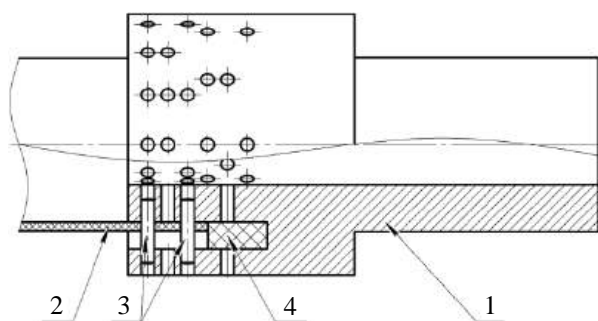


Рис. 1. Схема оснастки для испытаний:

1 — законцовка; 2 — трубчатый образец; 3 — штифт;  
4 — сменная вставка

Оснастка состояла из двух идентичных законцовок 1, устанавливаемых в захваты испытательной машины и обеспечивающих передачу крутящего момента на трубчатый образец 2 посредством штифтов 3 диаметром  $d = 3,8$  мм. Отверстия в образце для установки штифтов выполняли сверлением по месту с использованием оснастки в качестве кондуктора. Расстояние от торца образца до осей штифтов ближайшего ряда составляло  $1,5d$  или 5,7 мм. Расстояние между соседними рядами штифтов также составляло  $1,5d$ . Сменные вставки 4 обеспечивали заданное положение штифтов относительно торца образца при различных схемах нагружения. При размещении в два или в три ряда штифты устанавливали в шахматном порядке, т. е. соседние ряды смещались друг относительно друга на угол, равный половине углового шага между штифтами.

Образцы нагружались крутящим моментом при постоянной скорости вращения активного захвата машины  $1^\circ$  в мин, во время нагружения определяли зависимость крутящего момента от угла поворота захвата. За момент разрушения образца принимал момент резкого снижения крутильной жёсткости системы образец—оснастка, что выражалось в появлении горизонтального или ниспа-

дающего участка на диаграмме зависимости крутящего момента от угла поворота захвата.

### Результаты испытаний и их анализ

Характерные диаграммы зависимости крутящего момента от угла поворота захвата, полученные при испытаниях, приведены на рис. 2, 3. На диаграммах можно выделить начальный участок, который с высокой точностью аппроксимируется линейной функцией, и конечный участок, на котором зависимость приобретает нелинейный характер. По результатам испытаний определяли значение крутящего момента, соответствующее переходу от линейного к нелинейному деформированию.

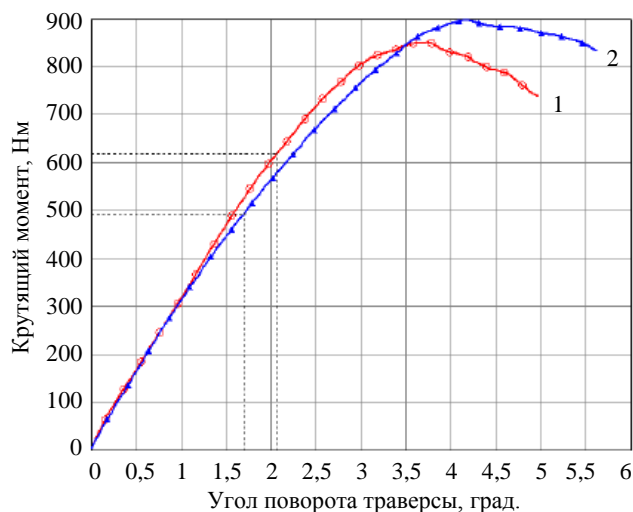


Рис. 2. Результаты испытаний образцов № 11 (кривая 1) и № 16 (кривая 2)

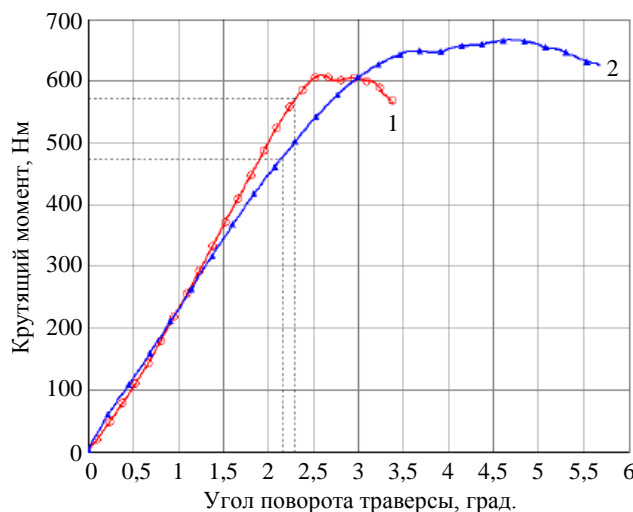


Рис. 3. Результаты испытаний образцов № 5 (кривая 1) и № 8 (кривая 2)

Всего было испытано 18 образцов. Результаты испытаний приведены в табл. 1, где приняты следующие обозначения:  $M_{\text{лин}}$  — значение крутящего момента, соответствующее окончанию линейного участка диаграммы зависимости крутящего момента от угла поворота захвата,  $M_{\text{разр}}$  — разрушающее значение крутящего момента,  $M_{\text{лин}}^{\text{шт}}$  — величина крутящего момента  $M_{\text{лин}}$ , приходящаяся на один штифт в соединении,  $M^{\text{шт}}$  — величина разрушающего крутящего момента, приходящаяся на один штифт. Образцы № 15 и № 18 не были разрушены вследствие достижения предельного значения крутящего момента для используемой испытательной машины, но для них наблюдался переход к нелинейному деформированию. Для этих образцов в таблице приведены верхние и нижние оценки характеристик.

Из данных, приведённых в таблице, следует, что предельная разрушающая нагрузка штифтового соединения прямо пропорциональна общему количеству крепёжных элементов (штифтов) и слабо зависит от способа их расположения.

При этом количество рядов штифтов влияет на величину крутящего момента  $M_{\text{лин}}$  и на его отношение к разрушающему значению. На рис. 2 приведены диаграммы зависимости крутящего момента от угла поворота для образцов № 11 и № 16. Общее количество штифтов при испытаниях этих образцов было одинаковым и составляло 12 штук, а размещались они в 2 и в 3 ряда соответственно. Разрушающие значения крутящего момента близки, но при этом величина крутящего момента  $M_{\text{лин}}$  выше для образца № 11.

Похожие результаты получены на образцах № 5 и № 8 (см. рис. 3).

При обработке результатов всех экспериментов получено, что при размещении штифтов в один ряд величина крутящего момента  $M_{\text{лин}}$  достигает в среднем 0,85 от разрушающего значения  $M_{\text{разр}}$ , а при двухрядном и трёхрядном размещении штифтов 0,79 и 0,55 соответственно. Это может свидетельствовать о неравномерном распределении нагрузки между штифтами при многорядном размещении.

Результаты испытаний

№	Число рядов штифтов	Штифтов в ряду	$M_{\text{лин}}$ , Нм	$M_{\text{разр}}$ , Нм	$M_{\text{лин}}^{\text{шт}}$ , Нм	$M^{\text{шт}}$ , Нм	$M_{\text{лин}}/M_{\text{разр}}$ , %
1	1	4	—	269,0	—	67,25	—
2	1	4	—	294,7	—	73,67	—
3	1	6	320,0	403,6	53,3	67,26	79,3
4	1	6	290,0	392,7	48,3	65,45	73,8
5	1	8	572,0	608,2	71,5	76,02	94,0
6	1	8	480,0	526,6	60,0	65,8	91,2
7	2	4	480,0	545,1	60,0	68,13	88,1
8	2	4	485,0	647,0	60,6	80,87	75,0
9	2	4	437,0	539,2	54,6	67,4	81,0
10	2	4	395,0	552,1	49,4	69,0	71,5
11	2	6	620,0	850,4	51,7	70,87	72,9
12	2	6	640,0	800,8	53,3	66,73	79,9
13	2	6	569,0	778,6	47,4	64,9	73,1
14	2	6	633,8	909,6	52,8	75,8	70,0
15	2	8	720,0	>1000	45,0	>62,5	<72,0
16	3	4	495,0	896,8	41,3	74,7	55,2
17	3	4	370,0	675,0	30,8	56,3	54,8
18	3	6	730,0	>1000	40,5	>55,5	<72,5



Разрушение всех испытанных образцов происходило вследствие смятия стенки композитного образца под штифтами. Характерный вид зоны разрушения образца показан на рис. 4.



Рис. 4. Характерный вид зоны разрушения образца

### Заключение

Результаты изучения несущей способности многорядного соединения хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами [7]. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании штифтовых соединений и для верификации инженерных методик расчёта их несущей способности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Brace M. W., Tzioumis Elias.** Flange design for filament wound composite shaft: Patent US 20080064511A1. USA, filed 13.09.2006, publ. 13.03.2008. — 6 p.
2. **Suryawanshi B. K., Damle P. G.** Review of Design of Hybrid Aluminum/Composite Drive Shaft for Automobile // International J. Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2013. V. 2. Iss. 4. P. 259—266.
3. **Kim H. S., Hong P. D., Kang H. Y.** Design of the Hybrid Propeller shaft using Composite Materials // Applied Mechanics and Materials. 2013. V. 284—287. P. 687—691. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.687.
4. **Kim J. K., Lee D. G., Cho H. D.** Investigation of Adhesively Bonded Joints for Composite Propeller Shafts // J. Composite Materials. 2001. V. 35. № 11. P. 999—1021. DOI: 10.1106/J5QD-B843-QEXC-18EB.
5. **Ha J. et al.** A Study on Tube and Flange Joint of Car Propeller Shaft Made of Carbon Composite Fiber // International J. Applied Engineering Research. 2017. V. 12. № 19. P. 8227—8231.
6. **Ларионова А. А., Дудченко А. А., Сергеев В. Н.** Проектирование узлов механических композитно-металлических соединений // Труды МАИ. 2016. № 90. С. 4.
7. **Xiangdong L. et al.** Study on the Pin-load Distribution of Multiple-bolted Composite to Metal Joints // Key Engineering Materials. 2013. V. 525—526. P. 285—288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.285
8. **Yun J.-H., Choi J.-H., Kweon J.-H.** A study on the strength improvement of the multi-bolted joint // Composite Structures. 2014. V. 108. P. 409—416. DOI: 10.1016/j.compstruct. 2013.09.047
9. **Xiong Y.** An analytical method for failure prediction of multi-fastener composite joints // Int. J. Solids Structures. 1996. V. 33. № 29. P. 4395—4409. DOI: 10.1016/0020-7683(95)00231-6
10. **McCarthy C. T., Gray P. G.** An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints // Composite Structures. 2011. № 93. P. 287—298.

## Experimental research of the bearing capacity of the pin load connection of a composite shaft with flange

A. N. BARYSHEV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

L. V. FEDOROV, Yu. Yu. SHIRSHOV

Joint stock company "Military and industrial corporation JSC "MIC "Mashinostroyeniya",  
Reutov, Moscow region, Russia

*Bearing capacity of pin load connection of composite tube and steel flange has been experimentally researched. Effect of pin number and their arrangement on bearing capacity of joint has been studied.*

**Keywords:** experiment, torsion, tubular specimen, pin connection, load-deformation diagram, propeller shaft.



УДК 539.4

DOI: 10.52190/2073-2562\_2023\_1\_7

EDN: LBHITY

## Численное 3D-моделирование деформирования и разрушения железобетонных ангаров при нагреве и взрывном 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 3D-модель деформирования и разрушения бетонных композитов на основе представления неоднородной среды совокупностью взаимодействующих континуумов. Произведено численное моделирование деформирования и разрушения нагретых укрытий из бетонов, усиленных арматурной сталью. Получено, что разработанные численные модели позволяют рассчитывать методом конечно-размерных частиц характеристики нестационарного 3D-поведения конструкций из бетонных композитов вплоть до их полного разрушения. Показано, что нагрев до  $T = 600$  °С практически не влияет на степень поврежденности рассматриваемой конструкции.*

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

Железобетонные арочные укрытия (ЖБУ) используют для защиты крупногабаритной техники (например, летательных аппаратов), важных и/или опасных промышленных объектов [1].

Отметим, что для изготовления капитальных укрытий традиционно используется железобетон (ж/б), но в последнее время в несущих конструкциях различного назначения для армирования бетона стали применять [2] высокомолекулярные полимерные композитные материалы (КМ) на основе углеродных (в углеродном бетоне — Carbon Concrete Composite) [3], базальтовых [4] и других волокон (стекловолокон и арамидных нитей).

В ряде случаев имеет место сочетание теплового и нестационарного механического действия факторов различной физической природы на композитные конструкции летательных аппаратов [5, 6] и на строительные сооружения [7, 8]. Интересно рассмотреть влияние нагрева на уровень

разрушений ЖБУ при нестационарном нагружении взрывом.

Ранее [9] авторами была предложена модель нестационарного поведения бетонных композитов в 2D-постановке (в цилиндрической системе координат для случая осевой симметрии) и проведены расчеты деформирования и разрушения конструкций типа контаймента из бетонов, усиленных арматурной сталью или углеродными волокнами. В данной работе эта модель обобщается на трехмерный случай. Оказалось, что численная реализация 3D-модели облегчается при использовании линейных кинематических уравнений Пуассона для кватернионов, характеризующих поворот арматуры вместе с деформирующимся бетоном относительно исходной неподвижной декартовой системы координат. Использование углов Эйлера вместо кватернионов и соответствующих кинематических уравнений для этих углов менее удобно, поскольку эти уравнения нелинейные и имеют особенность при нулевом угле нутации  $\theta$ .

### Численная 3D-модель бетонных композитов

При построении модели поведения бетонных композитов (БК) в [9] использовали подход на основе представления гетерогенной среды, как совокупности континуумов, в которой поведение каж-

Острик Афанасий Викторович, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: ostrik@fcp.ac.ru

Ким Вадим Валерьевич, старший научный сотрудник.

E-mail: kim@fcp.ac.ru

Острик Мария Афанасьевна, студентка.

E-mail: maria.ostrik@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2022 г.

© Острик А. В., Ким В. В., Острик М. А., 2023

дого континуума рассматривается отдельно, а между ними устанавливаются некоторые соотношения, обеспечивающие их совместное поведение [10]. В качестве континуумов рассматриваются бетон и арматура. Предполагается, что их совместное поведение обеспечивается работой в общем деформационном поле. Поведение бетона описывается ранее разработанной нестационарной численной моделью деформирования и разрушения бетона [11, 12]. Арматура представляется системой из трех взаимно перпендикулярных множеств упругопластических (для арматурных сталей) или нелинейно-упругих и хрупкоразрушающихся (для высокомодульных КМ) стержней. В результате получается модель анизотропного разрушающегося БК.

Ориентация осей координат арматуры (эти оси ориентированы по направлениям армирования) относительно неподвижной декартовой системы координат (НДСК) задается в каждой расчетной ячейке кватернионом

$$\Lambda = \Lambda(t) = (\lambda_0(t), \lambda_1(t), \lambda_2(t), \lambda_3(t)).$$

В начальный момент времени  $t = 0$  эти компоненты выражаются через начальные углы Эйлера  $\varphi_0, \psi_0, \theta_0$ , также определяющие ориентацию арматуры относительно НДСК

$$\begin{aligned} \lambda_0(0) &= \cos \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\psi_0 + \varphi_0}{2}, \\ \lambda_1(0) &= \sin \frac{\theta_0}{2} \cos \frac{\psi_0 - \varphi_0}{2}, \\ \lambda_2(0) &= \sin \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\psi_0 - \varphi_0}{2}, \\ \lambda_3(0) &= \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\psi_0 + \varphi_0}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Кинематические уравнения Пуассона для определения функции  $\Lambda = \Lambda(t)$  в каждой расчетной ячейке имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d\Lambda}{dt} &= \frac{1}{2} \Omega \otimes \Lambda, \quad \Omega = (0, \omega_x, \omega_y, \omega_z), \\ \vec{\omega} &= \frac{1}{2} \text{rot}(\vec{V}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\vec{\omega}$  — вектор угловой скорости;  $\vec{V}$  — скорость среды в рассматриваемой ячейке; знак  $\otimes$  означает операцию умножения кватернионов, для любых двух кватернионов  $\Lambda, X$  имеем результат их умножения  $M = \Lambda \otimes X$ :

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \lambda_0 \chi_0 - \lambda_1 \chi_1 - \lambda_2 \chi_2 - \lambda_3 \chi_3, \\ \mu_1 &= \lambda_0 \chi_1 + \lambda_1 \chi_0 + \lambda_2 \chi_3 - \lambda_3 \chi_2, \\ \mu_2 &= \lambda_0 \chi_2 + \lambda_1 \chi_3 + \lambda_2 \chi_0 - \lambda_3 \chi_1, \\ \mu_3 &= \lambda_0 \chi_3 + \lambda_1 \chi_2 + \lambda_2 \chi_1 - \lambda_3 \chi_0. \end{aligned}$$

Линейная система обыкновенных дифференциальных уравнений (2) с начальными условиями (1) имеет аналитическое решение в случае  $\vec{\omega} = \text{const}$ . Используем его для построения численного решения, считая что на временном шаге от  $t$  до  $t + \Delta t$  скорость остается постоянной. Тогда расчет новых значений компонент кватерниона  $\Lambda(t + \Delta t)$  по старым компонентам  $\Lambda(t)$  делается согласно соотношениям

$$\begin{aligned} \Lambda(t + \Delta t) &= M(t) \otimes \Lambda(t), \\ M(t) &= \begin{pmatrix} \cos \frac{w \Delta t}{2}, \frac{w_x}{w} \sin \frac{w \Delta t}{2}, \frac{w_y}{w} \sin \frac{w \Delta t}{2}, \\ \frac{w_z}{w} \sin \frac{w \Delta t}{2} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где значения компонент угловой скорости  $(w_x, w_y, w_z)$  и её модуль  $w$  берутся на старом временном шаге или в момент времени  $t + \Delta t / 2$ , если  $\vec{\omega}(t + \Delta t / 2)$  — известно. Отметим, что компоненты кватерниона  $M$  имеют особенность при  $w = 0$ , но она раскрывается (например, для второй компоненты кватерниона  $\lim_{w \rightarrow 0} \frac{w_x}{w} \sin \frac{w \Delta t}{2} = \lim_{w \rightarrow 0} w_x \frac{\Delta t}{2} = 0$ ) и для непрерывности кватерниона  $M(w)$  достаточно положить при  $w = 0$  его равным  $M(0) = (1, 0, 0, 0)$ . Из (3) также следует, что при переходе на новый временной шаг модуль кватерниона остается равным единице

$$\|\Lambda(t + \Delta t)\| = \|M(t) \otimes \Lambda(t)\| = \|M(t)\| \|\Lambda(t)\| = 1 \times 1 = 1$$

что соответствует известному факту о норме кватерниона, как первом интеграле уравнений Пуассона.

Отладку программы численного решения кинематического уравнения Пуассона проводили сравнением с известным аналитическим решением задачи о качении кругового конуса по другому неподвижному конусу (вершины обоих конусов совпадают) без проскальзывания с постоянной по величине (её направление меняется, оставаясь коллинеарным линии соприкосновения конусов)

угловой скоростью  $\vec{w}(t)$ . Аналитическое решение для кватерниона ориентации  $\Lambda = \Lambda(t)$  подвижного конуса имеет вид (решение задается угловой скоростью  $w$  и углами полураствора неподвижного и вращающегося конусов  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно)

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \cos \frac{w_f t}{2} \cos \frac{w_m t}{2} - \cos(\alpha + \beta) \sin \frac{w_f t}{2} \sin \frac{w_m t}{2}, \\ \lambda_1 &= \sin(\alpha + \beta) \sin \frac{w_f t}{2} \sin \frac{w_m t}{2}, \\ \lambda_2 &= \sin(\alpha + \beta) \cos \frac{w_f t}{2} \sin \frac{w_m t}{2}, \\ \lambda_3 &= -\sin \frac{w_f t}{2} \cos \frac{w_m t}{2} - \cos(\alpha + \beta) \cos \frac{w_f t}{2} \sin \frac{w_m t}{2}, \\ w_f &= w(\cos \alpha - \sin \alpha \operatorname{ctg}(\alpha + \beta)), \quad w_m = \frac{w \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}.\end{aligned}$$

Требующиеся для решения кинематического уравнения (2) компоненты угловой скорости в НДСК находятся по формулам

$$w_x = w \sin \alpha \sin w_f t, \quad w_y = w \sin \alpha \cos w_f t, \quad w_z = -\cos \alpha.$$

При численном моделировании использованы следующие параметры задачи:  $w = 2\pi \text{ c}^{-1}$ ,  $\alpha = \pi/12$ ,  $\beta = \pi/6$ ,  $\Delta t = 0,01$ . Результаты численного расчета кватерниона  $\Lambda = \Lambda(t)$  (крестиками показано аналитическое решение) и нормированного отклонения  $\Delta \lambda_i / \Delta t^2$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) от аналитического решения для каждого из его компонент представлены на рис. 1.  $\vec{w} = \vec{w}_f + \vec{w}_m$  — разложение угловой скорости по направлениям осей конусов (см. рис. 1, а).

По определенному в каждой расчетной ячейке кватерниону ориентации  $\Lambda = \Lambda(t)$  находится матрица  $\hat{A}(t)$  поворота осей анизотропии арматуры относительно НДСК

$$\hat{A}(t) = 2 \begin{bmatrix} \lambda_0^2 + \lambda_1^2 - 1/2 & \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_0 \lambda_3 & \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_0 \lambda_2 \\ \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_0 \lambda_3 & \lambda_0^2 + \lambda_2^2 - 1/2 & \lambda_2 \lambda_3 - \lambda_0 \lambda_1 \\ \lambda_1 \lambda_3 - \lambda_0 \lambda_2 & \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_0 \lambda_1 & \lambda_0^2 + \lambda_3^2 - 1/2 \end{bmatrix}.$$

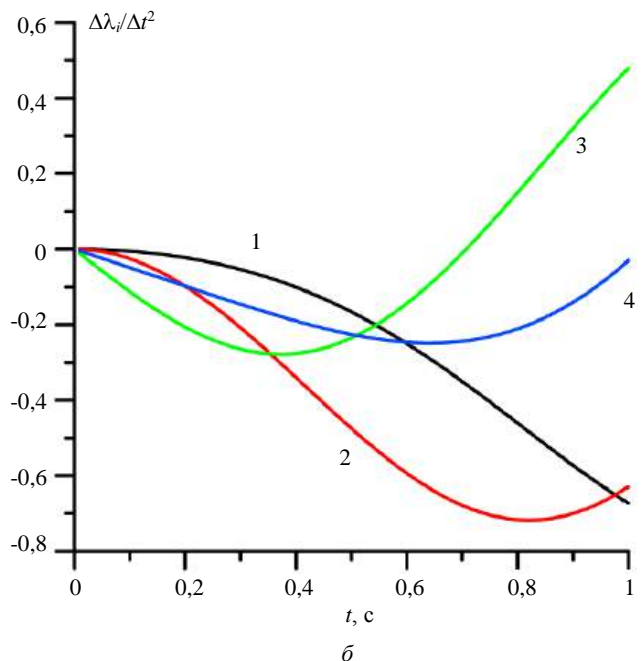
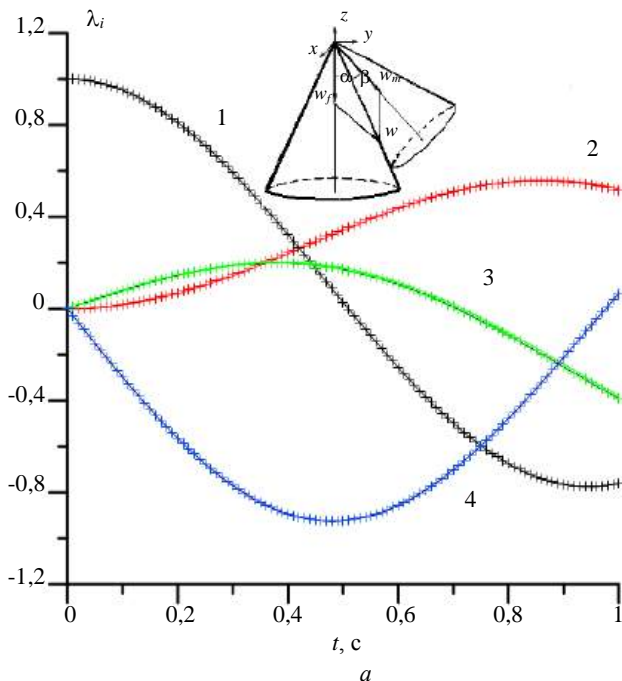


Рис. 1. Сравнение аналитического и численного решения кинематического уравнения Пуассона:

а — компоненты кватерниона  $\Lambda = \Lambda(t)$ ; б — нормированная ошибка для каждой из компонент кватерниона;

1 — нулевой компонент; 2 — первый компонент; 3 — второй компонент; 4 — третий компонент

Рассчитанные компоненты тензора напряжения в бетонном континууме

$$\hat{T} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

преобразуются при переходе от НДСК к системе координат, связанной с осями ортотропии стержневой арматурной системы,

$$\hat{\hat{T}} = \hat{A}(t) \hat{T} \hat{A}^T(t), \quad (4)$$

где верхний индекс  $T$  у матрицы означает, что эта матрица транспонирована; волна над переменной показывает, что компоненты тензора вычисляются в системе отсчета, связанной с арматурой.

В соответствии с преобразованиями (4) находим и компоненты тензора скоростей деформации в системе координат, связанной с осями ортотропии арматуры, а затем определяем соответствующие им приращения деформаций в арматурных стержнях. По приращениям деформации находится новое напряженное состояние стержневой системы  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ , где 1, 2, 3 — оси ортотропии континуума арматуры. Используется модель Джонсона—Кука [13, 14], в которой предел текучести  $\sigma_T$  определяется с учетом деформационного упрочнения, скоростных и температурных эффектов

$$\sigma_T = \begin{cases} \left( A + B \varepsilon_p^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right) & \text{при } \dot{\varepsilon}_p > \dot{\varepsilon}_0, \\ \left( A + B \varepsilon_p^n \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right) & \text{при } \dot{\varepsilon}_p \leq \dot{\varepsilon}_0, \end{cases}$$

где  $T_0, T, T_m$  — температуры (начальная, текущая и плавления);

$\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p$  — интенсивность пластической деформации и её скорость;

$A, B, n, C, m, \varepsilon_0$  — константы материала ( $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$ ).

В случае стержня, полагая, что при пластическом течении коэффициент Пуассона равен 1/2 (несжимаемый материал), получаем для приращения интенсивности пластической деформации

$d\varepsilon_p = d\varepsilon - d\sigma / E$  ( $E$  — модуль Юнга арматурной стали).

Для определения момента разрушения стержня арматуры используется энергетический критерий [15]

$$D = 1, \quad D = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma \theta(\sigma) d\varepsilon_p / W_{cr}(T),$$

где  $D$  — степень поврежденности;

$\theta(\sigma)$  — функция Хевисайда;

$W_{cr}(T)$  — пластическая работа до разрушения.

При наличии экспериментальных данных используем более корректный критерий, включающий уравнение для кинетики накопления микроповреждений

$D = 1,$

$$\Delta D = \frac{\Delta \varepsilon_p}{\left( D_1 + D_2 \exp \left( \frac{D_3 P}{\sigma} \right) \right) \left( 1 + D_4 \ln \left( \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \right) \times \left( 1 + D_5 \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \right)},$$

где  $D_i (i=1, \dots, 5)$  — константы материала.

После определения нового напряженного состояния арматуры вычисляются усредненные суммарные компоненты тензора напряжений БК в осях ортотропии

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{xx\Sigma} &= \tilde{\sigma}_{xx} (1 - \psi) + \psi p_1 \sigma_1, \\ \tilde{\sigma}_{yy\Sigma} &= \tilde{\sigma}_{yy} (1 - \psi) + \psi p_2 \sigma_2, \\ \tilde{\sigma}_{zz\Sigma} &= \tilde{\sigma}_{zz} (1 - \psi) + \psi p_3 \sigma_3, \\ \tilde{\sigma}_{xy\Sigma} &= \tilde{\sigma}_{yx\Sigma} = \tilde{\sigma}_{xy} (1 - \psi), \\ \tilde{\sigma}_{xz\Sigma} &= \tilde{\sigma}_{zx\Sigma} = \tilde{\sigma}_{xz} (1 - \psi), \\ \tilde{\sigma}_{yz\Sigma} &= \tilde{\sigma}_{zy\Sigma} = \tilde{\sigma}_{yz} (1 - \psi), \end{aligned}$$

где  $\psi$  — объемная доля армирования БК;

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

Компоненты усредненного тензора напряжений БК в исходной НДСК находятся с помощью преобразования обратного по отношению к преобразованию (4)

$$\hat{\hat{T}}_\Sigma = \hat{A}^T(t) \hat{\hat{T}}_\Sigma \hat{A}(t).$$



Компоненты тензора напряжений, даваемые матрицей  $\hat{T}_\Sigma$ , и используются при численном моделировании в уравнениях динамики и энергии анизотропного БК в НДСК.

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)

$$\psi = \frac{\rho}{\rho_{rf}} m,$$

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

Предложенная численная 3D-модель БК может рассматриваться, 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, пренебрегали дискретностью, обусловленной различием механических свойств компонентов. Чем более равномерно распределен армирующий материал в БК, тем достовернее будут результаты, получаемые по предлагаемой модели.

### Результаты расчетов

В качестве модельной конструкции ЖБУ рассматривали железобетонную арку в виде полуцилиндра длиной  $L = 12$  м. На рис. 2 показано её центральное поперечное сечение с размерами ( $h/R = 1/10$ ).

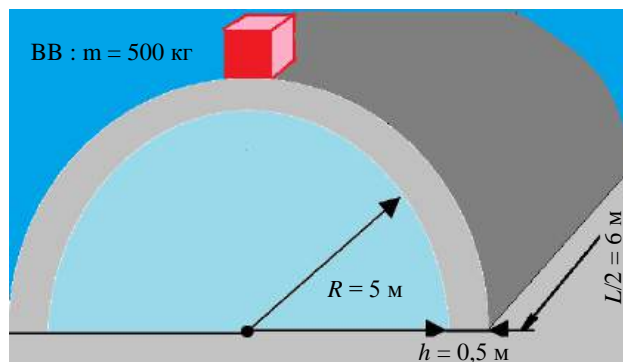


Рис. 2. Центральное поперечное сечение ЖБУ с зарядом

Нагружение ЖБУ осуществлялось в середине образующей цилиндра продуктами детонации взрывчатых веществ (ВВ) массой 500 кг. Предполагали, что заряд до детонации имел форму куба и находился в контакте с внешней поверхностью ЖБУ.

В качестве материала армирования ж/б была выбрана арматурная сталь А-III (А-400). Для описания поведения продуктов детонации использовалось уравнение состояния JWL [16] для флегматизированного гексогена PBX-9010 с начальной плотностью ВВ равной  $1,787 \text{ г/см}^3$ . Максимальное давление продуктов взрыва составляло  $34,0 \text{ ГПа}$  (соответствует давлению в точке Чепмена-Жуге для рассматриваемого ВВ).

На рис. 3 приведены расчетные 3D-конфигурации ЖБУ и облака продуктов детонации ВВ в различные моменты времени. Динамика распределения степени поврежденности  $D$  бетона в ЖБУ показана на рис. 4. Серым цветом выделена область полного разрушения бетона со значениями  $D \geq 1$ . Сквозное разрушение происходит уже к моменту времени  $t = 0,25 \text{ мс}$  в вершине купола, а к моменту времени  $t = 1,0 \text{ мс}$  радиус разрушенной области составляет около 3 м. Как следует из полученных результатов, рассматриваемая конструкция ЖБУ не обеспечивает защиты от заряда рассматриваемого типа ВВ массой 500 кг. В то же время нагрев арматуры вплоть до  $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  не оказывает существенного влияния на распределение степени поврежденности рассматриваемой конструкции.

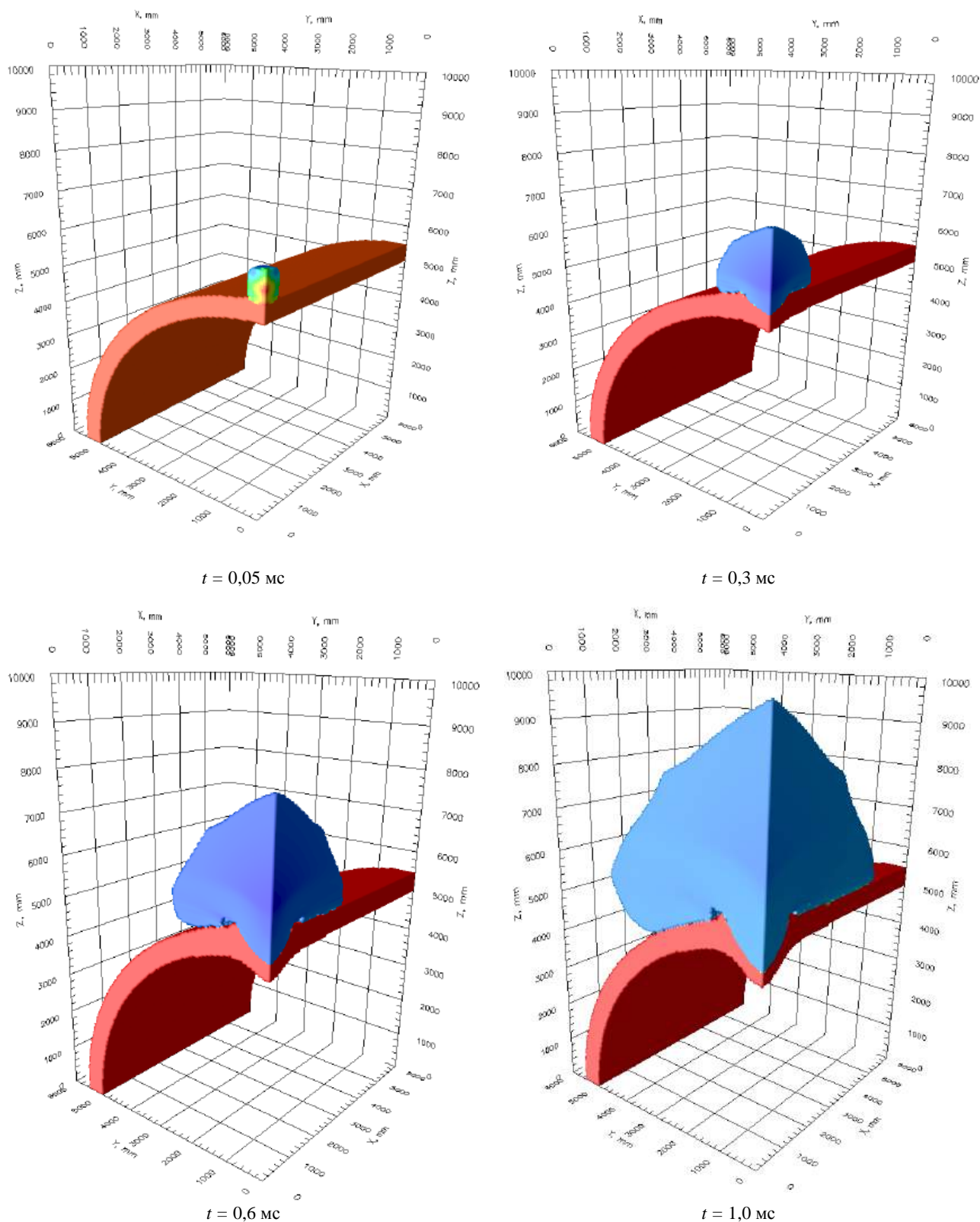


Рис. 3. 3D-конфигурации расширяющегося облака продуктов детонации ВВ и ЖБУ в различные моменты времени

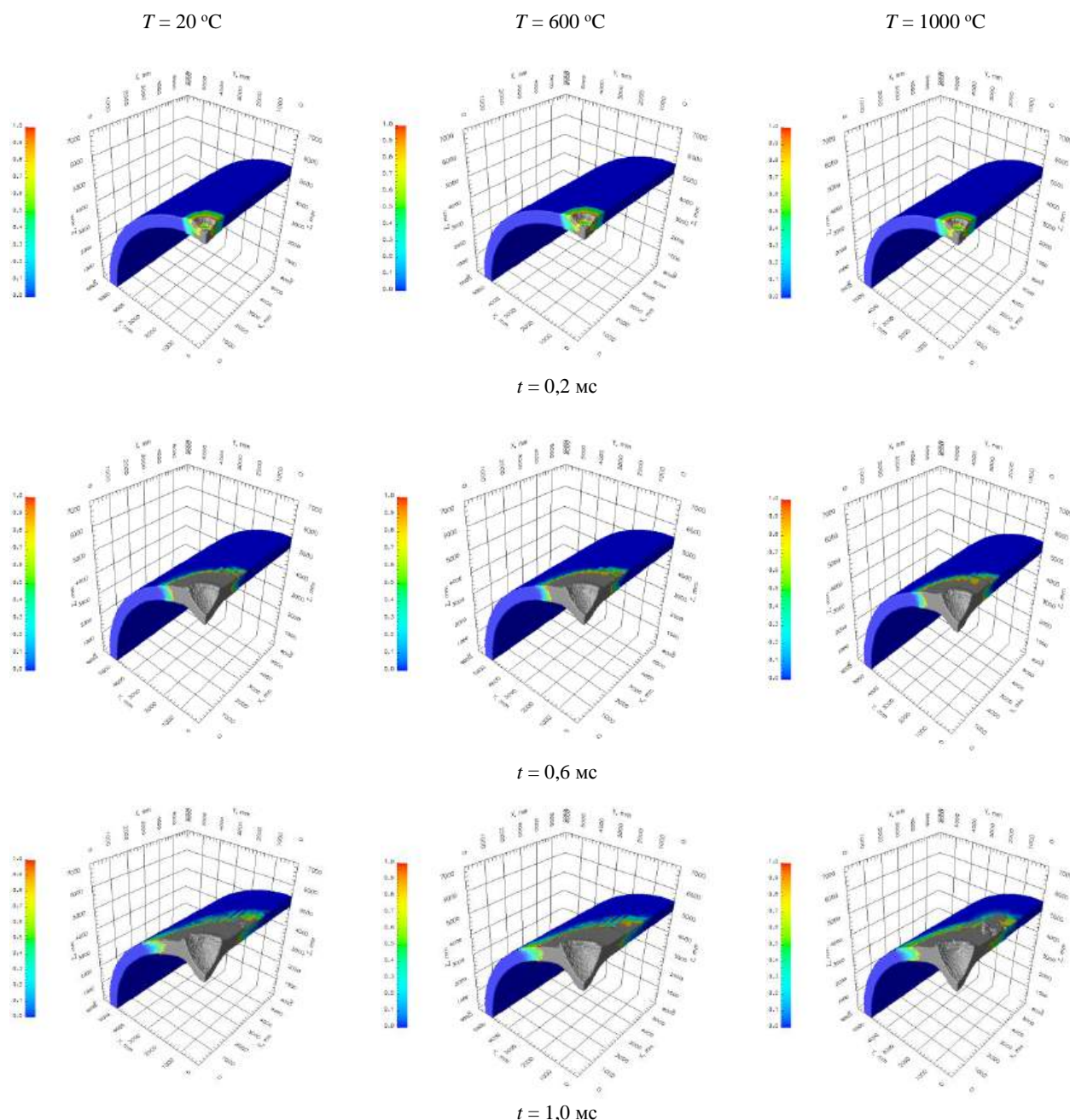


Рис. 4. Распределение степени поврежденности бетона при различных температурах нагрева в моменты времени  $t = 0,2$ ;  $0,6$  и  $1,0$  мс (серым цветом выделены области полного разрушения материала)

### Выводы

Предложенная численная 3D-модель деформирования и разрушения бетонных композитов позволяет рассчитывать характеристики нестационарного поведения нагретых конструкций из бетонов, усиленных арматурной сталью или арматурой из полимерных КМ на основе высокомолекулярных волокон, вплоть до полного разрушения БК.

Проведенные расчеты показывают высокую численную устойчивость метода конечно-размер-

ных частиц, что позволяет прогнозировать нелинейное нестационарное поведение нагретых конструкций из БК вплоть до их полного разрушения.

Как показывают результаты расчетов, рассматриваемая конструкция ЖБУ не обеспечивает защиты от заряда рассматриваемого типа ВВ массой 500 кг. Нагрев арматуры вплоть до  $T = 600$  °C не оказывает существенного влияния на распределение степени поврежденности рассматриваемой конструкции.

Разработанный комплекс ЭВМ-программ может быть полезен для предварительных расчетов

поведения нагретых конструкций 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. Леденев А. А., Внуков А. Н., Загоруйко Т. В., Перцев В. Т. Исследование и разработка термостойких бетонов для повышения огнестойкости строительных конструкций зданий и сооружений военного назначения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 7. С. 198—206.
2. Окольников Г. Э., Герасимов С. В. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве // Строительство и архитектура. 2015. № 3. С. 14—21.
3. Böhm R., Thieme M., Wohlfahrt D., Wolz D. S., Richter B. H. Jäger Reinforcement Systems for Carbon Concrete Composites Based on Low-Cost Carbon Fibers // Fibers. 2018. № 6. — 56 p.
4. 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. Springer.
5. Бакулин В. Н., Острик А. В. Комплексное действие излучений и частиц на тонкостенные конструкции с гетерогенными покрытиями. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 288 с.
6. Гуняева А. Г., Курносоев А. О., Гуляев И. Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП "ВИАМ", для авиационно-космической техники: настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1(95). С. 43—53.
7. Курлапов Д. В. Воздействие высоких температур пожара на строительные конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 4(6). С. 41—43.
8. Васильченко А. В. Учет комбинированного воздействия взрыва и пожара на железобетонные изгибаемые конструкции: мат. II Всеукраинской науч.-практ. конф. "Проблемы гражданской защиты: управление, предупреждения, аварийно-спасательные и специальные работы". — Харьков: НУГЗУ, 2013. С. 150—152.
9. Острик А. В., Ким В. В., Острик М. А. Численное моделирование деформирования и разрушения конструкций из бетонных композитов при нестационарном нагружении // Конструкции из композиционных материалов. 2022. Вып. 4. С. 21—28.
10. Куропатенко В. Ф. Модели механики сплошных сред. — Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2007. — 302 с.
11. 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.
12. 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. С. 14—21.
13. Johnson G. R., Cook W. N. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. High rates and high temperatures: Proc. 7th Int. Symp. Ballistics, Hague (Netherlands), 19—21 Apr. 1983. Hague: Roy. Inst. of Engrs in the Netherlands. 1983. P. 541—547.
14. Johnson G. R., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Engng Fract. Mech. 1985. V. 21. № 1. P. 31—48.
15. Cockcroft M. G., Lathan D. J. Ductility and the Workability of Metals // J. Inst. Metals. 1968. V. 96. P. 33.
16. Urtiew P. A., Hayes B. Parametric Study of the Dynamic JWL-EOS for Detonation Products // ФГВ. 1991. № 4. С. 126—137.

## Numerical 3D-modeling of deformation and destruction of reinforced concrete hangars as a result of heating and action of explosive 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

*Numerical 3D-model of deformation and destruction of concrete composites is proposed based on representation of inhomogeneous medium by combination of interacting continuums. Numerical modeling of deformation and destruction of heated structures such as a hangar made of concrete reinforced with reinforcing steel was carried out. It is obtained that the developed numerical models allow calculating by the method of finite-dimensional particles the characteristics of the non-stationary 3D-behavior of constructions made of concrete composites up to their complete destruction. It has been shown that heating to  $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  practically does not affect the degree of damage for considered construction.*

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



УДК 678.0675-42

DOI: 10.52190/2073-2562\_2023\_1\_15

EDN: LGPVDZ

## Способ косослойной продольно-поперечной намотки как основа технологии массового производства малогабаритных изделий из стеклопластика

Г. И. РУССКИХ, канд. техн. наук, Ю. М. РЕЗЯПОВ

АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, Алтайский край, Россия

В. А. БАШАРА, канд. техн. наук

ООО «Бийский завод стеклопластиков», г. Бийск, Алтайский край, Россия

А. А. ПАЖИТНОВ

ООО ПКМ «Алтай», г. Бийск, Алтайский край, Россия

*Рассмотрена автоматизированная технология массового производства полых малогабаритных емкостных изделий высокого давления, впервые полученная на основе способа косослойной продольно-поперечной намотки (КППН), эволюция ее развития с решением проблем массового выпуска.*

**Ключевые слова:** полимерные композиты, технология КППН непрерывного формования труб высокого давления из стеклопластика, технология формования вмотанных соединений, методы контроля качества, алгоритмы автоматизации.

В 70—80-е годы XX века в ФНПЦ "Алтай" (АНИИХТ, НПО "Алтай") была создана технологическая база для разработки и изготовления стеклопластиковых труб высокого давления диаметром до 500 мм.

В основу технологии был положен разработанный в Бийске способ КППН (рис. 1) [1], заключающийся в следующем: тангенциальные нити собираются в ленту, пропитываются в ванне связующим, натягиваются устройством натяжения до заданной величины и после раскладки на укладочной гребенке на ширину  $B$  обматываются нитями осевой ориентации со шпуль, расположенных на вращающемся укладчике (вертлюге). Полученная в результате нетканая лента продольно-поперечной арматуры наматывается на вращающуюся оправку с продольным смещением  $S$ .

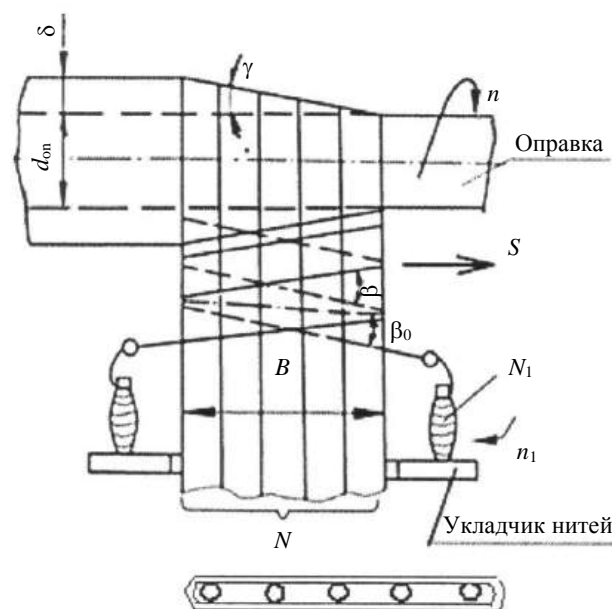


Рис. 1. Схема бийского способа КППН:

$B$  — ширина ленты;  $N$ ,  $N_1$  — количество жгутов (нитей) кольцевой и нитей (катушек) осевой арматуры соответственно;

$\beta$  — угол укладки нитей осевой арматуры в ленту (зависит от отношения угловых скоростей укладчика  $n_1$  и оправки  $n$ );  $\gamma$  — угол укладки ленты к поверхности оправки.

Внизу — схема укладки волокон

Русских Геннадий Иванович, ведущий научный сотрудник.

E-mail: post@frpc.secna.ru

Резяпов Юрий Михайлович, начальник отдела.

E-mail: post@frpc.secna.ru

Башара Владимир Алексеевич, главный специалист.

E-mail: bzs@mail.bysk.ru

Пажитнов Александр Андреевич, технический директор.

E-mail: pkm-altay@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 октября 2022 г.

© Русских Г. И., Резяпов Ю. М., Башара В. А.,  
Пажитнов А. А., 2023

В отличие от других способов формования труб (продольно-поперечная намотка (ППН) или спиральная намотка (СН)) способ КППН имеет семь

параметров управления ( $n$ ,  $n_1$ ,  $N$ ,  $N_1$ ,  $B$ ,  $\gamma$ ) (см. рис. 1), что позволяет создать многокритериальную систему управления процессом. Например, регулировать толщину намотки можно как изменением величины подачи ленты, так и регулировкой скорости вращения оправки, а также — скоростью вращения вертлюга. При этом можно менять и схему армирования, в частности, соотношение кольцевых и осевых нитей. Толщина изделия набирается за один проход.

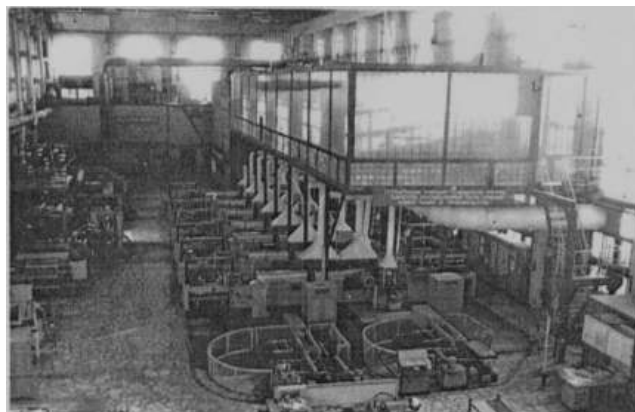
Способ имеет две разновидности: периодический — структура формируется на вращающуюся оправку, закрепленную на станке, а намотка осуществляется перемещением укладчика ленты вдоль оправки; непрерывный — рама укладчика установлена неподвижно, а намотка производится на вращающуюся и подвижную вдоль оси оправку. Второй вариант способа и позволил в рамках развития технологии реализовать технологию массового производства.

Развитием технологии бийского способа КППН занимался автор способа — начальник технологической лаборатории В. А. Башара со своими коллегами. Над внедрением изделий, полученных данным способом, работали конструкторы изделий (В. А. Казаринов, В. В. Шмидт, А. И. Демченко и др.), конструкторы оборудования (В. А. Англинов, Г. И. Кондрашев, В. Н. Седелков, Н. В. Ощепкова, Т. А. Быстрыкина и др.), технологи-материаловеды (Я. И. Широ́ва, А. Н. Воробьев, А. К. Константинова, Э. Н. Гареева и др.). Задачами по неразрушающему контролю занимались Н. Д. Фоминов, Н. И. Долги. Большое значение в автоматизации процесса имела работа отделения автоматизации с участием В. В. Шутова, В. М. Петракова, П. П. Быстрикова, Л. С. Звольского и других сотрудников. Большую роль сыграли инженеры-прочности и испытатели изделий.

### **Работы по внедрению способа КППН применительно к массовому производству**

Начало работ по внедрению оригинальной технологии формования КППН было положено в 70-е годы с разработкой технологии получения корпусов двигателей из стеклопластика для реактивных систем залпового огня: "Град", "Ураган", "Смерч". Работы были доведены до натурных испытаний изделий, но не были приняты к производству. Наиболее продвинулась технология формования стеклопластиковых труб диаметром 110 мм для аналога "Град 1" — "Октава". Изделие прошло государственные испытания и хотя не было принято к производству, позволило получить

первый опыт разработки комплекса из автоматических линий для массового выпуска труб высокого давления (до 34 МПа) (рис. 2).



**Рис. 2. Автоматическая линия намотки корпусов изделия "Октава":**

на переднем плане — установка распрессовки труб и возврата оправок на формование

Из гражданской продукции было освоено производство корпусов из стеклопластика для противогорадовых ракет "Облако".

### **Создание технологии автоматизированного производства малогабаритных изделий**

Новый этап в развитии технологии был начат в 80-е годы, когда НПО "Алтай" (генеральный директор — академик СО АН СССР Г. В. Сакович) была поручена на конкурсной основе разработка конструкции и технологии корпусов двигателей для выстрела РПГ "Таволга" и "Вампир" (рис. 3).



**Рис. 3. Корпус двигателя из стеклопластика в составе выстрела гранатомёта РПГ-29, изготовленного в НПО "Алтай" по технологии КППН [2]**

В отличие от ранних вариантов по типу РПГ-7, где использовался заряд дозвукового истечения, в РПГ-27 "Таволга" и РПГ-29 "Вампир" использовался классический ракетный двигатель сверхзвукового истечения. Корпус двигателя должен был выдерживать рабочее давление до 60 МПа. Варианты корпусов двигателя из стали имели больший вес и по удельной прочности уступали корпусам из композиционных материалов. По технико-экономическим показателям несомненный выигрыш имел корпус из стеклопластика (рис. 4).

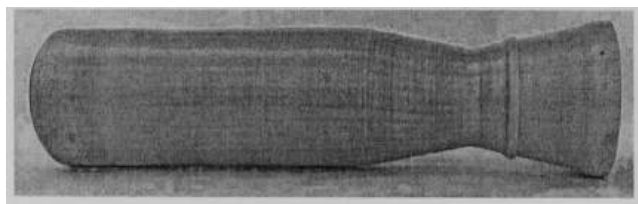


Рис. 4. Внешний вид корпуса изделия "Вампир" из стеклопластика [1]

Конструкции корпусов изделий "Таволга" и "Вампир" были однотипными, но отличались размерами. Корпус представлял собой цельноформованную конструкцию, выполненную способом КППН на оправке. В передней части корпуса имеется заформованная резьбовая втулка для крепления дна (из алюминиевого сплава для "Таволги" и стальная для "Вампира"). Герметизация осуществлялась резиновым чехлом, надеваемым вместе с втулкой перед формованием на оправку. Длина чехла заканчивалась вблизи критического сечения сопла. Незащищенная внутренняя поверхность раструба сопла герметизировалась пропиткой герметизирующим составом. Внешнюю часть раструба сопла обрабатывали механически для получения выступов, на которых крепили оперение (см. рис. 3).

Конструкции обоих видов корпусов разрабатывали одновременно с технологией их получения. Первоначально их формовали на станке периодической намотки УН-ТР на базе токарного станка с использованием блока оправок для 3—4 корпусов. Полимеризацию осуществляли на станке при помощи инфракрасных излучателей до полного отверждения связующего. Полученные корпуса испытывали на внутреннее давление на гидроразрывной установке и пороховым зарядом для обеспечения полуторного запаса прочности.

В рамках разработки конструкции и отработки технологии решались следующие основные задачи технологии.

- Выбор материала корпуса: связующего, вида наполнителя, материала втулки и материала чехла.
- Подбор схемы формования: вида формования, схемы и укладки армирующих нитей на оправку.
- Отбор режимов КППН, обеспечивающих заданную схему армирования.
- Разработка ТЗ на линию непрерывной намотки с учетом обеспечения на ней выбранных режимов формования и полимеризации.
- Разработка ТЗ автоматизации с обеспечением режимов намотки, полимеризации, обрезки, подачи, распрессовки и возврата оправок в исходную точку намотки.
- Решение вопросов механической обработки с ее автоматизацией.

- Решение вопросов неразрушающего контроля готовых изделий и его автоматизация.

**Отработка конструкции корпусов изделий "Таволга" и "Вампир".** Для армирования корпуса использовали высокомодульные стекловолоконные материалы: нити ВМС, ВМПС и ровинг РВМН. В первоначальном варианте конструкции в качестве как осевых нитей  $N_1$ , так и кольцевых  $N$  (см. рис. 1) использовали нить ВМС. Из-за большой обрывности осевую нить заменили на ровинг РВМН 10-420-80, а его — на ровинг из стекла ВМП, что позволило повысить прочность на 10—20 %, обеспечить требования по давлению разрушения корпуса и снизить вес на 2,3 %. Также по условиям технологичности были заменены марки резин для герметизирующих чехлов как на "Таволге", так и на "Вампире". Решены задачи подбора клея и технологии склейки чехла с резьбовой втулкой. Из-за сползания чехла с оправки при намотке пришлось ввести армирование резинового чехла стеклотканью.

#### **Создание пилотной установки формования.**

В технологии получения корпусов основным процессом является формование его оболочки из стеклопластика. Поэтому разработке установки намотки было уделено особое внимание. На ней отработывали режимы намотки и задачи автоматизации по контролю намотки, полимеризации, обрезки оправок по длине изделий и др. Линия получила название КН-1СП. В процессе отработки технологии было получено более 15 000 изделий "Таволга" [3]. При этом исследовалась надежность оборудования, выявлялись узкие места и наиболее нагруженные узлы. Отработкой занимался коллектив технологов в составе А. А. Пажитнова, Е. Г. Власовой, С. С. Ермоленко, Г. К. Корнаковой, В. А. Боткина и других.

Установка намотки КН-1СП представляла собой станину, на которой размещались узлы подачи и вращения оправки; узел пропитки и укладчик нетканой ленты, линия полимеризации и устройство обрезки. Блоки из трёх состыкованных между собой оправок соединяли на линии в звенья и перемещали с вращением на формование.

Были автоматизированы и поддерживались на заданном уровне скорости подачи, вращения оправки и вертлюга, температуры в зонах нагрева полимеризаторов, контролировалось натяжение нитей и их обрывность. Сборку блоков оправок, их подготовку для повторного использования и заливку связующего осуществляли вручную. Намоточный комплекс КН-1СП позволял проводить перенастройку для получения изделий разного калибра, однотипных с "Таволгой" и "Вампиром".

Успешная эксплуатация линии КН-1СП позволила приступить к разработке гибкого намоточного комплекса ГНК-М, в котором для массового производства могло размещаться от двух до десяти намоточных линий СП-1 (рис. 5) [3].

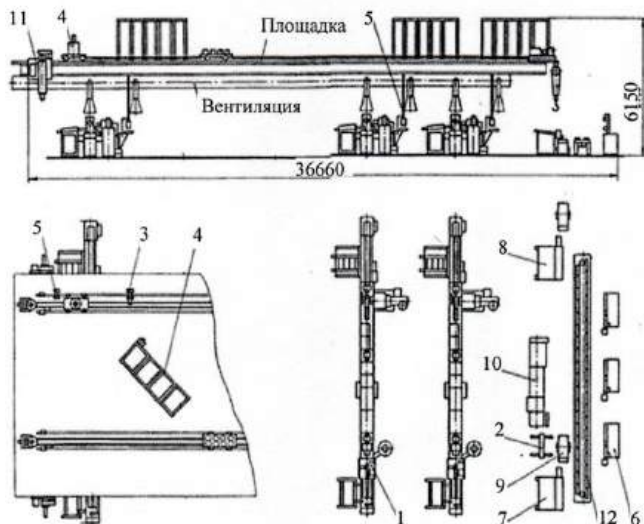


Рис. 5. Гибкий намоточный комплекс ГНК-М:

1 — линия намотки СП-1; 2 — стеллаж; 3 — устройство подъема клапана раздачи связующего; 4 — шпулярник; 5 — заливочное устройство; 6 — сборщик оправок; 7 — стенд разборки блок-оправок; 8 — стенд сборки блок-оправок; 9 — тележка; 10 — токарный станок; 11 — робот промышленный

Функционально комплекс ГНК-М поделен на шесть технологических секций.

1. Участок подготовки блок-оправок состоял из стендов разборки оправок 7 и сборки 8. На стенде 8 блок-оправки с намотанными изделиями разбирались на отдельные оправки, которые подготавливались к намотке, вновь собирались в блок-оправки и снова подавались на намотку.

2. На линии загрузки блок-оправок использовался робот загрузки для установки на линию намотки.

3. Участок намотки состоял из линий намотки СП-1, расположенных параллельно.

4. На линии выгрузки блок-оправок с изделиями использовали робот для снятия их с линии и транспортировки и с линии намотки на участок подготовки.

5. На линии раздачи связующего использовали устройство контроля уровня и раздатчик связующего 5 в ванны пропитки линий СП-1 по транспортным рельсовым направляющим.

6. По рельсовым направляющим ровинг с линии раздачи стеклоарматуры подавался на шпулярники, а оттуда — на линии СП-1.

В отдельном помещении размещались управляющие ЭВМ и электрошкафы АСУ ТО оборудования 1, 2, 4, 5 и 6-й групп и на каждую линию намотки.

Комплекс работает следующим образом. В подготовленные к работе линии СП-1 вводят необходимое количество блок-оправок, шпулярники заправляются ровингом, связующее заливается в ванны.

Блок-оправки в линии состыковываются соосно одна в другую, образуя единый стержень, проходящий через всю линию. Приводом линии этот стержень вращается и одновременно движется вперед. На поверхность блок-оправок наматывается оболочка изделия, подаваемая лентой с пропитанными кольцевыми жгутами ровинга. Далее оболочка полимеризуется, отрезается по линиям разреза изделий и механизмом выгрузки отгружается в накопитель линии СП-1. Далее робот передает блок-оправку на стенд разборки оправок. Напольный конвейер передает оправки на стенд сборки—разборки оправок, где изделия снимаются с оправок, а оправки передаются на стенд сборки блок-оправок для использования в дальнейшем цикле формования.

По сигналу с механизма загрузки одной из линий намотки СП-1 об отсутствии блок-оправки включается робот линии загрузки. Он принимает блок-оправку со стенда сборки и передает ее на механизм загрузки линии намотки.

При разработке технических решений ГНК-М получено восемь авторских свидетельств СССР на изобретения.

#### Разработка АСУТП намоточного комплекса.

Учитывая требования по малолюдности технологических процессов в условиях массового выпуска продукции, все техпроцессы были максимально автоматизированы. Уровень автоматизации составил 90 %. Рассматривая современные достижения в вычислительной технике и микроэлектронике, нужно с пониманием отнестись к трудностям разработчиков в СССР в конце 80-х годов XX века.

На рис. 6 показана структура локальной АСУТП.

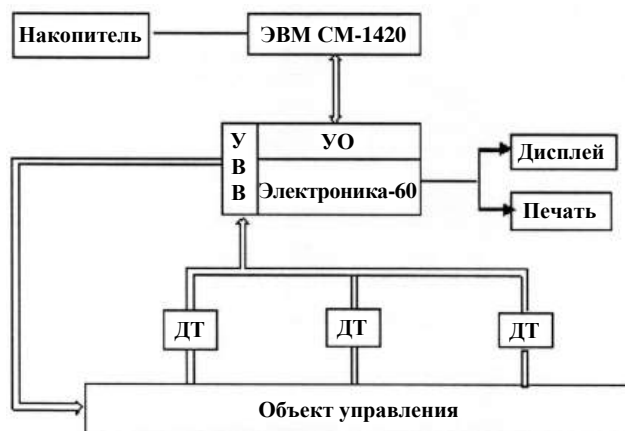


Рис. 6. Структура технических средств линии намотки У1-СП:

УО — устройство обмена; УВВ — устройство ввода-вывода; ДТ — датчики и КИП температур, натяжения, обрывности, скорости двигателей, состояния объекта управления



Система управления промышленным модулем была разработана как иерархическая, базирующаяся на принципах распределенного управления (см. рис. 6). Каждая локальная АСУТП, управляемая микро-ЭВМ "Электроника-60", координировалась системой верхнего уровня, управляемой ЭВМ СМ-1420. На рис. 7 представлена система технических средств АСУТП.

Программное обеспечение системы управления процессом намотки реализовало следующие основные функции:

- программно-логическое управление (ПЛУ) механизмами установки УН-1СП;
- контроль и управление технологическими параметрами (скорости вращения электродвигателями намотки, температуры в полимеризаторах, натяжения псевдоленты и др.);
- регистрация технологических параметров и выдача их на видеотерминал, печатающее устройство и ЭВМ верхнего уровня для дальнейшей обработки;
- начальная диагностика работоспособности оборудования установки, а также входных и выходных линий вычислительного комплекса.

Методы ПЛУ использовали для управления процессами стыковки, загрузки и отрезки оболочек на оправках, а также подачи связующего. В процессе отладки технологии в программное обеспечение АСУТП вносили коррективы.

Например, для повышения качества поддержания требуемого уровня технологических параметров введен контроль: соответствия натяжения псевдоленты и температуры связующего заданным требованиям; фактического продольного перемещения оправок и их фактического вращения.

Поскольку в период разработки комплекса намотки вычислительные возможности технических средств были ограничены, проведена оптимизация структуры программного обеспечения. Так, общее количество операторов макроассемблера было уменьшено с 5994 до 2900, а занимаемый объем памяти — с 110350<sub>8</sub> до 73042<sub>8</sub> байт. Для повышения качества управления разработали комплекс программ метрологической аттестации каналов АСУТП линии намотки [3].

**Создание и отработка АСУТП контроля качества корпусов.** Техническими требованиями уровень автоматизации при контроле качества корпусов "Таволга" и "Вампир" был установлен в 80 %. Структура работы технических средств АСУТП контроля качества была аналогична АСУТП намоточного комплекса (см. рис. 6, 7). Для контроля качества было спроектировано, изготовлено для неразрушающего ультразвукового контроля; оптического контроля; контроля герметичности оснований; автомат маркирования годных изделий; роботы-манипуляторы.

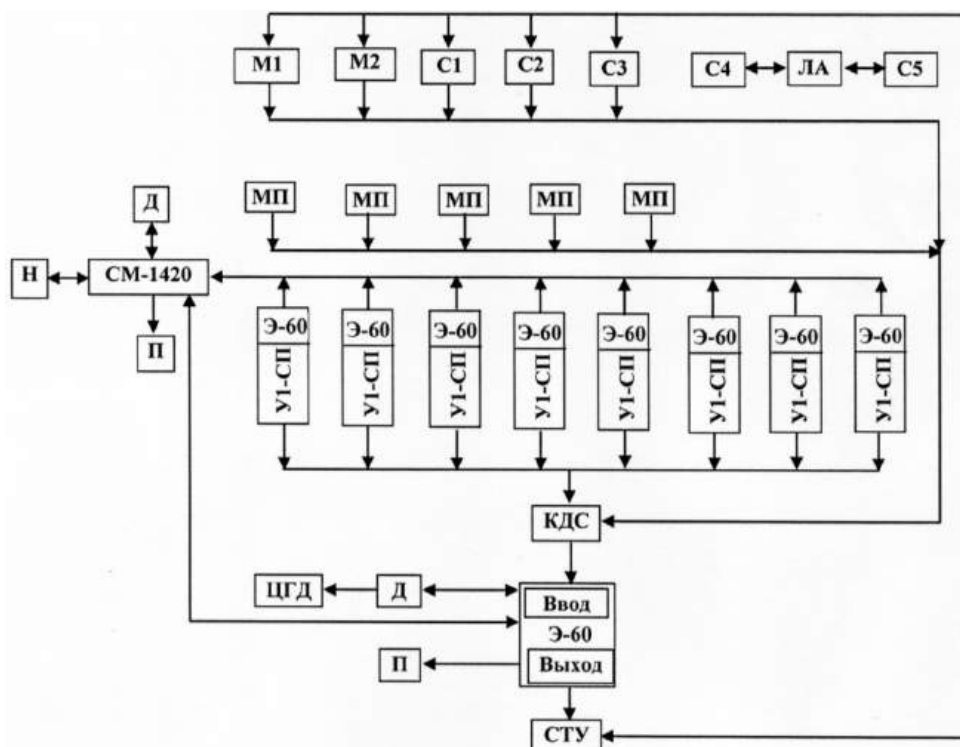


Рис. 7. Структура технических средств АСУТП:

М1, М2 — механизмы загрузки и разгрузки; С1, С2 — стеллажи сборки и разборки блоков оправок; С3, С5 — раздача связующего и ровинга; С4 — разборка оправок; ЛА — локальная автоматика; МП — местный пульт; КДС — коммутатор дискретных сигналов; СТУ — станция тиристорных усилителей; ЦГД — графический дисплей; Н — накопитель; Д — дисплей; П — печать

Работой станков и обработкой результатов контроля управляла микро-ЭВМ "Электроника-60". Аппаратура станков позволяла проводить измерения в автоматическом режиме.

*Стенд проверки герметичности* служит для пневмоиспытаний корпусов изделий. Корпуса закрывают заглушками, погружают в ванну с водой и надувают воздухом с давлением 0,2 МПа. Специальный прибор определяет степень герметичности. Степень автоматизации станка 90 %. Обработка результатов проводилась на ЭВМ "Электроника-МС 119001".

*Стенд неразрушающего ультразвукового (УЗ) контроля* представляет собой трехпозиционный агрегат. На первой позиции проводится акустический контроль, на второй — УЗ-контроль в плоскостях, перпендикулярных оси, на третьей — УЗ-контроль вдоль оси изделия, после чего корпус изделия убирают из рабочей зоны станка. Степень автоматизации станка 90 %.

*Стенд оптического контроля* проверяет однородность материала корпусов изделий "Таволга" и "Вампир" световым методом перемещением измерительного прибора при вращении изделия. Степень автоматизации 80 %.

*Стенд контроля герметичности оснований*, представляющих собой резьбовые втулки, склеенные с резиновым чехлом. Проверка происходит на станке, аналогичном станку оптического контроля со схожим принципом работы: вращение изделия, надетого на специальную оправку; перемещение течеискателя вдоль изделия с подведенным под чехол сжатым воздухом. Течь регистрируется акустическим методом.

*Автомат маркирования* наносит номера обозначения изделия методом напыления краской через трафарет-перфоленту в автоматическом режиме.

*Промышленные роботы-манипуляторы* предназначены для перемещения корпусов изделий на позиции автоматизированной линии неразрушающего контроля.

Общий вид линии представлен на рис. 8.

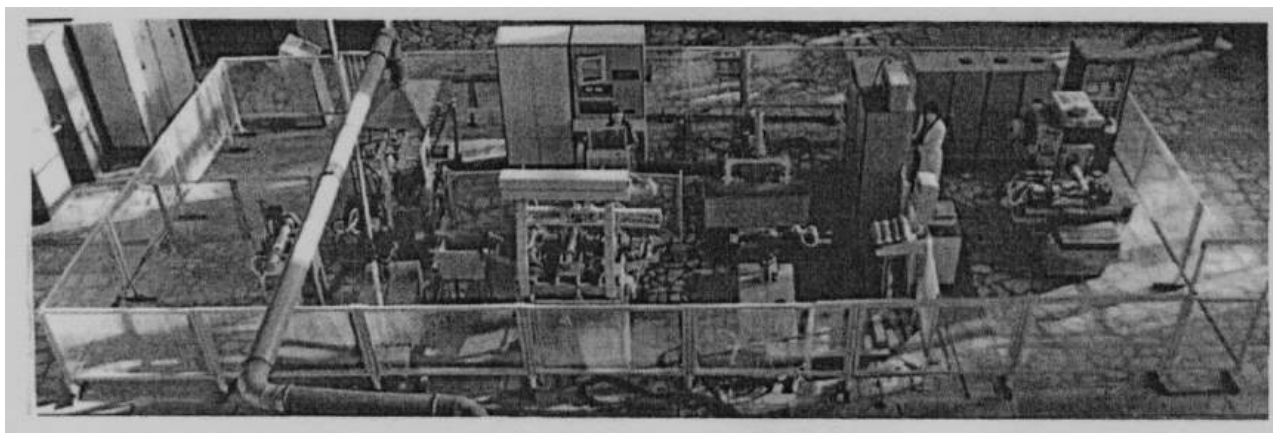
Качество контролируется по следующим параметрам: геометрические размеры, масса, герметичность, прочность, однородность материала.

**Порядок контроля изделий.** Разработанное программное обеспечение создает:

- автоматический режим линии контроля;
- режим калибровки корпусов на испытательных станках;
- режим автономной работы с одним или со всеми станками контроля.

Изделия после механической обработки в специальной таре подаются на участок контроля геометрических размеров. Оператор поштучно устанавливает корпус на оправку системы измерения. Контроль размеров проводится в автоматическом режиме с записью в память ЭВМ. После этого изделия взвешивают, фиксируют их массы и номера на ЭВМ и укладывают на лоток, откуда роботоманипулятором изделия устанавливают в ложемент станка проверки герметичности, затем на стенд УЗ-контроля, после чего по команде ЭВМ — на стенд оптического контроля. По завершении оптического контроля однородности материала ЭВМ обрабатывает результаты всех контрольных операций и присваивается каждому изделию критерий "годен" или "брак". Годное изделие маркирует и укладывает робот в тару. Одновременно распечатывается паспорт на каждое изделие.

При обработке в 1990 г. на линии проконтролировано около 5000 изделий с анализом всех параметров.



**Рис. 8. Внешний вид роботизированной технологической линии неразрушающего контроля качества и маркирования изделий**

**Заключение**

Работы по созданию автоматизированного производства подтвердили перспективность способа КППН для использования в технологии массового производства малогабаритных корпусных изделий из стеклопластика.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Башара В. А., Русских Г. И. Бийский способ формования оболочек из стеклопластика: сб. трудов X Междунар. науч. школы-конференции "Фундаментальное и прикладное материаловедение". — Барнаул: АлтГТУ. 2013. С. 43—48.
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https:// Militaryrussia.ru/blog/topic](https://Militaryrussia.ru/blog/topic). — 439 с.
3. Разработка оборудования и технологического процесса изготовления корпусов из ПКМ: научно-технический отчет по ОКР. Тема ТТ4-622-89 ("Надежда-2") / НПО "Алтай". — Бийск. 1990. — 243 с.

## **The method of oblique longitudinal-transverse winding as the basis of mass production technology of small-sized fiberglass products**

G. I. RUSSKIKH, Yu. M. REZYAPOV  
JSC "FR&PC "Altai", Biysk, Altai Territory, Russia,

V. A. BASHARA  
LLC "Biysk Fiberglass Plant", Biysk, Altai Territory, Russia

A. A. PAJITNOV  
LLC "PKM-Altai", Biysk, Altai Territory, Russia

*The computer-aided technology for the production of hollow small-sized high-pressure bulk-capacity products, the evolution of its development with solution to the problems of mass production have been considered. It was obtained for the first time based on oblique longitudinal-transverse winding (OLTW).*

**Keywords:** polymer composites, OLTW technology for continuous molding of high-pressure fiberglass pipes, technology for molding wound-in joints, quality control methods, automation algorithms.

## О взаимодействии керамического порошка с жаростойким сплавом при формировании и эксплуатации теплозащитного покрытия

С. А. ОГЛЕЗНЕВА, д-р техн. наук; С. Е. ПОРОЗОВА, д-р техн. наук;  
М. Н. КАЧЕНЮК, канд. техн. наук; В. Б. КУЛЬМЕТЬЕВА, канд. техн. наук;  
А. А. СМЕТКИН, канд. техн. наук

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

*Исследовано взаимодействие компонентов в системе  $ZrO_2-8Y_2O_3$  — сплав ВКНА при имитации условий эксплуатации оборудования при 1000–1200 °С в атмосфере вакуума. Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света и электронной микроскопии установлено взаимодействие между некоторыми компонентами сплава (алюминий, хром, никель) и керамическим порошком, выраженное в расстабилизации  $ZrO_2$  и превращения части тетрагональной фазы в моноклинную.*

**Ключевые слова:** теплозащитное покрытие, диоксид циркония, оксид иттрия, жаростойкий сплав, моноклинная модификация, рамановская спектроскопия, электронная микроскопия.

От возможности повышения температуры работы деталей машин часто зависит и повышение эффективности технологического оборудования в целом. Детали, работающие в условиях экстремально высоких температур, обычно изготавливают из жаропрочных никельсодержащих сплавов. К сожалению, ресурс таких сплавов практически исчерпан. Керамика, на применение которой в качестве замены жаропрочных металлических сплавов рассчитывали многие исследователи, пока не может конкурировать с металлами из-за неудовлетворительных показателей пластичности, теплопроводности, трещиностойкости [1]. Повышение

эксплуатационных характеристик изделий может быть достигнуто только созданием на их поверхности изделий теплозащитных покрытий (ТЗП).

Современные ТЗП — это, в общем случае, двухслойные системы, которые состоят из изолирующего керамического внешнего слоя и внутреннего устойчивого к коррозии антиокислительного слоя (соединительного слоя между подложкой и керамикой). В качестве керамического внешнего слоя часто используют диоксид циркония, стабилизированный 7–8 масс. % оксида иттрия [2, 3].

Непосредственный контакт металлических деталей машин и керамического слоя невозможен из-за слишком большой разницы термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР), приводящей к отслаиванию и разрушению покрытия. Металлический соединительный слой не решает проблему, поэтому одним из наиболее простых вариантов является введение в состав соединительного металлического слоя керамического порошка [2, 3]. Однако при высоких температурах компоненты сплава и керамический порошок активны по отношению друг к другу.

Сложности методов исследования дисперсных слоев продуктов реакции в многокомпонентных системах металл—керамика обуславливают ограниченность количества работ, посвященных этим исследованиям [4]. Наиболее информативным методом для изучения изменений в составе керами-

Оглезнева Светлана Аркадьевна, профессор кафедры "Механика композиционных материалов и конструкций".

E-mail: svetlana.iron@yandex.ru

Порозова Светлана Евгеньевна, профессор кафедры "Механика композиционных материалов и конструкций".

E-mail: swporozova@yandex.ru

Каченюк Максим Николаевич, доцент кафедры "Механика композиционных материалов и конструкций".

E-mail: kachenjukmn@pstu.ru

Кульметьева Валентина Борисовна, доцент кафедры "Механика композиционных материалов и конструкций".

E-mail: kulmetevavb@pstu.ru

Сметкин Андрей Алексеевич, доцент кафедры "Механика композиционных материалов и конструкций".

E-mail: smetkinaa@pstu.ru

Статья поступила в редакцию 17 октября 2022 г.

© Оглезнева С. А., Порозова С. Е., Каченюк М. Н.,  
Кульметьева В. Б., Сметкин А. А., 2023



ческого порошка является метод комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопия, рамановская спектроскопия) [5].

Цель работы — исследование взаимодействия компонентов в системе  $ZrO_2-8Y_2O_3$  — связующий сплав ВКНА сочетанием методов спектроскопии комбинационного рассеяния света, электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа.

### Методика эксперимента и исследования

В качестве исходного металлического порошка для получения образцов связующего материала для ТЗП использован порошок ВКНА (АО "Полема", Россия), состав которого определен методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре EDX-800HS (Shimadzu, Япония).

Перед искровым плазменным спеканием (ИПС) порошок ВКНА подвергали механоактивации в планетарной мельнице. При этом по результатам лазерной дифрактометрии на анализаторе размера частиц "Analyzette 22 NanoTec" (Fritsch, Германия) удалось уменьшить средний размер частиц с 32 до 18 мкм и улучшить характер распределения частиц по размерам.

Порошок  $ZrO_2-8$  масс. %  $Y_2O_3$  получали методом обратного соосаждения [6] в Научном центре порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета. Удельная поверхность порошка, измеренная методом тепловой десорбции азота на приборе СОРБИ 4.1 (ЗАО "МЕТА", г. Новосибирск), составила  $59,3 \text{ м}^2/\text{г}$ , средний рассчитанный размер частиц — 17 нм. Средний размер агломератов частиц по результатам лазерной дифрактометрии соответствует 2,4 мкм.

Исследования эволюции фазового состава керамики в системе со сплавом ВКНА проводили методом спектроскопии комбинационного рассеяния света на образцах, изготовленных из смесей порошков ВКНА с 15 и 30 масс. %  $ZrO_2-8Y_2O_3$  и обозначаемых в дальнейшем М-15К и М-30К. Пористость образцов после искрового плазменного спекания составила 2 %. Спектроскопию комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопию) выполняли на многофункциональном Фурье-спектрометре Senterra (Bruker, Германия) при длине волны излучающего лазера 532 нм. Обработку спектров проводили с помощью программного обеспечения OPUS 65 в полуавтоматическом

режиме по алгоритму Левенберга-Марквардта с использованием функции Лоренца.

Электронно-микроскопические исследования структуры и элементного состава проводили на диффузионных парах системы  $ZrO_2-8Y_2O_3$  — сплав ВКНА с использованием автоэмиссионного растрового электронного микроскопа VEGA3 TESCAN (TESCAN, Чехия).

Искровое плазменное спекание (ИПС) проводили в установке Dr. Sinter SPS –1050 (SPS Syntex Inc., Япония) по следующему режиму: нагрев при давлении 15 МПа со скоростью 80—100 град/мин до 1050 °С, подъем давления до 30 МПа и выдержка в течение 5 мин. Режим осуществляли в вакууме с остаточным давлением 10 Па.

Для стабилизации фазового состава керамики проводили изотермический отжиг в вакуумной печи при 1000 °С в течение 1 ч. Покрытие должно длительное время работать при температуре не менее 1000 °С, поэтому для исследования взаимодействия в системе диффузионные пары после ИПС выдерживали в вакууме при температуре 1200 °С в течение 4, 8, 12, 16 ч.

### Результаты и их обсуждение

По данным рентгенофлуоресцентного анализа основными компонентами порошка ВКНА являются никель и алюминий, табл. 1. Третьим по значимости компонентом является хром.

Фазовый состав керамического порошка  $ZrO_2-8Y_2O_3$  типичен для данного материала [7]. Интенсивные пики КР-спектра 148, 257, 316, 466 и  $639 \text{ см}^{-1}$  могут быть отнесены к тетрагональной фазе стабилизированного диоксида циркония. Моноклинная модификация отсутствует.

Спеченный методом ИПС образец из порошка  $ZrO_2-8Y_2O_3$  по фазовому составу соответствовал составу исходного порошка, пики моноклинной модификации не зафиксированы.

КР-спектры композиционных слоев ВКНА с содержанием 15 и 30 масс. %  $ZrO_2-8Y_2O_3$  снимали после выдержки в течение 1 ч в вакууме при температуре 1000 °С на изломе образцов. При изготовлении микрошлифов поверхность керамических частиц маскировалась слоем сплава и становилась недоступна. КР-спектроскопия — эффективный метод анализа различных форм углерода, полимерных и керамических материалов — не может быть использована при анализе металлов.

Таблица 1

Химический состав порошка ВКНА

Элемент	Ni	Cr	Al	Co	Fe	Mo	W	Si	S
Содержание, масс. %	основа	3,25	21,97	0,81	0,16	0,76	0,36	0,29	0,14

На рис. 1 представлены спектры композиционных слоев. Предварительно проведены операции сглаживания пиков. Низкая интенсивность спектров связана с незначительным количеством керамического порошка, особенно в смеси М-15К.

Изменение вида КР-спектров у композиционных слоев М-15К и М-30К по сравнению со спектром чистой керамики  $ZrO_2-8Y_2O_3$  указывает на достаточно активно проходящее в процессе выдержки уже при температуре  $1000^\circ C$  в вакууме взаимодействие компонентов сплава и керамического порошка. Основные пики расширенные, приобретают иную форму, что указывает, как минимум, на наличие деформаций в кристаллической решетке диоксида циркония. Наибольший интерес представляет то, что в спектре слоя М-30К можно выделить пики моноклинной модификации (наиболее интенсивный в КР-спектре дуплет  $178, 190\text{ см}^{-1}$  и близкий пик  $221\text{ см}^{-1}$ ) [7, 8]. Моноклинная модификация при высокой температуре претерпевает обратимый фазовый переход с изменением объема [7]. Именно это обстоятельство и

заставляет использовать различные добавки, стабилизирующие тетрагональную или даже кубическую фазы диоксида циркония. Так, при применении оксида иттрия тетрагональная фаза достаточно устойчива уже при 5 масс. %  $Y_2O_3$ . При введении свыше 7—8 % получают кубическую модификацию, иногда с примесью мало отличающейся от нее, не превращаемой в моноклинную тетрагональной фазы. Появление в наших условиях моноклинной модификации указывает на потерю керамическим компонентом существенной части оксида иттрия.

Для улучшения выделения пиков на КР-спектрах проведены аналитические операции разложения спектров композиционных слоев. Разложение КР-спектров проведено в полуавтоматическом режиме по алгоритму Левенберга—Марквардта с использованием функции Лоренца. На рис. 2 приведен КР-спектр композиционного слоя М-30К в области  $140-280\text{ см}^{-1}$  и результат операции разложения этого спектра с помощью программного обеспечения OPUS 65.

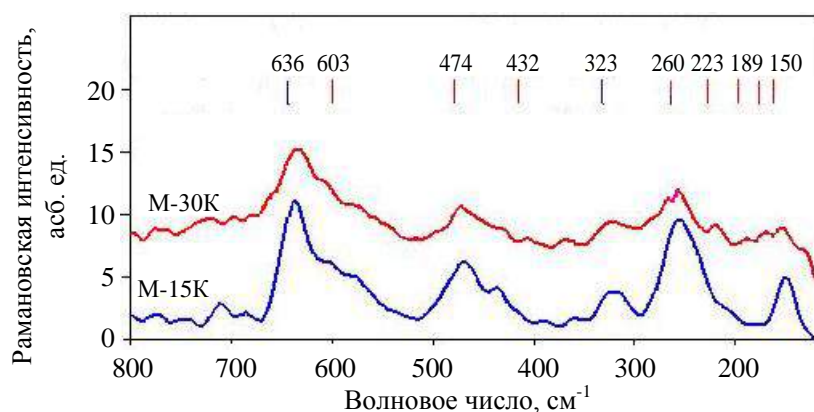


Рис. 1. КР-спектры композиционных слоев в интервале  $120-850\text{ см}^{-1}$

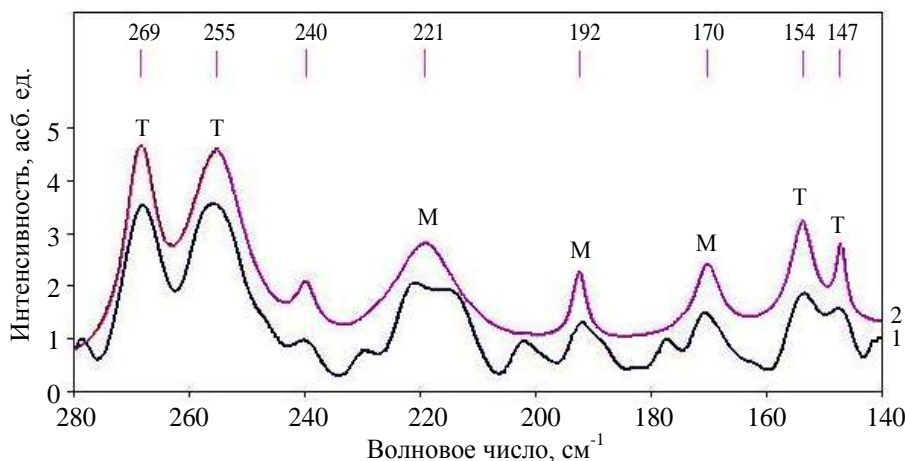


Рис. 2. КР-спектр композиционного слоя М-30К в области  $140-280\text{ см}^{-1}$ :

1 — фрагмент спектра; 2 — результат операции разложения спектра.

М — пики моноклинной модификации диоксида циркония; Т — пики тетрагональной модификации

На рис. 2 представлен только результат разложения, детализация не приведена из-за значительного количества отдельных пиков и сложного характера их наложения. В рассматриваемой области волновых чисел находятся два интенсивных пика тетрагонального диоксида циркония ( $148$  и  $260\text{ см}^{-1}$ ). Четкое разделение обоих пиков на дуплеты позволяет предположить наличие двух различающихся тетрагональных фаз диоксида циркония, исходной и сформировавшейся в процессе взаимодействия компонентов слоя.

В табл. 2 приведены результаты операции разложения спектров в областях  $180\text{—}380\text{ см}^{-1}$ ,  $400\text{—}$

$520\text{ см}^{-1}$  и  $525\text{—}700\text{ см}^{-1}$ . Анализ результатов подтверждает появление моноклинной фазы, которая не обнаруживалась в керамике из порошка состава  $\text{ZrO}_2\text{—}8\text{Y}_2\text{O}_3$ , спеченной без ВКНА. Так как моноклинная фаза склонна к обратимому фазовому переходу в тетрагональную при флуктуации температуры в интервале  $1100\text{—}1300\text{ °C}$  [9], то для исследованного материала увеличение доли моноклинной фазы нежелательный процесс.

Исследования элементного состава в зоне межфазной границы показали проникновение алюминия, хрома и никеля из сплава ВКНА в слой керамики, рис. 3, табл. 3.

Таблица 2

Результаты операции разложения КР-спектров

Интервалы разложения пиков, см <sup>-1</sup>	Композиционный слой М-15К			Композиционный слой М-30К		
	ν, см <sup>-1</sup>	Интегральная интенсивность, %	Отнесение [7, 8]	ν, см <sup>-1</sup>	Интегральная интенсивность, %	Отнесение [7, 8]
180—380	239	22,6	—	223	3,0	М
	260	66,0	Т	257	69,5	Т
				322	23,2	Т
400—520	435	8,0	М			
	458	12,0	М	458	88,5	М
	468	50,4	Т	469	11,5	Т
525—700	537	14,4	М	542	6,6	М
	603	19,0	М	603	3,8	М
	638	45,9	Т, М	635	57,2	Т, М

Примечание: М — пик относится к моноклинной модификации; Т — пик относится к тетрагональной модификации.

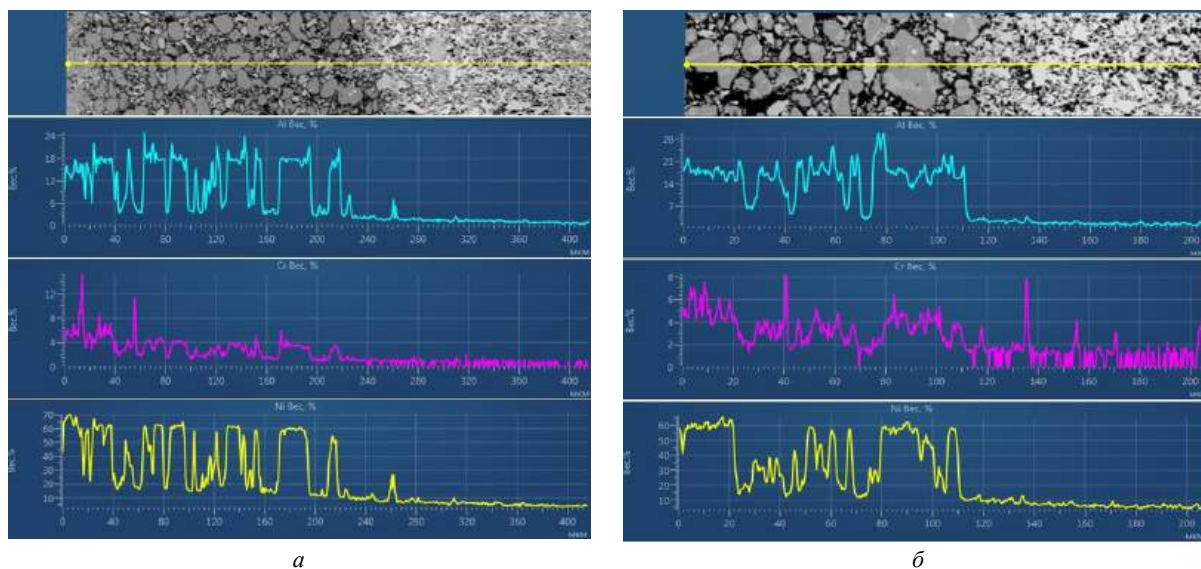


Рис. 3. Микроструктуры и распределение элементов алюминия, хрома, никеля в области межфазной границы диффузионной пары М-15К (слева) и  $\text{ZrO}_2\text{—}8\text{Y}_2\text{O}_3$  (справа) после 8 ч (а) и 16 ч (б) изотермической выдержки

Таблица 3

Содержание никеля, хрома и алюминия в керамическом слое диффузионной пары после отжига в вакууме при  $1200\text{ °C}$

Время выдержки, ч	Содержание металлов в керамике на расстоянии 110 мкм от межфазной границы, масс. %		
	Ni	Cr	Al
4	0	0	0
8	3,0	1,0	1,0
12	6,0	1,5	1,5
16	7,0	2,0	2,0

После термообработки в течение 4 ч диффузии металлов в керамический слой не наблюдалось. Увеличение времени изотермической выдержки привело к увеличению степени проникновения металлов из сплава ВКНА в керамический слой (см. табл. 3).

Скорость продвижения фронта диффузии алюминия и хрома из сплава ВКНА в керамику оказалась стабильной во времени, а у никеля с увеличением времени выдержки — возрастала. Ранее было показано, что именно оксид иттрия в системе  $ZrO_2$ — $Y_2O_3$  является компонентом, взаимодействующим с оксидами меди и хрома [9, 10] при достаточно низких температурах (900—1100 °С). Авторами [9] установлено, что на поверхности диоксида циркония происходит формирование хромата иттрия  $YCrO_4$  и, возможно, нестехиометрических соединений  $YCrO_{4-x}$ .

Основой сплава ВКНА является никель, но сплав содержит и значительное количество алюминия (~22 %), который может служить подслоем для получения термодинамически выращенного защитного слоя (ТГО) в процессе эксплуатации (окисления) композиционного слоя.

Оба основных металла сплава способны при температуре 1000—1050 °С реагировать с  $Y_2O_3$ . Например, в системе  $Y_2O_3$ — $Al_2O_3$  образуется сложная смесь из  $YAlO_3$  с орторомбической перовскитоподобной структурой,  $Y_4Al_2O_9$  моноклинной модификации и иттрий алюминиевого граната  $Y_3Al_5O_{12}$ , кристаллизующегося в кубической модификации. Формирование  $YAlO_3$  без примесей происходит при более высоких температурах [11]. Образование никелата иттрия  $YNiO_3$  зафиксировано уже при температурах выше 600 °С [12, 13]. Таким образом, никель и алюминий — основные металлы сплава ВКНА — при относительно невысоких температурах способны вступать в реакцию со стабилизирующим диоксид циркония оксидом иттрия. Причем такие реакции, как известно [14], наиболее интенсивно проходят на твердых поверхностях керамических материалов.

Для чистоты эксперимента диффузионные пары отжигали в вакууме (исключая наложение на процесс диффузии процесса окисления), но в условиях эксплуатации такие материалы работают в окислительной среде, и через слой пористой керамики кислород проникает к металлической подложке, на которой формируется термически выращенный защитный плотный слой оксидов (чаще, оксида алюминия). Поэтому диффузия алюминия и хрома (тем более, в незначительных количествах на незначительную глубину) не является существенным фактором для разрушения или деградации керамического покрытия. Но более активная диффузия никеля является критической. Поэтому

для исключения его влияния на фазовый состав керамического внешнего слоя необходимо либо ограничить его количество в промежуточном слое, либо изолировать его от границы с керамикой, например, нанесением между ним и керамикой слоев из алюминия или хрома.

## Заключение

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии) проведено исследование взаимодействия компонентов в системе  $ZrO_2$ — $8Y_2O_3$  — сплав ВКНА. Методами сканирующей зондовой микроскопии установлена диффузия в незначительной степени алюминия и хрома в керамический слой и существенная диффузия никеля. Установлено, что в процессе, имитирующем условия эксплуатации выдержки в вакууме при температурах 1000—1200 °С, уже после 8 ч может быть зафиксировано взаимодействие компонентов сплава и керамического порошка, выраженное в расстабилизации  $ZrO_2$  и появлении пиков моноклинной модификации.

---

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № FSNM-2020-0026 на выполнение фундаментальных научных исследований.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бендовский Е. Б. Керамические детали для двигателя внутреннего сгорания // Новые огнеупоры. 2013. № 8. С. 51—54.
2. Оглезнева С. А., Каченюк М. Н., Кульметьева В. Б., Порозова С. Е., Сметкин А. А. Многослойное теплозащитное покрытие на деталях из жаропрочных сплавов. Патент РФ № 2766404 С 1. МПК<sup>21</sup> C23C 24/08, B22F 3/105, B22F 7/00. Заявл. 05.08.2021. Опубл. 15.03.2022. БИ № 8.
3. Смышляева Т. В., Порозова С. Е., Максимов Д. А. Перспективные материалы теплозащитных покрытий для деталей авиационных газотурбинных двигателей (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 1(157). С. 26—36.
4. Тарасенко Ю. П., Царева И. Н., Бердник О. Б., Фелью Я. А. Структура и физико-механические свойства жаростойких газопламенных покрытий  $NiCrCoAlY/ZrO_2$  для турбинных лопаток газотурбинных двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3(27). С. 164—169.
5. Шмидт В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов / Пер. с англ. Н. П. Ивановской / под ред. С. В. Савилова. — М.: Техносфера, 2007. — 367 с.
6. Kul'met'eva V. B., Porozova S. E., Gnedina E. S. Synthesis of nanocrystalline zirconium dioxide stabilized with yttrium oxide for low-temperature sintering // Russian J. Non-Ferrous Metals. 2013. V. 54. № 3. P. 239—245. DOI: 10.3103/S1067821213030097
7. 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. № 3. P. 1170—1173. DOI: 10.1016/j.matlet.2005.10.102.

8. **Bo Liang, Chuanxian Ding, Hanlin Liao, Christian Coddet.** Study on structural evolution of nanostructured 3 mol % yttria stabilized zirconia coatings during low temperature ageing // J. European Ceramic Society. 2009. V. 6. Iss. 3. P. 2267—2273. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.01.002

9. **Порозова С. Е., Старков Д. А., Лебедева К. Н.** Модификация поверхности ультрадисперсных порошков  $ZrO_2$  оксидными соединениями хрома // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 2. С. 5—12. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.01.

10. **Gadalla A. M., Kongkachuichay Paisan.** Compatible phases of the  $Y_2O_3$ — $CuO$ — $Cu_2O$  system in air // J. Materials Research. 1991. V. 6. Iss. 3. P. 450—454. DOI: 10.1557/JMR.1991.0450.

11. **Michalik D., Pawlik T., Plewa J., Sopicka-Lizer M.** Influence of Homogenization and Micro/Nano Source of Starting

Powders on Format Ion of the Single YAP Phase // Archives of Metallurgy and Materials. 2016. V. 61. № 4. P. 1753—1760. DOI: 10.1515/amm-2016-0281.

12. **Silva Z. R., Fernandes J. D. G., Melo D. M. A., Alves C., Leite E. R., Paskocimas C. A., Longo E., Bernardi M. I. B.** Photoluminescence in amorphous  $YNiO_3$  and  $La_{0.5}Nd_{0.5}NiO_3$  systems // Materials Letters. 2002. V. 56. № 3. P. 232—237.

13. **Causa M. T., Sánchez R. D., Tovar M., Alonso J. A., Martínez-Lope M. J.** Charge disproportionation in  $YNiO_3$ : ESR and susceptibility study // Physical Review B. 2003. V. 68. № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.68.024429>. DOI: 10.1103/PhysRevB.68.024429.

14. **Hurley B. L., McCheery R. L.** Raman spectroscopy of monolayers formed from chromate corrosion inhibitor on copper surfaces // J. The Electrochemical Society. 2003. V. 150(8). P. 367—373.

## About the interaction of ceramic powder with heat-resistant alloy during the operation of the thermal barrier coating

S. A. OGLEZNEVA, S. E. POROZOVA, M. N. KACHENYUK,  
V. B. KULMETIEVA, A. A. SMETKIN  
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

*The interaction of components in the  $ZrO_2$ — $8Y_2O_3$  — VKNA alloy system was studied while simulating operating conditions at 1000—1200 °C in a vacuum atmosphere. Using Raman spectroscopy and electron microscopy, the interaction between some components of the alloy (aluminum, chromium, nickel) and ceramic powder was established, expressed in the destabilization of  $ZrO_2$  and the transformation of a part of the tetragonal phase into a monoclinic one.*

**Keywords:** thermal barrier coating, zirconium dioxide, yttria, heat-resistant alloy, monoclinic modification, Raman spectroscopy, electron microscopy.



## Кинетика разрушения при межслоевом сдвиге углепластика ВКУ-30 после воздействия СВЧ электромагнитного поля

<sup>1,2</sup> И. В. ЗЛОБИНА, канд. техн. наук; <sup>1</sup> Н. В. БЕКРЕНЕВ, д-р техн. наук;

<sup>3</sup> Б. Б. МОРОЗОВ; <sup>3,4</sup> Ф. А. НАСОНОВ, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

<sup>3</sup> ОКБ Сухого ПАО "ОАК", Москва, Россия

<sup>4</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Разработка новых надежных и экономичных конструкций в авиастроении определяет необходимость применения и совершенствования материалов с высокими физико-механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами — полимерных композиционных материалов (ПКМ). Выявлено рациональное сочетание режимов, при которых обеспечивается увеличение значений напряжений на 17–18 % и времени до первичного расслоения более, чем на 65 %. Установлено увеличение периода времени до полного разрушения образца более, чем в 3 раза.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, углепластики, прочность, межслоевой сдвиг, изгибающие нагрузки, устойчивость, СВЧ электромагнитное поле, плотность потока энергии.

Необходимость создания новых конструкционных материалов и технологий их эффективной обработки в целях формирования заданного комплекса свойств соответствует направлению Н1 Стратегии научно-технического развития Российской Федерации: "Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта". Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства ПКМ, армированных тканями на основе углеродных, стеклянных, арамидных волокон и их применения в

аэрокосмической и оборонной промышленности, ветроэнергетике, а также автомобиле- и судостроении, строительстве.

К 2026 г. прогнозируется рост мирового рынка углеродного волокна с 3,9 млрд долл. в 2019 г. до 8,0 млрд долл., а ежегодный прирост производства стеклопластиков составляет 8–10 % ежегодно [1, 2]. Углепластики наиболее широко используются в авиации, причем с резким увеличением производства малоразмерных беспилотных летательных аппаратов эта тенденция будет усиливаться [3–7].

Первостепенное значение при обосновании требований к изделиям из ПКМ придается эксплуатационным характеристикам. При этом в производстве авиационной техники основными являются следующие требования: теплостойкость, водостойкость, атмосферостойкость, прочность при растяжении вдоль волокон, прочность при сжатии вдоль волокон, трансверсальная (поперек волокон) прочность, межслоевой сдвиг, ударная вязкость, технологичность [8–12]. При этом ПКМ характеризуются резким различием значений прочностных параметров в зависимости от ориентации действующих нагрузок относительно изделия и схемы армирования. Наиболее опасными, с точки зрения повреждаемости изделий из ПКМ, являются напряжения межслоевого сдвига, величина которых для большинства ПКМ на 1–2 порядка ниже напряжений растяжения—сжатия.

**Злобина Ирина Владимировна**, доцент кафедры "Техническая механика и мехатроника", научный сотрудник.

E-mail: irinka\_7\_@mail.ru

**Бекренев Николай Валерьевич**, профессор кафедры "Техническая механика и мехатроника".

E-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru

**Морозов Борис Борисович**, заместитель начальника НИО — начальник отдела.

E-mail: mbbbox@gmail.com

**Насонов Федор Андреевич**, ведущий технолог НИО-21, доцент.

E-mail: nasonovf2006@mail.ru

Статья поступила в редакцию 6 октября 2022 г.

© Злобина И. В., Бекренев Н. В., Морозов Б. Б., Насонов Ф. А., 2023

Для повышения физико-механических характеристик ПКМ используют различные химические, физические, механические методы, а также конструктивные решения. Использование конструктивных методов не всегда выполнимо, поскольку местное усиление конструкции часто сопровождается увеличением ее веса, что нежелательно для авиационной и ракетной техники. Одним из перспективных методов многие исследователи считают модифицирование армирующих волокон ПКМ, а также их структуры при отверждении и в отвержденном состоянии путем кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля, о чем свидетельствуют результаты исследований отечественных и зарубежных ученых [13—20].

Авторами данной работы выполнены исследования возможности повышения эксплуатационных характеристик заготовок и деталей из отвержденных угле- и стеклопластиков воздействием на них СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц в течение 2—3 минут. Установлено, что такая обработка обеспечивает, в частности, увеличение предельных напряжений среза в среднем на 40 %, изгиба — на 7...13 %, межслоевого сдвига — на 14...16 % [21—23]. Отмечено значительное повышение равномерности прочностных характеристик в партии исследованных образцов (проводилось по 5 повторных опытов). Разброс значений напряжений межслоевого сдвига, выраженный в их дисперсии, снижается более, чем на порядок. Дисперсия модуля упругости снижается в еще большей степени.

Однако кинетика развития повреждений и изменение периода времени до полного разрушения образцов при действии поперечных нагрузок авторы не изучали. Также представляет научный и практический интерес зависимость указанных параметров от энергетических факторов СВЧ электромагнитного поля: плотности потока энергии (ППЭ) и времени воздействия.

Цель работы — исследование зависимости кинетики разрушения отвержденного углепластика при межслоевом сдвиге от ППЭ и времени воздействия СВЧ электромагнитного поля.

### Методика исследования и оборудование

Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 32659-2014 "Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки". При исследовании были использованы плоскопараллельные пластины размером 40×20×4 мм, вырезанных из отформованной вакуумавтоклавным методом плиты из углепластика марки ВКУ-30 со схемой армирования [0; 45; -45; 90; -45; 45; 0]<sub>s</sub>. СВЧ-обработку образцов осуществляли на экспериментальной установке, созданной на базе микроволнового излучателя "Жук-2-02" производства ООО НПП "АгроЭкоТех", г. Обнинск Калужской обл. при частоте 2450 МГц и ППЭ, равной (10—12)×10<sup>4</sup>, (17—18)×10<sup>4</sup> и (45—50)×10<sup>4</sup> мкВт/см<sup>2</sup>. Время воздействия составляло 1, 2 и 3 минуты. В соответствии с указанным стандартом одновременно обрабатывали при каждом сочетании факторов для испытаний по 5 образцов. В процессе СВЧ-обработки при помощи тепловизора FLIR E40 определяли температуру поверхности образцов.

Для нагружения использовали электрогидравлический пресс С040N с микропроцессорной системой получения и записи данных (рис. 1, а). Параметры системы обеспечивали записи текущих значений нагружающего усилия с дискретностью интервала времени 0,05 с при скорости нагружения 2,0 кН/с. Образцы устанавливали в специальной оснастке (рис. 1, б), диаметр опор которой и расстояние между ними соответствовали п. 5.2 ГОСТ 32659-2014.



а



б

Рис. 1. Электрогидравлический пресс С040N с микропроцессорной системой получения и записи данных (а) и специальная оснастка для установки образцов (б)

Проведены испытания 5 контрольных образцов. Изменения напряжений межслоевого сдвига оценивали по его среднему значению из 5 измерений.

Испытания всех образцов проводили до полного разрушения. Момент повреждения при межслоевом сдвиге определяли по значимому падению величины изгибающей нагрузки до значения, равного примерно 1/3 максимальной величины. Величину напряжений вычисляли по формуле:

$$\tau = 0,75 F_{\max} / bh,$$

где  $F_{\max}$  — максимальное значение нагружающей силы, кН;

$b$  и  $h$  — фактические значения ширины и толщины образцов, мм.

Определяли зависимость напряжений межслоевого сдвига от режимов СВЧ-воздействия. Влияние каждого из варьируемых факторов оценивали на основе анализа аппроксимирующих функций данной зависимости.

По графикам, описывающим изменение величины воспринимаемой образцом нагрузки с учетом развития его повреждений с течением времени, оценивали период времени до первого повреждения (расслоения) и до полного разрушения.

## Результаты и обсуждение

Результаты испытаний контрольных и опытных образцов представлены в табл. 1, 2 и на графиках, построенных по результатам записей процессора пресса С040N.

Типичные формы графиков представлены на рис. 2, 3. Характер зависимостей, представленных на графиках, связан с конструктивной особенностью пресса и дискретностью записи (регистрации) данных, что привело к положению начальных точек при определенных значениях нагрузок.

Таблица 1

Результаты испытаний опытных образцов

Показатели	ППЭ, мкВт/см <sup>2</sup>			
	—	(45—50)×10 <sup>4</sup>	(17—18)×10 <sup>4</sup>	(10—12)×10 <sup>4</sup>
$T$ , мин	—	1		
$t$ , °C	23	50—60 (55)	40—45 (42,5)	35—39 (37)
$\tau_{\text{ср}}$ , МПа	42,0 ± 3,5	44,8 ± 4,2	46,7 ± 2,9	45,1 ± 3,2
$T$ , мин	—	2		
$t$ , °C	—	80—100 (90)	60—80 (70)	38—42 (40)
$\tau_{\text{ср}}$ , МПа	—	38,9 ± 1	49,8 ± 3	45,8 ± 3,8
$T$ , мин	—	3		
$t$ , °C	—		69—83 (76)	65—75 (70)
$\tau_{\text{ср}}$ , МПа	—		47,9 ± 4,9	49,3 ± 1,2

Таблица 2

Время до полного разрушения контрольных и опытных образцов

Вид образца	Контрольный	Опытный		
ППЭ, мкВт/см <sup>2</sup>	—	(45—50)×10 <sup>4</sup>	(17—18)×10 <sup>4</sup>	(10—12)×10 <sup>4</sup>
Время обработки, мин	—	1	2	3
Время до разрушения, с	13 ± 2	16 ± 1,5	44 ± 6,3	70 ± 6,5

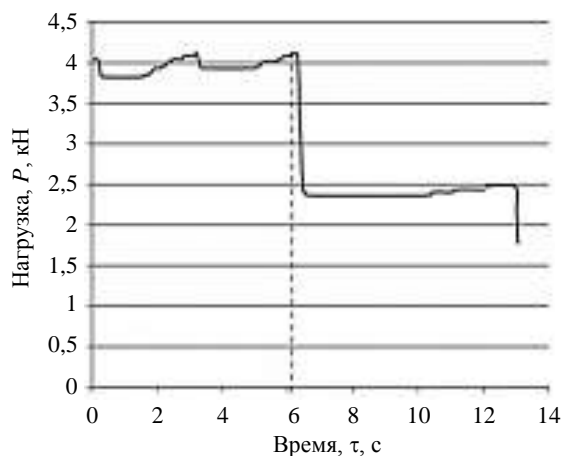


Рис. 2. Кинетика разрушения контрольного образца

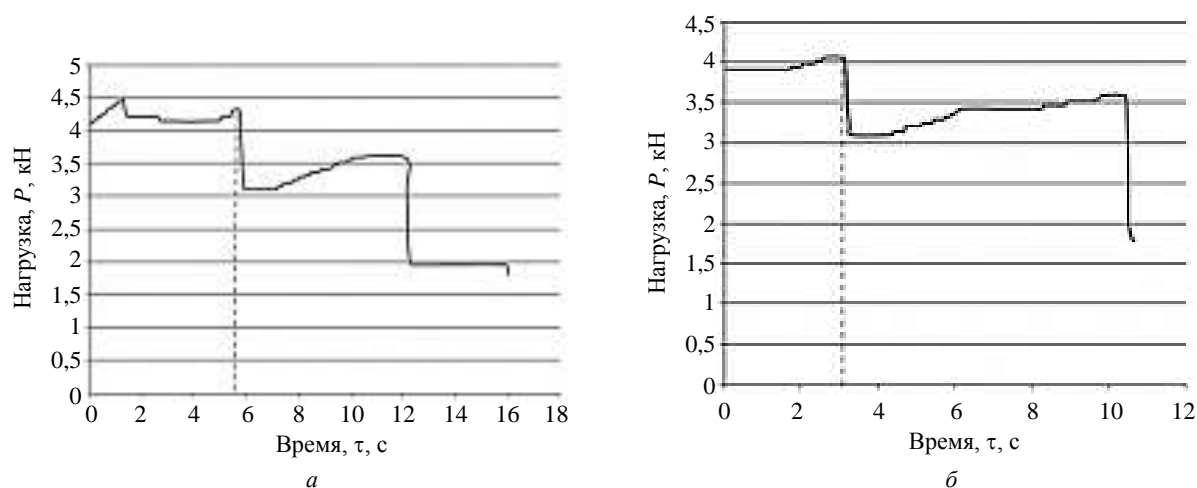


Рис. 3. Кинетика разрушения образца, обработанного при ППЭ =  $(40\text{—}50) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> в течение 1 (а) и 2 (б) мин

Анализ полученных данных (см. табл. 1) позволяет отметить совместное влияние ППЭ и времени СВЧ-воздействия на величину максимальных напряжений межслоевого сдвига. При этом сохраняется отмеченная авторами ранее в ряде работ [21—23] тенденция роста предельных напряжений с увеличением времени воздействия на малых значениях ППЭ (в исследованном диапазоне значений) и изменении данной закономерности с увеличением ППЭ. Так, при ППЭ  $(10\text{—}12) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> при временных воздействиях 1—2 мин значения напряжений межслоевого сдвига лишь незначительно отличаются от установленных для контрольных образцов, а при времени 3 мин их величина уже возрастает примерно на 15 %. При максимальных ППЭ  $(45\text{—}50) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> наибольшие значения напряжений отмечаются при малых временах воздействия (1 мин), а уже при увеличении времени до 2 минут значения напряжений становятся даже меньше, чем у контрольных образцов. При дальнейшем увеличении времени установить величину напряжений в образцах не представилось возможным вследствие явной деструкции последних. При значении ППЭ  $(17\text{—}18) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> зависимость носит экстремальный характер: отмечается максимум значения  $\tau$  при времени воздействия 2 мин и затем — некоторое снижение на времени 3 мин.

Причина данного отличия может заключаться в действии механизма влияния СВЧ электромагнитного поля на свойства ПКМ, состоящем в совместном воздействии на матрицу и межфазный слой (МФС) волнового и теплового факторов, присущих данной электрофизической технологии.

В диэлектрических средах главную роль играет диэлектрическая поляризация (атомная, электронная, ориентационная и структурная). Ориентационная поляризация вызывается перераспределением зарядов в полярных молекулах или других

молекулах, обладающих дипольным моментом в веществе. Данный вид поляризации оказывает наиболее существенное влияние на процесс СВЧ-нагрева, так как время релаксации ориентационной поляризации равно периоду колебаний СВЧ-диапазона [13].

При отверждении термореактивного, например, эпоксидного) связующего в процессе формирования композиционных материалов вследствие различных коэффициентов термического расширения матрицы и наполнителя происходит усадка, приводящая к возникновению остаточных напряжений и образованию несплошностей в области контакта матрица—волокно, что уменьшает связанность компонентов и ухудшает перераспределение внешней нагрузки между волокнами наполнителя в ПКМ [24—26].

Ранее авторами было установлено, что воздействие СВЧ электромагнитного поля с ППЭ  $(40\text{—}50) \times 10^4$ ,  $(17\text{—}18) \times 10^4$ ,  $(10\text{—}12) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> в течение 2 мин приводит к нагреву углеродной ткани от исходной температуры 25 °С до  $(87\text{—}42)$  °С, стеклоткани — до  $(40\text{—}27)$  °С. Эпоксидная матрица нагревается при аналогичных условиях воздействия до  $(40\text{—}30)$  °С. Большая интенсивность нагрева углеродной ткани определяется скин-эффектом в проводящих углеродных волокнах.

Таким образом, предполагаем, что при воздействии на ПКМ СВЧ электромагнитного поля матрица и армирующий компонент нагреваются при определенных условиях до значений температур, при которых возможно снижение жесткости термопластичного компонента полимерной матрицы, начинающего в большей мере работать в качестве стопперов трещин. Также появляется эффект снижения модуля упругости термореактивного компонента и, соответственно, повышается вероятность конформационных вращений звеньев макромолекул и заполнение пустот в структуре

МФС, т. е. "залечивание" микродефектов, перераспределение механических напряжений, а также релаксация остаточных напряжений.

При этом тепловые потоки, вызванные внутренним трением колеблющихся с частотой поля элементов структуры, способствуют понижению модуля упругости матрицы и уже упомянутому исчезновению или снижению количества дефектов, формируя новые упорядоченные области контактного взаимодействия матрица—волокно в МФС большей площади. Волновые процессы в структуре ПКМ, вызванные воздействием СВЧ электромагнитного поля, можно считать основным механизмом структурных изменений в отвержденных ПКМ, приводящих к эффекту их упрочнения.

При больших значениях ППЭ происходит быстрый нагрев матрицы и МФС до температур (50—60) °С, что обеспечивает условия для упрочнения на 7 % в 1-ю минуту СВЧ-воздействия. С увеличением времени до 2 мин интенсивные тепловые потоки приводят к росту интегральной температуры поверхности до 100 °С. С учетом скин-эффекта и переотражения СВЧ-волн от углеродных волокон в межфазном слое (МФС) волокно—матрица [27, 28] возможны локальные перегревы до значений температур, вероятно превышающей порог начала деструкции матрицы. Факт деструктивных изменений в объеме эпоксидного компаунда при зафиксированной поверхностной температуре 90 °С отмечается в [27], локальные достигаемые температуры имеют, вероятно, значительно большие значения. Поэтому, несмотря на сохранение условий высокой подвижности звеньев макромолекул и, соответственно, перестройки микроструктуры матрицы и МФС, прочность материала по напряжениям межслоевого сдвига значительно снижается.

При малых значениях ППЭ в первые 2 мин СВЧ-воздействия температура повышается незначительно и в среднем достигает порога снижения модуля упругости, что способствует лишь незначительным поворотам звеньев макромолекул и, соответственно, рост напряжений межслоевого сдвига не превышает (7—9) %. При воздействии в течение 3 мин температура на поверхности образца углепластика составляет в среднем 70 °С, что близко к значениям, приводящим к эффекту перестройки микроструктуры, обеспечивающим увеличение поверхностей контакта в МФС и увеличение напряжений межслоевого сдвига в среднем на 17 %.

На средних из исследованного диапазона значениях ППЭ (см. табл. 1) обеспечивается максимальная эффективность СВЧ-воздействия по критериям упрочнения и времени. При времени воздействия 2 мин достигается средняя темпера-

тура (по поверхности) 70 °С, что обеспечивает аналогичное указанному ранее увеличение напряжений межслоевого сдвига на 18,5 %. Дальнейшее увеличение времени воздействия способствует повышению средней температуры образца и, главное, превышение максимальными температурами поверхности значения 80 °С, что может явиться проявлением, как указано, локальных перегревов в МФС до температур начала деструкции матрицы и негативных изменений механических свойств, которые вызывают снижение положительного эффекта СВЧ-воздействия.

Анализ графиков нагружения показывает, что они имеют сходный ступенчатый характер для контрольных и опытных образцов. На большинстве графиков можно выделить две характерные области: значительное — на 30...50 % падение действующей нагрузки, связанное с проявлением первичного расслоения при межслоевом сдвиге с сохранением частичной несущей способности и полное разрушение. В ряде случаев отмечаются дополнительные стадии ступенчатого разрушения, очевидно связанные с повторным частичным сдвигом и нарушением связи и целостности сохранившихся после первого повреждения слоев.

При анализе графиков отмечается увеличение периода времени от начала регистрации нагрузки до ее снижения на 30 % для опытных образцов по сравнению с контрольными с 6 до 10...11 с после СВЧ-воздействия со средними значениями ППЭ в течение 2 мин. Возможно, это связано с отмеченными ранее изменениями условий структурирования матрицы при достижении оптимальной для данного материала температуры нагрева. При больших значениях ППЭ и времени 1 мин до первого расслоения проходит аналогичное контрольным образцам время порядка 6 с. Также оценивали период времени от начала нагружения до начала полного разрушения образцов, которому соответствовало резкое падение зафиксированной нагрузки до минимального значения, после которого испытания останавливали. Для всех опытных образцов с увеличенными после СВЧ-воздействия прочностными характеристиками отмечается существенное увеличение времени до полного разрушения (см. табл. 2).

Описанные материалы испытаний подтверждают ранее полученные авторами результаты, согласно которым воздействие СВЧ электромагнитного поля с ППЭ  $(17—18) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> в течение 2 мин на отвержденные углепластики других марок способствует повышению их прочности, в том числе по напряжениям трехточечного изгиба, межслоевого сдвига и ударного изгиба, а также увеличению периода сохранения несущей способности под нагрузкой до разрушения.



## Заключение

Изучение кинетики нагружения образцов из углепластика марки ВКУ-30 в процессе испытаний на межслоевой сдвиг после их обработки в отвержденном состоянии в СВЧ электромагнитном поле с различной ППЭ и временем воздействия позволило установить увеличение времени до появления первичного расслоения при падении зафиксированной величины нагрузки на 30 % с 6 до 10—11 с при ППЭ  $(17—18) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> и времени воздействия 2 мин. На данном режиме зафиксировано повышение температуры поверхности образцов в среднем до 70 °С и установлено максимальное увеличение предельных напряжений межслоевого сдвига по сравнению с контрольными образцами с 42 до 49 МПа. При данных режимах показано увеличение периода времени до полного разрушения опытных образцов с 13 до 44 с. Увеличение времени воздействия вызывает первоначальный рост, а затем снижение предельных напряжений.

В качестве механизма проявления установленных фактов предложено произвести совместное воздействие волнового и теплового факторов взаимодействия СВЧ электромагнитного поля с композициями на термореактивном (эпоксидном) связующем, которые вызывают эффект снижения модуля упругости матрицы (в том числе увеличение податливости ее компонентов), что облегчает конформационные повороты звеньев макромолекул под действием колебаний, способствующие перестройке структуры МФС, "залечиванию" ее дефектов, перераспределению механических напряжений и, соответственно, к увеличению количества поверхностей контакта матрицы с волокном после доотверждения.

Полученные результаты могут иметь значение для повышения надежности и живучести элементов конструкций технических систем, выполненных из углепластиков, или позволить значительно снизить массу конструкции.

*Исследования выполнены в рамках проекта СП-5946.2021.3 "Метод повышения функциональных характеристик элементов космических аппаратов из отвержденных полимерных композиционных материалов в условиях воздействия температурного градиента".*

*Работа выполнена при поддержке НИЦ "Курчатовский институт". Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП НИЦ "Курчатовский институт" —*

*ИРЕА при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2022-1157 от 16.08.2022.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мировой рынок углеродного волокна [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-gynok-uglerodnogo-volokna/> (дата обращения: 09.08.2022).
2. **Дориомедов М. С.** Российский и мировой рынок полимерных композитов (Обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6, 7. С. 29—37.
3. **Кошкин Р. П.** Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://spmagazine.ru/420/> (дата обращения: 09.08.2022).
4. **Каблов Е. Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520—530.
5. **Ким С.** Сырьё, композиты, углеволокно // The Chemical Journal. 2014. № 10. Р. 64—73.
6. **Садовская Т. Г., Лукина Е. А.** Проблемы и перспективы реализации политики импортозамещения при формировании производственной кооперации по применению композиционных материалов в отечественном гражданском авиастроении на примере ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 11. С. 1—12.
7. **Гуляев Г. М., Кривонос В. В., Румянцев А. Ф. и др.** Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов // Конверсия и машиностроение. 2004. № 4. С. 65—69.
8. **Михайлин Ю. А.** Конструкционные полимерные композиционные материалы. Изд. 2. — СПб.: Научные основы и технологии, 2010. — 822 с.
9. **Brinkmann S. et al.** International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers. — Ed. Hanser. 2006. — 919 p.
10. **Karbhari V. M. et al.** Structural Characterization of Fiber Reinforced Composite Short and Medium Span Bridge Systems // ECCM-8 European conference on composite materials "Science, technologies and applications", Naples — Italy. 1998. V. 2. P. 35—42.
11. **Razali N., Sultan M. T. H., Mustapha F. et al.** Impact damage on composite structures (Review) // The International J. Engineering And Science (IJES). 2014. V. 3. Iss. 7. P. 8—20.
12. **Abrate S.** Impact Ingeneering of Composite Structures. — Springer Wien NewYork, 2011. — 409 p.
13. **Архангельский Ю. С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник. — Саратов: Научная книга, 2011. — 560 с.
14. **Калганова С. Г.** Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: дисс. доктора тех. наук. — Саратов, 2009. — 356 с.
15. Microwave processing of materials. — Washington: National Academy Press, 1994. — 150 p.
16. **Inderdeep S., Pramendra K. B., Deepak M. et al.** Feasibility study on microwave joining of green composites // Akademeia. 2011. V. 1. P. 1—6.
17. **Menéndez J. A., Arenillas A., Fidalgo B. et al.** Microwave heating processes involving carbon materials // Fuel Processing Technology. 2010. V. 91. P. 1—34.
18. **Kim T., Lee Ja., Lee K.-H.** Influence of oxyfluorinated graphite on fluorinated ethylene-propylene composites as bipolar plates // Carbon Letters. 2014. V. 15. № 1. P. 15—24.
19. **Bradshaw S. M., van Wyk E. J., de Swardt J. B.** Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon // The J. The South African Institute of Mining and Metallurgy. 1998. V. 4. P. 201—210.
20. **Kwak M.** Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Process Development and Material Evaluation. — Imperial College London Department of Aeronautics: 2016. — 175 p.
21. **Zlobina I. V., Bekrenev N. V.** The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteris-

tics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural // Solid State Phenomena. 2016. V. 870. P. 101—106.

22. **Zlobina I. V.** The effect of processing in a electromagnetic field on the parameters of vibro-wave processes generated by the impact of a solid body in cured polymer composite materials under the influence of climate factors // IOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. 2020. P. 42045.

23. **Злобина И. В., Бодягина К. С., Павлов С. П. и др.** Теоретико-экспериментальное исследование влияния изменений параметров межфазной зоны отвержденного полимерного композиционного материала под действием микроволнового излучения на его прочностные характеристики // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Сер. "Механика предельного состояния". 2018. № 4. С. 34—48.

24. **Гаврилов М. А.** Особо плотные эпоксидные композиты на основе отходов производства. — Пенза: ПГУАС, 2014. — 131 с.

25. **Василевич Ю. В.** Влияние химической усадки связующего в процессе отверждения на образование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композита // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. 2016. Вып. 31. С. 67—72.

26. **Мошинский Л.** Эпоксидные смолы и отвердители. — Тель-Авив: Аркадия-Пресс. ЛТД, 1995. — 372 с.

27. **Ogonna Mgbemena C., Li D., Lin M-F., Daniel Liddel P., Babu Katnam K., Thakur Kumar V., Yazdani Nezhad H.** Accelerated microwave curing of fibre-reinforced thermoset polymer composites for structural applications: A review of scientific challenges // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2018. V. 115. P. 88—103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.012>.

28. **Jing Zhou, Yingguang Li, Mengchen Zhang, Eyan Xu, Tao Yang** Effect of lay-up configuration on the microwave absorption properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials // Materials Today Communications. 2021. V. 26. P. 101960. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101960.

## Kinetics of fracture during interlayer shear of carbon fiber reinforced plastic VKU-30 after exposure to a microwave electromagnetic field

<sup>1,2</sup>I. V. ZLOBINA, <sup>1</sup>N. V. BEKRENEV, <sup>3</sup>B. B. MOROZOV, <sup>3,4</sup>F. A. NASONOV

<sup>1</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

<sup>2</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>3</sup> Sukhoi Design Bureau PJSC "UAC", Moscow, Russia

<sup>4</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The development of new reliable and economical structures in the aircraft industry determines the need for the use and improvement of materials with high physical, mechanical, technological and operational properties — polymer composite materials (PCM). A rational combination of modes has been revealed, in which an increase in stress values by 17—18 % and the time to primary stratification by more than 65 % is provided. An increase in the time period to complete destruction of the sample by more than 3 times has been established.*

**Keywords:** polymer composite materials, carbon fiber plastics, strength, interlayer shear, bending loads, stability, microwave electromagnetic field, energy flux density.

УДК 538.95

DOI: 10.52190/2073-2562\_2023\_1\_35

EDN: LVIGHO

## Формирование высокоанизотропного состояния в промышленных сегнетопьезоэлектрических материалах на основе титаната—цирконата свинца путем многократного циклического переключения поляризации

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, Ростов-на-Дону, Россия

*Изучено влияние циклического переключения поляризации на анизотропию пьезоэффекта сегнетопьезоэлектрических керамических материалов группы ПКР (пьезокерамика ростовская), разработанных и изготовленных в НИИ физики ЮФУ. Установлено, что в большей степени воздействие многократным переключением поляризации ведет к увеличению анизотропии пьезоэффекта сегнетомягких материалов из морфотропной области, располагающихся ближе к ромбоэдрической фазе, и материалов средней сегнетожесткости; при подобном же воздействии — анизотропия сегнетожестких материалов существенно не меняется. Представленные результаты целесообразно принимать во внимание при разработке, изготовлении и использовании подобных материалов и устройств с их участием в электронной технике.*

**Ключевые слова:** сегнетопьезоэлектрические керамические материалы, электрофизические параметры, анизотропия пьезоэффекта, применение.

Во многих отраслях промышленности, связанных с использованием сегнетопьезоэлектрических керамических материалов (СПКМ), необходима реализация в них высокой анизотропии (высокого отношения) пьезокоэффициентов — пьезомодулей ( $d_{33}$ ,  $|d_{31}|$ ) и коэффициентов электромеханической связи толщинной ( $K_t$ ) и радиальной ( $K_r$ ) мод колебаний в сочетании с высокими значениями пьезосвойств. Это обеспечивает возможность применения таких СПКМ в дефектоскопии, акселерометрии, толщинометрии и других областях электронной техники.

Среди известных СПКМ наиболее полно удовлетворяют этим требованиям материалы на основе титаната свинца [1]. Но из анализа библиографических и патентных сведений следует, что высокой анизотропии пьезоэффекта можно достигнуть и в других СПКМ, используя определенные схемы поляризации образцов, вводя модифи-

каторы, изменяя термодинамическую предысторию (условия приготовления) объектов [2].

В данной работе авторы используют многократное циклическое переключение поляризации материалов группы ПКР, разработанных и изготовленных в НИИ физики ЮФУ, с целью добиться в них высокой анизотропии пьезоэффекта.

### Объекты, методы получения и исследование образцов

Для исследования выбраны СПКМ — ПКР-1, ПКР-7М, ПКР-8 и ЦТС-19, электрофизические характеристики которых приведены в таблице.

Электрофизические параметры материалов типа ПКР и ЦТС

Характеристики	Материал			
	ПКР-1	ПКР-7М	ПКР-8	ЦТС-19
$T_c, ^\circ\text{C}$	355	175	325	290
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	650	5000	1400	1600
$K_r$	0,62	0,71	0,58	0,60
$K_{15}$	0,70	0,71	0,63	—
$K_t$	0,50	0,52	0,45	0,50
$K_{31}$	0,37	0,40	0,33	—
$K_{33}$	0,72	0,78	0,66	—
$ d_{31} $ , пКл/Н	95	350	130	150
$d_{33}$ , пКл/Н	220	760	290	340
$ g_{31} $ , мВ·м/Н	16,5	7,9	10,5	10,6
$g_{33}$ , мВ·м/Н	38,0	10,8	23,5	24,0
$\text{tg}\delta \cdot 10^2$ ( $E = 50 \text{ В/см}$ )	2,0	2,0	0,35	2,5
$Q_M$	90	60	2000	50

Макарьев Дмитрий Иванович, старший научный сотрудник.

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 интеллектуальных материалов и нанотехнологий, главный научный сотрудник.

E-mail: lareznichenko@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 30 августа 2022 г.

© Макарьев Д. И., Резниченко А. Н., Дудкина С. И.,  
Резниченко Л. А., 2023

Образцы были изготовлены в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной 1 мм с серебряными электродами. Выбор именно этих материалов обусловлен следующими причинами: ПКР-1 и ПКР-7М относятся к сегнетомягким (СМ) материалам. ЦТС-19 — к среднежестким (ССЖ), а ПКР-8 — к сегнетожестким (СЖ). ПКР-1 и ПКР-7М отличаются значениями диэлектрической проницаемости: если ПКР-1 имеет  $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0 = 650$  — это одно из самых низких значений диэлектрической проницаемости, то ПКР-7М, напротив, имеет одно из самых высоких —  $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0 = 5000$ . Кроме того, ПКР-1 принадлежит морфотропной области (МО) вблизи её границы с ромбоэдрической (Рэ) фазой, а ПКР-7М — к МО вблизи тетрагональной (Т) границы. Материалы ПКР-8 и ЦТС-19 находятся в тетрагональной фазе. Таким образом, данными материалами охвачена достаточно большая область промышленных материалов с широким спектром характеристик.

Исследуемые образцы подвергали циклической переполяризации с частотой 50 Гц в полях, превышающих коэрцитивное в два раза, с числом переключений  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$  раз. Методика этого эксперимента 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 располяризвывались путем нагрева до температуры, превышающей точку Кюри. Затем образцы помещали в установку переключения поляризации, где выдерживали определенное время, в течение которого производилось нужное количество переключений. После отключения установки у образцов оставалась некоторая поляризация, при наличии которой измеряли их анизотропию. Потом образцы поляризовались в полиэтиленсилоксановой жидкости до максимально возможных значений поляризации, после чего вновь измеряли анизотропию коэффициентов электромеханической связи.

Далее изучали зависимости изменения  $K_i$  и  $K_p$  от числа циклов переключения поляризации  $N$ , по которым определяли изменения в анизотропии пьезоэффекта образцов.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости  $(K_i/K_p)$  от числа циклов переключения поляризации исследованных образцов материала ПКР-1. Анизотропия пьезоэффекта  $K_i/K_p$ , первоначально меньшая 1, уже к  $N = 10^4$  становится равной 1,9, а при  $N = 10^5$

$(K_i/K_p)$  достигает 4, что позволяет считать такие образцы анизотропными. Как уже отмечалось, этот материал расположен вблизи Рэ-границы МО и принадлежит к группе СМ-материалов, его коэрцитивное  $E_k = 600$  В/мм (см. рис. 1).

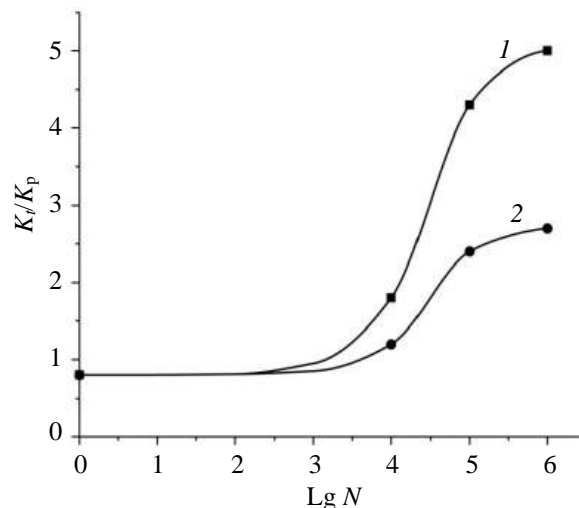


Рис. 1. Зависимость величины анизотропии  $K_i/K_p$  от количества циклов переключения поляризации  $N$  материала ПКР-1:

- 1 — анизотропия измерена по остаточной поляризации;
- 2 — анизотропия измерена после дополнительной поляризации в постоянном поле

Предварительная циклическая переполяризация ведет к существенному росту анизотропии данного материала и последующая поляризация этих образцов заметно снижает анизотропию (см. рис. 1). По-видимому, частичная обратимость процесса вызвана изменением статистики распределения поляризаций доменных структур.

Аналогичное исследование выполнено с материалом ПКР-7М. Этот материал так же, как и ПКР-1, принадлежит МО, но ближе к её Т-границе. Основными отличительными особенностями данного материала являются высокие значения диэлектрических проницаемостей, коэффициентов электромеханической связи, пьезокоэффициентов. Материал более устойчив к воздействию, чем ПКР-1. Однако рост анизотропии образцов данного материала с ростом числа циклов переключения поляризации также значителен. Зависимость анизотропии пьезоэффекта образцов данного материала от числа циклов переполяризации показана на рис. 2.

Анизотропия монотонно увеличивается с ростом  $N$ , и при  $N = 10^5$  достигает 1,9, что не позволяет считать такой материал анизотропным, но этот рост, несомненно, расширит сферу применения данного материала (см. рис. 2). Последующая поляризация в обычном режиме значительно снижает анизотропию материала так же, как это происходит и с ПКР-1.

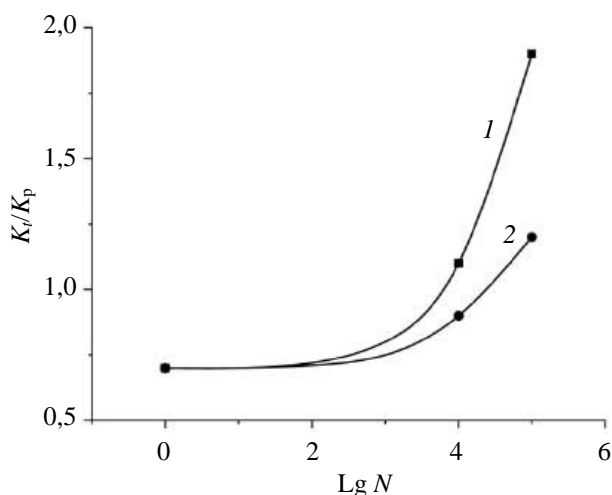


Рис. 2. Зависимость величины анизотропии  $K/K_p$  от количества циклов переключения поляризации  $N$  материала ПКР-7М:

- 1 — анизотропия измерена по остаточной поляризации;  
2 — анизотропия измерена после дополнительной поляризации в постоянном поле

Рассмотрим результаты экспериментов, в которых объектами выступают материалы ЦТС-19 и ПКР-8.

Материал ЦТС-19 представляет собой один из наиболее распространенных промышленных материалов средней жесткости. При воздействии на образцы данного материала циклической переполаризацией их анизотропия пьезоэффекта растет менее значительно, чем у образцов, описанных ранее сегнетомягких материалов (рис. 3).

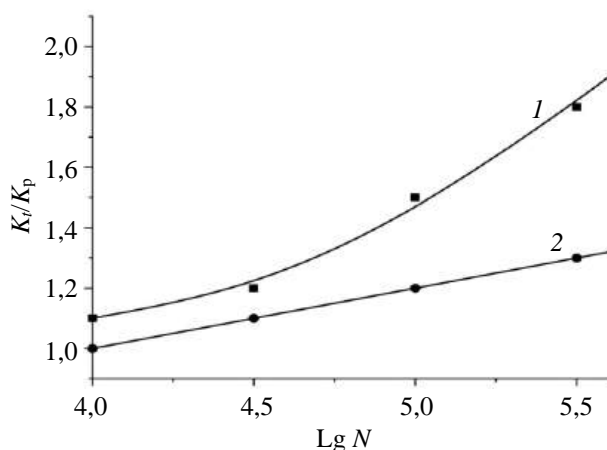


Рис. 3. Зависимость величины анизотропии  $K/K_p$  от количества циклов переключения поляризации  $N$  материала ЦТС-19:

- 1 — анизотропия измерена по остаточной поляризации;  
2 — анизотропия измерена после дополнительной поляризации в постоянном поле

Здесь так же виден рост анизотропии материала с ростом числа циклов переключения поляризации и ее уменьшение при последующей поляризации обычным способом. Отношение  $K/K_p$  достигает

значения 1,8 при  $N = 10^{5,5}$ . Отличается только поведение кривой 2 на рис. 3: в отличие от аналогичных кривых для ПКР-1 и ПКР-7М оно линейно. Возможно, это объясняется только относительно небольшими изменениями анизотропии при подобном воздействии, что не позволяет четко определить характер этой кривой.

ПКР-8 является сегнетожестким материалом, он расположен в тетрагональной области на границе с морфотропным переходом. Материал обладает высокой механической добротностью, низким значением тангенса угла диэлектрических потерь, достаточно высокими пьезоэлектрическими параметрами при средних значениях компонент тензора диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_{ij}$ . Исследование показало, что этот материал устойчив к описанному воздействию. Поведение его анизотропии при воздействии циклическим переключением поляризации показано на рис. 4. Здесь видно, что анизотропия материала практически не меняется при росте  $N$ .

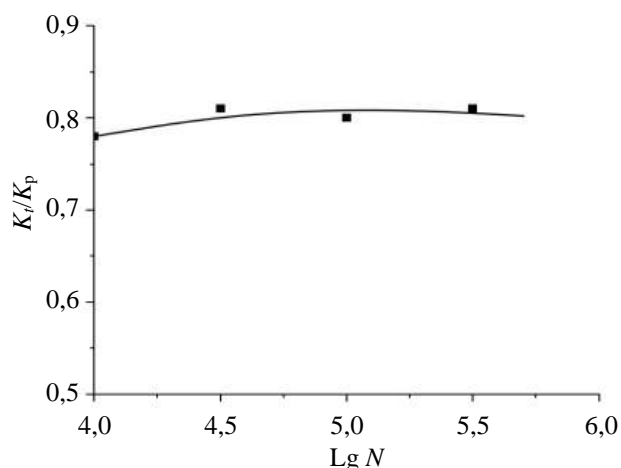


Рис. 4. Зависимость величины анизотропии  $K/K_p$  от количества циклов переключения поляризации  $N$  материала ПКР-8, анизотропия измерена по остаточной поляризации

Анализ представленных результатов позволил установить, что в большей степени изменяется анизотропия материалов из МО, располагающихся ближе к Рэ-фазе, то есть воздействие многократным переключением поляризации ведет к увеличению анизотропии пьезоэффекта СМ-материалов и материалов средней сегнетожесткости; при подобном же воздействии анизотропия СЖ-материалов существенно не меняется.

Что же происходит с керамикой в процессе циклического переключения поляризации? Рассмотрим доменные структуры выбранных СПКМ в исходном состоянии и после указанного воздействия.



Доменная структура ПКР-1 (рис. 5) в исходном состоянии представляет собой развитую структуру  $180^\circ$ -ных доменов при отсутствии или при незначительных по объему вкраплениях  $90^\circ$ -ных двойников [3]. Похожую же доменную структуру имеет и материал ПКР-7М. Он характеризуется полным отсутствием двойниковых структур.

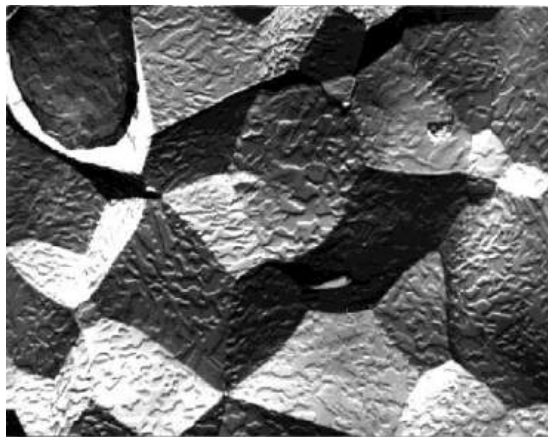


Рис. 5. Микрофотография доменной структуры неполяризованного образца ПКР-1; фигуры травления соответствуют  $180^\circ$ -ным доменам ( $\times 10^4$ )

В керамике ЦТС-19 более сложная доменная структура характеризуется существованием тонкослоистых серий  $90^\circ$ -ных доменов с характерными размерами этих доменов порядка 0,02—0,05 мкм и более крупной  $180^\circ$ -ной доменной структурой (2—3 мкм) [4]. У ПКР-8 исходная доменная структура несколько отличается и представляет собой хаотически расположенные группы слоистых двойниковых структур [3].

В результате воздействия циклической переполаризацией, в кристаллитах данных СПК образуются следующие доменные структуры.

У ПКР-1 после воздействия  $10^5$  циклами переполаризации  $180^\circ$ -ная доменная структура исчезает, концентрация двойников заметно возрастает (рис. 6).

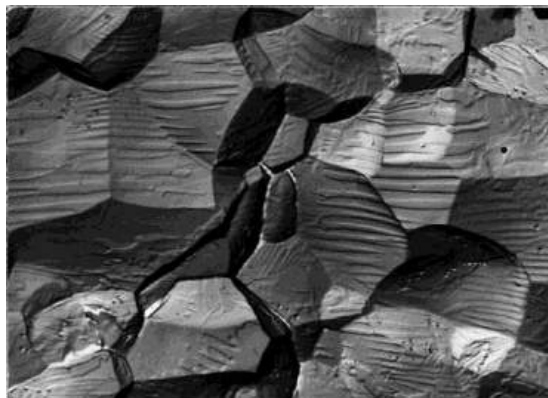


Рис. 6. Микрофотография доменной структуры ПКР-1 после воздействия многократной переполаризацией при числе циклов переполаризации  $N = 10^5$  ( $\times 10^4$ )

Как правило, это неразвитые двойники-клинья, основания которых лежат на границах кристаллитов. Это говорит о том, что именно на границах кристаллитов концентрируются напряжения, вызывающие рост двойников [3].

ПКР-7М ведет себя похожим образом, здесь тоже исчезает  $180^\circ$ -ная доменная структура и вместо нее возникает структура из множества клиновидных двойников, при этом клинья в обоих случаях вытянуты вдоль направления, перпендикулярного направлению внешнего электрического поля [3, 5].

У ЦТС-19 в результате поляризации  $180^\circ$ -ная доменная структура исчезает, как это ранее показано в работе [5]. Вместо нее возникают слоистые серии  $90^\circ$ -ных доменов и полосчатые структуры сложного двойникового строения (рис. 7).

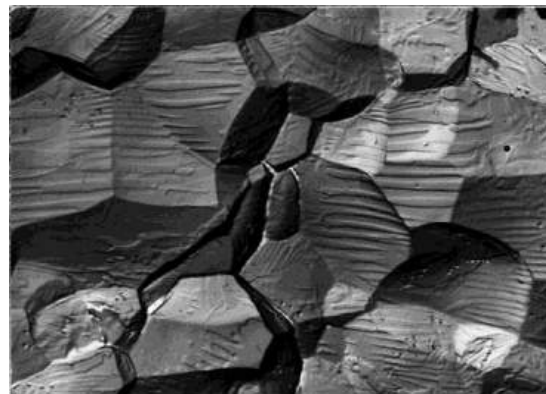


Рис. 7. Микрофотография доменной структуры ЦТС-19 после воздействия многократной переполаризацией при числе циклов переполаризации более  $N = 10^5$  ( $\times 10^4$ )

У ПКР-8 после воздействия  $10^5$  циклами поляризации, уже имеющаяся двойниковая структура кристаллитов переходит в более сложную, в которой преобладают элементы вторичного двойниования кристаллитов.

## Выводы

Циклическая переполаризация воздействует практически одинаково на доменную структуру всех СПКМ:  $180^\circ$ -ная доменная структура переходит в структуру несовосьмидесятиградусных доменов, структура механических двойников переходит в структуру вторичных двойников. Установлено также [3, 5], что перестройка доменной структуры кристаллитов происходит уже при  $10^4$  циклов процесса в ходе, так называемой формовки керамики.

Таким образом, в результате воздействия циклической переполаризацией в кристаллитах происходит генерация и закрепление механических двойников. При этом образуются доменные струк-

туры, обладающие повышенной анизотропией пьезоэффекта. Именно поэтому в СПКМ с малой исходной анизотропией пьезоэффекта (ПКР-1, ПКР-7М, ЦТС-19) заметный рост анизотропии достигается в том случае, когда концентрация кристаллитов, в которых формируется доменная структура, состоящая из слоев двойников, ориентированных перпендикулярно направлению  $E_p$ , возрастает. Возникновение же в результате воздействия многократной переполяризации в образцах материала ПКР-8 структур вторичных двойников не ведёт к изменению анизотропии пьезоэффекта.

Представленные в работе результаты целесообразно принимать во внимание при разработке широкополосных безрезонансных электромеханических устройств электронной техники, в которых данные материалы способны конкурировать с современными композитными пьезоматериалами [6].

*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 мультифункциональных*

*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. Гринёва Л. Д. К вопросу об анизотропии пьезопараметров сегнетокерамики на основе  $PbTiO_3$  // Пьезоактивные материалы. Физика, технология, применение в приборах. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1991. Вып. 9. С. 65—70.
2. Гавриляченко В. Г., Кузнецова Е. М., Семенчев А. Ф., Складова Е. Н. Динамическая усталость при переполяризации керамики на основе цирконата-титаната свинца с различной сегнетожесткостью // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. № 6. С. 1080—1083.
3. Гавриляченко В. Г., Резниченко Л. А., Рыбьянец А. Н., Гавриляченко В. Г. Пьезокерамика для частотно-селективных устройств. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГПУ, 1999. — 240 с.
4. Шувалов Л. А. Диэлектрические и пьезоэлектрические свойства поляризованной керамики  $BaTiO_3$  в разных сегнетоэлектрических фазах // Кристаллография. 1957. Т. 2. № 1. С. 119—129.
5. Экнадиосянц Е. И., Пинская А. Н., Бородин В. З. Доменная структура сегнетомягких керамик на основе титаната-цирконата свинца // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 3. С. 502—507.
6. 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.

## Formation of a highly anisotropic state in industrial ferropiezoelectric materials based on lead titanate-zirconate by repeated cyclic polarization switching

D. I. MAKARIEV, A. N. REZNICHENKO, S. I. DUDKINA, L. A. REZNICHENKO  
Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

*The effect of cyclic polarization switching on the anisotropy of the piezoelectric effect of ferro-piezoelectric ceramic materials of the PCR group (Rostov piezoceramics) developed and manufactured at the Research Institute of Physics of the Southern Federal University was studied in this work. It has been established that, to a greater extent, the effect of multiple switching of polarization leads to an increase in the anisotropy of the piezoelectric effect of the ferrosoft materials from the morphotropic region, located closer to the Rh-phase, and materials of medium ferrohardness; under a similar impact, the anisotropy of the ferrohardness materials does not change significantly. 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:** ferro-piezoelectric ceramic materials, electrophysical parameters, piezoelectric effect anisotropy, application.

## Исследование и разработка требований к спектральным параметрам волоконных брэгговских решеток для системы диагностики композитных конструкций

М. Ю. ФЕДОТОВ, канд. техн. наук

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия  
Российская инженерная академия, Москва, Россия

*Рассмотрены и проанализированы результаты измерений основных спектральных параметров волоконных брэгговских решеток (ВБР), предназначенных для создания интегрированной системы диагностики конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ), приведены основные расчётные соотношения. Экспериментально подтверждено, что коэффициент отражения, амплитуда модуляции показателя преломления и ширина спектра отражения на полувывоте фактически не изменяются при приложении механических растягивающих нагрузок, тогда как изменение резонансной длины волны ВБР позволяет их надежно регистрировать во всем диапазоне измерения относительных деформаций, характерных для конструкционных ПКМ. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению внутренних деформаций конструкций из ПКМ с помощью интегрированных ВБР. Экспериментально установлено, что коэффициент отражения и амплитуда модуляции показателя преломления ВБР в составе ПКМ зависят от предельных температур формования ПКМ, которые приводят к некоторому снижению этих параметров, при этом ширина спектра отражения на полувывоте остается постоянной. Разработаны экспериментальные требования к спектральным параметрам ВБР, предназначенных для диагностики композитных конструкций.*

**Ключевые слова:** встроенная диагностика, полимерный композитный материал, композитная конструкция, волоконная брэгговская решетка, спектральный параметр, резонансная длина волны, коэффициент отражения, амплитуда модуляции показателя преломления, ширина спектра отражения на полувывоте.

Вопросам обеспечения безопасности эксплуатации конструкций различного назначения из ПКМ уделяется огромное внимание. Данная задача актуальна для объектов целого ряда отраслей промышленности — транспортной, включая авиационную и космическую, строительной, судостроения, энергетики, дорожно-мостовой инфраструктуры и других. Большое количество конструкций эксплуатируется длительное время, следовательно, требуется оценка их фактического состояния в целях выявления повреждений, влияющих на их несущую способность, принятия решений о необходимости проведения тех или иных регламентных мероприятий, ремонтных работ, возможности дальнейшей безопасной эксплуатации.

Наблюдается резкое увеличение доли ПКМ, применяемых для высоконагруженных и ответственных конструкций [1, 2]. Одним из наиболее

ярких примеров является конструкция пассажирского самолета МС-21. Доля ПКМ в конструкции самолета составляет более 30 %, это прежде всего крылья и хвостовое оперение. В вертолетной индустрии широкое использование ПКМ также востребовано [3, 4]. Так, на Международном авиационно-космическом салоне (МАКС-2019) холдинг "Вертолеты России" продемонстрировал опытный образец новейшего многоцелевого вертолета Ка-62. Уникальность представленной машины обусловлена внедрением принципиально новых конструкторско-технологических решений, среди которых стоит особенно выделить использование ПКМ, применение которых позволило повысить маневренность, скорость, экономичность и грузоподъемность. Доля применения ПКМ составила до 60 % по массе.

Вместе с тем, внедрение новых материалов в перспективные образцы техники невозможно без применения методов неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики, обеспечивающих получение достоверной информации об объекте контроля на протяжении всего жизненного цикла изделия.

---

**Федотов Михаил Юрьевич**, главный конструктор проекта, академик РИА, заместитель президента РИА.  
E-mail: fedotovmyu@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2022 г.

© Федотов М. Ю., 2023

Одним из новых и перспективных методов НК является оптический метод [5], основанный на регистрации деформации и температуры конструкций с помощью интегрированных волоконных световодов (ВС) с массивами волоконно-оптических датчиков (ВОД), например, на основе ВБР в режиме реального времени, либо с заданной частотой опроса ВОД. Таким образом, благодаря сравнительно малым геометрическим размерам и весу ВОД, становится возможным реализовать встроенную волоконно-оптическую систему диагностики конструкции. Однако при явных преимуществах метод имеет целый ряд особенностей, связанных с необходимостью разработки топологии ВОД для каждой конкретной композитной конструкции, проведением трудоемкого процесса интеграции ВОД в структуру ПКМ, включая формирование надежного вывода ВОД из конструкции в целях подключения к опросному устройству.

Цель данной работы — экспериментальное исследование и разработка требований к спектральным параметрам ВБР, предназначенных для создания интегрированной системы диагностики конструкций из ПКМ.

### Спектральные параметры волоконных брэгговских решеток. Основные расчетные соотношения

ВБР представляет собой сложную периодическую структуру, в которой показатель преломления меняется по какому-либо периодическому закону. Как правило, для интеграции в ПКМ с целью создать встроенную систему диагностики, используются ВБР, записанные в фоточувствительной сердцевине одномодового ВС на сравнительно небольшом (~ 1—10 мм) участке с помощью интерференционной картины когерентного УФ-излучения.

Известно, что резонансная длина волны ВБР, сформированной на участке ВС, определяется соотношением, известным в литературе [6] как условие фазового синхронизма

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \quad (1)$$

где  $n$  — эффективный показатель преломления ВС на брэгговской длине волны;

$\Lambda$  — период ВБР.

Согласно [7] выражение для профиля показателя преломления однородной ВБР, записанной в одномодовом ВС, имеет вид

$$n = n_0 + \Delta n_{\text{mod}} \cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right), \quad (2)$$

где  $n_0$  — средний показатель преломления;

$\Delta n_{\text{mod}}$  — амплитуда модуляции показателя преломления;

$l$  — расстояние вдоль оси ВС.

Тогда, согласно теории связанных мод [8], спектр отражения ВБР является функцией двух переменных — длины волны ВБР  $\lambda$  и геометрической длины ВБР  $L$

$$R(\lambda, L) = \frac{\kappa_B^2 \sin^2 h^2(s, L)}{\Delta\beta^2 \sin^2 h^2(s, L) + s^2 \cosh^2(s, L)}, \quad (3)$$

где  $\kappa_B$  — коэффициент связи;

$\Delta\beta = \beta - \pi/\lambda$  — волновой вектор расстройки;

$\beta = 2\pi n_0/\lambda$  — постоянная распространения;

$s^2 = \kappa^2 - \Delta\beta^2$ .

На резонансной длине волны  $\lambda_B$  выполняется равенство  $\Delta\beta = 0$ .

Тогда для однородной ВБР длиной  $L$ , коэффициент отражения  $R$  на резонансной длине волны  $\lambda_B$  выражается как [9]

$$R = th^2(\kappa_B \cdot L). \quad (4)$$

Для случая синусоидальной функции модуляции показателя преломления коэффициент связи определяется выражением [10]

$$\kappa_B = \pi \Delta n_{\text{mod}} \eta_B / \lambda_B. \quad (5)$$

В указанном источнике, а также иной зарубежной литературе, данный параметр упоминается как "Grating Strength".

В выражении (5)  $\Delta n_{\text{mod}}$  — амплитуда модуляции показателя преломления в первом порядке разложения формы штриха в ряд Фурье,  $\eta_B$  — интеграл перекрытия — часть мощности основной моды, которая распространяется по сердцевине ВС радиуса  $r = a$  с амплитудой электрического поля основной моды  $E_{co}$ , определяемый из соотношения

$$\eta_B = \frac{\int_0^a |E_{co}|^2 r dr}{\int_0^\infty |E_{co}|^2 r dr}. \quad (6)$$

Таким образом, из соотношений (4), (5) видно, что коэффициент отражения зависит от амплитуды модуляции показателя преломления и геометрической длины ВБР. Дополнительно отметим, что число штрихов ВБР определяется выражением

$$N = \frac{L}{\Lambda}, \quad (7)$$

где  $N$  — число штрихов ВБР.

Полная спектральная ширина ВБР характеризуется участком спектра между первыми нулевыми значениями коэффициента отражения и определяется соотношением [11]

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_B}{N} \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa_B L}{\pi}\right)^2} \quad (8)$$

Однако на практике удобно пользоваться экспериментально определяемым параметром — полной шириной спектра ВБР на полувысоте.

Отметим, что важными спектральными параметрами ВБР, характеризующими качество и достоверность оптического контроля ПКМ являются, собственно, резонансная длина волны ВБР (1), коэффициент отражения (пропускания) ВБР (4) и связанная с ним амплитуда модуляции показателя преломления (4, 5), а также полная спектральная ширина ВБР (8). Для практических приложений обычно используют полную ширину спектра пропускания (отражения) на полувысоте (FWHM — Full Width at Half Maximum) (8).

Основное выражение для определения ширины спектра отражения ВБР на полувысоте имеет вид [7]

$$\Delta W = \lambda_B \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n_{\text{mod}}}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (9)$$

В (9) коэффициент  $\alpha$  зависит от отражательных свойств ВБР. Так, для случая создания интегрированной системы оптического контроля ПКМ применяют ВБР с высоким коэффициентом отражения, в этом случае  $\alpha \approx 1$ . Для ВБР, имеющих сравнительно низкую отражательную способность, и используемых при разработке различных оптических устройств, значение  $\alpha \approx 0,5$  [8].

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Для проведения экспериментальных исследований использовали стандартные одномодовые кварцевые ВС в акрилатном защитном покрытии (ЗП) диаметром 0,25 мкм в количестве 15 шт. длиной 0,5 м каждый. В геометрическом центре каждого ВС методом УФ-записи на лабораторной установке, основанной на применении интерферометра Ллойда [12], были сформированы ВБР из расчета 1 ВБР на 1 ВС. Стоит отметить, что перед нанесением ВБР зона ВС, предназначенная для этих целей была зачищена от ЗП. После формирования ВБР ЗП было восстановлено методом термоотверждения [13] для обеспечения механической целостности ВС в локальной зоне распо-

ложения ВБР при воздействии технологического режима формования.

Исследования спектральных параметров ВБР проводили с использованием спектроанализатора ANDO 6317B с разрешающей способностью по длине волны  $\sim 0,02$  нм и универсального регистрирующего модуля на основе спектроанализатора I-MON 512E-USB, позволяющего определять изменение резонансной длины волны ВБР в диапазоне от 1510 до 1590 нм.

При создании интегрированной волоконно-оптической системы диагностики конструкций из ПКМ важно обеспечить стабильность и повторяемость спектральных параметров ВБР для обеспечения возможности долговременного контроля деформации и температуры конструкции в режиме реального времени — мониторинга.

### Экспериментальные исследования влияния внешних растягивающих нагрузок на спектральные параметры ВБР

Внешние механические воздействия (например, продольная деформация ВС с ВБР и температура), как известно, приводят к смещению резонансной длины волны ВБР. По величине данного смещения можно судить о действующих значениях относительной деформации и/или температуры объекта диагностики. Вместе с тем, для создания надежной системы встроенной диагностики конструкций из ПКМ целесообразно оценить влияние внешних продольных механических нагрузок на форму спектра ВБР, характеризующуюся указанными спектральными параметрами.

Экспериментальные исследования влияния внешних растягивающих нагрузок на спектральные параметры ВБР проводили на 10 ВС с ВБР по следующей методике:

- ВС с ВБР надежно фиксировал с одной стороны с использованием стандартного фиксатора, закрепленного на оптическом столе;
- второй конец ВС с ВБР фиксировался аналогичным образом, при этом данный узел фиксации был закреплен на линейном трансляторе;
- ВС с ВБР подключался к спектроанализатору ANDO 6317B для получения спектра отражения от широкополосного эрбиевого источника излучения Er-BBLS-14-CL-X;
- фиксировался спектр ВБР при продольном растяжении ВС с ВБР с помощью транслятора и определялись спектральные параметры ВБР.

Результаты проведенных экспериментальных исследований по описанной методике для одной из исследуемых ВБР представлены на рис. 1.



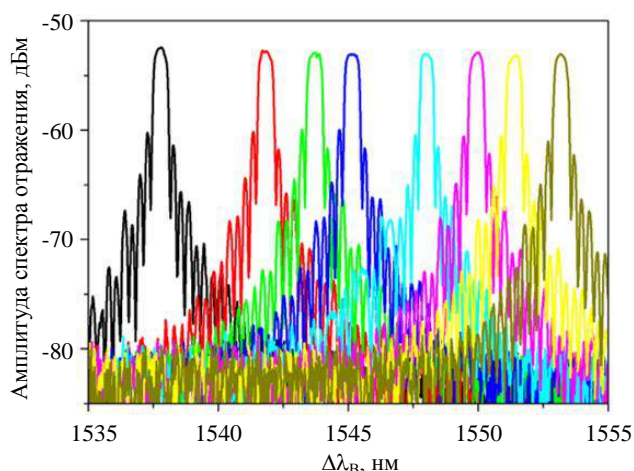


Рис. 1. Спектры отражения ВБР при растягивающих нагрузках

При приложении к ВС с ВБР растягивающих нагрузок в исследуемом диапазоне длин волн практически не изменяется форма спектра, а, следовательно, коэффициент отражения, функционально связанная с ним амплитуда модуляции показателя преломления и спектральная ширина на полувысоте (см. рис. 1). Похожая картина наблюдалась для всех исследуемых ВБР.

Для расчета деформаций, регистрируемых ВБР, удобно воспользоваться линейной моделью оптического контроля

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B^0} = K_\varepsilon^0 \Delta\varepsilon + K_T^0 \Delta T, \quad (10)$$

где  $\lambda_B^0$  — резонансная длина волны ВБР в свободном состоянии (до интеграции в композитную панель), нм;

$\Delta\lambda_B$  — изменение резонансной длины волны ВБР вследствие приложения растягивающей нагрузки, нм;

$\Delta\varepsilon$  — изменение относительной деформации ВС, отн. ед.;

$K_\varepsilon^0$  — коэффициент чувствительности ВБР к деформации, (мкм/м)<sup>-1</sup>;

$K_T^0$  — коэффициент чувствительности ВБР к температуре, °C<sup>-1</sup>.

Экспериментальные исследования проводили при комнатной температуре ~ 24 °C, поэтому вторым слагаемым в выражении (10) можно пренебречь. Тогда выражение для определения относительной деформации ВБР примет вид

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{K_\varepsilon^0} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B^0} 100 \%. \quad (11)$$

Таким образом, вследствие изменения резонансной длины волны ВБР на величину ~ 16 нм с учетом стандартного значения  $K_\varepsilon^0 = 0,78$  отн. ед.

[14] для ВБР с резонансной длиной волны 1537,71 нм относительная деформация согласно (11) и составила 1,33 %.

Диапазон изменения относительных деформаций, в котором проводили исследование, выбран с учетом того обстоятельства, что ПКМ, в частности конструкционные углекомпози́ты, работают фактически в зоне упругих деформаций, а величина разрушающих деформаций, соответствующая пределу прочности на растяжение, обычно варьируется в пределах (1,0—1,5) %. Таким образом, экспериментально подтверждено, что спектральные параметры ВБР, такие, как коэффициент отражения, амплитуда модуляции показателя преломления и спектральная ширина на полувысоте, фактически не изменяются при приложении механических растягивающих нагрузок, тогда как изменение резонансной длины волны ВБР позволяет их надежно фиксировать во всем диапазоне измерения относительных деформаций, характерных для конструкционных углекомпози́тов, что крайне важно при создании надежной интегрированной системы диагностики композитных конструкций.

#### Экспериментальные исследования спектральных параметров ВБР, предназначенных для диагностики композитных конструкций

Изготовление конструкций из ПКМ представляет собой сложный многоступенчатый технологический процесс включает в себя мероприятия по подготовке заготовки для формования, сам процесс формования, при котором вследствие воздействия температуры и давления происходит процесс полимеризации связующего, достижение температуры стеклования и окончательное отверждение [15], после чего осуществляется остывание отформованного изделия до комнатной температуры. Для компенсации внутренних напряжений в материале конструкции зачастую применяют методы термообработки готовых конструкций из ПКМ [16]. Эти обстоятельства нужно учитывать и при создании интегрированных систем диагностики композитных конструкций.

Экспериментальные исследования спектральных параметров ВБР, предназначенных для диагностики композитных конструкций, проводили по следующей методике:

- перед встраиванием в композитную панель с помощью спектроанализатора ANDO 6317B и широкополосного эрбиевого источника излучения Er-BBLS-14-CL-X регистрировали спектры отражения всех ВБР, определялись исходные значения спектральных параметров ВБР: резонансных длин волн, коэффициентов отражения, ширины спектра

ВБР на полувывоте, а также осуществляли расчет амплитуды модуляции показателя преломления каждой ВБР с учетом уравнений (4) и (5);

- осуществляли выкладку заготовок препрега на основе однонаправленной углеродной ленты УОЛ-300-2 3К и эпоксидного растворного связующего ЭНФБ-2М для последующего прессового формования. Панель имела квази-изотропную укладку из 8 монослоев, причем ВС с ВБР размещали в направлении армирования одного из монослоев, тогда как ориентация прилегающего монослоя отличалась на 45°. Формирование зоны ввода—вывода осуществляли через поверхность панели с использованием фторопластового капилляра для защиты от механических повреждений;

- проводили прессовое формование панели из углекомпози́та УОЛ-300-3К/ЭНФБ-2М с интегрированными ВС с ВБР по штатному режиму;

- после формования панели из углекомпози́та УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М с интегрированными ВС с ВБР осуществляли повторную регистрацию спектров отражения ВБР и определение их спектральных параметров: резонансных длин волн, коэффициентов отражения, ширины спектра ВБР на полувывоте, а также производили расчет амплитуды модуляции показателя преломления каждой ВБР с учетом уравнений (4) и (5);

- проводился расчет изменений спектральных параметров ВБР после встраивания в панель из углекомпози́та УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М;

- проводили обработку и интерпретации полученных результатов.

Результаты экспериментальных исследований спектральных параметров ВБР при интеграции в панель из углекомпози́та УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М приведены в табл. 1, где  $\lambda_B^{CFRP}$  — резонансная длина волны ВБР после интеграции в композитную панель,  $\Delta\lambda_B^{CFRP}$  — изменение резонансной длины волны ВБР после интеграции в композит-

ную панель,  $R_B^0$  — коэффициент отражения ВБР до интеграции в композитную панель,  $R_B^{CFRP}$  — коэффициент отражения ВБР после интеграции в композитную панель,  $\Delta R_B^{CFRP}$  — изменение коэффициента отражения ВБР после интеграции в композитную панель,  $\Delta n_{mod}^{CFRP}$  — относительное изменение амплитуды модуляции показателя преломления ВБР после интеграции в композитную панель, равное отношению амплитуды модуляции показателя преломления ВБР после интеграции в композитную панель  $\Delta n_{mod}^{CFRP}$  к соответствующему коэффициенту ВБР в исходном состоянии (до интеграции)  $\Delta n_{mod}^0$ .

В табл. 1 не приведены данные по изменению ширины спектра ВБР на полувывоте вследствие интеграции в структуру углекомпози́та УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М. Это связано с тем, что данный спектральный параметр ВБР фактически не менялся, величина его изменения составила ~0,01 нм, что хорошо согласуется с результатами, описанными в [17] для углекомпози́та ЭЛУР-П/ЭНФБ-2М, перерабатываемого автоклавным методом формования.

Изменение резонансных длин волн ВБР, интегрированных в одну и ту же панель из углекомпози́та УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М, варьируется в пределах от -0,19 нм до -0,36 нм при среднем значении -0,26 нм (см. табл. 1). Отрицательные значения показывают, что наблюдается продольное сжатие ВБР в составе материала конструкции после формования, обусловленное как разницей коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) углекомпози́та и кварцевого стекла ВС, так и точностью позиционирования ВОД относительно направления армирования прилегающих слоев в процессе сборки пакета для прессового формования.

Таблица 1

Изменение спектральных параметров ВБР после интеграции в панель из углекомпози́та УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М

№ ВБР	$\lambda_B^0$ , нм	$\lambda_B^{CFRP}$ , нм	$\Delta\lambda_B^{CFRP}$ , нм	$R_B^0$ , %	$R_B^{CFRP}$ , %	$\Delta R_B^{CFRP}$ , %	$\Delta n_{mod}^{CFRP}$ , отн. ед.
1.	1527,41	1527,22	-0,19	89,3	83,4	-5,9	0,87
2.	1538,94	1538,69	-0,25	90,9	85,2	-5,7	0,86
3.	1536,45	1536,19	-0,26	86,2	82,6	-3,6	0,92
4.	1537,71	1537,35	-0,36	89,3	79,1	-10,2	0,79
5.	1555,12	1554,91	-0,21	92,4	83,4	-9	0,79
6.	1536,93	1536,64	-0,29	89,5	83	-6,5	0,85
7.	1546,78	1546,55	-0,23	93,8	86,2	-7,6	0,79
8.	1530,69	1530,44	-0,25	94,2	86,8	-7,4	0,8
9.	1527,91	1527,59	-0,32	88,5	74,9	-13,6	0,76
10.	1537,69	1537,42	-0,27	86,2	74,3	-11,9	0,79

Таким образом, отметим, что внутренние деформации отформованного материала конструкции в локальных зонах расположения ВБР отличаются незначительно и с учетом (11) составляют в среднем величину порядка -0,022 %. Однако на практике зачастую удобно пользоваться относительными величинами. С учетом этого обстоятельства выражение (11) примет вид

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon}^0} \cdot \Delta_{\text{В}}, \quad \text{где } \Delta_{\text{В}} = \frac{\Delta \lambda_{\text{В}}}{\lambda_{\text{В}}^0}. \quad (12)$$

В этом случае  $\Delta_{\text{В}}$  будет выражаться в миллионных долях (ppm — part per million) длины волны,  $\Delta \varepsilon$  — в мкм/м.

Результаты расчета внутренних деформаций в панели из углекомпозита УОЛ-300-2 ЗК/ ЭНФБ-2М в зоне расположения ВБР с учетом  $K_{\varepsilon}^0 = 0,78 \text{ (мкм/м)}^{-1}$  представлены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 2.

Таблица 2

Расчет внутренних деформаций в панели из углекомпозита  
УОЛ-300-2 ЗК/ ЭНФБ-2М в зоне расположения ВБР

№ ВБР	$\lambda_{\text{В}}^0$ , нм	$\Delta \lambda_{\text{В}}$ , нм	$\Delta_{\text{В}}$ , ppm	$\Delta \varepsilon$ , мкм/м	$\Delta \varepsilon$ , %
1	1527,41	-0,19	-124	-159	-0,016
2	1538,94	-0,25	-162	-208	-0,021
3	1536,45	-0,26	-169	-217	-0,022
4	1537,71	-0,36	-234	-300	-0,03
5	1555,12	-0,21	-135	-173	-0,017
6	1536,93	-0,29	-189	-242	-0,024
7	1546,78	-0,23	-149	-191	-0,019
8	1530,69	-0,25	-163	-209	-0,021
9	1527,91	-0,32	-209	-269	-0,027
10	1537,69	-0,27	-176	-225	-0,023

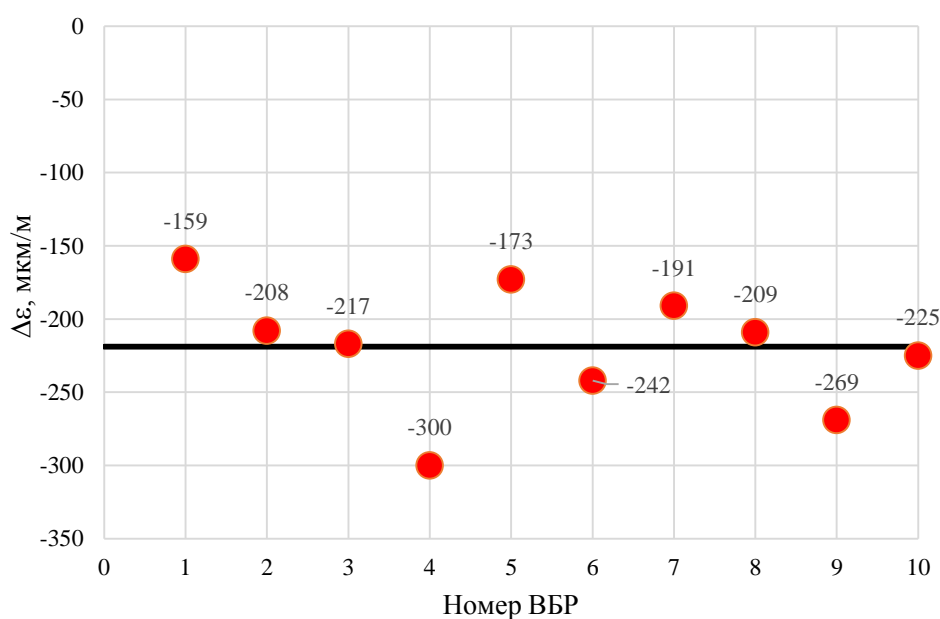


Рис. 2. Относительное изменение резонансных длин волн ВБР после интеграции в панель из углекомпозита УОЛ-300-2 ЗК/ ЭНФБ-2М

Анализируя представленные результаты исследований, отметим, что внутренние деформации углекомпози́та УОЛ-300-2 ЗК/ЭНФБ-2М, обусловленные процессом формования прессовым методом, варьируются в пределах от -0,016 до -0,024 % (от -159 до -300 мкм/м) при среднем значении 0,022 % (-219 мкм/м). Таким образом, показано, что с помощью ВС с ВБР, интегрированных в панель из углекомпози́та УОЛ-300-2 ЗК/ЭНФБ-2М, с высокой точностью можно определять фактические распределение внутренних деформаций материала после прессового формования. При этом данные значения достаточно малы, однако они могут быть использованы для оценки внутренних напряжений сжатия конструкции, возникающих вследствие формования.

Для создания интегрированных волоконно-оптических систем диагностики композитных конструкций на основе ВБР, обеспечивающих необходимую достоверность НК, необходимо выявить закономерности изменения спектральных параметров ВБР после введения в материал. Это необходимо для разработки требований к ВБР, предназначенным для диагностики.

Результаты экспериментальных исследований изменения коэффициента отражения ВБР, а также относительного изменения амплитуды модуляции показателя преломления ВБР до и после интегра-

ции в панель из углекомпози́та УОЛ-300-2 ЗК/ЭНФБ-2М, проиллюстрированы на рис. 3.

В указанном диапазоне внутренних деформаций сжатия материала  $\Delta\epsilon$  от -159 до -300 мкм/м, зарегистрированных соответствующими ВБР, наблюдается неравномерное изменение коэффициента отражения  $\Delta R_B^{CFRP}$  в диапазоне от -3,6 до -13,6 % при среднем значении -8,1 %. (см. рис. 3). В том же диапазоне внутренних деформаций также наблюдается неравномерное распределение значений относительного изменения амплитуды модуляции показателя преломления ВБР  $\Delta_{mod}^{CFRP}$  в пределах от 0,76 до 0,92 отн. ед. при среднем значении 0,82 отн. ед.

Таким образом, экспериментально показано, что изменение значений указанных спектральных параметров ВБР обусловлено частичным отжигом показателя преломления ВБР, наведенного УФ-излучением, вследствие проведения процесса формования при температурах  $\sim 180^\circ\text{C}$  в течение 3—4 ч, и фактически не зависит от величин возникающих в материале внутренних деформаций в локальной области расположения ВБР. Это обстоятельство хорошо соотносится с результатами экспериментальных исследований, описанных в разделе "Экспериментальные исследования влияния внешних растягивающих нагрузок на спектральные параметры ВБР".

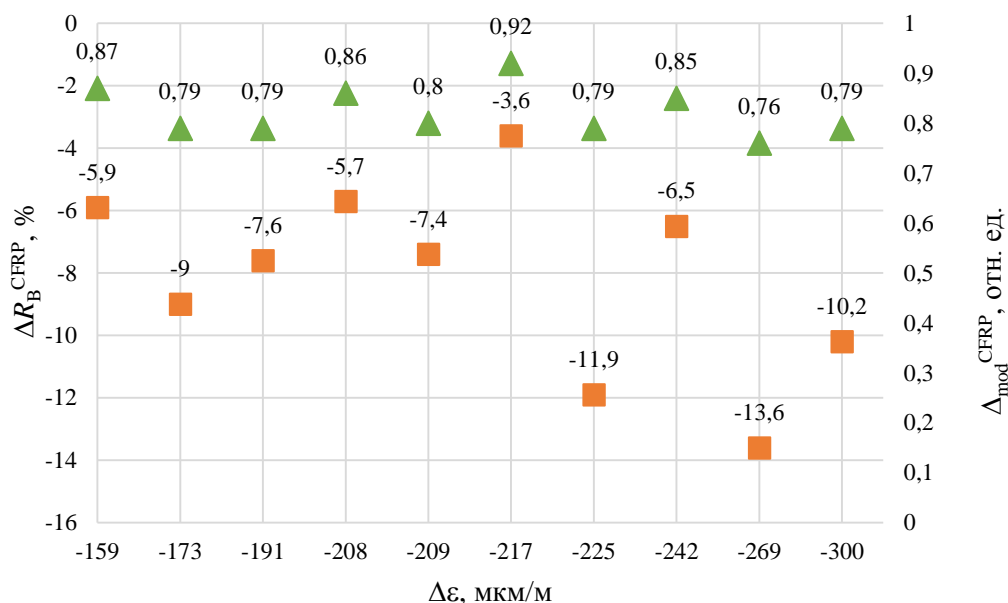


Рис. 3. Изменение коэффициента отражения и относительное изменение амплитуды модуляции показателя преломления ВБР после интеграции в панель из углекомпози́та УОЛ-300-2 ЗК/ЭНФБ-2М:

■ —  $\Delta R_B^{CFRP}$ , ▲ —  $\Delta_{mod}^{CFRP}$

Таким образом, экспериментально подтверждено, что коэффициент отражения и амплитуда модуляции показателя преломления ВБР в составе углекомпозиата УОЛ-300-2 ЗК/ЭНФБ-2М фактически не зависят от величины сжимающих деформаций, возникающих в материале конструкции вследствие формования, а зависят исключительно от предельных температур формования ПКМ, которые приводят к некоторому снижению этих параметров. Для минимизации влияния температуры формования ПКМ на указанные спектральные параметры ВБР целесообразно проводить предварительный отжиг ВБР [18] при предельных температурах формования, характерных для конкретного материала конструкции.

### ***Разработка экспериментальных требований к спектральным параметрам ВБР, предназначенных для диагностики композитных конструкций***

По результатам проведенных экспериментальных исследований, а также с учетом спектрального диапазона длин волн коммерчески доступных отечественных и зарубежных устройств опроса ВБР (интеррогаторов) для создания интегрированных волоконно-оптических систем диагностики композитных конструкций целесообразно применять ВБР, имеющие следующие спектральные параметры:

- резонансная длина волны ВБР: 1 515—1 590 нм для устройства опроса с диапазоном 1 510—1 595 нм. Так, анализатор сигналов ВБР (АС ВБР) FIU-44-1.55-40-S-A4-IP40 ("НЦВО-Фотоника", Россия) может проводить измерения в диапазоне длин волн 1 510—1 595 нм, АС ВБР ASTRO A31X ("Инверсия-Сенсор", Россия) — 1 500—1 600 нм, АС ВБР si155-ST-01-1500-1600-0100-NO ("Luna Innovations Inc.", США) — 1 500—1 600 нм. Конкретный диапазон резонансных длин волн также должен учитывать предельные значения деформаций композитной конструкции, в которую осуществляется интеграция ВБР для создания встроенной системы диагностики;

- коэффициент отражения ВБР: не менее 85 %. Стоит подчеркнуть, что довольно высокие значения этого параметра для ВБР, предназначенных для введения в структуру ПКМ на стадии изготовления для создания встроенной системы диагностики композитных конструкций, обусловлены тем, что в процессе их формования под воздействием температур (как правило, не менее 180 °С в течение 3—4 ч) и избыточного давления (~ 0,7 МПа для монолитных конструкций и ~ 0,2 МПа для трехслойных конструкций) происходит некоторое снижение этого параметра, как

правило, на величину от 3 до 14 %. Дополнительным аспектом являются и конкретные условия эксплуатации, где воздействие температуры также является существенным фактором;

- амплитуда модуляции показателя преломления ВБР является спектральным параметром, функционально зависимым от коэффициента отражения. Так, для значений коэффициента отражения ВБР 85—90 % ее значение составляет  $\sim 4 \times 10^{-4}$  отн. ед.;

- ширина спектра ВБР на полувысоте. Данный спектральный параметр фактически не зависит от предельных условий формования конструкций из ПКМ, однако с учетом указанных значений коэффициента отражения, его величина составляет ~ 0,4—0,5 нм. Стоит пояснить, что выбор значения данного спектрального параметра обусловлен тем, что с точки зрения опроса ВБР целесообразно использовать узкий резонансный пик, но при этом стоит учитывать, что число точек (выборка) при использовании стандартных алгоритмов обработки данных от ВБР, таких как центроид-метод, аппроксимация функцией Гаусса и других, должна обеспечивать необходимую достоверность измерений, что, в свою очередь, предполагает использование ВБР с более широким резонансным пиком. Поэтому выбор указанных параметров для реализации системы встроенного контроля композитных конструкций должен учитывать эти обстоятельства.

С учетом указанных требований к спектральным параметрам ВБР средняя геометрическая длина ВБР, предназначенных для создания встроенной системы диагностики композитных конструкций, варьируется в пределах 2—3 мм.

При формировании пространственной топологии квази-распределенных волоконно-оптических систем диагностики композитных конструкций также стоит учитывать количество ВБР, которое можно опрашивать одним измерительным каналом. Количество ВБР и значения их резонансных длин волн в данном случае будут определяться как диапазоном измерений опросного устройства, так и величинами действующих деформаций в локальных зонах размещения ВБР с учетом того, чтобы спектры этих ВБР в процессе стендовых испытаний/воздействий реальных условий эксплуатации не перекрывались, создавая неопределенность при проведении измерений, тем самым снижая качество и достоверность диагностики.

Данные требования к спектральным параметрам ВБР носят рекомендательный характер и могут быть скорректированы с учетом технологических режимов изготовления, конструктивных особенностей и связанной с ними пространственной топологией датчиков в составе конструкции из ПКМ.



## Выводы

Важными спектральными параметрами ВБР, влияющими на качество и достоверность контроля композитных конструкций встроенной волоконно-оптической системой, являются резонансная длина волны ВБР, коэффициент отражения, амплитуда модуляции показателя преломления и ширина спектра отражения на полувысоте.

Экспериментально показано, что форма спектра, а значит и его параметры — коэффициент отражения, амплитуда модуляции показателя преломления и ширина спектра отражения на полувысоте фактически не изменяются при приложении механических растягивающих нагрузок. При этом происходит смещение спектра (резонансной длины волны ВБР) в длинноволновую область, величина которого и определяет численное значение относительной деформации растяжения.

Результаты проведенных исследований показали, что технологические процессы изготовления ПКМ, связанные с воздействием температуры ~ 180 °С, оказывают влияние на ряд спектральных параметров ВБР, прежде всего, на коэффициент отражения и амплитуду модуляции показателя преломления. Значения данных спектральных параметров уменьшаются. Это обусловлено частичным отжигом показателя преломления ВБР, наведенного УФ-излучением вследствие проведения процесса формования. При этом процесс формования не сказывается на значениях ширины спектра отражения ВБР на полувысоте. Установлено, что с помощью ВБР, интегрированных в конструкцию из ПКМ, можно оценить внутренние деформации материала, возникающие после формования. Показано, что вследствие процесса формования возникают внутренние сжимающие деформации, величину которых можно определить, сравнивая значения резонансной длины волны ВБР в свободном состоянии (до интеграции в конструкцию) и после формования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Валуева М. И., Евдокимов А. А., Клименко О. В., Начаркина А. В.** Углепластики в конструкциях изделий космической техники (Обзор) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 1. С. 12—21. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-1-12-21
2. **Валуева М. И., Железина Г. Ф.** Полимерные композиционные материалы с повышенной сдвиговой прочностью на основе арамидных волокон для изделий авиационной техники // Материаловедение. 2018. № 4. С. 30—33.

3. **Башаров Е. А., Вагин А. Ю.** Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // Труды МАИ. 2017. № 92. С. 13.
4. **Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Макрушин К. В., Рысин Л. С.** Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1(50). С. 58—63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63
5. **Kinet D., Mégret P., Goossen K. W. et al.** Fiber bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions // Sensors. 2014. V. 14. P. 7394—7419.
6. **Kersey A. D., Davis M. A., Patrick H. J., Leblanc M.** Fiber grating sensors // IEEE J. Lightwave Tech. 1997. V. 15(8). P. 1442—1463.
7. **Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г. и др.** Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085—1103.
8. **Варжель С. В.** Волоконные брэгговские решетки: учеб. пособие. — Санкт-Петербург, 2015. — 65 с. <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1762.pdf> (дата обращения: 23.09.2022 г.).
9. **Morey W. W., Meltz G., Glenn W. H.** Fiber optic Bragg grating sensors // Fiber Optic and Laser Sensors VII. T. 1169. International Society for Optics and Photonics. 1990. P. 98—107.
10. **Tremblay G., Sheng Y.** Effects of the phase shift split on phase-shifted fiber Bragg gratings // JOSA B. 2006. V. 23. № 8. P. 1511—1516.
11. **Kashyap R.** Fiber bragg gratings. Academic press, 2009.
12. **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.
13. **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
14. **Kreuzer M.** Strain with fiber Bragg grating sensors // The optical measurement chain from HBM. — 11 p. URL: [http://www.micronoptics.ru/uploads/library/documents/FBGS\\_StrainMeasurement\\_mo.pdf](http://www.micronoptics.ru/uploads/library/documents/FBGS_StrainMeasurement_mo.pdf) (дата обращения: 23.09.2022 г.).
15. **Ирошников А. И., Степанов Н. В., Безруков Г. Т., Семкин В. Н.** Особенности проектирования и изготовления высокоточной крупногабаритной формообразующей композиционной оснастки: сб. докладов V Всеросс. науч.-техн. конф. "Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения". — М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", 2021. С. 148—157. EDN: QJXCXG.
16. **Кербер М. Л. и др.** Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. Изд. 5-е, испр. и допол. / под ред. Акад. Берлина А. А. 2018. — 640 с.
17. **Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Васильев С. А., Медведков О. И., Козельская С. О.** Исследование встроенной волоконно-оптической системы диагностики углепластика после воздействия технологических режимов формования // Контроль. Диагностика. 2019. № 1. С. 42—49.
18. **Божков А. С., Васильев С. А., Медведков О. И., Греков М. В., Королев И. Г.** Установка для исследования изменения наведенного преломления в волоконных световодах при высоких температурах // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 4. С. 76—83.

## **Research and development of requirements for the spectral parameters of fiber bragg gratings for the system of diagnostics of composite structures**

M. Yu. FEDOTOV

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

*This article describes and analyzes the main spectral parameters of fiber Bragg gratings (FBG) designed to create an integrated system of diagnostics structures made of polymer composite materials (PCM), and the main calculation ratios are given. It has been experimentally confirmed that the reflection coefficient, the modulation depth, and full width at half maximum do not actually change under the application of mechanical tensile loads, while a change in the Bragg wavelength allows them to be reliably recorded over the entire range of relative deformation measurements characteristic of structural PCMs. The results of experimental researches on the determination of internal deformations of PCM structures using integrated FBGs are presented. It has been experimentally established that the reflection coefficient and the modulation depth in the PCM composition depend on the limiting temperatures of PCM formation, which lead to some decrease in these parameters, while the full width at half maximum remains constant. Experimental requirements have been developed for the spectral parameters of FBGs intended for diagnostics of composite structures.*

**Keywords:** embedded diagnostics, polymer composite material, composite structure, fiber Bragg grating, spectral parameter, Bragg wavelength, reflection coefficient, modulation depth, full width at half maximum.

Конструкции из композиционных материалов: Межотр. науч.-техн. журн. / Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»; Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». 2023. Вып. 1 (169). С. 1—52.

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

Подписано в печать 14.02.2023. Формат 60х84 1/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,2.  
Тираж 250 экз. Заказ 2009. Свободная цена.  
Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., д. 77,  
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».  
[www.ntskompas.ru](http://www.ntskompas.ru); E-mail: [izdanie@ntskompas.ru](mailto:izdanie@ntskompas.ru)  
Отпечатано: 101000, Москва,  
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX, ком. 15, 16  
ООО «Спиди-Принт.ру»  
Индекс 80089.

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

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

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

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

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

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

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

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала. Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

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

### Комплектование статьи (обзора)

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в Российской Федерации и других государствах. При отсутствии в организации экспертной комиссии вме-

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

- лицензионный договор по приведенному образцу;

- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;

- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте с текстом в формате Word на электронную почту.

### Оформление статьи:

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

- далее представляется аннотация статьи (10—15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);

- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);

- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литерных обозначений (типа 1*a*, 2*b* и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;

- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;

- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;

- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

### **Оформление рисунков:**

- рисунки и графики вставляются непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе.

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

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

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

### **Оформление формул:**

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;

- стандартные математические обозначения (например,  $\max$ ,  $\log$ ,  $\sin$ ,  $\exp$  и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;

- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);

- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;

- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например  $U_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$ ,  $v_{\text{гр}}$  и т. п.

- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

### **Оформление таблиц:**

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;

- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

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

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

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