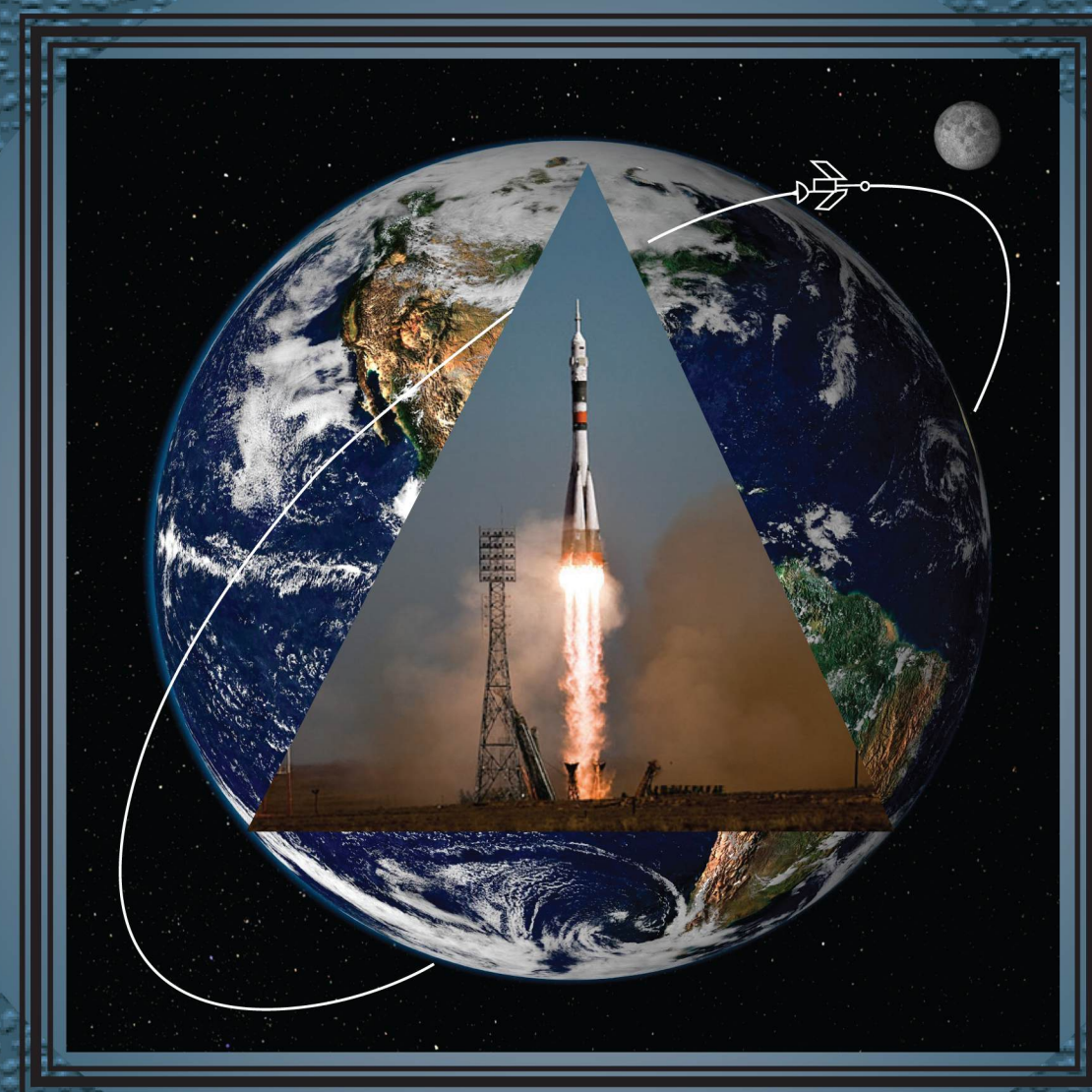


КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2



Москва 2022



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

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



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



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



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



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



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

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

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

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

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

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

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

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

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Орган Научного совета РАН по механике
конструкций из композиционных материалов

Выпуск 2 (166)

Издается с 1981 г.

Москва 2022

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Мойса М. О., Андрияшин К. П. О численном моделировании петель диэлектрического гистерезиса в сегнето-пьезоэлектрических материалах на основе ниобатов щелочных металлов и титаната-цирконата свинца 3

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Донецкий К. И., Караваев Р. Ю., Быстрикова Д. В., Мищун М. И. Свойства углепластика на основе биаксиальной объемно-армирующей плетеной преформы для изготовления элементов трубчатых конструкций 8

Троценко Е. А., Ирошников А. И., Васина Л. Н., Безруков Г. Т., Щербакова Л. В. Особенности проектирования и изготовления формообразующей композиционной оснастки с закладными элементами 15

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Шавнев А. А., Бабашов В. Г., Варрик Н. М. Керновые волокна карбида кремния для армирования композиционных материалов (Обзор) 19

Костин Г. Ф., Калашников С. Т., Гусев В. В. Аналитический метод определения эффективных теплофизических характеристик низкотеплопроводных материалов при различных темпах нагрева 26

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Таурова Л. П. Идентификация характеристик рассеяния энергии однонаправленных слоев по характеристикам рассеяния энергии многослойных композитных материалов 37

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О., Васильев С. А., Греков М. В. Исследование физических параметров волоконных световодов для диагностики композитных конструкций 47

Острик А. В., Чепрунов А. А., Бугай И. В. Взрывные и нагревательные устройства для прочностных испытаний тонкостенных композитных конструкций на совместное действие нестационарных теплосиловых нагрузок различной физической природы 56

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

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

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

УДК 538.9

DOI: 10.52190/2073-2562_2022_2_3

EDN: ACQYYH

О численном моделировании петель диэлектрического гистерезиса в сегнетопъезоэлектрических материалах на основе ниобатов щелочных металлов и титаната-цирконата свинца

М. О. МОЙСА; К. П. АНДРЮШИН, канд. физ.-мат. наук

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

Представлены результаты численного моделирования петель диэлектрического гистерезиса в материалах на основе ниобатов щелочных металлов (ТР1) и промышленных сегнетопъезоэлектрических материалах ПКР7М (СПКМ1) и ЦТС-19 (СПКМ2). Найдены выражения для нисходящей ветви петель диэлектрического гистерезиса посредством двойного интегрирования весовых функций Гаусса, производной от функции Arc-Tangent и представления функции распределения как полинома рациональной функции. Расчёты подгоночных коэффициентов выражений для ветвей петли гистерезиса проводили в среде MAPLE методом наименьших квадратов. Результаты аппроксимации показывают, что наилучшего наложения теоретической кривой на экспериментальные точки удается добиться в ТР1, используя выражение, полученное на основе рациональной функции, а в материале ПКР7М — посредством выражения на основе весовой функции, производной от функции Arc-Tangent. Сделано заключение о целесообразности использования полученных результатов при разработке сегнетопъезоэлектрических керамических материалов и устройств на их основе.

Ключевые слова: статистическая модель, модель Преизаха, функция распределения, процессы переключения.

В сегнетоэлектрических (СЭ) материалах эффективное управление физическими свойствами с помощью различных внешних воздействий реализуется прежде всего благодаря наличию доменной структуры. Переключения доменов под действием внешних электрических или механических полей, температуры позволяют в широких пределах изменять диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие свойства сегнетоэлектриков. При этом доменные переключения сопровождаются диэлектрическим и электромеханическим гистерезисом. Поведение СЭ-материалов можно описать в рамках статистических методов. Для решения данного рода задач формализм Преизаха [1–3] является перспективным кандидатом. Профессор Турик А. В. (Южный федеральный университет) этот формализм использовал для экспериментального исследования статистического распределения доменов в титанате бария [4]. Указанного можно достичь двойным дифференцированием поляризации на нисходящих ветвях семейства петель диэлектрического гистерезиса по текущему значению и амплитуде переменного электрического поля.

В данной работе авторы рассматривают весовые функции для получения аналитического выражения поляризации на нисходящих ветвях петли диэлектрического гистерезиса материалов ТР1, СПКМ1 и СПКМ2, что позволит в дальнейшем получить диаграмму распределения доменов по внутренним и коэрцитивным полям.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали твёрдый раствор (ТР) системы $(1-x-y)\text{NaNbO}_3-x\text{KNbO}_3-y\text{CdNb}_2\text{O}_6$ с $y = 0,10$, $x = 0,10$ (ТР1) и образцы популярной промышленной сегнетопъезо-керамики ПКР7М (СПКМ1) [5] и ЦТС-19 (СПКМ2) [6]. Образцы ТР1 были получены твердофазным синтезом в две стадии и спечены по обычной керамической технологии ($T_{\text{син.1}} = 1220$ К, $\tau = 5$ ч, $T_{\text{син.2}} = 1240$ К, $\tau = 10$ ч; $T_{\text{спек.}} = 1180$ К), образцы СПКМ2 синтезом и спеканием ($T_{\text{син.1}} = 1223$ К, $\tau = 5$ ч, $T_{\text{син.2}} = 1243$ К, $\tau = 5$ ч; $T_{\text{спек.}} = 1643$ К) и горячим прессованием СПКМ1 ($T_{\text{син.1}} = 1023$ К, $\tau = 4$ ч, $T_{\text{син.2}} = 1073$ К, $\tau = 5$ ч; $T_{\text{спек.}} = 453$ К, $P = 100$ кг/см²).

Петли диэлектрического гистерезиса ($P-E$) исследовали осциллографическим методом Сойера—Тауэра ($f = 50$ Гц, $T = 300$ К). При этом были рассчитаны спонтанная (P_s) и остаточная (P_r) поляризации, а также напряженность коэрцитивного поля E_c .

Семейство $P-E$ -петель может быть описано с помощью различных весовых функций. В рамках данной работы авторы использовали весовую функцию Гаусса [7], производную от функции Arc-Tangent [8] и рациональную функцию [9].

Мойса Максим Олегович, научный сотрудник отдела "Интеллектуальные материалы и нанотехнологии".

E-mail: moysa@sfedu.ru

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

E-mail: vortexblow@gmail.com

Статья поступила в редакцию 28 января 2022 г.

© Мойса М. О., Андрюшин К. П., 2022

Выражение на основе производной от функции Arc-Tangent имеет вид

$$P^- = P_m - \frac{2P_s}{3} \left[\frac{A}{1 + \left\{ \left[\left(\frac{E_m - E}{2} + E_m - E_c \right) \sigma \right]^2 + \left[\left(\frac{E_m - E}{2} - E_m + E_c - h \right) \sigma \right]^2 \right\}^\eta} - \frac{A}{1 + \left\{ \left[\left(\frac{E_m - E}{2} + E + E_c \right) \sigma \right]^2 + \left[\left(\frac{E_m - E}{2} - E - E_c - h \right) \sigma \right]^2 \right\}^\eta} \right], \quad (1)$$

где A , h , σ и η — параметры подгонки;

E_m — амплитуда;

P_m — значение поляризации при E_m ;

E — мгновенное значение переменного электрического поля.

Выражение для поляризации на нисходящей P — E -ветви петли с использованием весовой функции Гаусса находили посредством двойного интегрирования по ее операторам, следуя теории Прейзаха:

$$P^- = P_m - \frac{2P_s}{3} \int_0^{\frac{E_m - E}{2}} \int_{E + E_c}^{E_m - E_c} C \exp \times \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\alpha - \beta - 2Q}{2Q} w \right)^2 + \left(\frac{\alpha + \beta}{2Q} w \right)^2 \right] \right\} d\alpha d\beta, \quad (2)$$

где α и β — операторы функции;

C , Q и w — параметры подгонки.

Последнее выражение получено из предположения, что двойной интеграл можно представить, как полином рациональной функции (в силу условия нормировки [2]), поскольку он показал хорошую согласованность с экспериментом при исследовании кривых намагничивания [10]:

$$P^- = P_m - \frac{2P_s}{3} \frac{\sum_{i=0}^n p_i \left(\frac{E_m - E}{2} \right)^i}{\sum_{i=0}^n q_i (E_m + 2E_c - E)^i}, \quad (3)$$

где p_i и q_i — коэффициенты разложения функции распределения доменов в полином;

n — число членов разложения.

$$P^- = 16,278 - \frac{2 \cdot 11,611}{3} \left[-\frac{1}{w^2} \left\{ \pi C Q^2 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{0,00001 w (5,356 \cdot 10^5 + 25000E + 50000Q)}{Q} \right) - \operatorname{erf}(0,5w) \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[-\operatorname{erf} \left(\frac{0,0025w(200E + 1361 + 200Q)}{Q} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{0,00004w(1,827 \cdot 10^5 + 12500Q)}{Q} \right) \right] \right\} \right]; \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены P — E -петли материалов ТР1, СПКМ1 и СПКМ2 при $T = 292$ К. Обнаружено, что значение электрического поля, при котором формируются насыщенные СЭ-петли, составляет для ТР1 $E_m = 20$ кВ/см, для СПКМ1 $E_m = 21$ кВ/см, для СПКМ2 $E_m = 18$ кВ/см.

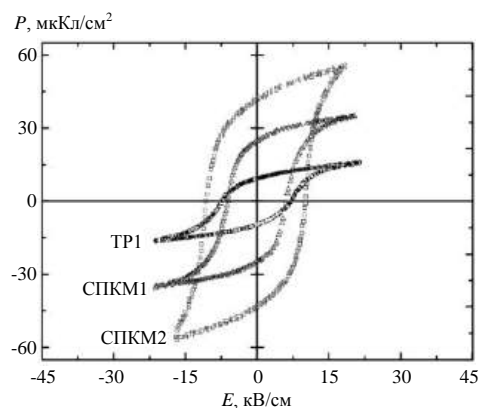


Рис. 1. P — E -петли материалов ТР1, СПКМ1 и СПКМ2 при $T = 292$ К

Из петель диэлектрического гистерезиса найдены значения P_m при E_m , P_s и E_c для каждого материала (табл. 1).

Таблица 1

Поляризационные характеристики исследуемых материалов при $T = 292$ К

Показатель	ТР1	СПКМ1	СПКМ2
P_m , мкКл/см ²	16,278	35,067	55,720
E_m , кВ/см	21,168	21,213	18,202
P_s , мкКл/см ²	11,611	28,927	45,600
E_c , кВ/см	7,228	6,060	10,678

С учётом значений, указанных в табл. 1, получаем выражения для поляризации на нисходящей ветви P — E -петли из распределения Гаусса для ТР1, СПКМ1, СПКМ2 соответственно:

$$P^- = 35,067 - \frac{2 \cdot 28,927}{3} \left(\frac{1}{w^2} \left\{ \pi A Q^2 \left[\operatorname{erf}(0,5w) - \operatorname{erf} \left(\frac{0,0002w(-21213 + 1000E + 2000Q)}{Q} \right) \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[-\operatorname{erf} \left(\frac{0,00005w(10000E + 60609 + 10000Q)}{Q} \right) \right] + \operatorname{erf} \left(\frac{0,00005w(1,515 \cdot 10^5 + 10000Q)}{Q} \right) \right] \right\} \right); \quad (5)$$

$$P^- = 55,72 - \frac{2 \cdot 45,6}{3} \left(-\frac{1}{w^2} \left\{ \pi A Q^2 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{0,0005w(-9101 + 500E + 1000Q)}{Q} \right) - \operatorname{erf}(0,5w) \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[-\operatorname{erf} \left(\frac{0,001w(500E + 5339 + 500Q)}{Q} \right) \right] + \operatorname{erf} \left(\frac{0,002w(1881 + 250Q)}{Q} \right) \right] \right\} \right). \quad (6)$$

Нисходящая ветвь P — E -петель каждого материала аппроксимировалась уравнением поляризации с применением весовой функции, производной от функции Arc-Tangent, весовой функции Гаусса, а также разложения в полином рациональ-

ной функции. Фитинг экспериментальной зависимости $P^-(E)$ проводился с помощью уравнений (1), (3)—(6) и применения метода наименьших квадратов (рис. 2). Критерием качества аппроксимации выступал коэффициент детерминации R^2 .

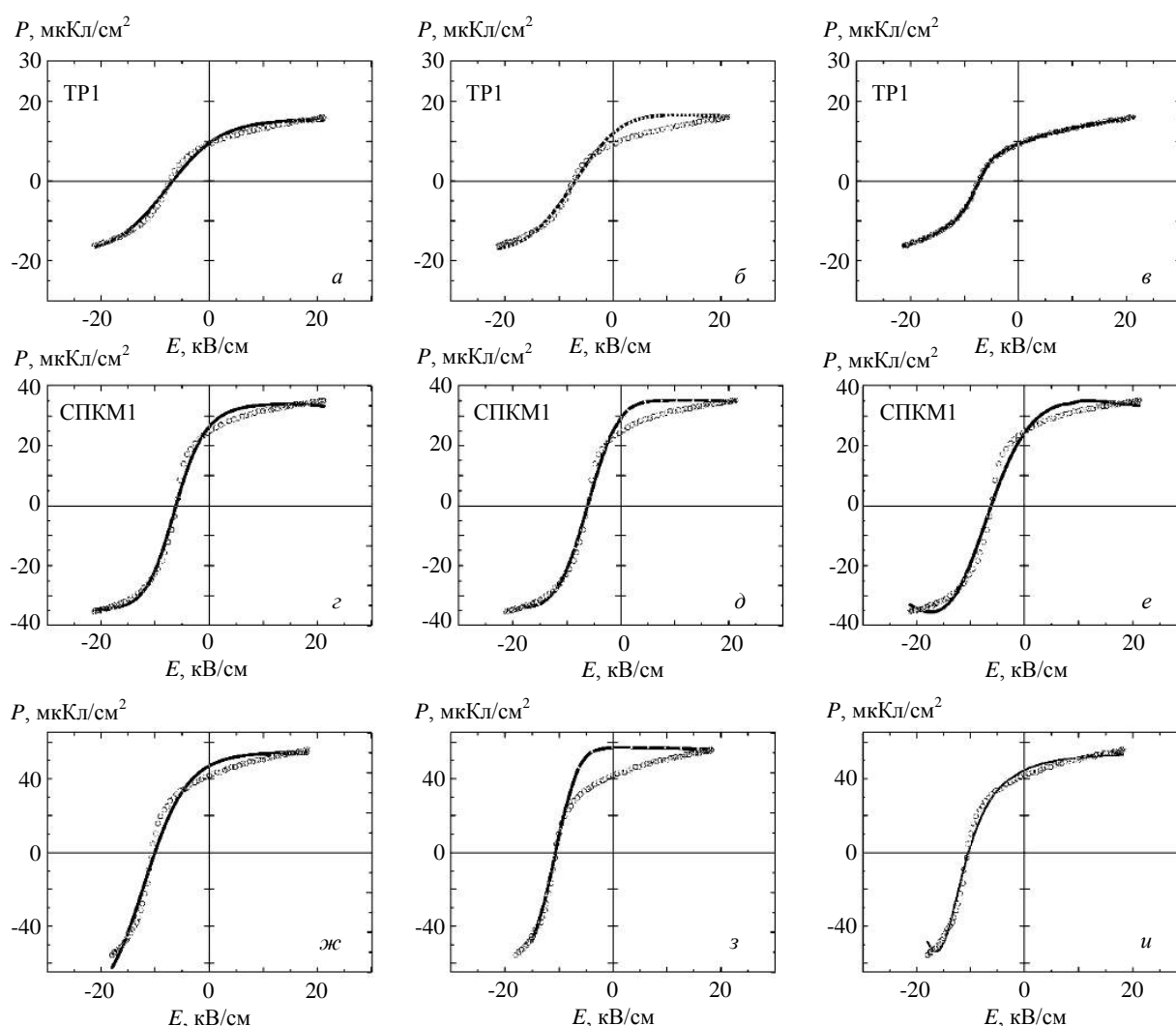


Рис. 2. Нисходящие ветви P — E -петель материалов TP1 (а—в), СПКМ1 (г—е) и СПКМ2 (ж—и): кружки — эксперимент, сплошная и штриховая линии — аппроксимация выражением (1) — (а, г, ж), выражением (3) (в, е, и), выражениями (4)—(6) (б, д, з)

На рис. 2 продемонстрированы нисходящие ветви петель диэлектрического гистерезиса ТР1, СПКМ1 и СПКМ2, которые описаны теоретическими кривыми (1), (3)—(6). Наиболее интересные результаты получены для ТР1 и СПКМ1. Наилучшего наложения теоретической кривой на экспериментальные точки в ТР1 получилось добиться, используя выражение (3), полученное на основе рациональной функции, а в материале ПКР7М — посред-

ством выражения (1). В остальных случаях коэффициент детерминации не превышал 0,9999. Необходимо отметить, что для всех исследованных керамик использовалось разное количество членов полинома (3): для ТР1 $n = 7$, для СПКМ1 $n = 5$, для СПКМ2 $n = 3$. Превышение указанных n приводило к уменьшению коэффициента детерминации.

Результаты расчётов при комнатной температуре приведены в табл. 2—4.

Таблица 2

Коэффициенты весовой функции, производной от функции Arc-Tangent, для нисходящей ветви петли диэлектрического гистерезиса при $T = 292$ К

Показатель	ТР1	СПКМ1	СПКМ2
A	4,605	3,617	4,655
h	64,245	-82,090	75,027
σ	0,014	0,012	0,013
η	-6,579	-20,734	-9,680
R^2	0,99753	0,999915	0,93416

Таблица 3

Коэффициенты весовой функции Гаусса для нисходящей ветви петли диэлектрического гистерезиса при $T = 292$ К

Показатель	ТР1	СПКМ1	СПКМ2
C	3104,673	-45468,049	32798,393
Q	0,00011	0,0000039	0,00014
w	0,0073	0,0011	0,0327
R^2	0,977603	0,997917	0,946865

Таблица 4

Коэффициенты полинома рациональной функции для нисходящей ветви петли диэлектрического гистерезиса при $T = 292$ К

Показатель	ТР1	СПКМ1	СПКМ2
$(p_0 + p_1)/(q_0 + q_1)$	3740,350/-11,578	$2,624 \cdot 10^5$ /-467,647	8525,314/-4547,015
p_2/q_2	-1825,670/105,607	-99653,635/302,042	-2271,370/-3181,476
p_3/q_3	344,130/-12,797	17994,411/898,490	109,789/132,768
p_4/q_4	-35,683/0,349	-1626,461/-65,947	0
p_5/q_5	2,504/0,013	58,840/1,806	0
p_6/q_6	-0,116/-0,0008	0	0
p_7/q_7	0,0025/0,00001	0	0
R^2	0,999992	0,999827	0,99989

Выводы

В твёрдых растворах системы $(1-x-y)\text{NaNbO}_3-x\text{KNbO}_3-y\text{CdNb}_2\text{O}_6$ с $y = 0,10$, $x = 0,10$ (ТР1) и образцах промышленных сегнетопъезокерамик ЦТС-19 и ПКР7М получены петли диэлектрического гистерезиса при комнатной температуре ($T = 292$ К).

На основе описанных представлений произведен фитинг экспериментальных зависимостей $P(E)$.

Показана хорошая сходимость экспериментальных точек в ТР состава $0,8\text{NaNbO}_3-0,1\text{KNbO}_3-0,1\text{CdNb}_2\text{O}_6$ и аналитического выражения поляризации, полученного на основе рациональной функции, а в материале ПКР7М — посредством выражения на основе весовой функции, производной от функции Arc-Tangent.

Полученные данные необходимо использовать при определении диаграммы Преязаха. Эта диа-

грамма даёт возможность судить об общем характере и особенностях процессов переполяризации.

Полученные результаты целесообразно учитывать при разработке сегнетопьезоэлектрических керамических материалов, подобных описанным, и устройств на их основе.

Авторы выражают благодарность профессору, д-ру физ.-мат. наук Тополову Виталию Юрьевичу за оказанную помощь в подборе и анализе литературных данных, а также д-ру физ.-мат. наук Рыбняцу Андрею Николаевичу за предоставление измерительных образцов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание в сфере научной деятельности, научный проект № (0852-2020-0032)/(БА30110/20-3-07ИФ)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sutor A., Rupitsch S. J., Lerch R. A Preisach-based hysteresis model for magnetic and ferroelectric hysteresis // Appl Phys A. 2010. V. 100. P. 425—430.
2. Турик А. В. К теории поляризации и гистерезиса сегнетоэлектриков // ФТТ. 1963. Т. 5. № 4. С. 1213—1215.
3. Турик А. В. Статистический метод исследования процессов переполяризации керамических сегнетоэлектриков // ФТТ. 1963. Т. 5. № 9. С. 2406—2408.
4. Турик А. В. Экспериментальное исследование статистического распределения доменов в сегнетокерамике // ФТТ. 1963. Т. 5. № 10. С. 2922—2924.
5. Reznichenko L. A., Verbenko I. A., Shilkina L. A., Pavlenko A. V., Dudkina S. I., Andryushina I. N., Andryushin K. P., Abubakarov A. G., Krasnyakova T. V. Binary and four-component systems based on sodium niobate: Phase diagrams of states, the role of the number of components and defectiveness in the formation of the properties // Springer Proceedings in Physics. 2018. V. 207. P. 3—23.
6. Смоленский Г. А., Боков В. А., Исупов В. А., Крайник Н. Н., Пасынков Р. Е., Соколов А. П., Юшин Н. К. Физика сегнетоэлектрических явлений. — Л.: Наука, 1985. — 396 с.
7. Consolo G., Finocchio G., Carpentieri M. About Identification of Scalar Preisach Functions of Soft Magnetic Materials // IEEE Transactions on Magnetics. 2006. V. 42. № 4. P. 923—926.
8. Sutor A., Rupitsch S. J., Lerch R. A Preisach-based hysteresis model for magnetic and ferroelectric hysteresis // Appl Phys A. 2010. V. 100. P. 425—430.
9. Матюк В. Ф., Осипов А. А. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Ч. I. Анализ моделей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 2. С. 10—15.
10. Михайлов С. П., Литвинцев А. А. Аппроксимация экспериментальных кривых намагничивания с помощью рациональных функций // Дефектоскопия. 1995. № 6. С. 52—55.

Numerical simulation of dielectric hysteresis loops in ferroelectric materials based on alkali metal niobates and lead titanate-zirconate

M. O. MOYSA, K. P. ANDRYUSHIN

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

The article presents the results of numerical simulation of dielectric hysteresis loops in materials based on alkali metal niobates (SS1) and industrial ferroconceramic materials PCR7M (FPCM1) and PZT-19 (FPCM2). Expressions are found for the descending branch of dielectric hysteresis loops by double integration of Gaussian weight functions derived from the Arc-Tangent function and representation of the distribution function as a polynomial of a rational function. Calculations of the fitting coefficients of expressions for the branches of the hysteresis loop were carried out in the MAPLE environment by the least squares method. The approximation results show that the best overlay of the theoretical curve on experimental points was achieved in SS1 using an expression derived from a rational function, and in the PCR7M material by means of an expression based on a weight function derived from the Arc-Tangent function. The conclusion is made about the expediency of using obtained results in the development of ferroelectric ceramic materials and devices based on them.

Keywords: statistical model, Preisach model, distribution function, switching processes.

Свойства углепластика на основе биаксиальной объемно-армирующей плетеной преформы для изготовления элементов трубчатых конструкций

К. И. ДОНЕЦКИЙ, канд. хим. наук; Р. Ю. КАРАВАЕВ; Д. В. БЫСТРИКОВА; М. И. МИЩУН
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия

Рассмотрены пути снижения стоимости полимерных композиционных материалов (ПКМ). Один из них — замена достаточно дорогого и ресурсоемкого автоклавного формования на альтернативные безавтоклавные процессы, позволяющие получать высокопрочные материалы. Замена часто используемых в авиастроении трубчатых частей конструкций на углепластиковые, которые выполнены с использованием объемно-армирующих плетеных преформ, обеспечит снижение весовых характеристик изделий и позволит внедрить автоматизированные процессы производства. Приведены свойства углепластика на основе объемно-армирующей плетеной преформы и расплавленного эпоксидного связующего как на плоских плитах, так и трубчатых элементах.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, связующее, элементы конструкции, пропитка под давлением, объемно-армирующая плетёная преформа, безавтоклавное формование, физико-механические свойства, пропитка, пористость.

Повсеместный рост применения полимерных композиционных материалов в самых различных отраслях промышленности, таких как авиационная, космическая и военная, так и в гражданских отраслях уже не требует декларирования. Не смотря ни на мировой экономический кризис, ни на многие технологические сложности, связанные с разработкой и внедрением ПКМ, ни на достаточно пока ещё высокую стоимость материалов, преимущества их бесспорны и потребители всё больше "привыкают" к их технологичности и удобству применения [1—4].

В Российской авиационной отрасли, процент реализации изделий из ПКМ также становится более высоким. Находятся в высокой степени реализации такие амбициозные проекты как углепла-

стиковое крыло МС-21, корпус и элементы двигателя ПД-14 и др. И в разрабатываемых образцах новой вертолётной техники задачи снижения веса, трудоёмкости и производственных затрат, расходов и рост эксплуатационной живучести решаются разработчиками предприятия Камова и Миля [5], а также за рубежом [6].

Однако в российской промышленности широко используемые высоконагруженные части трансмиссий, приводов и тяг управления, а также трубчатые элементы конструкций в основном производят из металлических сплавов. Значительно в меньшей степени для изготовления трубчатых элементов из ПКМ используют метод намотки.

Цель работы — ознакомление разработчиков и конструкторов различных видов техники с разработанной в НИЦ "Курчатовский институт" — ВИАМ технологией изготовления углепластика, позволяющей достаточно просто и с высоким уровнем автоматизации процесса производства изготавливать трубчатые элементы конструкций, например, таких, как элементы трансмиссий, управляющие штанги и тяги управления летательных аппаратов и космических аппаратов, трубчатые конструкции, применяемые в широком температурном диапазоне и различных климатических условиях. Использование плетёных преформ и безавтоклавного формования (например, пропитка под давлением или вакуумная инфузия) позволяет производить низкопористые изделия с высоким уровнем физико-механических свойств [7—9].

Донецкий Кирилл Игоревич, заместитель начальника лаборатории 625 по науке.

E-mail: doneckijki@viam.ru

Караваев Роман Юрьевич, начальник сектора лаборатории 625.

E-mail: romankaravaev@yandex.ru

Быстрикова Дарья Владимировна, техник 2-й категории лаборатории 625.

E-mail: dariabystrikova2015@yandex.ru

Мищун Михаил Игоревич, техник 1-й категории лаборатории 625.

E-mail: mishun.mihail@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2021 г.

© Донецкий К. И., Караваев Р. Ю., Быстрикова Д. В., Мищун М. И., 2022

Валы трансмиссий и тяги управления обеспечивают передачу крутящего момента или усилия к рабочим механизмам, поэтому к узлам таких конструкций предъявляются высокие требования по изгибающим и крутильным колебаниям, их соосности, биению и скручиванию. Помимо этого материалы должны обладать устойчивостью к разнопеременным температурным нагрузкам, разнообразным смазкам и маслам, а также обладать устойчивостью к коррозии [10, 11].

Одним из способов изготовления трубчатых элементов конструкции является радиальное плетение, технологии которого позволяют изготавливать армирующие преформы из практически любого волокна, такого, как углеродное, стеклянное, базальтовое, органическое и проектировать изделия с варьируемым спектром свойств и соответственно ценовым диапазоном, а также применение пропитки низковязким расплавленным связующим, обеспечивающим совместно с технологией плетения низкопористый высокопрочный материал [12, 13].

В работе рассмотрен углепластик на основе биаксиальной объёмно-армирующей плетёной преформы и расплавленного эпоксидного связующего, а также обсуждены его свойства, оценивается возможность применения материала при изготовлении конструкций, в том числе работающих под тангенциальной нагрузкой трубчатых образцов.

Знание свойств таких материалов при проектировании конструкций позволяет оптимизировать выпуск изделий с необходимыми параметрами. Паспортизованные отечественные материалы подобного класса на рынке РФ отсутствуют.

Материалы и методы

Для изготовления объёмно-армирующей плетёной преформы авторами было выбрано волокно российского производства номиналом 12К, в качестве схемы армирования выбрана биаксиальная схема с укладкой волокна $\pm 45^\circ$. На рис. 1 приведена схема армирования биаксиальной преформы и её изготовление на цилиндрической оснастке.



Рис. 1. Биаксиальная схема армирования преформы и её изготовление на цилиндрической оснастке на радиальной плетельной машине

Из литературных источников известно принципиальное влияние связующего на свойства получаемого полимерного материала, такие, как прочность, тепло- и влагостойкость, стойкость к действию агрессивных сред и многие другие. Связующее должно обеспечивать совместную работу армирующих волокон и образовывать непрерывно-наполненный материал, в котором матрица сохраняет свою структуру вплоть до разрушения волокна [14–16].

Для проведения данной работы было использовано расплавленное эпоксидное связующее разработки НИЦ "Курчатовский институт" — ВИАМ основные свойства которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные свойства расплавленного эпоксидного связующего марки ВСЭ-62

Свойства	Значение
Вязкость связующего при температуре переработки (100 °С) после изотермической выдержки при 100 °С в течение не менее 6,5 ч, Па·с	0,089
Температура стеклования (T_{gdry}), °С	171
Прочность при статическом изгибе отвержденного образца при 20 °С (среднее значение), МПа	145
Прочность при растяжении отвержденного образца при 20 °С (среднее значение), МПа	87
Время гелеобразования при 160 °С, мин	65,5
Температура отверждения, °С	180
Степень отверждения, %	98

Из приведённых данных (см. табл. 1) следует, что связующее обладает низкими вязкостными характеристиками при температуре переработки и вместе с этим высокой технологической жизнеспособностью, что обеспечивает его пригодность для изготовления пластика на основе плетёных преформ методами безавтоклавного формования.

С использованием указанных биаксиальных объёмно-армирующих плетёных преформ и расплавленного эпоксидного связующего методом пропитки под давлением были изготовлены плоские образцы углепластика для проведения физико-механических испытаний и определения эксплуатационных свойств (рис. 2).



Рис. 2. Изготовление углепластика на основе биаксиальной объёмно-армирующей плетёной преформы в жёсткой оснастке методом пропитки под давлением

Важным критерием качества изготовления материала является его объёмная пористость. Ввиду этого, в рамках исследования свойств углепластика авторами была определена объёмная доля пористости методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ), количественным металлографическим анализом и для сравнения гидростатическим взвешиванием и выжиганием.

Определение объёмной доли пористости методом рентгеновской компьютерной томографии является комплексным процессом, состоящим из нескольких этапов: сбор проекционных данных, реконструкция трехмерной модели, обработка данных, выполнение поиска пор. С помощью порогового метода, проведен поиск пор и расчет объёмной доли пористости. Результаты оценки, полученные различными методами определения пористости, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки различными методами исследований объёмной доли пористости в образцах

Методы определения объёмной доли пористости, % (среднее значение)			
Рентгено-компьютерная томография	Количественный металлографический анализ	Метод выжигания	Гидростатическое взвешивание
0,58	0,5	0,65	0,7

На рис. 3 представлены панорамный снимок микроструктуры образца при проведении количественного металлографического исследования и визуализация образца при проведении РКТ на примере экспериментальных образцов углепластика на основе объёмно-армирующей плетёной преформы.

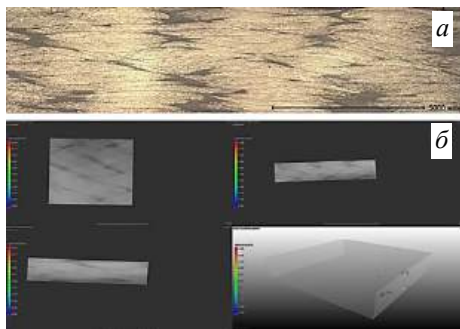


Рис. 3. Панорамный снимок микроструктуры образца при проведении количественного металлографического анализа (а) и визуализация образца при проведении РКТ образцов углепластика на основе объёмно-армирующей плетёной преформы (б)

Видна сходимость результатов определения пористости представленными методами. Объёмная доля пор, полученная методом выжигания, сопоставима с РКТ, но используемый метод — разрушающий, что является не всегда пригодным для

оценки объёмной доли пор. Кроме того, метод выжигания малоприменим для определения объёмной доли пор в углепластике ввиду невозможности полноценного проведения процесса при высоких температурах.

Усреднённое значение объёмной доли пор, полученное расчетом с использованием результатов гидростатического взвешивания образца, сопоставимо с результатами объёмной доли пор, полученными методом РКТ, но точность оценки в этом случае значительно ниже. Это связано с тем, что при расчёте объёмной доли пор методом гидростатического взвешивания используются значения поверхностной плотности наполнителя, плотность связующего и волокна, которые всегда имеют ошибку в третьем знаке после запятой. Этой ошибки достаточно, чтобы получить значение объёмной доли пор со значительным разбросом. Метод гидростатического взвешивания весьма эффективен для быстрой оценки объёмной доли пор в ПКМ, но его недостаточно для точного определения истинного значения пористости.

В табл. 3 приведены некоторые свойства плоских образцов углепластика на основе биаксиальной объёмно-армирующей плетёной преформы и расплавленного эпоксидного связующего, изготавливаемого методом пропитки под давлением.

Таблица 3

Некоторые свойства образцов, изготовленных на основе биаксиальной объёмно-армирующей плетёной преформы и расплавленного эпоксидного связующего

Свойства	Температура испытаний 20 °С
Плотность (среднее значение), кг/м ³	1523
Ударная вязкость (среднее значение), кДж/м ²	144
Предел прочности при изгибе, МПа	630
Предел прочности при растяжении, МПа	620
Модуль упругости при растяжении, ГПа	103

Интересно рассмотреть, как изменяется ударная вязкость углепластика после эксплуатационных воздействий (табл. 4).

Таблица 4

Изменение ударной вязкости (без надреза) углепластика при температуре испытаний 20 °С и 120 °С после эксплуатационных воздействий, кДж/м²

Ударная вязкость, после воздействия	Температура испытаний	
	20 °С	120 °С
Термического старения при 120 °С в течение 500 ч	153	134
Тепловлажностного старения в течение 1 месяца (при влажности воздуха 85 % при температуре 60 °С)	157	104
Воды в течение 1 месяца	156	121
Влаги в течение 1 месяца	157	118

Установлено, что сохранение ударной вязкости относительно исходных данных при 20 °С (144 кДж/м²) и 120 °С (127 кДж/м²) составило:

- при температуре испытаний 20 °С после термического старения при 120 °С в течение 500 ч — 100 %, при температуре испытаний 120 °С после термического старения при 120 °С в течение 500 ч — 100 %;
- при температуре испытаний 20 °С после тепловлажностного старения при влажности воздуха 85 % и температуре 60 °С в течение 1 месяца — 100 %, при температуре испытаний 120 °С после тепловлажностного старения — 81 %;
- при температуре испытаний 20 °С после воздействия воды в течение 1 месяца — 100 %, при температуре испытаний 120 °С после воздействия воды в течение 1 месяца — 95 %;
- при температуре испытаний 20 °С после воздействия влаги в течение 1 месяца — 100 %, при температуре испытаний 120 °С — 81 %, после воздействия влаги в течение 1 месяца — 92 %.

Наблюдается вполне закономерная тенденция незначительного снижения эксплуатационных характеристик материала. Можно ожидать, что в практике, после выполнения работ по грунтовке и окраске изделия, падение свойств будет практически обнулено.

Результаты и обсуждение

Для расширения объёма знаний по свойствам исследуемого материала проведены опытно-технологические работы по изготовлению конструктивно-подобных трубчатых элементов из углепластика на основе объёмно-армирующей плетёной преформы. На рис. 5 приведены используемые для изготовления трубчатых элементов биаксиальные плетёные преформы на формообразующей оснастке.



Рис. 5. Биаксиальные плетёные преформы из углеродного волокна на формообразующей оснастке различного диаметра (20, 45 и 60 мм)

Авторами проведены исследования свойств образцов, вырезанных из конструктивно-подобного

трубчатого образца из углепластика (пористость и объёмная доля пор методом РКТ).

Как было указано ранее, пористость является важным свойством материала, принципиально влияющим на прочностные свойства. Так же проведено исследование методом РКТ объёмной пористости образцов, вырезанных из конструктивно-подобного трубчатого образца (КПО). Кроме того, определена плотность полученного углепластика в КПО (табл. 5).

Таблица 5

Плотность, объёмная доля пор образцов конструктивно-подобного трубчатого элемента из углепластика на основе биаксиальной объёмно-армирующей плетёной преформы

Характеристика	Результат (среднее значение)
Плотность	1529 кг/м ³
Объёмная доля пор (пористость)	не более 0,02 %

Установлено, что плотность образцов конструктивно-подобного трубчатого элемента из углепластика марки ВКУ-66Пл составила 1529 кг/м³, что соответствует аналогичному значению, полученному на плоских плитах материала. Значение пористости также низкое, что свидетельствует о правильно выбранных технологических режимах и качественно проведённом процессе изготовления КПО.

На рис. 6 представлена визуализация образца конструктивно-подобного трубчатого элемента из углепластика при проведении РКТ.

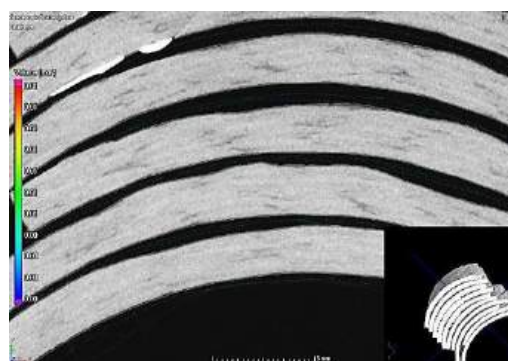


Рис. 6. Визуализация КПО трубчатого элемента из углепластика при проведении РКТ

Для проведения исследования образцы были собраны в единый пакет, и за одно сканирование получена томограмма всех образцов. Далее с использованием пакета специализированного программного обеспечения для каждого образца была определена поверхность, которая отделяет воксели материала образца от вокселей фона. Рассчитаны среднее значение уровня серого и стандартное отклонение.

Наглядно видно по результатам определения объёмной пористости, что разработанная технология изготовления трубчатых элементов из углепластика на основе плетёных преформ пропиткой под давлением позволяет изготавливать высококачественный низкопористый углепластик.

Проведена оценка устойчивости КПО трубчатых элементов со структурой армирования $\pm 45^\circ$ к тангенциальным нагрузкам (скручивание) — предел прочности при сдвиге в плоскости армирования на специализированном испытательном горизонтальном стенде. Нагружение проводилось со скоростью вращения активного захвата 2 град/мин (рис. 7).



Рис. 7. Испытания КПО трубчатых элементов из углепластика к тангенциальным нагрузкам

При нагружении произошло разрушение образца с внешним диаметром 44 мм и внутренним 40 мм при максимальном моменте силы 1070 Нм и угле поворота 14° . На рис. 8 представлен образец трубчатого сечения из углепластика марки ВКУ-66Пл после разрушения в рабочей зоне.



Рис. 8. Реакция КПО трубчатых элементов из углепластика на воздействие до (а) и после (б) тангенциальных нагрузок

Кроме испытаний КПО трубчатых элементов со структурой армирования $\pm 45^\circ$ из углепластика к тангенциальным нагрузкам, проведены испытания на определение механических характеристик образцов трубчатого сечения при растяжении, сжатии и удельную кольцевую жесткость (рис. 9).

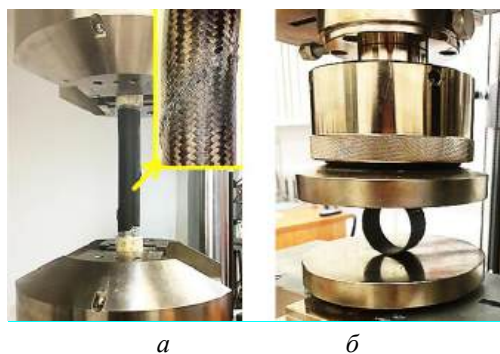


Рис. 9. Испытания КПО трубчатых элементов со структурой армирования из углепластика на определение механических характеристик образцов трубчатого сечения при растяжении, сжатии (а) и удельную кольцевую жесткость (б)

Как видно из рис. 8 и 9, характер разрушения углепластика КПО схож при испытаниях на тангенциальную нагрузку, а также растяжение и сжатие.

В табл. 10 приведены свойства КПО трубчатых элементов внешним диаметром 44 мм и внутренним 40 мм со структурой армирования $\pm 45^\circ$ из углепластика на определение механических характеристик образцов трубчатого сечения при растяжении, сжатии и начальную удельную кольцевую жесткость при направлении приложения нагрузки 0° .

Таблица 10

Свойства образцов конструктивно-подобных трубчатых элементов из углепластика на основе объёмно-армирующих плетёных преформ (армирование $\pm 45^\circ$)

Характеристики	При температуре испытаний, 20°C
Прочность при растяжении, МПа	310
Модуль упругости при растяжении, ГПа	21
Прочность при сжатии, МПа	155
Модуль упругости при сжатии, ГПа	16
Относительное предельное удлинение при растяжении, %	7,2
Смятие при растяжении, МПа	204
Начальная удельная кольцевая жесткость, кН/м^2	82
Циклическая долговечность на базе до 10^6 циклов при коэффициенте асимметрии $R_a = 0,1$ (максимальное напряжение 154 МПа), N	> 10000

Данные, приведённые в табл. 10, возможно интерпретировать применительно к трубчатому элементу указанного диаметра. Полученные в работе результаты по свойствам КПО трубчатых элементов в первую очередь предназначены для расчётов и разработчиков изделий из ПКМ для создания необходимых конструкций.

Заключение

Применение углепластика на основе объёмно-армирующих плетёных преформ, изготавливаемого безавтоклавным формованием, является эффективным способом изготовления как материалов, так и элементов конструкций на его основе. Представляется несомненно важным знание как закономерностей процесса и технологии безавтоклавного изготовления ПКМ в целях получения материала именно с теми свойствами. Ввиду того, что материалы на основе объёмно-армирующих плетёных преформ в значительной степени сами по себе являются конструкциями, интересным и важным является исследование свойств именно трубчатых элементов. В рамках проведения работы исследованы как свойства материала на плоских пластинах, так и трубчатых элементов. Показано, что используемые при изготовлении углепластика технологии позволяют получать низкопористый материал.

Развитие и применение данных решений в высокотехнологичных отраслях российской промышленности позволит придать дополнительный импульс в изготовлении новых образцов техники различного применения и использовать их в широком диапазоне температур.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Климатические испытания"
НИЦ "Курчатовский институт" — ВИАМ
по программе "Стратегические направления развития ... на период до 2030 года"
— Направление 13: Полимерные композиционные материалы. Комплексная проблема 13.2 "Конструкционные ПКМ"*

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузник В. М., Каблов Е. Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник РАН. 2017. Т. 87. № 9. С. 827—839.
2. Онищенко Г. Г., Каблов Е. Н., Иванов В. В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6(260). С. 3—16.
3. Раскутин А. Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349—367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
4. Каблов Е. Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. В 6 т. — СПб.: 2019. Т. 4. С. 24.
5. Башаров Е. А., Вагин А. Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // Труды МАИ. 2017. № 92. С. 1—33.
6. Composite tube for torque and/or load transmissions and related methods // Pat. US 2014221110, filed 05.02.2014, publ. 07.08.2014 (дата обращения: 13.11.2019).
7. Душин М. И., Хрульков А. В., Мухаметов Р. Р., Чурсова Л. В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 1. С. 18—26.
8. Донецкий К. И., Быстрикова Д. В., Караваев Р. Ю., Тимошков П. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3. С. 9. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2021). DOI:10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.
9. Донецкий К. И., Раскутин А. Е., Хиллов П. А., Лукьяненко Ю. В., Белинис П. Г., Коротыгин А. А. Объёмные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2015. № 9. С. 10. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2021). DOI:10.18577/2307-6046-2015-0-9-10-10.
10. Трансмиссия вертолета // Информационное агентство "Avia.pro" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://avia.pro/blog/transmissiya-vertoleta> (дата обращения: 20.10.2021).
11. Тимошков П. Н., Хрульков А. В., Григорьева Л. Н. Трансмиссионные валы из углепластика. Материалы и технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 8. С. 5. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-46-53.
12. Донецкий К. И., Караваев Р. Ю., Раскутин А. Е., Дун В. А. Углепластик на основе объёмно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // Труды ВИАМ. 2019. № 1. С. 7. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.
13. Ткачук А. И., Терехов И. В., Гуревич Я. М., Кудрявцева А. Н. Использование связующего марки ВСЭ-30, перерабатываемого по инфузионной технологии, для изготовления низко- и средненагруженных деталей // Труды ВИАМ. 2019. № 12(84). С. 67—79. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
14. Донецкий К. И., Караваев Р. Ю., Раскутин А. Е., Панина Н. Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетёных преформ // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 4(45). С. 54—59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
15. Меркулова Ю. И., Мухаметов Р. Р. Низковязкое эпоксидное связующее для переработки методом вакуумной инфузии // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 1. С. 39—41.
16. Ткачук А. И., Донецкий К. И., Терехов И. В., Караваев Р. Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления ПКМ методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1(45). С. 54—59. DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

Properties of carbon fibers composite basis on biaxial volume reinforcing braiding preformy for manufacturing of elements of tubular construction

K. I. DONETSKIY, R. Yu. KARAVAEV, D. V. BYSTRIKOVA, M. I. MISHCHUN

FSUE "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials" of National Research Center "Kurchatov Institute",
Moscow, Russia

Ways to reduce the cost of polymer composite materials (PCM) are considered. One of the ways to reduce the cost is to replace fairly expensive and resource-intensive autoclave molding on alternative babulling processes. Replacement often used in aircraft industry of tubular parts of designs on carbon fibre, executed with use volume reinforcing braiding preform, will provide decrease in weight characteristics of products and will allow to implement the automated processes of production. The properties of carbon fiber based on a volume-reinforcing wicker preform and molten epoxy both on flat plates of so and tubular elements.

Keywords: polymer composite materials, binder, structural elements, pressure impregnation, volume-reinforcing braided preform, out-of-autoclave molding, physical and mechanical properties, impregnation, porosity.

УДК 678.5:629.78

DOI: 10.52190/2073-2562_2022_2_15

EDN: AWURZI

Особенности проектирования и изготовления формообразующей композиционной оснастки с закладными элементами

Е. А. ТРОЦЕНКО; А. И. ИРОШНИКОВ; Л. Н. ВАСИНА;

Г. Т. БЕЗРУКОВ; Л. В. ЩЕРБАКОВА

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Калужская обл., Россия

Представлены конструкторские разработки закладных элементов для внедрения в композиционную оснастку. Показаны результаты испытаний различных конструкций закладных элементов, интегрированных на этапе выкладки сухого армирующего наполнителя с последующей пропиткой. Приведены результаты экспериментальных работ по ремонту соединения оснастки и закладных элементов.

Ключевые слова: композиционная оснастка, закладные элементы, полимерные композиционные материалы.

Наблюдается неуклонный рост объемов применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) во многих областях промышленности, в том числе в конструкциях авиационно-космической техники [1]. Данная тенденция повышения доли ПКМ в различных отраслях является следствием не только возросших требований к точности формы и жесткости конструкций, но и появления высокотехнологичных способов получения изделий из ПКМ.

Обеспечение соответствующей скорости реагирования производства на необходимость выпуска новых изделий из ПКМ не может быть реализовано без налаженной схемы проектирования и изготовления формообразующей оснастки. При этом к оснастке предъявляют повышенные требования по точности теоретического контура как в исходном состоянии, так и при проведении технологических режимов автоклавного формования (при высоких температурах 175 °С и выше), по герметичности формообразующей поверхности и т. п.

Кроме того, технологии изготовления детали зачастую приводят к появлению дополнительных требований к конструкции оснастки, например,

к наличию установочных отверстий для размещения вспомогательного оборудования при выкладке. В целях повышения износостойкости таких отверстий используют металлические закладные элементы. Закладные элементы с установочными (базовыми) отверстиями применяют для расположения шаблонов, съемных частей оснастки или для позиционирования деталей при сборке и склейке деталей.

Особенности технологии формования сложных изделий из ПКМ подразумевают введение в конструкцию композиционной оснастки множества закладных элементов в рабочей зоне. Это усложняет конструкцию оснастки, требует решения задач по точности позиционирования, монтажу и прочности соединения закладных элементов при эксплуатационных нагрузках.

В работе представлены конструктивно-технологические решения по закладным элементам и их влиянию на прочностные и эксплуатационные свойства оснастки из ПКМ.

Конструктивно-технологические решения по закладным элементам

Конструкция полимерной композиционной оснастки для формования изделия представляет собой формообразующую оболочку, закрепленную на каркасе. Наиболее перспективной технологией производства крупногабаритной композиционной оболочки является вакуумная инфузия связующего в преформу, выложенную на мастер-модели, повторяющей поверхность формируемого изделия. Точность воспроизведения теоретического контура формообразующей оболочки оснастки определяется точностью мастер-модели и возможными деформациями формообразующей оболочки [2]. Применение вакуумной инфузии связующего позволяет получить композиционный материал с

Троценко Евгений Александрович, инженер-технолог 1-й категории.

E-mail: gamabunter@gmail.com

Ирошников Андрей Игоревич, инженер-технолог 1-й категории.

E-mail: Airoshnikov@gmail.com

Васина Людмила Николаевна, начальник сектора.

E-mail: vasina-1@mail.ru

Безруков Геннадий Тимофеевич, начальник сектора.

E-mail: bezrukovgt@technologiya.ru

Щербакова Лариса Васильевна, инженер-технолог 1-й категории.

E-mail: sherbakovalara@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2021 г.

© Троценко Е. А., Ирошников А. И., Васина Л. Н., Безруков Г. Т., Щербакова Л. В., 2022

низкой пористостью, при содержании армирующего волокна не менее 60 % от объема готового пластика.

С учетом технологии изготовления формообразующей оболочки было рассмотрено три основных конструктивно-технологических решения по оснащению рабочей поверхности оснастки закладными элементами:

- **вклейка** — фиксирование закладного элемента при помощи клеевого состава на посадочном месте, сформированном мастер-моделью на этапе изготовления формообразующей оболочки. Таким образом, обеспечивается точность позиционирования закладных элементов в оснастке. Дополнительным плюсом данного способа является сохранение целостности армирующих слоев формообразующей оболочки;

- **врезка** — крепление закладного элемента сквозь формообразующую оболочку резьбовым соединением. Посадочное место закладного элемента определяется разметкой, переносимой с мастер-модели, и формируется ручной механической обработкой пластика. Герметичность формообразующей оболочки с подобным закладным элементом обеспечивается уплотнителем. Недостатками данного способа являются нарушение целостности формообразующей оболочки и недостаточная точность при ручном формировании посадочных мест;

- **интеграция** — внедрение закладного элемента в формообразующую оболочку обеспечивающее закрепление закладного элемента на мастер-модели на этапе выкладки сухого армирующего наполнителя. Данный способ позволяет минимизировать погрешность позиционирования при разметке и установке закладных элементов.

После оценки преимуществ и недостатков способов крепления закладных элементов выбран способ интеграции закладного элемента. Данный способ позволяет минимизировать трудоемкость в сравнении с вклейкой и обеспечивать целостность и герметичность формообразующей оболочки, исключив механическую обработку пластика.

Конструкция закладного элемента

Основными требованиями к конструкции закладного элемента являются его прочность, долговечность и обеспечение целостности места крепления закладного элемента в формообразующей оболочке. Данные требования обуславливают необходимость изготовления закладного элемента из материала с коэффициентом линейного термического расширения (КЛТР) близким к КЛТР формообразующей оболочки, снижая тем самым

разрушающие нагрузки на границе раздела при автоклавном формовании изделия и при съеме изделия. Немаловажным также является ремонтно-пригодность оснастки в случае отрыва закладного элемента. Представленные в ходе исследований конструктивно-технологические решения по закладным элементам были подвергнуты нагружению сосредоточенным усилием, имитирующем воздействие на формообразующую оболочку при распрессовке (рис. 1).

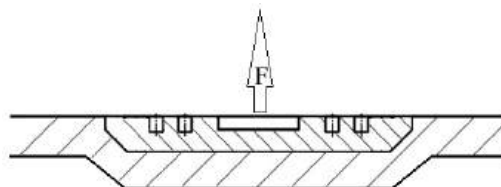


Рис. 1. Схема нагружения сосредоточенным усилием

Конструкции закладных элементов:

- с гладкой (ЗЭ-Г) (рис. 2) поверхностью является технологичной как в изготовлении, так и при монтаже;

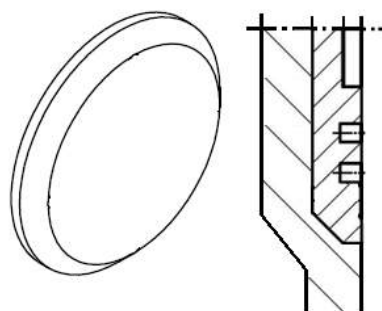


Рис. 2. Внешний вид и схема ЗЭ-Г

- с резьбовыми вертикальными креплениями в количестве 8 шт. (ЗЭ-В8) (рис. 3) обеспечивает закрепление закладного элемента в оболочке за счет внедрения фиксаторов с резьбой и шляпками в тело армирующего материала. Резьбовые фиксаторы устанавливаются на этапе выкладки сухого армирующего наполнителя;

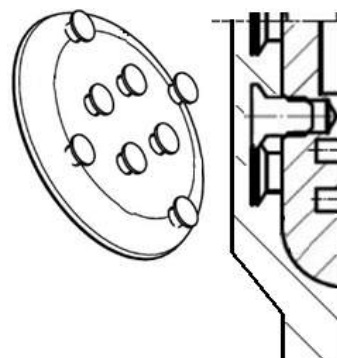


Рис. 3. Внешний вид и схема ЗЭ-В8

- со ступенчатыми пазами (ЗЭ-П) (рис. 4) обеспечивает фиксацию закладного элемента в оболочке за счет укладки сухого армирующего материала в пазы во время выкладки;

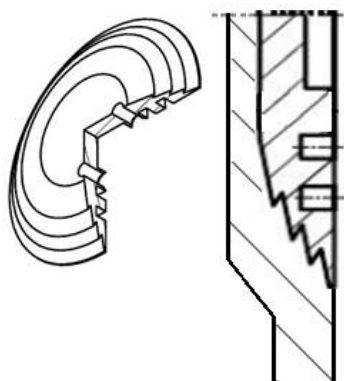


Рис. 4. Внешний вид и схема ЗЭ-П

- с боковыми фиксаторами (ЗЭ-Ш) (рис. 5) обеспечивает закрепление закладного элемента в оболочке за счет установки фиксаторов внутрь элемента в процессе выкладки сухого армирующего материала.

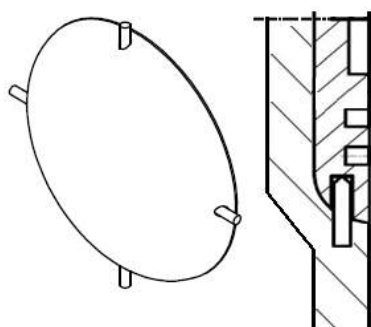


Рис. 5. Внешний вид и схема ЗЭ-Ш

Влияние типов закладных элементов на прочность соединений с формообразующей оболочкой исследовали на образцах, выполненных методом вакуумной инфузии связующего по технологии, аналогичной технологии, используемой при изготовлении формообразующей оболочки.

Результаты влияния типов закладных элементов на прочность соединений с формообразующей оболочкой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние типов закладных элементов на прочность соединений с формообразующей оболочкой

Показатель	ЗЭ-Г	ЗЭ-В8	ЗЭ-П	ЗЭ-Ш
Среднее значение усилия вырыва, Н	8753	16447	7304	11446
Коэффициент вариации, %	7	5	18	3
Ремонтопригодность посадочного места, ±	+	-	-	±

Образцы с закладными элементами типа ЗЭ-Г обладают средними прочностными характеристиками, однако при вырыве данного типа закладного элемента посадочное место на экспериментальной заготовке осталось в неповрежденном состоянии.

Как видно из табл. 1 образцы с закладными элементами типа ЗЭ-В8 и ЗЭ-Ш показали высокие результаты благодаря вертикальным резьбовым креплениям и боковым фиксаторам. Кроме того, они имеют минимальный коэффициент вариации, но в процессе изготовления и испытания этих образцов выявлены следующие недостатки:

- в образце с закладными элементами типа ЗЭ-В8 при установке резьбовых креплений наблюдалось накручивание сухого армирующего материала, что привело к смещению выкладываемых слоев; в результате испытаний образовались расслоения формообразующей оболочки, несовместимые с дальнейшей эксплуатацией;

- в образце с закладными элементами типа ЗЭ-Ш при испытаниях повреждены фиксаторы.

В образце с закладными элементами типа ЗЭ-П после формования наблюдалось прокручивание закладного элемента и, как следствие, пониженные показатели прочности.

Исследование ремонтпригодности соединения формообразующей и закладного элемента

На основе полученных результатов и учитывая все недостатки, выявленные в процессе изготовления и испытания образцов, только конструкция ЗЭ-Г имеет высокую степень ремонтпригодности, в связи с чем она выбрана для исследования соединения после проведения ремонтных работ посадочного места. Для экспериментальной оценки возможности ремонта оснастки закладные элементы вклеены в подготовленные под склейку посадочные места на следующие клеевые составы:

- K-800;
- BK-36;
- Araldite 4415/Aradur 4416.

После проведенных режимов отверждения образцы были подвергнуты сосредоточенному усилию на вырыв. Полученные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние типов закладных элементов на прочность клеевых соединений с формообразующей оболочкой

Клеевой состав	Среднее значение усилия вырыва, Н	Коэффициент вариации, %
K-800	1959	17
BK-36	3359	4
Araldite 4415/ Aradur 4416	544	11

Результаты, приведенные в табл. 2, показали, что клеевые составы K-800 и Araldite 4415/Aradur 4416 имеют малые значения прочности и большой коэффициент вариации. Клеевой состав ВК-36 показал хороший эффект при повторяемом результате.

Заключение

Проведен анализ разработанных решений по конструктивно-технологическим схемам закладных элементов и способам их внедрения в оснастку. Рассмотренные конструкции имеют близкие прочностные характеристики, однако конструкция с гладкой поверхностью фиксации показала высокую ремонтпригодность за счёт сохранения посадочных мест при вырыве.

Закладные элементы с гладкой поверхностью обеспечивают безотказную работу оснастки. В случае отрыва закладного элемента производится ремонт формообразующей оснастки и установка закладного элемента на посадочное место, используя клеевой состав ВК-36. Возможность ремонта и подобранный клеевой состав обеспечивают качество и скорость ремонта, минимизируя простой производства.

По результатам выполненных работ изготовлены композиционные оснастки типа "капот" с закладными элементами по периметру рабочей зоны. Закладные элементы с гладкой поверхностью фиксации выполнены из сплава 30НХД и интегрированы в оснастку из углепластика в процессе изготовления формообразующей оболочки методом вакуумной инфузии связующего. Оснастки переданы в производство для апробации и последующего изготовления изделий. Необходимость проведения ремонтных работ на данных оснастках сводится к минимуму в процессе изготовления изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вешкин Е. А., Постнов В. И., Абрамов П. А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4–3. С. 834–839.
2. Куркин Е. И., Садыкова В. О. и др. Проектирование термонагруженных инфузионных оснасток, обеспечивающих высокую точность аэродинамических поверхностей крупно-размерных агрегатов авиационных конструкций // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2015. № 4 (35). С. 54–59.

Features of design and production of polymer composite form-building tools with embedded elements

E. A. TROTSSENKO, A. I. IROSHNIKOV, L. N. VASINA,
G. T. BEZRUKOV, L. V. SHCHERBAKOVA

JSC "ORPE "Technologiya" named after A. G. Romashin", Obninsk, Kaluga Region, Russia

Moulding of complex composite parts strongly depends on quality of form-building tools capable to sustain multiple modes of autoclave molding without loss of characteristics. Some types of composite parts demand embedded elements inside the tool for the moulding. Different designs of embedded elements are offered and tested.

Keywords: composite equipment, embedded element, polymer composite material.

УДК 669.018.95:677.53

DOI: 10.52190/2073-2562_2022_2_19

EDN: BDWEOK

Керновые волокна карбида кремния для армирования композиционных материалов (Обзор)

А. А. ШАВНЕВ, канд. техн. наук; В. Г. БАБАШОВ, канд. техн. наук; Н. М. ВАРРИК
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия

Рассмотрены некоторые аспекты создания металлических композиционных материалов на основе титановых матриц, армированных керновыми волокнами карбида кремния. Приведены данные источников научно-технической литературы по получению непрерывных волокон карбида кремния на углеродном и вольфрамовом керне методами нанесения на них покрытий, предотвращающих взаимодействие волокна с металлической матрицей, и технологиям изготовления конструктивных изделий из металлического композиционного материала SiC—Ti-сплав. Обозначены основные проблемы, возникающие при получении материалов данного класса.

Ключевые слова: волокно, карбид кремния, вольфрамовый керн, углеродный керн, титановый сплав, металлический композиционный материал.

Металломатричные композиционные материалы (МКМ) и интерметаллидоматричные композиционные материалы (ИКМ) создавали как альтернативу сплавам конструкционного назначения.

Открыто большое направление по интерметаллидам титана, разработано и используется большое количество алюминидов, боридов, силицидов и никелидов титана, обладающих более высокой температурой плавления по сравнению с исходными металлами.

В качестве армирующих наполнителей для таких композитов были опробованы металлические тугоплавкие волокна (такие, как вольфрамовые и молибденовые), монокристаллические волокна Al_2O_3 (сапфировые), короткие и длинные волокна SiC. Ключевыми проблемами для всех композитов оказались чрезмерная реакция между волокном и матрицей, разрушение волокна в процессе изготовления композита и недостаточная химическая стойкость как волокна, так и матрицы [1—3].

В работе рассмотрены МКМ и ИКМ на основе титановых сплавов или интерметаллидов, упроч-

ненных непрерывными карбидокремниевыми волокнами.

Созданы технологии получения непрерывных волокон карбида кремния и композиционных материалов с алюминиевыми, титановыми и интерметаллидными матрицами, однако влияние окисления на свойства композитов этого класса является проблемой до конца не изученной.

Керновые волокна SiC разработаны в 1960-е гг., они имеют высокую температуру плавления, высокие показатели прочности и модуля упругости, показали неплохую совместимость с различными видами матриц (керамическими, металлическими и полимерными). С их использованием получены ИКМ на основе титана, особенно много материалов создано на основе алюминидов титана.

Применение алюминидов титана в газотурбинном двигателе позволяет обеспечить снижение его веса и повысить тяговооруженность. Хрупкость Ti_3Al при низких температурах является серьезным недостатком, который препятствует их широкому использованию. Для повышения их пластичности используют введение легирующих элементов, способных ослабить ковалентные связи между титаном и алюминием, такие как цирконий, гафний, ниобий, молибден, ванадий. Появление прочных высокомодульных карбидокремниевых волокон дало импульс для синтеза новых ИКМ с использованием их в качестве упрочняющего компонента [4—6]. Следует отметить, что процесс отбора подходящих сочетаний волокно—матрица, а также волокно—интерфаза—матрица, отработка приемлемых технологий, не вызывающих деградацию армирующего волокна на стадии изготовления композиционного материала (КМ), заняли немало времени. Тем не менее, серийное произ-

Шавнев Андрей Александрович, заместитель начальника НИО "Неметаллические материалы, металлические композиционные материалы и теплозащита".

E-mail: viam29@mail.ru

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории 629 "Лаборатория волокон тугоплавких соединений, волокнистых высокотемпературных теплоизоляционных, теплозащитных и керамических композиционных материалов".

E-mail: viam29@mail.ru

Варрик Наталья Мироновна, ведущий инженер лаборатории 629.

E-mail: nvarrik@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2022 г.

© Шавнев А. А., Бабашов В. Г., Варрик Н. М., 2022

водство композиционных материалов волокно SiC—титановый сплав пока не налажено. Причиной, кроме недостаточной воспроизводимости и невысокого качества таких материалов, является еще и их высокая стоимость. Однако по мере развития технологий появляются новые возможности, поэтому материалы данного класса продолжают разрабатывать.

Волокна карбида кремния

Крупнейшими фирмами, которые начинали производство керновых волокон карбида кремния и КМ с их использованием, были FMW Composite Systems, Inc., США (Atlantic Research Corporation), TISICS Ltd, Великобритания (DERA, QinetiQ) и Specialty Materials Inc, США (Textron, Avco) [7, 8].

Волокна SiC получают методом химического осаждения из газовой фазы на нить-подложку. В качестве реагентов используют газовые смеси метилхлорсиланов (CH_3SiCl_3 , $\text{CH}_3\text{SiHCl}_2$, $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$) с водородом, либо другим газом-носителем, а в качестве подложек — вольфрамовые или углеродные нити диаметром 15—30 мкм. Осаждение проводят при температурах 1200—1400 °С. Данный способ позволяет получать непрерывные волокна SiC диаметром 70—140 мкм, которые обладают высокими показателями предела прочности на разрыв и модуля упругости [9, 10].

Компания Avco запатентовала способ получения волокна SiC в 1977 году. На рис. 1 представлена схема реактора 1, включающего трубчатый цилиндр 2, имеющий два закрытых торца 3 и 4, к которым через центральные отверстия подведены ртутные контакты 5 и 6, которые обеспечивают через вводы а-а контакт с источником тока (на схеме не указаны).

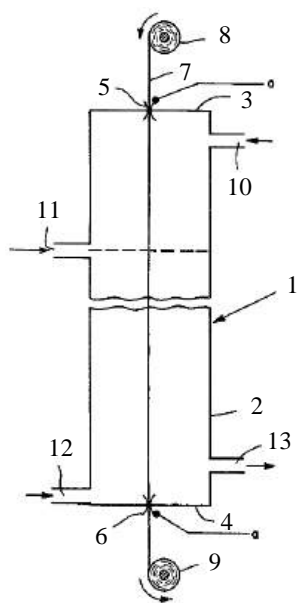


Рис. 1. Схема реактора для получения кернового волокна карбида кремния [9]

Вольфрамовый или углеродный керн 7 поступает от подающей бобины 8 в цилиндр 2 через ртутный контакт 5 и выходит через контакт 6 к принимающей бобине 9. Также обеспечивается достаточное количество вводов 10, 11, 12 и выводов 13 для газа [9].

Компания Avco наладила выпуск карбидокремниевых волокон и КМ с их использованием и позднее получила название Specialty Materials Inc. (SMI). Волокна марки SCS из карбида кремния, производимые SMI, являются результатом десятков лет исследований и разработок. Эти волокна используют в металлических, керамических и полимерных матричных материалах для высокотемпературных применений. Армированные карбидом кремния титан, алюминий и керамические композиты имеют высокую прочность и жесткость, легкий вес и сохраняют свои свойства при высоких температурах.

Высокая прочность карбидокремниевых волокон в атмосфере инертного газа сохраняется до 1200 °С. Волокно марки SCS-6™ имеет высокую прочность, смачиваемость для металлов, низкую электропроводность, высокую термостойкость. Это волокно из β -SiC на углеродном керне с покрытием SiC—C.

Волокно карбида кремния SCS-Ultra™ было разработано в 1990-е гг., по заказу производителей турбинных двигателей для создания ИКМ на основе алюминидов титана, используемого во вращающихся деталях двигателя. SMI разработала SCS-Ultra™, волокно с очень мелкими кристаллитами карбида кремния (200 нм или менее), которое на 50 % прочнее и на 10 % жестче, чем SCS-6 волокно, и стабильно при температурах выше 2200 °С. С использованием волокна марки SCS-Ultra™ в качестве армирующего наполнителя разработано несколько видов высокотемпературных деталей из алюминидов титана для газотурбинного двигателя.

Кроме того, волокно SCS-Ultra™ также было использовано в качестве упрочнителя керамоматричных композитов и в качестве оптического волокна.

Согласно официальным данным компании Specialty Materials производимые ими волокна имеют свойства, представленные в таблице.

Свойства волокон карбида кремния SCS-6 и SCS-Ultra [8]

Марка	SCS-6	SCS-Ultra
Диаметр, мкм	142	75
Плотность, г/см ³	3,08	2,89
Коэффициент термического расширения, град ⁻¹	4,1	4,1
Прочность при растяжении, МПа	3900	5900
Модуль упругости, ГПа	380	415

Покрывтия волокон карбида кремния

Первые образцы композиционного материала системы Ti—SiC появились в середине 70-х гг. XX в. Однако оказалось, что механические свойства композита значительно ниже ожидаемых из-за реакции между волокном и матрицей.

Поскольку прессование титановых сплавов проходит при высоких температурах, то процесс получения МКМ необходимо проводить при температурах, при которых происходит интенсивное взаимодействие волокна и матрицы с образованием хрупкого межфазного слоя, в результате чего не удастся добиться изначальной цели — повысить прочность композита.

Для предотвращения разупрочнения армирующих волокон карбида кремния используют защитные покрытия. Ряд компаний разработал различные покрытия для волокон SiC, способные обеспечить интерфазу, препятствующую их деградации.

Компания General Motors предложила наносить на волокна SiC или B—SiC (борные волокна с покрытием карбида кремния) перед заключением их в титановую матрицу тонкий слой циркония, который действует как диффузионный слой, предотвращающий реакцию карбида кремния с титаном [11].

Покрытие наносят электрофорезным осаждением порошка циркония на волокно, проходящее через суспензию мелких частиц циркония в жидком электролите при создании потенциала между волокном и контейнером с электролитом. Прочность МКМ на основе титанового сплава, армированного покрытым цирконием волокном SiC, существенно превышает прочность МКМ, армированного тем же волокном без покрытия.

Компания Avco запатентовала метод нанесения на волокна покрытия бора или карбида бора. Для нанесения покрытия карбида бора используют двухстадийный реактор получения волокон химическим паровым осаждением [12].

Для получения покрытия элементного бора используют реакцию:

$2\text{BCl}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{B} + 6\text{HCl}$ при температуре от 760 до 815 °C;

Для получения покрытия карбида бора используют реакцию:

$4\text{BCl}_3 + \text{CH}_4 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{B}_4\text{C} + 12\text{HCl}$, температура осаждения 980—1400 °C. Температура и время нахождения волокна в камере определяют толщину покрытия. Для использования волокон в эпоксидных матрицах наносят покрытие толщиной менее 0,1 мкм, обеспечивающее смачиваемость волокна материалом матрицы, для алюмоматричных композитов наносят покрытие карбида бора толщиной 0,2—1,0 мкм, а для горячего прессования титановых композитов толщина покрытия карбида бора составляет 6—9 мкм.

Другим вариантом покрытия, предложенным компанией Avco, для алюмоматричных композитов является слой практически чистого кремния [13]. Такое покрытие снижает чувствительность волокон SiC к царапинам, повышает смачиваемость волокон расплавом алюминия, обеспечивает связывание волокон с алюминиевыми сплавами при горячем прессовании, предотвращает взаимную диффузию алюминия и карбида кремния, обеспечивает поверхность, способную превращаться в SiO₂ в стеклянных и эпоксидных матрицах. Процесс получения волокна с покрытием включает стадии: нанесение карбида кремния на субстрат при его прохождении через реактор, добавление дихлорсилана в газовый поток реактора для осаждения слоя с повышенным содержанием кремния на волокно. Температура осаждения 1000—1350 °C.

Другими вариантами покрытий, предложенных Avco Corporation, являются слой карбида кремния, обогащенный углеродом, слой мелкозернистого карбида кремния и слой диборида титана [14—16].

Матрицы для металлических композитов

Алюминиды титана имеют преимущества по сравнению с титановыми сплавами по удельной прочности, температуре плавления и стойкости к окислению. Однако главный недостаток бинарных интерметаллидов — их хрупкость при низких температурах. Основные недостатки Ti₃Al следующие:

- недостаточная стойкость к атмосфере, как и для композитов на основе титана;
- реакция между волокнами SiC и матрицей на основе Ti₃Al;
- большая разница между коэффициентами теплового расширения (КТР) упрочняющих волокон SiC и матрицы на основе Ti₃Al.

Все разработки по решению проблем материалов SiC—Ti₃Al имели только частичный успех. Более новый класс материалов на основе Ti—Al—Nb был разработан недавно и основан на орторомбической фазе Ti₂AlNb. Материалы на основе Ti₂AlNb имеют более высокую удельную прочность, чем материалы на основе Ti₃Al. Кроме того, материалы на основе Ti₂AlNb имеют улучшенную низкотемпературную пластичность и ударную вязкость и высокотемпературные свойства не ниже, чем у материалов на основе Ti₃Al. Однако фазовая стабильность и химическая стойкость являются ключевыми проблемами, которые надо решать. Композиты на основе Ti₂AlNb рассматривают как один из возможных вариантов матрицы.

TiAl (γ-TiAl) имеет более высокую температуру, удельную прочность и жесткость по сравне-

нию с Ti_3Al . Ударная вязкость материалов на основе $\gamma-TiAl$ низкая, хотя недавно произошли некоторые улучшения. Благодаря введению хрома, кремния и ниобия удалось достичь более высокой пластичности и вязкости.

Такие же проблемы, включающие недостаточную пластичность и стойкость к окислению, а также активное взаимодействие с армирующим волокном на границе фаз, присущи и титановым сплавам. Для обеспечения надежной работы металлического композита в авиационных двигателях продолжается работа по поиску оптимального сочетания упрочняющего волокна, покрытия и матрицы [17].

Методы получения МКМ, армированных карбидокремниевыми волокнами

Разработано большое количество вариантов МКМ и ИКМ для изготовления деталей двигателей [18—31]. Наиболее перспективными считают матрицы из алюминидов титана и орторомбических титановых сплавов. Основными недостатками указанных материалов являются хрупкость при низких температурах, обусловленная природой интерметаллидов, и неполная реализация свойств упрочнителя, вызванная чрезмерной реакцией между армирующим компонентом и матрицей с образованием хрупкого реакционного слоя на границе интерфаз.

Основные методы получения таких МКМ — это прессование препрегов из чередующихся слоев карбидокремниевых волокон и металлической фольги из материала матрицы, напыление или осаждение матричного материала на волокна с последующим их прессованием, лазерная сварка, диффузионное связывание, порошковые методы. Во всех вариантах главной проблемой остается сохранение свойств карбидокремниевых волокон.

Для решения этой проблемы помимо защитных покрытий, наносимых на волокна, для сохранения свойств упрочнителя используют технологические приемы, позволяющие понизить температуру и время обработки при получении МКМ. Охранные документы на способы получения композиционных материалов на основе титановых матриц были отмечены у Secretary of the Air Force (США) [20—22], General Electric (США) [23, 24], отмечены также разработки у SNECMA [25] и ONERA (Франция) [26].

Фирма NKK Corporation (Япония) предлагает при получении МКМ укладкой чередующихся слоев однонаправленных волокон и металлической фольги использовать фольгу сплава, содержащего по весу: (3—7) % Al, (2—5) % V, (1—3) % Mo, (1—3) % Fe, (0,06—0,20) % O, остальное — Ti и

неизбежные примеси [27]. Схема получения такого композита, согласно охранному документу NKK Corporation, представлена на рис. 2.

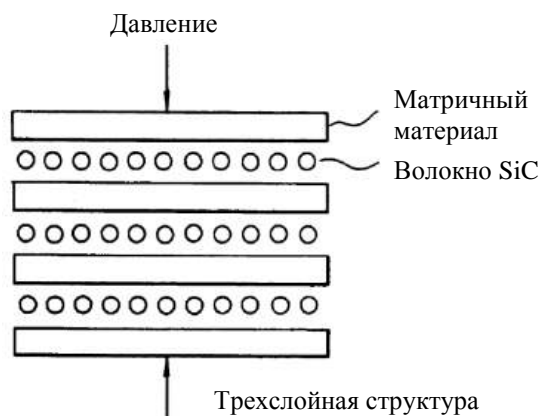


Рис. 2. Схема получения металлического композиционного материала на основе титанового сплава, упрочненного волокнами карбида кремния [27]

Предложенный японскими разработчиками титановый сплав имеет пониженную температуру β -перехода (900°C), что позволяет проводить операцию горячего прессования композита при $(790\pm 5)^\circ\text{C}$ и тем самым предотвратить чрезмерную реакцию на границе волокно/матрица.

Также этими авторами были рассмотрены альтернативные пути консолидации композита с помощью лазерной сварки, диффузионного связывания и кратковременной жидкофазной сварки [28].

Для улучшения свойств интерметаллидной матрицы компанией Avco Lycoming (США) разработан металлический ИКМ с гибридной матрицей, обладающий высокой прочностью и жесткостью до 815°C , хорошими механическими свойствами, включая хорошую пластичность и повышенную стойкость к растрескиванию матрицы [29]. Схема получения такого ИКМ с гибридной матрицей, армированной волокном SiC, представлена на рис. 3 по патенту [29].

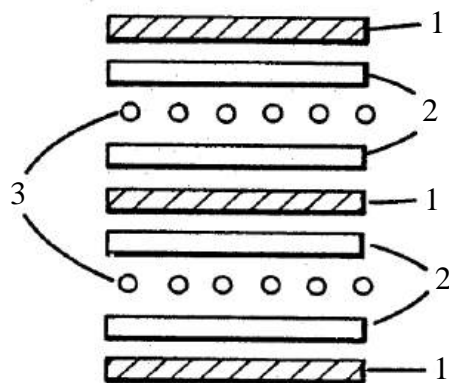


Рис. 3. Вариант схемы получения гибридного композита на основе матрицы $Ti-TiAl$

Матрица состоит, по крайней мере, из двух сплавов, например, высокотермостойкого алюминид титана 1 и пластичного низко модульного титанового сплава 2, а упрочнитель 3 содержится в одном, либо в обоих матричных сплавах. Слои, содержащие упрочнитель, получают заранее путем парофазного осаждения алюминид титана на волокна. В качестве алюминид титана могут быть использованы Ti_3Al , $TiAl$, а в качестве пластичных низко модульных сплавов можно использовать фольгу сплавов $Ti-6Al-4V$ (Ti64), $Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al$ (Ti-15-3), $Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo$ (Ti6246), $Ti-5Al-6Sn-1Mo-0,25Si$ (Ti-5621S). В качестве армирующего компонента предложено использовать не только волокна карбида кремния, но и волокна B , B_4C , TiB_2 , Al_2O_3 и др.

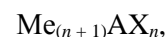
Отмечены также разработки по получению ИКМ порошковыми методами. Дорогостоящее производство титановых интерметаллидов в виде фольги обычным многостадийным методом исключает их экономичность. Такой технологический процесс включает отливку слитка (возможно, двойными и более переплавами), ковку, многократную горячую прокатку и холодную прокатку с промежуточными отжигами. К тому же сплавы, содержащие Mo , Nb , Si , плохо поддаются холодной прокатке.

Для снижения стоимости МКМ и ИКМ проводят разработки по получению сферического порошка матричного сплава распылением в струе инертного газа. Полученный порошок затем можно напылять плазменным методом на волокна, получая препрег в виде монолент с последующей их консолидацией; можно получать гибкую металлизированную ткань, смешивая металлический порошок с органическим связующим, укладывать послойно волокна и металлизированную ткань и подвергать полученную заготовку горячему изостатическому прессованию с одновременным удалением органической связки [30—34].

Кроме того, материаловеды рассматривают возможность получения изделий из титановых сплавов методами аддитивных технологий, предусматривающих последовательное нанесение слоев материала. Вариантами таких методов являются выборочное спекание порошковых материалов, использование присадочной проволоки, а в качестве источника энергии для спекания расходного материала используют лазер, дуговую плазму и электронный луч.

В процессе информационного поиска было отмечено также сообщение об армировании карбидокремневыми волокнами матриц из так называемой мах-фазы. Это класс тугоплавких соединений со слоистой структурой, сочетающий

свойства металлов и керамики, описываемый формулой:



где M — переходный металл;

A — элемент IIIA или IVA подгруппы периодической системы;

X — углерод или азот.

Такие материалы обладают высокой температурой плавления, низкой плотностью, стойкостью к окислению, высокими значениями тепло- и электропроводности. В Японском национальном институте материаловедения синтезировали композиционный материал с матрицей Ti_3AlC_2 , армированной SiC -волокнами с углеродным покрытием, обогащенным кремнием, с разным объемным наполнением методом горячего изостатического прессования [35]. Эксперимент показал, что на границе покрытия волокна и матрицы идет взаимодействие, при котором со стороны волокна образуется соединение Al_4C_3 , затем TiC , а на границе с матрицей кремний диффундирует в матрицу, образуя $Ti_3(Al,Si)C_2$. Для температур прессования $1300^\circ C$ слой покрытия недостаточен, однако возможно получить композит $SiC(SCS-6)/Ti_3AlC_2$ с нехрупкой моделью разрушения при объемной доле волокна 15 % и температуре прессования $1250^\circ C$.

Идут поиски новых металлматричных материалов и совместимых с ними армирующих наполнителей. Как видно из анализа литературных данных, поиски "идеального композита" продолжаются, и далеко не все возможности исследованы.

Заключение

МКМ и ИКМ на основе титановых сплавов и титановых интерметаллидов, армированных SiC -волокнами, являются материалами-кандидатами для высокотемпературных применений в качестве конструктивных элементов, например, в газовых турбинах. Из источников научно-технической литературы известно, что kernовые волокна SiC для МКМ на основе титановых сплавов серийно производят компании TISICS Ltd, (DERA, QinetiQ (Великобритания), производящая волокна на вольфрамовом kernе марок Sigma 1140+ и Sigma 1240 [7], компания Specialty Materials Inc, SMI, ранее Textron (Avco) (США), производящая волокна марок SCS-6, SCS-Ultra [8], а также FMW Composite Systems, Inc. (США), производящая волокно марки Trimark и композиционный материал с матрицей $Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo$, армированной волокном марки Trimarc1 (вольфрамовый kern, диаметр волокна 128 мкм), получаемый совместной намот-

кой волокна карбида кремния и проволоки из матричного сплава с последующим изостатическим прессованием.

Исследования керновых волокон карбида кремния и металлических композитов с их использованием показали, что оптимальных свойств этих материалов пока не достигли [17—19, 33—37]. Привлекательные свойства интерметаллидов титана могут быть реализованы полностью лишь после преодоления недостатков, таких как хрупкость при низких температурах, недостаточная стойкость к окислению, деградация волокна из-за образования хрупкой реакционной зоны на границе волокно—матрица, невысокая прочность в поперечном направлении композиционного материала. Промышленное внедрение этих материалов требует их сертификации, так как степень риска для использования их в качестве ответственных компонентов достаточно велика.

На характер разрушения и долговечность МКМ системы Ti—SiC влияют плотность упаковки волокон, схема армирования и объемное содержание волокон. Характерными повреждениями при циклических нагрузках чаще всего являются трещины на границе раздела волокно—матрица в реакционном слое, отслоение волокон от матрицы и разделение слоев с разной ориентацией волокон, трещины в матрице, поперечные трещины в волокне, полосы скольжения.

Важным моментом является то, что углеродный защитный слой керновых волокон SiC подвержен окислению при температурах выше 500 °С, в результате чего волокно резко теряет прочность, что не может не отражаться на свойствах композиционного материала. Очень важно, чтобы волокна были полностью покрыты титановым матричным материалом, в противном случае кислород может получить доступ к волокну через усталостные трещины матрицы и их окисление может стать причиной преждевременного разрушения материала [38].

Как видно из анализа научно-технической литературы, проблемы при создании металлических композиционных материалов на основе титановых сплавов и интерметаллидов, армированных SiC-волокнами с углеродным или вольфрамовым керном, до конца не решены. Интерес к данному классу материалов высок, отмечены публикации материаловедов России, США, Великобритании, Франции, Германии, Испании, Японии, Китая и других стран. Поиски решения проблем ведутся как в области создания новых композиций волокно—интерфаза—матрица, так и в области совершенствования технологий получения качественного изделия из металло- и интерметаллидно-матричного композита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54—58.
2. Каблов Е. Н., Ночовная Н. А., Ширяев А. А., Давыдова Е. А. Исследование структурно-фазовых превращений в псевдо-β-титановых сплавах и влияния скорости охлаждения с температуры гомогенизации на структуру и свойства сплава BT47. Ч. 1 // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-3-10.
3. Каблов Е. Н., Кашапов О. С., Медведев П. Н., Павлова Т. В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti-Al-Sn-Zr-Si-B-стабилизаторы // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1. С. 30—37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
4. Антипов В. В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186—194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-186-194.
5. Изотова А. Ю., Гришина О. И., Шавнев А. А. Композиционные материалы на основе титана, армированные волокнами (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 5(53). <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.04.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-5-5.
6. Гришина О. И., Кочетов В. Н., Шавнев А. А., Серпова В. М. Аспекты применения высокопрочных и высоко-модульных волокнистых металлических композиционных материалов авиационного назначения (Обзор) // Труды ВИАМ. 2014. № 10. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.04.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-5-5.
7. Интернет-сайт компании TISICS (Великобритания). <https://www.tisics.co.uk/tech-overview> (дата обращения: 08.07.2021).
8. Интернет-сайт компании Speciality Materials (США). <https://www.specmaterials.com> (дата обращения: 08.07.2021).
9. Silicon carbide filaments and method: Pat. 4127659 USA № 762649, filed 26.01.1977, publ.28.11.1978. — 5 p.
10. Устройство для получения карбидокремниевых волокон. Патент 2471885 РФ. № 2011153129/02. Заявл. 27.12.2011. Оpubл. 10.01.2013. — 5 с.
11. Boron coated silicon carbide filaments: Pat. 4481257 USA, № 505567, filed 17.06.1983, publ.06.11.1984. — 6 p.
12. Zirconium diffusion barrier in titanium silicon carbide composite materials: Pat. 3717443 USA № 156365 filed 24.06.1971, publ.20.02.1973. — 6 p.
13. Boron coated silicon carbide filaments: Pat. 4481257 USA, № 505567, filed 17.06.1983, publ.06.11.1984. — 6 p.
14. Method of applying a carbon-rich surface layer to a silicon carbide filament: Pat. 4415609 USA, № 374992, filed 05.05.1982, publ.15.11.1983. — 5 p.
15. Surface treatment for silicon carbide filaments and product: Pat. 5024889 USA, № 324180, filed 16.03.1989, publ. 18.06.1991 — 7 p.
16. Silicon carbide monofilament for transverse composite properties: Pat. 4628002 USA, № 738614, filed 28.05.1985, publ. 09.12.1986 — 6 p.
17. Гришина О. И., Серпова В. М. Влияние диаметра волокон карбида кремния на механические свойства композиционных материалов (Обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 5. <http://viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-55-63.
18. Peters P., Hempfenmacher J., Weber K., Assler H. Fiber dominant tensile and creep strength at 600 °C of SCS-6 fiber reinforced titanium alloys // J. Composites, Technology and Research. 2002. V. 24. № 4. P. 246—253. <https://doi.org/10.1520/CTR10931J>.
19. Серпова В. М., Сидоров Д. В., Курбаткина Е. И., Шавнев А. А. Разрушение волокнистых металлических ком-

позиционных материалов системы Ti-SiC при циклических нагрузках (Обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 4–5. <http://viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-108-118.

20. Method of producing titanium aluminide metal matrix composite articles: Pat. 4746374 USA, № 13817, filed 12.02.1987, publ. 24.05.1988. — 5 p.

21. Method and titanium aluminide matrix composite: Pat. 5030277 USA, № 628956, filed 17.12.1990, publ. 09.07.1991. — 4 p.

22. Method to fabricate titanium aluminide matrix composites: Pat. 5118025 USA, № 628951, filed 17.12.1990, publ. 02.06.1992. — 4 p.

23. Silicon-carbide reinforced composites of titanium aluminide: Pat. 4786566 USA, № 10882, filed 04.02.1987, publ. 22.11.1988. — 12 p.

24. Silicon carbide filament reinforced titanium aluminide matrix with reduced cracking tendency: Pat. 5017438 USA, № 455041, filed 22.12.1989, publ. 21.09.1991. — 6 p.

25. Titanium-based intermetallic alloys: Pat. 6132526 USA, № 213247, filed 17.12.1998, publ. 17.10.2000. — 11 p.

26. Titanium aluminide which can be used at high temperature: Pat. 6176949 USA, № 34496, filed 04.03.1998, publ. 23.01.2001. — 9 p.

27. Continuous fiber-reinforced titanium-based composite material and method of manufacturing the same: Pat. 5558728 USA, № 270936, filed 05.07.1994, publ. 24.09.1996. — 8 p.

28. **Fukumoto S., Hirose A., Kobayashi H. S.** Joining Processes for Structural Applications of Continuous Fiber Reinforced MMCs // Key Engineering Materials. 1995. V. 104–107. P. 853–872.

29. Hybrid titanium alloy matrix composites: Pat. 4816347 USA, № 55415, filed 29.05.1987, publ. 26.03.1989. — 8 p.

30. Preparation Method of Continuous Fiber-reinforced Metal-based Composite Material: Pat. 109572091 China, № 201811516058A, filed 12.12.2018, publ. 05.04.2019. — 7 p.

31. Preparation Method of SiC Continuous Fiber Reinforced Titanium-based Composite and Product: Pat. 107815625 China, № 201711065245A, filed 02.11.2017, publ. 20.03.2016. — 7 p.

32. **Djanarthany S., Viala J.-C., Bouix J.** Development of SiC/TiAl composites: processing and interfacial phenomena // Materials Science and Engineering. 2001. V. 300. № 1–2. P. 211–218.

33. **Valente T., Carassiti F.** Hot Pressing of Plasma-Sprayed SiC Fiber-Reinforced Ti-6Al-4V Alloy // J. Composites, Technology and Research. 1996. V. 18. № 2. P. 89–95.

34. Titanium Aluminide Alloys: Pat. 2009/0151822 USA, № 33190908A, filed 10.12.2008, publ. 18.06.2009. — 9 p.

35. **Guo S., Hu C., Gao H., Tanaka Y., Kagawa Y.** SiC(SCS-6) fiber-reinforced Ti_3AlC_2 matrix composites: Interfacial characterization and mechanical behavior // J. European Ceramic Society. 2015. V. 35. P. 1375–1384.

36. **Baik K. H., Grant P. S.** // Chemical Interaction between Sigma 1140+ SiC Fibre and Ti-6Al-4V // Scripta materialia. 2001. V. 44. № 4. P. 607–612. DOI:10.1016/S1359-6462(00)00649-7.

37. **González C., Llorca J.** Mechanical Properties of Sigma 1140+ SiC Fibre Prior and After Composite Processing // Advanced Composites Letters. 2000. V. 9. № 4. P. 295–302.

38. **Peters P. W. M., Hemptenmacher J.** Oxidation of the carbon protective coating in SCS-6 fibre reinforced titanium alloys // Composites. 2002. Part A. V. 33. P. 1373–1379.

Core fibers of silicon carbide for reinforcement of composite materials (Review)

A. A. SHAVNEV, V. G. BABASHOV, N. M. VARRIK

FSUE "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials" of National Research Center "Kurchatov Institute",
Moscow, Russia

The article considers some aspects of creation of metal composite materials based on titanium matrices reinforced with core fibers of silicon carbide. There are given data of sources of scientific and technical literature on production of continuous silicon carbide fibres on carbon and tungsten core, methods of application of coatings on them preventing interaction of fibre with metal matrix and technologies of production of structural articles from metal composite material SiC—Ti-alloy. The main problems in obtaining materials of this class are indicated.

Keywords: fiber, silicon carbide, tungsten core, carbon core, titanium alloy, metal composite.

УДК 536.2

DOI: 10.52190/2073-2562_2022_2_26

EDN: BMFNUO

Аналитический метод определения эффективных теплофизических характеристик низкотеплопроводных материалов при различных темпах нагрева

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

В. В. ГУСЕВ

АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», г. Миасс, Челябинская обл., Россия

Построено приближенное аналитическое решение задачи теплопроводности неограниченной пластины для условий интенсивного нагрева плоских образцов материалов при тепловых испытаниях, проводимых в целях определения эффективных теплофизических характеристик материалов по результатам измерений температуры на поверхностях образцов. Решение задачи представлено суммой решений двух задач с граничными условиями (ГУ), соответствующими реализующимся при испытаниях на поверхностях образцов при нулевых условиях в каждой из задач на противоположных поверхностях. При значениях чисел Фурье, превышающих одну десятую, можно с определенной погрешностью отбросить входящие в аналитические решения бесконечные ряды, за исключением первых членов. Предложена аппроксимационная зависимость для экспоненты, входящей в первые члены, позволившая при ее подстановке в полученное решение получить уравнение четвертой степени, коэффициенты которого рассчитывают с использованием измеренных значений температуры на внешней и внутренней поверхностях образцов для двух последовательных узловых моментов времени. Корень данного уравнения дает эффективное значение температуропроводности, по которому затем определяют эффективные значения удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности испытываемого материала, соответствующие диапазону температуры и темпам нагрева на этих интервалах.

Ключевые слова: решения задач теплопроводности, теплофизические характеристики, тепловые испытания, обратные задачи теплопроводности.

Рассматриваемая задача является обратной задачей теплопроводности, которые решаются как численными, так и аналитическими методами [1—5]. В частности, в работе [5] с использованием аппроксимаций сложных граничных условий простыми функциями, для которых имеются аналитические решения, на основе методов работ [6—8] построено приближенное аналитическое решение для неограниченной пластины. На примере анализа результатов тепловых испытаний на установке лучистого нагрева (УЛН) плоского образца композиционного теплозащитного материала показана возможность использования этого решения для определения теплофизических характеристик

(ТФХ) материалов. Схема образцов для тепловых испытаний материалов приведена на рис. 1.

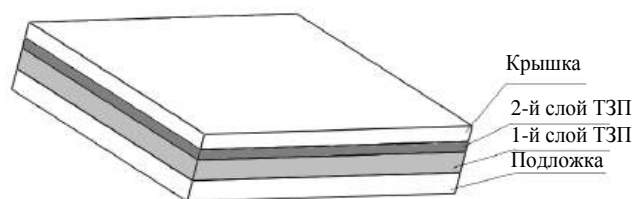


Рис. 1. Схема двухслойного образца для испытаний на установке лучистого нагрева

Слой испытываемого материала, состоящий из двух подслоев (общая толщина 5—7 мм), зажимали специальными стяжками между двумя металлическими пластинами (со стороны нагревательной панели УЛН — крышка, с тыльной стороны — подложка). В металлическую крышку (в ряде испытаний для дублирования — между крышкой и поверхностью материала) между подслоями материала и между тыльной поверхностью материала и подложкой устанавливали термопары.

Толщина слоя испытываемого материала (суммарная толщина подслоев) была на порядок мень-

Костин Геннадий Федотович, старший научный сотрудник.

E-mail: kostgf@yandex.ru, ofpat@mail.ru

Калашников Сергей Тимофеевич, старший научный сотрудник — руководитель темы.

E-mail: ofpat@mail.ru, src@makeyev.ru

Гусев Владимир Васильевич, ведущий инженер.

E-mail: src@makeyev.ru

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2022 г.

© Костин Г. Ф., Калашников С. Т., Гусев В. В., 2022

ше линейных размеров вдоль поверхности, поэтому краевыми эффектами пренебрегалось, и задача рассматривалась в одномерной постановке как для неограниченной пластины.

Зависимость от времени τ показаний $t = t_w(\tau)$ термопар, установленных в металлическую крышку, и для дублирования — между крышкой и поверхностью материала, могут приниматься для слоя материала в качестве граничного условия (ГУ) первого рода (в ряде испытаний термопары устанавливались только в крышках, что обеспечивало более плотный контакт крышки с материалом). Металлическая подложка принимается в качестве слоя бесконечной теплопроводности, примыкающего к слою материала, в который происходит сток тепла. Кроме того, часть тепла отводится от подложки в окружающую среду за счет свободной конвекции и излучения. Суммарный сток тепла S на этой поверхности является ГУ второго рода. Соответствующая задача теплопроводности для неограниченной пластины с ГУ первого рода на поверхности со стороны крышки (внешняя поверхность) и ГУ второго рода на противоположной поверхности (тыльная поверхность) может быть разбита на сумму двух задач: первая — с ГУ первого рода на внешней поверхности, нулевым тепловым потоком на тыльной поверхности и начальными условиями t_0 , равными начальным условиям исходной задачи, вторая — с ГУ второго рода на тыльной поверхности, нулевой температурой на внешней поверхности и нулевыми начальными условиями. Схематично задача соответствует представленной на рис. 2.

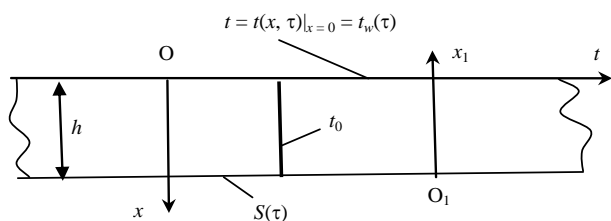


Рис. 2. Неограниченная пластина, одномерная задача теплопроводности: Ox , Ox_1 — оси поперечных координат; Ot — ось температуры

Граничное условие на тыльной поверхности слоя материала имеет вид

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0} = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=h} = -S(\tau) = S_{\text{инп}} + S_{\text{п}} + S_{\text{апп}} = -\varepsilon_{\text{п}} \sigma_0 (T_{\text{п}}^4 - T_{\text{с}}^4) - c'_p \rho' h' \frac{\partial t_{\text{п}}}{\partial \tau} - \alpha_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала;
 τ — время;

x — координата поперек образца с началом отсчета от границы слоя материала с крышкой;
 x_1 — координата поперек образца с началом отсчета от границы слоя материала с подложкой;
 h — толщина слоя материала;
 $t(x, \tau)$, $t(x_1, \tau)$ — профиль температуры в образце;
 $S_{\text{инп}}$, $S_{\text{п}}$, $S_{\text{апп}}$ — теплоотвод излучением, теплоотвод в подложку и теплоотвод в помещение за счет конвективного теплообмена;
 $T_{\text{п}}$, $T_{\text{с}}$ — измеренная температура подложки и температура стенок помещения по шкале Кельвина (соответственно $t_{\text{п}}$, $t_{\text{с}}$ по шкале Цельсия);
 $\varepsilon_{\text{п}}$ — приведенная степень черноты подложки и стенок;
 σ_0 — постоянная Стефана-Больцмана;
 c'_p , ρ' , h' — теплоемкость, плотность, толщина слоя бесконечной теплопроводности (металлической подложки);
 $\alpha_{\text{п}}$ — коэффициент свободно-конвективного теплообмена.

Первое и третье слагаемые в правой части в (1) при наличии теплоизолятора под подложкой могут отсутствовать, а при небольших значениях температуры подложки могут быть существенно меньше второго, и ими можно пренебрегать, как это было сделано в работе [8].

Криволинейные ГУ, построенные с использованием показаний термопар, можно аппроксимировать на внешней поверхности ломаной линией с конечным числом N прямолинейных участков, а на тыльной поверхности — кусочно-ступенчатой линией с постоянными значениями ГУ на этих участках.

С использованием суперпозиционного метода [6–8] для первой задачи с кусочно-линейной аппроксимацией ГУ на внешней поверхности можно записать приближенное аналитическое решение в виде

$$t^{(1)}(x, \tau) = t_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^N \frac{1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})}{2} \times [\theta_i (b_i - b_{i-1})], \quad (2)$$

где τ_i — узловые моменты времени;
 t_0 — начальная температура;

$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ — температуропроводность материала;

c_p , ρ — соответственно удельная теплоемкость и плотность материала;

$$\theta_i = Fo_i - \eta + \frac{\eta^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos[\mu_n(1-\eta)] \exp(-\mu_n^2 Fo_i); \quad \eta = \frac{x}{h}; \quad (3)$$

$$b_i = \frac{t_{ki} - t_{ki-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}}; \quad Fo_i = \frac{a(\tau - \tau_{i-1})}{h^2}; \quad \mu_n = (2n-1)\frac{\pi}{2};$$

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n}; \quad b_0 = \tau_0 = 0;$$

t_{ki} — измеренные значения температуры поверхности слоя материала в узловые моменты времени;

Fo — число Фурье.

Для второй задачи с кусочно-ступенчатой аппроксимацией ГУ на тыльной поверхности приближенное аналитическое решение имеет вид [6—8]

$$t^{(2)}(x, \tau) = \frac{h}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})}{2} [\theta_{li}(S_i - S_{i-1})], \quad (4)$$

$$\theta_{li} = 1 - \eta_i - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n} \sin[\mu_n(1-\eta_i)] \exp(-\mu_n^2 Fo_i); \quad (5)$$

$$\eta_i = \frac{x_i}{h},$$

где $S_i = \text{const}$ — значения аппроксимации функции $S(\tau)$ на интервалах времени (τ_{i-1}, τ_i) (i -й интервал).

Значения S_{ni} стоков теплоты в подложку рассчитывают аналогично b_i по формуле:

$$S_{ni} = -c_p' \rho' h' \frac{t_{ni} - t_{ni-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}}, \quad (6)$$

где t_{ni} — измеренные значения температуры подложки в узловые моменты времени (значения показаний термопары между слоем материала и подложкой); значения S_{ni} и S_{oi} на i -х интервалах принимаются постоянными, равными средним значениям, рассчитываемым по показаниям термопары между слоем материала и подложкой (по температуре подложки).

С учетом того что $\eta_i = \frac{x_i}{h} = 1 - \frac{x}{h} = 1 - \eta$ решение (4), (5) принимает вид

$$t^{(2)}(x, \tau) = \frac{h}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})}{2} [\theta_{li}(S_i - S_{i-1})], \quad (7)$$

$$\theta_{li} = \eta - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n} \sin[\mu_n \eta] \exp(-\mu_n^2 Fo_i), \quad (8)$$

приближенное аналитическое решение исходной задачи запишем в виде

$$t(x, \tau) = t^{(1)}(x, \tau) + t^{(2)}(x, \tau) = t_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^N \frac{1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})}{2} [\theta_i(b_i - b_{i-1})] + \frac{h}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})}{2} [\theta_{li}(S_i - S_{i-1})], \quad (9)$$

где θ_i, θ_{li} рассчитывают по формулам (3), (5).

Из номограмм работы [6] следует, что при

$$Fo_{i-1} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2} \geq 0,9 \quad \text{с погрешностью } 15\%$$

суммами рядов в (3) и (5) в моменты времени $\tau_i, i = 1, 2, \dots, N$ можно пренебречь.

Соответственно для любого узлового момента времени τ_k при выполнении условия

$$Fo_{k-1} = \frac{a(\tau_k - \tau_{k-1})}{h^2} \geq 0,9, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

выражение для решения (6) принимает вид

$$t|_{\tau=\tau_k} = t_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^k \left(\frac{a(\tau_k - \tau_{i-1})}{h^2} - \eta + \frac{\eta^2}{2} \right) (b_i - b_{i-1}) + \frac{h\eta}{\lambda} \sum_{i=1}^k (S_i - S_{i-1}) = t_0 + \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1}) (b_i - b_{i-1}) - \frac{h^2}{a} \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) (b_k - b_0) + \frac{h\eta(S_k - S_0)}{\lambda} = t_{kk} - \frac{h^2}{a} \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) (b_k - b_0) + \frac{h\eta(S_k - S_0)}{\lambda}. \quad (10)$$

Из (10) для двух последовательных интервалов времени (τ_k, τ_{k+1}) и (τ_{k+1}, τ_{k+2}) и двух соответствующих узловых моментов времени можно получить систему двух уравнений относительно двух неизвестных — коэффициента теплопроводности λ и удельной теплоемкости c_p :

$$\begin{cases} t|_{\tau=\tau_k, \eta=1} = t_{pk} = t_{kk} - \frac{\rho h^2}{2\lambda} c_p (b_k - b_0) + \frac{h(S_k - S_0)}{\lambda}; \\ t|_{\tau=\tau_{k+1}, \eta=1} = t_{pk+1} = t_{kk+1} - \frac{\rho h^2}{2\lambda} c_p (b_{k+1} - b_0) + \frac{h(S_{k+1} - S_0)}{\lambda}. \end{cases} \quad (11)$$

Из системы (11), учитывая, что в начальный момент $\tau_0 = 0$, $S_0 = b_0 = 0$, для искомых λ и c_p следует:

$$\lambda = h \frac{S_k b_{k+1} - S_{k+1} b_k}{(t_{kk+1} - t_{nk+1}) b_k - (t_{kk} - t_{nk}) b_{k+1}};$$

$$c_p = \frac{2\lambda}{\rho h^2} \frac{(t_{kk} - t_{nk}) S_{k+1} - (t_{kk+1} - t_{nk+1}) S_k}{S_{k+1} b_k - S_k b_{k+1}} = \quad (12)$$

$$= \frac{2}{\rho h} \frac{(t_{kk} - t_{nk}) S_{k+1} - (t_{kk+1} - t_{nk+1}) S_k}{(t_{kk+1} - t_{nk+1}) b_k - (t_{kk} - t_{nk}) b_{k+1}}.$$

Формулы (12) могут быть использованы для определения ТФХ в случае идеального контакта между крышкой и поверхностью слоя теплозащитного материала (ТЗМ), между подслоями ТЗМ, между ТЗМ и подложкой. В случае воздушных зазоров между этими слоями образца необходимо учитывать их тепловые сопротивления [9].

В случае, когда числа Фурье $Fo_{i-li} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2} \leq 0,9$, формулы (10)–(12) неприменимы, так как члены сумм рядов в формулах (3), (5) и, соответственно, в (8), (9) становятся значимыми, и ими пренебрегать нельзя.

В работе [8] на основе анализа результатов тепловых испытаний образцов материала ТМСЛ на УЛН с использованием решения (9) методом "пристрелки" были получены эффективные значения λ и c_p этого материала, удовлетворительно согласующие расчетные и измеренные значения температуры. Целесообразно было бы подтвердить эти эффективные значения с использованием формул вида (12), однако общая длительность периода нагрева образца ТМСЛ была такова, что разбиение этого периода даже на два интервала дает прогнозируемые значения чисел Фурье

$$Fo_{i-li} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2} \leq 0,9. \text{ Длительности периодов}$$

нагрева образцов при испытаниях, например, на УЛН, как в рассматриваемом случае испытаний материала ТМСЛ, не всегда могут быть достаточно большими из-за прогрева кассеты (державки), в которой закрепляют образцы, и возникновения больших погрешностей при применении одномерной модели из-за прогрева образцов со стороны кассеты (державки) через их боковые поверхности.

Вместе с тем, при $0,1 \leq Fo_i = \frac{a(\tau - \tau_{i-1})}{h^2} \leq 0,9$ вторыми и последующими членам рядов в (3), (8) можно пренебречь, и формулы для расчета безразмерных параметров температуры примут вид

$$\begin{cases} \theta_i = Fo_i - \eta + \frac{\eta^2}{2} + \frac{A_1}{\mu_1^2} \cos[\mu_1(1-\eta)] \times \\ \times \exp(-\mu_1^2 Fo_i); \\ \theta_{li} = \eta - \frac{A_1}{\mu_1} \sin(\mu_1 \eta) \cdot \exp(-\mu_1^2 Fo_i); \\ \mu_1 = \frac{\pi}{2}; A_1 = \frac{2}{\mu_1} = \frac{4}{\pi}. \end{cases} \quad (13)$$

Рассмотрим задачу для неограниченной пластины с начальной температурой t_0 и с граничными следующими условиями: на внешней поверхности температура меняется по линейному закону $t|_{x=0} = t_0 + b\tau$, $b = \text{const}$, на противоположной поверхности действует постоянный тепловой поток

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=h} = S = \text{const}. \text{ Данная задача является}$$

упрощенным прототипом рассматриваемой задачи. Она может быть представлена в виде суммы двух более простых задач: первая — с начальным условием t_0 и с граничными условиями

$$t|_{x=0} = t_0 + b\tau, \quad b = \text{const}, \quad -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0, \text{ вторая —}$$

с нулевым начальным условием и с ГУ $t|_{x=0} = 0$,

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=h} = S = \text{const}. \text{ Согласно методу суперпозиции [7],}$$

сумма решений этих двух простых задач будет являться решением исходной упрощенной задачи

$$t(x, \tau) = t^{(1)}(x, \tau) + t^{(2)}(x, \tau) = t_0 + \frac{h^2}{a} b\theta + \frac{h}{\lambda} \theta_1 S; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \theta &= Fo - \eta + \frac{\eta^2}{2} + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos[\mu_n(1-\eta)] \exp(-\mu_n^2 Fo); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\theta_1 = \eta - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n} \sin[\mu_n \eta] \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (16)$$

$$\eta = \frac{x}{h}; \quad Fo = \frac{a\tau}{h^2}; \quad \mu_n = (2n-1)\frac{\pi}{2}; \quad A_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n}.$$

При $\tau = 0$, то есть при $Fo = 0$, должно выполняться условие $t(x, 0) = t_0$, в том числе и при $\tau = 1$, и из (14)–(16) следует $\theta|_{x=h, Fo=0} = 0$,

$$\theta_1|_{x=h, Fo=0} = 0, \text{ то есть}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} = \frac{1}{2}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n} \sin \mu_n = 1.$$

Если в (15), (16) отбросить все члены рядов, кроме первых, то решение (14) примет вид

$$t(x, \tau) = t^{(1)}(x, \tau) + t^{(2)}(x, \tau) =$$

$$= t_0 + \frac{h^2}{a} b \left[Fo - \eta + \frac{\eta^2}{2} + \frac{A_1}{\mu_1^2} \cos[\mu_1(1-\eta)] \exp(-\mu_1^2 Fo) \right] +$$

$$+ \frac{h}{\lambda} \left[\eta - \frac{A_1}{\mu_1} \sin(\mu_1 \eta) \exp(-\mu_1^2 Fo) \right] S, \quad (17)$$

откуда при $\eta = 1$, $Fo = 0$ следует

$$t|_{\tau=0, \eta=1} = t_0 + \frac{bh^2}{a} \left(-\frac{1}{2} + \frac{A_1}{\mu_1^2} \right) + \frac{Sh}{\lambda} \left(1 - \frac{A_1}{\mu_1} \right) \approx$$

$$\approx t_0 + \frac{bh^2}{a} \left(-\frac{1}{2} + 0,516025 \right) + \frac{Sh}{\lambda} (1 - 0,810569) =$$

$$= t_0 + 0,016025 \frac{bh^2}{a} + 0,189431 \frac{Sh}{\lambda},$$

и для обеспечения условия $t(h, 0) = t_0$ необходимо записать решение в соответствующем этому уточненном виде, например, в виде

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{h^2}{a} b \left[Fo - 1,03205 \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) + \frac{A_1}{\mu_1^2} \times \right.$$

$$\left. \times \cos^{0,83}[\mu_1(1-\eta)] \exp(-\mu_1^2 Fo) \right] +$$

$$+ \frac{h}{\lambda} S \left[0,810569 \eta - \frac{A_1}{\mu_1} \sin^2(\mu_1 \eta) \exp(-\mu_1^2 Fo) \right]. \quad (18)$$

Решение в виде (18) обеспечивает условие $t(x, 0) = t_0$ при $Fo = 0$, $x = 0$, при $Fo = 0$, $x = h$, и при $Fo = 0$, $x = \frac{h}{2}$ функции в квадратных скобках также близки к нулю.

Для диапазона $0 \leq Fo \leq 0,9$ можно применить аппроксимацию вида

$$\exp(-\mu_1^2 Fo) = f(Fo) =$$

$$= 1 - 0,6919 \frac{1 + \text{sign}(0,1 - Fo)}{2} \sqrt{Fo} +$$

$$+ \frac{1 + \text{sign}(Fo - 0,1)}{2} \times$$

$$\times (0,23 - 1,52838 \sqrt{Fo} + 0,34487 Fo). \quad (19)$$

Здесь при $Fo < 0,1$ $\text{sign}(0,1 - Fo) = 1$, $\text{sign}(Fo - 0,1) = -1$, при $Fo \geq 0,1$ $\text{sign}(0,1 - Fo) = -1$, $\text{sign}(Fo - 0,1) = 1$, и при $0,1 \leq Fo \leq 0,9$ из (19) следует

$$\exp(-\mu_1^2 Fo) = (1,23 - 1,52838 \sqrt{Fo} + 0,34487 Fo). \quad (20)$$

Соответственно в этом диапазоне решение (18) примет вид

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{h^2}{a} b \left[Fo - 1,03205 \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{A_1}{\mu_1^2} \cos^{0,83}[\mu_1(1-\eta)] \times \right.$$

$$\left. \times (1,23 - 1,52838 \sqrt{Fo} + 0,34487 Fo) \right] +$$

$$+ \frac{h}{\lambda} S \left[0,810569 \eta - \frac{A_1}{\mu_1} \sin^2(\mu_1 \eta) \times \right.$$

$$\left. \times (1,23 - 1,52838 \sqrt{Fo} + 0,34487 Fo) \right]. \quad (21)$$

Оценим точность приближенных решений (18), (21). Рассмотрим модельную задачу для материала типа ТМСЛ, ТФХ которого примем следующими [5]: плотность $\rho = 545 \text{ кг/м}^3$, теплопроводность $\lambda = 0,12 \text{ Вт/(м·К)}$, теплоемкость $c_p = 1380 \text{ Дж/(кг·К)}$ (соответствующее значение температуропроводности $a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = 0,1596 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Примем пара-

метры, близкие к реализовавшимся при испытании, рассмотренном в работе [8]: $b = 3 \text{ К/с}$, $S = -1000 \text{ Вт/м}^2$, $h = 0,006 \text{ м}$, начальную температуру примем равной $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. В табл. 1 приведены

Таблица 1

Сравнение приближенных значений температуры с точными

Fo		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Точные значения, $^\circ\text{C}$	$x = 0,5h$	20,0	25,2	45,6	74,9	115,7	159,4	204,4	264,4	323,8	390,5
	$x = h$	20,0	2,4	5,5	21,5	52,3	83,5	136,6	180,8	233,4	299,1
Формула (18), $^\circ\text{C}$	$x = 0,5h$	20,0	26,0	45,4	75,4	113,7	158,3	208,0	261,7	318,4	377,5
	$x = h$	20,0	2,5	3,5	19,2	46,2	82,2	125,0	173,3	225,8	281,6
Формула (21), $^\circ\text{C}$	$x = 0,5h$	20,0	26,0	46,8	80,9	111,8	167,0	215,3	265,9	321,5	372,4
	$x = h$	20,0	2,4	5,5	26,8	57,4	94,0	135,0	179,1	225,8	274,6

значения температуры при $x = \frac{h}{2}$, $x = h$ в зависимости от числа Фурье, рассчитанные с использованием точного решения (14)–(16) и по формулам (18), (21).

Из табл. 1 видно удовлетворительное согласование точных и приближенных значений.

Подставляя выражения (21) в (9), для любого узлового момента времени τ_k , $k = 1, 2, \dots, N$, где N — число аппроксимирующих интервалов, на которые разбивается период испытаний, учитывая, что

значения температуры поверхности $t_{\kappa k}$ в узловые моменты времени равны

$$t_{\kappa k} = t_0 + \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}),$$

для диапазона $0,1 \leq Fo_{ik} = \frac{a(\tau_k - \tau_{i-1})}{h^2} \leq 0,9$ с учетом

того, что $\frac{A_1}{\mu_1^2} = 0,516025$, $\frac{A_1}{\mu_1} = 0,810569$ получим:

$$\begin{aligned} t|_{\tau=\tau_k} &= t_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^k \left[Fo_i - 1,03205 \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) + \frac{A_1}{\mu_1^2} \cos^{0,83} [\mu_1 (1 - \eta)] (1,23 - 1,52838 \sqrt{Fo_i} + 0,34487 Fo_i) \right] \times \\ &\times (b_i - b_{i-1}) + \frac{h}{\lambda} \sum_{i=1}^k \left[0,810569 \eta - \frac{A_1}{\mu_1} \sin^2 (\mu_1 \eta) (1,23 - 1,52838 \sqrt{Fo_i} + 0,34487 Fo_i) \right] (S_i - S_{i-1}) = \\ &= t_{\kappa k} + \left[0,63471 \cos^{0,83} [\mu_1 (1 - \eta)] - 1,03205 \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) \right] (b_k - b_0) \frac{h^2}{a} - \\ &- \left[0,78868 \cos^{0,83} [\mu_1 (1 - \eta)] \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \right] \sqrt{\frac{h^2}{a}} + \\ &+ 0,17796 \cos^{0,83} [\mu_1 (1 - \eta)] \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) + \\ &+ \frac{1}{c_p \rho h} \left[\left(0,810569 \eta - 0,997 \sin^2 (\mu_1 \eta) \right) (S_k - S_0) \frac{h^2}{a} + 1,23886 \sin^2 (\mu_1 \eta) \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) \sqrt{\frac{h^2}{a}} - \right. \\ &\left. - 0,27954 \sin^2 (\mu_1 \eta) \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

При $\eta = 1$ из (22) следует

$$\begin{aligned} &0,11869(b_k - b_0) \frac{h^2}{a} - 0,78868 \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \sqrt{\frac{h^2}{a}} + \left[(t_{\kappa k} - t_{nk}) + 0,17796 \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) \right] = \\ &= -\frac{1}{c_p \rho h} \left[-0,18643(S_k - S_0) \frac{h^2}{a} + 1,23886 \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) \sqrt{\frac{h^2}{a}} - 0,27954 \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Для номера $(k + 1)$ аналогично можно записать:

$$\begin{aligned} &0,11869(b_{k+1} - b_0) \frac{h^2}{a} - \\ &- 0,78868 \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \sqrt{\frac{h^2}{a}} + \left[(t_{\kappa k+1} - t_{nk+1}) + 0,17796 \sum_{i=1}^{k+1} (\tau_{k+1} - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) \right] = \\ &= -\frac{1}{c_p \rho h} \left[-0,18643(S_{k+1} - S_0) \frac{h^2}{a} + 1,23886 \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) \sqrt{\frac{h^2}{a}} - 0,27954 \sum_{i=1}^{k+1} (\tau_{k+1} - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

Выражения (23), (24) представляют собой систему двух уравнений относительно двух неизвестных: температуропроводности a и теплоемкости c_p .

Исключая множитель $\frac{1}{c_p \rho h}$, содержащий теплоемкость c_p , путем деления левых и правых частей уравнений (23) и (24) друг на друга и учитывая, что в начальный момент $\tau_0 = 0$, $S_0 = 0$, $b_0 = 0$,

после преобразований получим уравнение четвертой степени относительно \sqrt{a} :

$$\begin{aligned} & (\sqrt{a})^4 + h \frac{B_{kk+1}}{A_{kk+1}} (\sqrt{a})^3 + h^2 \frac{C_{kk+1}}{A_{kk+1}} (\sqrt{a})^2 + \\ & + h^3 \frac{D_{kk+1}}{A_{kk+1}} \sqrt{a} + h^4 \frac{E_{kk+1}}{A_{kk+1}} = 0, \end{aligned} \quad (25)$$

где коэффициенты имеют вид

$$\begin{aligned} A_{kk+1} = & 0,04975 \left[\sum_{i=1}^{k+1} (\tau_{k+1} - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) - \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) \sum_{i=1}^{k+1} (\tau_{k+1} - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) \right] + \\ & + 0,27954 \left[(t_{kk+1} - t_{nk+1}) \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) - (t_{kk} - t_{nk}) \sum_{i=1}^{k+1} (\tau_{k+1} - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) \right], \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} B_{kk+1} = & 0,22047 \left[\sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) - \right. \\ & - \sum_{i=1}^{k+1} (\tau_{k+1} - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) + \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \sum_{i=1}^{k+1} (\tau_{k+1} - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) - \\ & - \left. \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) \right] + \\ & + 1,23886 \left[(t_{kk} - t_{nk}) \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) - (t_{kk+1} - t_{nk+1}) \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) \right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} C_{kk+1} = & 0,03318 \left[S_{k+1} \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) - S_k \sum_{i=1}^{k+1} (\tau_{k+1} - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) \right] + \\ & + 0,18643 \left[S_{k+1} (t_{kk} - t_{nk}) - S_k (t_{kk+1} - t_{nk+1}) \right] - \\ & - 0,97706 \left[\sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) - \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) \right], \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} D_{kk+1} = & 0,14704 \left[b_k \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) - b_{k+1} \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) + \right. \\ & + S_k \sum_{i=1}^{k+1} \sqrt{\tau_{k+1} - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) - S_{k+1} \sum_{i=1}^k \sqrt{\tau_k - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \left. \right], \end{aligned} \quad (29)$$

$$E_{kk+1} = 0,02213(b_k S_{k+1} - b_{k+1} S_k). \quad (30)$$

Таким образом, начиная с номеров $k = 1$, $k + 1 = 2$ и заканчивая номерами $k = N - 1$, $k + 1 = N$, решается уравнение четвертой степени (25) и по полученным значениям температуропроводности a_{k+1}

отыскиваются средние (эффективные) на интервале $(0, \tau_{k+1})$ значения удельной теплоемкости c_{pk+1} и теплопроводности λ_{k+1} по формулам:

$$\begin{aligned} \lambda^v = & -h \frac{\left[-0,18643 S_v + 1,23886 \sqrt{\frac{a_v}{h^2}} \sum_{i=1}^v \sqrt{\tau_v - \tau_{i-1}} (S_i - S_{i-1}) - 0,27954 \frac{a_v}{h^2} \sum_{i=1}^v (\tau_v - \tau_{i-1})(S_i - S_{i-1}) \right]}{0,11869 b_v \frac{h^2}{a_v} - 0,78868 \sum_{i=1}^v \sqrt{\tau_v - \tau_{i-1}} (b_i - b_{i-1}) \sqrt{\frac{h^2}{a_v}} + \left[(t_{kv} - t_{nv}) + 0,17796 \sum_{i=1}^v (\tau_v - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) \right]}; \\ & v = k, k + 1; \lambda_{k+1} = 0,5(\lambda^k + \lambda^{k+1}); c_{pk+1} = \frac{\lambda_{k+1}}{\rho a_{k+1}}. \end{aligned} \quad (31)$$

Полученные значения a_{k+1} , c_{pk+1} , λ_{k+1} соответствуют диапазонам средней температуры образца и темпам ее изменения на интервалах $(0, \tau_{k+1})$, в том числе и на всем интервале испытаний $(0, \tau_K)$.

Для подтверждения достоверности изложенного метода использованы результаты испытаний на УЛН образцов композиционного теплозащитного материала ТМСЛ на основе кремний-органического связующего с наполнителем из кремнеземных сфер. Для ТМСЛ ранее, в том числе

и другими авторами, уже были получены значения теплофизических характеристик (табл. 2, [8]).

В табл. 3 и на рис. 3 приведены измеренные значения температуры поверхности слоя теплозащитного покрытия (ТЗП) образца со стороны крышки t_{ki} и со стороны подложки t_{pi} в моменты времени, выбранные авторами работы [8] для построения кусочно-линейной аппроксимации измеренной температуры поверхности и расчета теплового стока в подложку. Там же приведены измеренные значения температуры между подслоями теплозащитного материала (ТЗМ) t_{mi} .

Таблица 2

Теплофизические характеристики материала ТМСЛ (плотность $\rho = 530\text{—}560 \text{ кг/м}^3$)

Характеристика	Температура, К		
	323	523	723
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	0,105—0,121	0,119	0,124
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	1380	1500	1630

Таблица 3

Измеренные и расчетные значения температуры при испытаниях материала ТМСЛ

Номер узловой точки разбиения i	Время τ_i , с	t_{ki} , °C	t_{pi} , °C	b_i , К/с	S_i , Вт/м ²	Измеренная температура между подслоями ТЗМ, t_{mi} , °C	Расчетная температура между подслоями ТЗМ, t_{mpi} , °C
0	0	10,0	10,0	0,0	0,0	10,0	10,0
1	60	18,1	10,0	0,1350	0,0	13,9	11,8
2	100	179,7	12,4	4,0400	- 581,2	41,8	37,4
3	144	328,1	20,4	3,3727	- 1761,4	125,0	118,9
4	172	307,7	30,1	- 0,7286	- 3356,1	163,8	154,7
5	200	288,1	40,1	- 0,7000	- 3459,9	173,5	169,6
6	226	271,5	49,0	- 0,6385	- 3316,2	173,5	171,4
7	302	230,5	70,4	- 0,5395	- 2727,8	162,8	

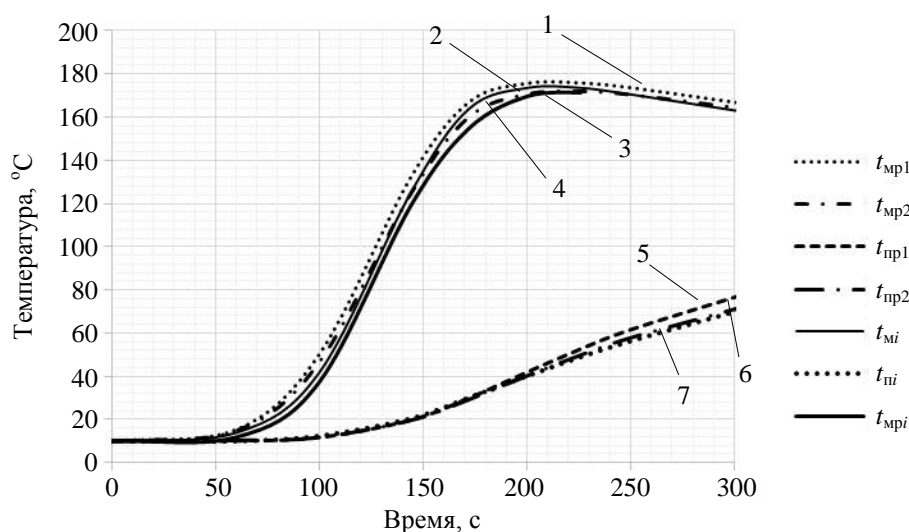


Рис. 3. Сравнение расчетных и измеренных значений температуры между подслоями ТЗМ (1—4) и подложки (5—7):

- 1 — расчет по ТФХ табл. 2 t_{mp1} , 2 — измеренная температура между слоями t_{mi} , 3 — расчет по формуле (22) t_{mpi} , 4 — расчет по полученным ТФХ t_{mp2} , 5 — расчет по ТФХ табл. 2 t_{pp1} , 6 — расчет по полученным ТФХ t_{pp2} , 7 — измеренная температура подложки t_{pi}

Если весь анализируемый период испытаний может быть разбит лишь на два интервала, например, вследствие малой теплопроводности материала при нормальной температуре и/или малой длительности испытаний, то уравнение (25) с коэффициентами, рассчитываемыми по формулам (26)—(30), применимо. При возможности разбить анализируемый период испытаний на три и более интервалов аппроксимирования должны быть выполнены условия:

$$Fo_{0k} = \frac{a(\tau_k - \tau_0)}{h^2} \leq 0,9,$$

$$k = 1, 2, \dots, N,$$

$$Fo_{i-li} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2} \geq 0,1.$$

Суммарная толщина двух подслоев ТЗМ образца составляла 5,9 мм, при этом толщина подслоя, примыкающего к крышке, составляла 3,0 мм, подслоя, примыкающего к подложке, — 2,9 мм. Расчет чисел Фурье с использованием значений ТФХ, приведенных в табл. 2, при выбранных в работе [8] интервалах времени показывает, что до номера $i = 5$ выполняются условия $Fo_{0k} = \frac{a(\tau_k - \tau_0)}{h^2} \leq 0,9$ и $0,1 \leq Fo_{i-li} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2}$, а при $i = 6$ эти условия при получаемых значениях ТФХ могут уже не выполняться. Соответственно для пяти интервалов ($i = 5$) можно применить уравнение (25). Если период остывания поверхности со 144 до 200 с аппроксимировать одним интервалом, как это было сделано в работе [5], то при $i = 4$ будет строка: $\tau_i = 200$ с, $t_{ki} = 288,1$ °С, $t_{wi} = 40,1$ °С, $b_i = -0,7143$ К/с, $S_i = -3408,0$ Вт/м². С использованием данных этой строки и строк табл. 3 до $i = 3$, принимая $i = 3 = k$, $i = 4 = k + 1$, были рассчитаны коэффициенты уравнения (25), которые составили значения:

$$A_{kk+1} = 21317802,8; B_{kk+1} = -11022193,7;$$

$$C_{kk+1} = 727089,0; D_{kk+1} = -3038,8;$$

$$E_{kk+1} = -282,2.$$

При установке термопар между крышкой и слоем ТЗМ, между подслоями ТЗМ и между ТЗМ и подложкой могут образовываться воздушные зазоры, которые снижают эффективную теплопроводность образцов [9]. Материал ТМСЛ относительно мягкий, и термопары вминались в материал

при сжатии слоев при сборке образцов, уплотнялись также и зазоры между поверхностью слоя материала и крышкой, между тыльной поверхностью материала и подложкой и между подслоями материала, вследствие чего суммарная толщина зазоров не превысила 0,2 мм. Соответственно конвективный теплообмен в зазорах отсутствовал. Согласно методу работы [9] при расчете первого приближения ТФХ влияние зазоров не учитывалось, то есть эквивалентная толщина слоя ТЗМ h_3 принималась равной суммарной толщине подслоев: $h_3 = h$. Соответственно показания термопары, установленной между подслоями ТЗМ, принимались за температуру на границе подслоев, а показания термопар, установленных между ТЗМ и подложкой и между крышкой и ТЗМ, вследствие большой теплопроводности спая и теплоизоляционных свойств материала ТМСЛ, принимались за значения температуры поверхностей крышки и подложки, то есть за значения температуры поверхности ТЗМ со стороны крышки и поверхности ТЗМ, примыкающей к подложке.

Первое приближение ТФХ составило значения: $a_{k+1} = 1,369 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_{k+1} = 0,142$ Вт/мК, $c_{pk+1} = 2100$ Дж/кгК (при использовании фактической плотности материала образца $\rho = 494$ кг/м³). При последующих итерациях была получена эквивалентная толщина слоя ТЗП, составившая $h_3 = 6,37$ мм, и соответствующие этому приближению корень уравнения (25), равный с погрешностью не более 1 % $\sqrt{a_{k+1}} = 0,3975 \cdot 10^{-3}$ м/ $\sqrt{с}$ ($a_{k+1} = 1,58 \cdot 10^{-7}$ м²/с), и значения $\lambda_{k+1} = 0,1$ Вт/(м·К), $c_{pk+1} = 1280$ Дж/(кг·К).

В формулы расчета температуропроводности и теплопроводности (25)—(31) плотность не входит, но при пересчете полученного значения $a = 1,58 \cdot 10^{-7}$ м²/с с учетом возможных разбросов плотности 2,83 % (см. табл. 2) температуропроводность может иметь значения от $a = 1,5365 \cdot 10^{-7}$ м²/с до $a = 1,6247 \cdot 10^{-7}$ м²/с. При этом диапазон значений температуры по времени и по толщине образца, при которых рассчитаны коэффициенты уравнения (25), составляет от 283 до 605,1 К. Рассчитанные по данным табл. 2 значения температуропроводности в диапазоне температуры от 323 до 723 К с учетом разброса плотности составляют от $a = 1,358 \cdot 10^{-7}$ до $a = 1,654 \cdot 10^{-7}$ м²/с, т. е. полученное из решения уравнения (25) значение температуропроводности согласуется со значениями, полученными другими авторами. Соответствующие полученному значению температуропроводности $a = 1,58 \cdot 10^{-7}$ м²/с значение теплопроводности $\lambda_{k+1} = 0,1$ Вт/(м·К) и рассчитанное с

использованием фактической плотности материала образца $\rho = 494 \text{ кг/м}^3$ значение теплоемкости $c_{pk+1} = 1280 \text{ Дж/(кг·К)}$ на 18 и 15,8 % меньше средних значений, рассчитанных по данным, приведенным в табл. 2 (в диапазоне температуры до 605 К). Меньшее значение теплопроводности объясняется меньшим значением фактической плотности материала $\rho = 494 \text{ кг/м}^3$ образца по сравнению с паспортной $\rho = 530\text{—}560 \text{ кг/м}^3$. Меньшее значение теплопроводности объясняется меньшим значением фактической плотности материала $\rho = 494 \text{ кг/м}^3$ образца по сравнению с паспортной $\rho = 530\text{—}560 \text{ кг/м}^3$. Соответственно в материале образца было повышенное содержание полых стеклянных сфер, имеющих более низкие значения плотности, теплопроводности и теплоемкости по сравнению с кремнийорганическим связующим.

С использованием полученных эффективных значений $\lambda_{k+1} = 0,1 \text{ Вт/(м·К)}$, $c_{pk+1} = 1280 \text{ Дж/(кг·К)}$, значения плотности $\rho = 494 \text{ кг/м}^3$, а также зависимостей ТФХ от температуры, приведенных в табл. 2, и номинального значения плотности $\rho = 545 \text{ кг/м}^3$ по апробированной программе численного решения задачи теплопроводности проведены расчеты температурных режимов образца при граничных условиях первого рода, в качестве которых использовали значения температуры крышки, приведенные в табл. 3. Результаты расчетов в сравнении с результатами измерений представлены на рис. 3. Видно, что результаты расчетов с использованием полученных эффективных характеристик удовлетворительно согласуются с результатами измерений и с результатами, рассчитанными с использованием данных других авторов.

С использованием полученного значения температуропроводности $a = 1,514 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ были проведены также расчеты температуры между подслоями ТЗМ t_{mri} по формуле (22) (безразмерные координаты границы подслоев, рассчитанные с учетом и без учета влияния зазоров примерно одинаковы и равны $\eta \approx 0,508$).

При значениях времени, больших 226 с, температуру между подслоями ТЗМ t_{mri} не рассчитывал, так как далее уже не выполняется условие

$$Fo_{0k} = \frac{a(\tau_k - \tau_0)}{h^2} \leq 0,9.$$

Видно, что согласование значений, полученных по формуле (22), с измеренными значениями удовлетворительное, что подтверждает также применимость представленного в работах [5, 8] аппроксимационно-суперпозиционного метода.

Таким образом, представлен приближенный аналитический метод решения обратной задачи теплопроводности по определению эффективных значений теплофизических характеристик низко-теплопроводных материалов по результатам измерений температуры на внешней и внутренней поверхностях образцов: температуропроводности, коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голованов А. Н., Кузин А. Я. Восстановление эффективных коэффициентов теплопроводности углепластиковых материалов в условиях теплового нагружения от плазменной струи // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 4(12). С. 83—89.
2. Алифанов О. М., Колесников В. А. Определение элементов тензора теплопроводности анизотропных материалов из решения обратной задачи // Труды МАИ. 2012. Вып. № 58. www.mai.ru/science/trudy/
3. Алифанов О. М., Черепанов В. В. Методы исследования и прогнозирования свойств высокопористых теплозащитных материалов. — М.: МАИ. 2014. — 264 с.
4. Туголуков Е. Н., Карпук В. А., Рухов А. В. Решение обратных задач теплопроводности для многослойных тел канонической формы // Вестник ТГТУ. 2013. Т. 19. № 3. С. 577—583.
5. Усов А. Т. Приближенные методы расчета температур нестационарно нагреваемых твердых тел простой формы. — М.: Машиностроение, 1973. — 108 с.
6. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. — М.: Энергия, 1976. — 352 с.
7. Костин Г. Ф. Способы решения задач теплопроводности на основе общефизических принципов: учеб. пособие Миасский филиал ФГБОУ ВО "ЧелГУ". — Челябинск: Челяб. гос. ун-т, 2018. — 187 с.
8. Костин Г. Ф., Калашников С. Т., Гусев В. В. и др. Применение аппроксимационно-суперпозиционного метода для восстановления теплофизических характеристик материалов по результатам тепловых испытаний // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 1. С. 37—42.
9. Костин Г. Ф., Калашников С. Т., Гусев В. В. Инженерный аналитический метод определения теплофизических характеристик материалов по результатам тепловых испытаний // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 3. С. 39—48.

Analytical method to define thermal and physical properties of low thermoconductive materials at various heating rates

G. F. KOSTIN, S. T. KALASHNIKOV

South Ural Federal Scientific Centre of Minerology and Eco-Geology of the Ural Division of RAS,
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

V. V. GUSEV

Joint Stock Company "Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre",
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

An approximate analytical solution for intensive heating of flat samples of materials in thermal testing, used to define effective thermal and physical properties of materials under resulted temperatures taken on surfaces of the samples, is framed in the paper based on analytical solutions of a problem of the determination of heat conductivity of an unbounded plate. The problem solution is written as a sum of solutions of two problems with boundary conditions actualized in the testing on surfaces of samples in zero-conditions, in each of the problems on countersurfaces. At Fourier numbers exceeding 1/10th, one can neglect to a certain accuracy infinitive series entering into analytical solutions, except two first terms. The article proposes an approximate dependence for an exponent entering the first terms that let us to get a biquadratic, if inserted into the obtained solution; the biquadratic coefficients are defined using temperatures taken on inner and outer surfaces of samples for two successive key time moments. The biquadratic root gives an effective thermal diffusivity used further to determine effective specific heat and a thermal conductivity coefficient of a testing material corresponding to a range of temperatures and heat rates within the intervals.

Keywords: solutions of a heat conductivity problem, thermal and physical properties, thermal testing, inverse problems of heat conductivity.

Идентификация характеристик рассеяния энергии однонаправленных слоев по характеристикам рассеяния энергии многослойных композитных материалов

Л. П. ТАИРОВА, канд. техн. наук

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

Представлено решение задачи определения характеристик диссипации энергии слоя по экспериментальным значениям характеристик диссипации энергии композитных материалов (КМ) с различными схемами армирования с использованием метода идентификации. В качестве модели рассеяния энергии в КМ при колебаниях использована энергетическая структурно-феноменологическая модель Зиновьева-Ермакова. Использование процедуры идентификации всех характеристик слоя по результатам наиболее технически простых испытаний КМ с различными схемами армирования дает заметные преимущества, которые продемонстрированы при анализе экспериментальных данных для углепластика. Предлагаемый метод позволяет проанализировать устойчивость вычисленных значений характеристик слоев к случайным отклонениям в экспериментально определенных исходных данных.

Ключевые слова: композиционные материалы, рассеяние (диссипация) энергии, идентификация, эксперимент, образцы-полоски, углепластик.

Все материалы и конструкции даже при весьма малых циклических деформациях обнаруживают способность к необратимому рассеянию энергии. Такая способность обеспечивает постепенное уменьшение амплитуды свободных колебаний, ограничивает амплитуду колебаний на резонансных частотах. Актуальность исследования характеристик рассеяния энергии композитов сохраняется в течение многих лет, несмотря на большое количество работ, посвященных этой тематике [1—5]. Это связано с необходимостью защиты от шума и вибраций, например, полезного груза в ракетной технике и салонов самолетов, где широко используют композитные материалы.

Существует ряд альтернативных подходов к описанию диссипативных свойств твердых тел. Так, весьма популярны вязкоупругие модели. В развитии этого подхода существенную роль сыграли соображения формального удобства. Действительно, представляется вполне естественным использовать "пустующее" в уравнениях движения место перед членом, содержащим первую производную по времени (скорость) для введения неких материальных констант, имеющих диссипативный смысл. Однако установлено, что зависимость диссипативного поведения от частоты колебаний,

характерная для этой модели, не свойственна большинству конструкционных материалов. Экспериментальные данные о диссипативном поведении КМ также свидетельствуют о том, что характеристики демпфирования значительной части этих материалов практически не зависят от частоты [1, 2].

Широкое распространение получил так называемый энергетический метод описания демпфирования при колебаниях механических систем. Суть этого приближенного метода заключается в том, что сохраняется линейная зависимость между напряжениями и деформациями, но наряду с упругими константами материала вводятся, как независимые, диссипативные константы. Эти константы (например, декременты колебаний или коэффициенты диссипации) являются интегральными, энергетическими показателями процесса. Они не связаны с конкретной формой петли гистерезиса и не требуют ее экспериментального определения. Энергетический метод является, в некотором смысле, наиболее общим феноменологическим методом, так как непосредственно оперирует с рассеянной энергией и не связывает ее с каким-либо конкретным внутренним механизмом.

Для многослойных КМ основой модели является гипотеза о том, что потери энергии при колебаниях в тонком ортотропном слое являются суперпозицией потерь энергии при трех простейших видах колебаний этого слоя: вдоль осей ортотропии и при сдвиге в плоскости слоя. Для этих форм колебаний введены и количественные характеристики потерь энергии — три коэффициента ψ_i ($i = 1, 2, 3$).

Таирова Людмила Павловна, старший научный сотрудник.
E-mail: com-or@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.

© Таирова Л. П., 2022

Полная трехмерная энергетическая модель применительно к анизотропным телам и композитам построена в [1, 2]. Так, в случае ортотропного тела, подверженного циклическому нагружению общего вида, его диссипативные свойства характеризуются девятью (а в случае плоского напряженного состояния — четырьмя) независимыми константами. Используем эту модель.

Наиболее распространенным видом слоев, из которых состоит многослойный КМ, являются однонаправленные, т. е. с одинаковым направлением волокон в слое, но могут быть и слои из ткани, с двумя взаимно перпендикулярными направлениями волокон. Далее будем рассматривать однонаправленные слои (ОС), как составляющие элементов многослойного КМ, но все соотношения останутся справедливы и для другого вида ортотропного слоя.

Цель работы — детальное изучение процедуры идентификации характеристик демпфирования ОС по результатам экспериментов, проведенных с многослойными КМ, содержащими эти слои. Эта задача весьма актуальна, причем не только для характеристик диссипации энергии, но и для характеристик упругости, прочности, термоупругости и других, являющихся исходными данными при проектировании конструкций из многослойных КМ. Непосредственное экспериментальное определение таких характеристик часто приводит в существенным техническим трудностям и снижает их достоверность по сравнению со значениями, вычисленными при решении задачи идентификации по характеристикам многослойных КМ [6—9].

Предлагаемый алгоритм идентификации достаточно традиционен (например, [8, 9]) и основан на минимизации суммы квадратов отклонений расчетных и экспериментальных значений характеристик диссипации многослойных пакетов. Особенностью данной работы являются:

- применение алгоритма идентификации для определения всех необходимых при расчете диссипации энергии в многослойных КМ характеристик ОС для полной энергетической модели;
- применение численного эксперимента в качестве инструмента для анализа достоверности решения задачи идентификации (влияния случайных отклонений в исходных данных на искомые характеристики диссипации слоев);
- демонстрация возможностей алгоритма идентификации по определению всех необходимых в предлагаемой модели диссипативных характеристик по результатам простейших в техническом отношении испытаний;
- демонстрация возможностей численного эксперимента для выбора наиболее подходящих схем

армирования и количества образцов, позволяющих обеспечить достоверное определение 4 характеристик диссипации ортотропного ОС.

В работе приведены результаты экспериментального определения характеристик диссипации многослойных пакетов из углепластика и результаты идентификации характеристик диссипации ОС этого углепластика. Для экспериментального определения характеристик диссипации (ХД) энергии углепластика использован метод свободных затухающих колебаний образцов-полосок исследуемого материала [10]. Определен логарифмический декремент колебаний, через который выражаются используемые в модели ХД.

Для решения задачи идентификации ХД требуется знание и характеристик упругости слоя рассматриваемого материала. Наиболее удобно определить вначале характеристики упругости тех же образцов, на которых определены ХД, а затем решить задачу идентификации характеристик упругости слоя [8].

Энергетическая модель диссипации энергии многослойного композитного материала

Основные соотношения

Наиболее распространенной моделью КМ является пакет ортотропных ОС, которые при деформировании не проскальзывают друг относительно друга, т. е. при плоском напряженном состоянии деформации всех слоев относительно общей оси постоянны, а сумма нагрузок в слоях равна равнодействующей нагрузке. Оси ортотропии i -го слоя $1_i, 2_i$ повернуты относительно общих осей пакета X, Y на угол α_i . Рассмотрим плоское напряженное состояние пакета.

Для описания энергии диссипации в анизотропном твердом теле при циклическом нагружении примем следующие гипотезы:

- связь напряжений и деформаций — в соответствии с законом Гука; для многослойного пакета этот закон имеет вид:

$$\{\sigma_\Sigma\} = [G_\Sigma]\{\varepsilon_\Sigma\} \quad (1)$$

или

$$\{\varepsilon_\Sigma\} = [S_\Sigma]\{\sigma_\Sigma\}, \quad (2)$$

где $[G_\Sigma]$ — матрица жесткости;
 $[S_\Sigma]$ — матрица податливости;
 $\{\sigma_\Sigma\}, \{\varepsilon_\Sigma\}$ — векторы-столбцы средних напряжений и деформаций пакета;

- нагружение осуществляется по симметричным моногармоническим циклам так что σ_j и ε_j ($j \rightarrow x, y, xy$) в уравнениях (1, 2) являются амплитудными значениями компонентов тензоров напряжений и деформаций за цикл нагружения;

- рассматривается только амплитудно-независимое внутреннее трение.

Обычно рассеяние энергии в твердых телах характеризуется относительным рассеянием энергии ψ^* (коэффициентом диссипации), который определяется как отношение потерь энергии ΔW в единичном объеме тела к амплитудному значению упругой энергии W (при заданном напряженном состоянии),

$$\psi^* = \frac{\Delta W}{W}.$$

Амплитудное значение упругой энергии имеет вид

$$W = \frac{1}{2} \{ \sigma_\Sigma \}^T [S_\Sigma] \{ \sigma_\Sigma \},$$

где для общего случая анизотропии:

$$[S_\Sigma] = \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xy} & s_{xt} \\ s_{xy} & s_{yy} & s_{yt} \\ s_{xt} & s_{yt} & s_{tt} \end{bmatrix}; \{ \sigma_\Sigma \} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix};$$

T — транспонирование.

Амплитудно-независимое внутреннее трение в многослойном КМ (пакете) может быть описано с помощью следующего соотношения для потерь энергии в единице площади пакета во время полного цикла нагружения

$$\Delta W = \frac{1}{2} \{ \sigma_\Sigma \}^T [\Psi_\Sigma] \{ \sigma_\Sigma \}, \quad (3)$$

где (в случае общего типа анизотропии и плоского напряженного состояния)

$$[\Psi_\Sigma] = \begin{bmatrix} \psi_{xx} & \psi_{xy} & \psi_{xt} \\ \psi_{xy} & \psi_{yy} & \psi_{yt} \\ \psi_{xt} & \psi_{yt} & \psi_{tt} \end{bmatrix} \text{ — матрица упруго-диссипативных характеристик (УДХ) пакета.}$$

Диссипативные свойства ортотропного слоя в рассматриваемой модели описываются с помощью четырех независимых характеристик диссипации. Они могут быть представлены в виде следующей матрицы УДХ слоя (матрица записана относительно осей ортотропии слоя):

$$[\Psi_0] = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & 0 \\ \psi_{12} & \psi_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \psi_{66} \end{bmatrix}.$$

Матрица податливости слоя относительно осей ортотропии

$$[S_0] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & 0 \\ s_{12} & s_{22} & 0 \\ 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix}.$$

Потери энергии в пакете КМ при циклическом нагружении равны сумме потерь энергии в составляющих пакет слоях (полагаем, что все слои изготовлены из одного и того же материала). Тогда потери энергии в пакете в виде прямоугольного параллелепипеда единичной площади могут быть представлены следующим образом [1]:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \{ \bar{\sigma}^{(i)} \}^T [\bar{\Psi}^{(i)}] \{ \bar{\sigma}^{(i)} \}. \quad (4)$$

Здесь $\{ \bar{\sigma}^{(i)} \}$ — вектор-столбец амплитудных значений напряжений в i -м слое относительно осей пакета, $[\bar{\Psi}^{(i)}]$ — матрица УДХ этого слоя относительно осей пакета.

При повороте осей координат рассматриваемые величины преобразуются следующим образом [1]:

$$\{ \bar{\sigma}^{(i)} \} = [T_1^{(i)}] \{ \sigma^{(i)} \}, \quad (5)$$

$$[\bar{\Psi}^{(i)}] = [T_2^{(i)}] [\Psi_0] [T_2^{(i)}]^T,$$

где

$$[T_1^{(i)}] = \begin{bmatrix} c_i^2 & s_i^2 & -2s_i c_i \\ s_i^2 & c_i^2 & 2s_i c_i \\ s_i c_i & -s_i c_i & c_i^2 - s_i^2 \end{bmatrix},$$

$$[T_2^{(i)}] = \begin{bmatrix} c_i^2 & s_i^2 & -s_i c_i \\ s_i^2 & c_i^2 & s_i c_i \\ 2s_i c_i & -2s_i c_i & c_i^2 - s_i^2 \end{bmatrix},$$

где $c_i = \cos \alpha_i$, $s_i = \sin \alpha_i$, α_i — угол поворота осей слоя относительно осей пакета, $\{ \sigma^{(i)} \}$; $[\Psi_0]$ — вектор-столбец напряжений и матрица УДХ i -го слоя относительно осей ортотропии слоя; T_1 и T_2 — матрицы преобразования векторов и тензоров при повороте осей координат.

Потери энергии в рассматриваемом пакете единичной площади определяются через интегральные (средние) УДХ пакета по формуле (5). В соответствии с принятыми гипотезами деформирования пакета

$$\{ \sigma_\Sigma \} = \sum_{i=1}^I \bar{h}_i [\bar{\sigma}^{(i)}], \{ \varepsilon_\Sigma \} = \{ \bar{\varepsilon}^{(i)} \},$$

где $\bar{h}_i = h_i/H$, h — толщина i -го слоя, H — общая толщина пакета; $\{ \varepsilon_\Sigma \}$, $\{ \bar{\varepsilon}^{(i)} \}$ — деформации пакета и i -го слоя относительно осей пакета.

Запишем закон Гука для пакета и i -го слоя:

$$\{\sigma_\Sigma\} = [G_\Sigma] \{\varepsilon_\Sigma\}, \quad \{\bar{\sigma}^{(i)}\} = [\bar{G}^{(i)}] \{\bar{\varepsilon}^{(i)}\}, \quad (6)$$

где $[G_\Sigma]$ и $[\bar{G}^{(i)}]$ — матрицы жесткости пакета и слоя относительно осей пакета;

$$[\bar{G}^{(i)}] = [T_1^{(i)}] [G_0] [T_1^{(i)}]^T, \quad (7)$$

$$[G_0] = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & 0 \\ g_{12} & g_{22} & 0 \\ 0 & 0 & g_{66} \end{bmatrix} \text{ — матрица жесткости слоя}$$

относительно осей ортотропии.

Теперь из условия равенства потерь энергии в формулах (3) и (4), с учетом (6), (7) и связи между матрицами жесткости и податливости $[G_\Sigma] = [S_\Sigma]^{-1}$ формула для матрицы УДХ многослойного пакета имеет вид:

$$[\psi_\Sigma] = [S_\Sigma] \left(\sum_{i=1}^I \bar{h}_i [\bar{G}^{(i)}] [\bar{\psi}^{(i)}] [\bar{G}^{(i)}] \right) [S_\Sigma]. \quad (8)$$

Перепишем (8), заменив матрицы жесткости и УДХ слоев, записанные относительно осей пакета, на соответствующие матрицы, записанные относительно осей ортотропии каждого слоя в соответствии с (5) и (7):

$$[\psi_\Sigma] = [S_\Sigma] \left(\sum_{i=1}^I \bar{h}_i [T_1^{(i)}] [G_0^{(i)}] [T_1^{(i)}]^T [T_2^{(i)}] \times \right. \\ \left. \times [\psi_0^{(i)}] [T_2^{(i)}]^T [T_1^{(i)}] [G_0^{(i)}] [T_1^{(i)}]^T \right) [S_\Sigma]. \quad (9)$$

Между матрицами преобразования тензоров при повороте осей координат существует связь

$$[T_2]^T = [T_1]^{-1}, \quad [T_1]^T = [T_2]^{-1}. \quad (10)$$

Соотношение (9) с учетом (10) имеет вид:

$$[\psi_\Sigma] = [S_\Sigma] \times \\ \times \left(\sum_{i=1}^I \bar{h}_i [T_1^{(i)}] [G_0^{(i)}] [\psi_0^{(i)}] [G_0^{(i)}] [T_1^{(i)}]^T \right) [S_\Sigma]. \quad (11)$$

Соотношение (11) показывает, что модель позволяет описать процесс диссипации энергии в любом многослойном КМ, если известны упруго-диссипативные свойства составляющих его слоев.

Введем следующие технические постоянные диссипации (ТПД) ортотропного пакета

$$\psi_x^* = \frac{\Psi_{xx}}{s_{xx}} \text{ — при } \sigma_x \neq 0, \text{ остальные напряжения равны нулю;} \quad (12)$$

$$\psi_y^* = \frac{\Psi_{yy}}{s_{yy}} \text{ — при } \sigma_y \neq 0, \text{ остальные напряжения равны нулю;} \quad (13)$$

$$\psi_t^* = \frac{\Psi_{tt}}{s_{tt}} \text{ — при } \tau_{xy} \neq 0 \text{ остальные напряжения равны нулю;} \quad (14)$$

$$\psi_{xy}^* = \frac{\Psi_{xx} + 2\Psi_{xy} + \Psi_{yy}}{s_{xx} + 2s_{xy} + s_{yy}} \text{ — при } \sigma_x = \sigma_y \neq 0, \tau_{xy} = 0. \quad (15)$$

ТПД ψ_1^* , ψ_2^* , ψ_6^* , ψ_{12}^* слоя могут быть определены по (12)—(15) при замене $x \rightarrow 1$, $y \rightarrow 2$, $t \rightarrow 6$.

Из соотношений (12)—(15) легко выразить УДХ через ТПД и элементы матриц податливости. Из этих соотношений следует, что ТПД слоя и ортотропного пакета могут быть экспериментально определены с использованием трех методов циклического нагружения:

1. одноосного нагружения образцов вдоль двух осей ортотропии;
2. нагружения чистым сдвигом относительно осей ортотропии;
3. двухосным пропорциональным нагружением относительно осей ортотропии.

Очевидно, что только метод 1 легко реализуем технически. Метод 2 значительно более сложен, хотя может быть осуществлен для трубчатых образцов, для плоских образцов не позволяет определить ТПД с удовлетворительной точностью. Метод 3 очень трудно реализуем. Поэтому важна задача идентификации всех характеристик диссипации по результатам простейших испытаний.

Преобразования основных соотношений для задачи идентификации

Рассмотрим N различных пакетов, слои которых состоят из одного и того же материала. Запишем ТПД слоя в виде вектора столбца

$$\{P_\psi^0\} = \{\psi_1^*, \psi_2^*, \psi_6^*, \psi_{12}^*\}^T,$$

а УДХ слоя — в виде вектора-столбца

$$\{P_{m\psi}^0\} = \{\psi_{11}, \psi_{22}, \psi_{66}, \psi_{12}\}^T. \quad (16)$$

Тогда в соответствии с (12)—(15)

$$\{P_{m\psi}^0\} = [A_1] \{P_\psi^0\},$$

где

$$[A_1] = \begin{bmatrix} s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{66} & 0 \\ -\frac{1}{2}s_{11} & -\frac{1}{2}s_{22} & 0 & \frac{1}{2}(s_{11} + s_{22}) + s_{12} \end{bmatrix}.$$

Запишем УДХ для рассматриваемых N ортотропных пакетов как вектор-столбец

$$\{P_{m\psi}^{\Sigma}\} = \{\psi_{xx}^{(1)}, \psi_{yy}^{(1)}, \psi_{tt}^{(1)}, \psi_{xy}^{(1)}, \dots, \psi_{xx}^{(N)}, \psi_{yy}^{(N)}, \psi_{tt}^{(N)}, \psi_{xy}^{(N)}\}^T. \quad (17)$$

Запишем ТПД для рассматриваемых N ортотропных пакетов как следующий вектор-столбец

$$\{P_{\psi}^{\Sigma}\} = \{\psi_x^{*(1)}, \psi_y^{*(1)}, \psi_t^{*(1)}, \psi_{xy}^{*(1)}, \dots, \psi_x^{*(N)}, \psi_y^{*(N)}, \psi_t^{*(N)}, \psi_{xy}^{*(N)}\}^T.$$

Теперь мы можем записать в соответствии с (12)—(15):

$$\{P_{\psi}^{\Sigma}\} = [A_3] \{P_{m\psi}^{\Sigma}\},$$

где $[A_3]$ — блочно-диагональная матрица

$$[A_3] = \begin{bmatrix} A_3^{(1)} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & A_3^{(n)} & \dots \\ 0 & \dots & A_3^{(N)} \end{bmatrix},$$

$$A_3^{(n)} = \begin{bmatrix} (s_{xx}^{(n)})^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (s_{yy}^{(n)})^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (s_{tt}^{(n)})^{-1} & 0 \\ (s_{xx}^{(n)} + s_{yy}^{(n)} + 2s_{xy}^{(n)})^{-1} & (s_{xx}^{(n)} + s_{yy}^{(n)} + 2s_{xy}^{(n)})^{-1} & 0 & 2(s_{xx}^{(n)} + s_{yy}^{(n)} + 2s_{xy}^{(n)})^{-1} \end{bmatrix}.$$

С учетом введенных обозначений УДХ слоев (16) и пакетов (17) формула (11) может быть записана как

$$\{P_{m\psi}^{\Sigma}\} = [A_2] \{P_{m\psi}^0\},$$

где

$$[A_2] = [A_6] [A_5] [A_4],$$

$$[A_4] = \begin{bmatrix} (g_{11})^2 & 2g_{11}g_{12} & (g_{12})^2 & 0 \\ (g_{12})^2 & 2g_{12}g_{22} & (g_{22})^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (g_{66})^2 \\ g_{11}g_{12} & g_{11}g_{22} - (g_{12})^2 & g_{12}g_{22} & 0 \end{bmatrix},$$

$[A_5]$ — матрица, состоящая из $4N$ строк и 4 столбцов:

$$[A_5] = \begin{bmatrix} A_5^{(1)} \\ A_5^{(2)} \\ \dots \\ A_5^{(N)} \end{bmatrix},$$

$$[A_5^{(n)}] = \sum_{i=1}^{I_n} \bar{h}_{in} \begin{bmatrix} c_{in}^4 & 2s_{in}^2 c_{in}^2 & s_{in}^4 & 4s_{in}^2 c_{in}^2 \\ s_{in}^4 & 2s_{in}^2 c_{in}^2 & c_{in}^4 & 4s_{in}^2 c_{in}^2 \\ s_{in}^2 c_{in}^2 & (s_{in}^4 + c_{in}^4) & s_{in}^2 c_{in}^2 & -4s_{in}^2 c_{in}^2 \\ s_{in}^2 c_{in}^2 & -2s_{in}^2 c_{in}^2 & s_{in}^2 c_{in}^2 & (s_{in}^2 - c_{in}^2)^2 \end{bmatrix},$$

где $s_{in} = \sin \alpha_{in}$, $c_{in} = \cos \alpha_{in}$, α_{in} — угол между осью 01 i -го слоя и осью 0X в n -м пакете, I_n — количество слоев в n -м пакете.

$[A_6]$ — блочно-диагональная матрица, имеющая $4N$ строк и $4N$ столбцов,

$$[A_6] = \begin{bmatrix} A_6^{(1)} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & A_6^{(n)} & \dots \\ 0 & \dots & \dots & A_6^{(N)} \end{bmatrix},$$

$$A_6^{(n)} = \begin{bmatrix} (s_{xx}^{(n)})^2 & (s_{xy}^{(n)})^2 & 2s_{xx}^{(n)} s_{xy}^{(n)} & 0 \\ (s_{xy}^{(n)})^2 & (s_{yy}^{(n)})^2 & 2s_{xy}^{(n)} s_{yy}^{(n)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (s_{tt}^{(n)})^2 \\ s_{xx}^{(n)} s_{xy}^{(n)} & s_{xy}^{(n)} s_{yy}^{(n)} & s_{xx}^{(n)} s_{yy}^{(n)} + (s_{xy}^{(n)})^2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\{P_{\psi}^{\Sigma}\} = [A_1] [A_2] [A_3] \{P_{\psi}^0\} = [A] \{P_{\psi}^0\}. \quad (18)$$

Таким образом, формула (18) показывает, что можно определить все характеристики диссипации любого пакета по известным характеристикам упругости и параметрам структуры слоев, составляющих этот пакет. Это значит, что любые УДХ и ТПД пакета включают в себя информацию о УДХ и ТПД слоев этого пакета. Таким образом, можно определить экспериментально ТПД пакетов с различными схемами армирования и по ним вычислить УДХ и ТПД слоев этих пакетов. Это вычисление может быть выполнено при решении задачи идентификации УДХ и ТПД слоев по ТПД пакетов, причем можно использовать только те ТПД пакетов, которые легко определить экспериментально.

Алгоритм идентификации позволяет максимально эффективно использовать все имеющиеся экспериментальные значения ТПД пакетов с разными схемами армирования для определения характеристик диссипации слоев и таким образом уменьшить влияние случайных погрешностей экспериментального определения отдельных УДХ за

счет использования избыточной экспериментальной информации при определении УДХ слоев. Это важно, т. к. точность прогнозирования рассеяния энергии в пакетах с любыми схемами армирования непосредственно зависит от точности определения коэффициентов диссипации слоев. Определение коэффициентов диссипации слоев по результатам испытаний композитов с разными схемами армирования позволяет учесть неизбежное изменение характеристик слоев, изготовленных в составе таких материалов, в сравнении с композитом, у которого все волокна уложены в одном направлении (как в отдельном слое).

Формулировка и решение задачи идентификации

Алгоритм идентификации

В задачах идентификации характеристики слоев являются искомыми характеристиками, а характеристики пакетов — заданными (экспериментально определенными) [8, 9]. При этом могут быть известны не все характеристики для каждого из рассматриваемых пакетов.

Представим заданные ТПД пакетов в виде вектора-столбца $\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^3$. Здесь индекс "э" означает "экспериментальные значения". Этому вектору может быть поставлен в соответствие вектор расчетных значений ТПД пакетов $\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^p$ (р — расчетные значения).

$$\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^p = [\hat{\mathbf{A}}] \{P_{\psi}^0\} \quad (19)$$

где $[\hat{\mathbf{A}}]$ — матрица, включающая в себя те строки матрицы $[\mathbf{A}]$ (18), которые соответствуют заданным ТПД. Матрица $[\hat{\mathbf{A}}]$ имеет L строк и 4 столбца, где L — количество заданных ТПД. Следует заметить, что L должно быть больше, чем 4, иначе задача идентификации не имеет смысла (число заданных характеристик должно быть больше числа искоемых характеристик).

Задача идентификации таких значений ТПД слоев $\{P_{\psi}^0\}$, которые обеспечивают наилучшее соответствие между вычисленными по ним в соответствии с (19) ТПД пакетов $\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^p$ и экспериментально определенными значениями УДХ пакетов $\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^3$.

Математическая формулировка этой задачи — определить такие значения компонентов вектора $\{P_{\psi}^0\}$, которые обеспечивают минимум функции цели $F\left(\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^3, \{P_{\psi}^{\Sigma}\}^p\right)$. Эта функция цели должна соответствовать следующим условиям:

$$\lim(F) = 0 \text{ при } \left(\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^3 - \{P_{\psi}^{\Sigma}\}^p\right) \rightarrow 0$$

$$F > 0, \text{ если } \{P_{\psi}^{\Sigma}\}^3 \neq \{P_{\psi}^{\Sigma}\}^p.$$

В работе задача идентификации решена для двух вариантов функции цели F , удовлетворяющих сформулированным выше условиям:

$$F_I = \sum_{j=1}^L \left[\left(p_j^{\Sigma} \right)^3 - \left(p_j^{\Sigma} \right)^p \right]^2 = \left\| \{P_{\psi}^{\Sigma}\}^3 - \{P_{\psi}^{\Sigma}\}^p \right\|^2$$

$$F_{II} = \sum_{j=1}^L \left[1 - \left(p_j^{\Sigma} \right)^p / \left(p_j^{\Sigma} \right)^3 \right]^2, \quad (20)$$

где $\left(p_j^{\Sigma} \right)^p$ и $\left(p_j^{\Sigma} \right)^3$ — компоненты векторов $\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^p$ и $\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^3$ соответственно. При этом использование F_I позволяет определить ТПД слоев, обеспечивающие минимум суммы квадратов абсолютных невязок расчетных и экспериментальных значений ТПД пакетов, а использование F_{II} — обеспечивающие минимум суммы квадратов относительных невязок этих же характеристик.

Для обоих вариантов решение задачи идентификации сводится к вычислению матрицы, являющейся псевдообратной по отношению к матрице $[\hat{\mathbf{A}}]$ (вариант I), либо по отношению к матрице $[\tilde{\mathbf{A}}]$ (вариант II). Элементы последней матрицы $[\tilde{\mathbf{A}}]$ выражаются через элементы матрицы $[\hat{\mathbf{A}}]$ следующим образом:

$$\tilde{a}_{ij} = \hat{a}_{ij} / \left(p_i^{\Sigma} \right)^3 \quad (i = 1, 2, \dots, L; j = 1, 2, \dots, 4).$$

Искомые псевдообратные матрицы могут быть определены с помощью следующих соотношений [11]:

$$[\hat{\mathbf{A}}]^+ = \left([\hat{\mathbf{A}}]^T [\hat{\mathbf{A}}] \right)^{-1} [\hat{\mathbf{A}}]^T, \quad (21)$$

$$[\tilde{\mathbf{A}}]^+ = \left([\tilde{\mathbf{A}}]^T [\tilde{\mathbf{A}}] \right)^{-1} [\tilde{\mathbf{A}}]^T.$$

При этом искомые характеристики будут иметь следующий вид

$$\{P_{\psi}^0\}^I = [\hat{\mathbf{A}}]^+ \{P_{\psi}^{\Sigma}\}^{\circ}, \quad \{P_{\psi}^0\}^{II} = [\tilde{\mathbf{A}}]^+ \{E\},$$

где $\{E\} = \{1, 1, \dots, 1\}^T$.

Выражения (21) имеют смысл только в случае, когда $[\tilde{\mathbf{A}}]^T [\tilde{\mathbf{A}}]$ и $[\hat{\mathbf{A}}]^T [\hat{\mathbf{A}}]$ невырожденные матрицы. Если эти матрицы невырожденные, но матрицы $[\hat{\mathbf{A}}]$ и $[\tilde{\mathbf{A}}]$ плохо обусловлены, то незначительные погрешности при определении компонентов $\{P_{\psi}^{\Sigma}\}^{\circ}$ могут привести к существенным погрешностям вычисления искомых характеристик. Поэтому в процессе вычислений следует осуществлять контроль степени обусловленности матриц $[\hat{\mathbf{A}}]$ и $[\tilde{\mathbf{A}}]$. Для вычисления псевдообратных матриц по отношению к $[\hat{\mathbf{A}}]$ и $[\tilde{\mathbf{A}}]$ использовался алгоритм сингулярного разложения [11], позволяющий определить число обусловленности исходной матрицы.

Число обусловленности является интегральной характеристикой достоверности полученного решения, но это число не может дать информацию о степени чувствительности каждой из искомых характеристик к случайным отклонениям заданных ТПД. Такую информацию в данной работе определяли с использованием численного эксперимента.

Алгоритм численного эксперимента по оценке достоверности и устойчивости решения

Для оценки достоверности решения необходимо прежде всего выбрать критерий (или систему критериев), а затем — способ его (их) вычисления. Достоверность решения задачи идентификации зависит не только от устойчивости и корректности численного алгоритма решения этой задачи, но и от типа (характера) исходных данных, используемых в конкретном расчете (например, от углов укладки и количества слоев в пакетах, характеристики которых используются в качестве исходных данных). В качестве таких критериев используем коэффициенты вариации искомых характеристик, определяемые в процессе следующей процедуры численного эксперимента.

Исходные данные в задаче идентификации могут быть разделены на две группы:

- экспериментально определяемые характеристики пакетов, влияние случайных отклонений которых на искомые характеристики оценивается в

процессе численного эксперимента (назовем эти характеристики ВИД — возмущаемые исходные данные);

- характеристики пакетов, влияние случайных отклонений которых на искомые характеристики не оценивается в процессе численного эксперимента (НИД — невозмущаемые исходные данные).

К ВИД относятся в первую очередь экспериментально определенные ТПД многослойных КМ, назовем эти характеристики базовыми. К ВИД могут быть отнесены и характеристики упругости слоя. НИД — это параметры схем армирования КМ, для которых определены базовые характеристики.

В ВИД в процессе численного эксперимента вносятся некие случайные отклонения, которые моделируют возможные ошибки экспериментального определения этих характеристик. Проведем численный эксперимент. С помощью программы — генератора случайных чисел, определим первый отрезок последовательности случайных чисел. В ВИД вносятся случайные отклонения, соответствующие этому отрезку и находящиеся внутри интервалов предельно допустимых отклонений. Эти интервалы задаются в процентах от заданного значения характеристики, входящей в ВИД. Они могут быть одинаковы для всех ВИД (например, $\pm 5\%$ от заданного значения) или различаться для разных характеристик. Если известны коэффициенты вариации базовых характеристик, то они могут быть использованы для задания интервалов предельно допустимых отклонений базовых характеристик.

Для измененных ВИД решается задача идентификации и определяется вектор искомых характеристик $\{P_{\psi}^0\}_1$, соответствующий первому отрезку

последовательности случайных чисел. Далее определим второй отрезок последовательности случайных чисел, для которого повторяются те же вычисления и определяется $\{P_{\psi}^0\}_2$. Повторяя этот расчет

K раз, получим K вариантов искомых характеристик, каждый из которых $\{P_{\psi}^0\}_i$ можно рассматривать как i -ю случайную реализацию вектора искомых характеристик. При этом для каждой из искомых характеристик будет получена выборка случайных реализаций размером K .

Вычислим для этих выборок коэффициенты вариации, являющиеся выборочными оценками рассеяния.

Обозначим элементы вектора начальных (невозмущенных) значений искомых характеристик как

$$\{P_{\psi}^0\} = \{P_{\psi 1}^{(0)}, P_{\psi 2}^{(0)}, P_{\psi 3}^{(0)}, P_{\psi 4}^{(0)}\}.$$

Возмущенные значения этих же характеристик

$$P_{\psi}^0 = \{p_{\psi 1}^{(i)}, p_{\psi 2}^{(i)}, p_{\psi 3}^{(i)}, p_{\psi 4}^{(i)}\},$$

где $i = 1, \dots, K$ — количество расчетов в численном эксперименте.

Тогда выборка для m -й искомой характеристики будет иметь вид

$$v_m = \{p_{\psi m}^{(1)}, p_{\psi m}^{(2)}, \dots, p_{\psi m}^{(i)}, \dots, p_{\psi m}^{(K)}\}.$$

Для нее коэффициент вариации имеет вид

$$K_v(p_{\psi m}) = \frac{S(p_{\psi m})}{\bar{p}_{\psi m}} 100 \%, \quad (22)$$

где

$$S(p_{\psi m}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (p_{\psi m}^{(i)} - \bar{p}_{\psi m})^2}{K-1}}, \quad \bar{p}_{\psi m} = \frac{\sum_{i=1}^K p_{\psi m}^{(i)}}{K}.$$

Сравнение величины коэффициента вариации искомой характеристики с предельными значениями интервалов предельно допустимых отклонений в ВИД позволяет сделать вывод об устойчивости рассматриваемой искомой характеристики к случайным отклонениям в исходных данных при решении задачи идентификации. Для численной оценки устойчивости m -й искомой характеристики можно использовать значение δ_m — отношение величины коэффициента вариации (22) в численном эксперименте к среднему значению интервалов предельно допустимых отклонений в ВИД. Чем ближе к единице δ_m , тем устойчивее определенное при решении задачи идентификации значение m -й искомой характеристики к случайным отклонениям в исходных данных. Вывод о достаточной степени устойчивости зависит от особенностей конкретных решаемых задач, от требова-

ний к точности определения характеристик диссипации энергии. Величины δ_m зависят от количества используемых в расчете экспериментально определенных характеристик многослойных КМ (ВИД) и схем армирования этих КМ.

Предложенный в работе алгоритм идентификации ТПД слоя многослойных КМ реализован в виде компьютерной программы, позволяющей при незначительном времени счета проводить численный эксперимент при количестве повторных расчетов $K = 100$ и более.

Результаты идентификации УДХ углепластика КМУ-4 по экспериментальным данным

В качестве исходных данных использовали результаты экспериментов, приведенные в табл. 1 [2]. Для экспериментов были взяты образцы — полоски из низко модульного углепластика с размерами 20×300 мм, толщиной $(1,80 \pm 0,05)$ мм, состоящие из 12 однонаправленных слоев, уложенных симметрично относительно срединной плоскости.

Для схем армирования $\pm \phi$ при количестве слоев не менее 10 при экспериментальном определении коэффициентов диссипации энергии можно заменить испытания в плоскости армирования на испытания при изгибе [1]. Погрешности такой замены не превышают 1 % от измеряемой величины. Поэтому приведенные в табл. 1 ТПД определены при возбуждении изгибных колебаний по первой форме свободно подвешенных в узлах колебаний образцов [10]. Такие испытания технически значительно проще, чем испытания при колебаниях в плоскости армирования.

При испытаниях регистрировали виброграммы свободных колебаний в зонах максимальных прогибов образцов, не превышавших 0,1 от толщины образца, в этом случае можно пренебречь влиянием воздуха на величину ТПД [1].

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и расчетных значений ТПД

№	ϕ	Эксперимент	Расчет				
		$(\psi_x^*)_3, \%$	$(\psi_x^*)_1 / \Delta, \%$	$(\psi_x^*)_2 / \Delta, \%$	$(\psi_x^*)_3 / \Delta, \%$	$(\psi_x^*)_4 / \Delta, \%$	$(\psi_x^*)_5 / \Delta, \%$
1	0 ₁₂	0,59	0,59/0,0	0,59/0,0	0,59/0,0	0,59/0,0	0,59/0,0
2	$\pm 20^\circ_6$	1,39	1,39/0,0	1,16/16,5	1,04/25,2	1,39/0	1,28/7,9
3	$\pm 40^\circ_6$	4,06	4,18/3,0	4,14/2,1	4,14/1,9	4,49/10,6	4,06/0
4	$\pm 45^\circ_6$	4,92	4,57/7,1	4,60/6,5	4,62/6,1	4,92/0,0	4,46/9,3
5	$\pm 50^\circ_6$	4,64	4,75/2,4	4,82/4,1	4,83/4,0	5,11/10,1	4,64/0
6	$\pm 70^\circ_6$	4,29	4,44/3,5	4,56/6,3	4,27/0,4	4,64/8,2	4,29/0
7	90 ₁₂	4,34	4,21/3,0	4,33/0,3	3,92/9,7	4,34/0,0	4,04/4,04

Во второй графе табл. 1 приведены углы укладки волокон относительно продольной оси OX для испытанных образцов, далее — средние экспериментальные значения ТПД. Затем приведены расчетные значения ТПД для пяти вариантов исходных данных и отклонения Δ этих ТПД от экспериментальных значений: вариант 1 — все 7 приведенных экспериментальных значений ТПД являлись исходными данными для решения задачи идентификации ТПД слоя, затем — 2 варианта расчета, когда исходными данными для таких задач являлись только 5 ТПД рассматриваемых пакетов, и еще 2 варианта, где исходными данными являлись только 4 ТПД рассматриваемых пакетов. Для вариантов 2—5 ТПД пакетов, являвшиеся исходными данными, выделены жирным шрифтом. Все задачи решены при минимизации относительных невязок (20), хотя различия результатов расчетов для невязок обоих типов для рассматриваемых исходных данных незначительны.

Расчетные ТПД слоя для всех представленных вариантов расчетов, а также коэффициенты вариации в численном эксперименте для них приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные технические постоянные диссипации слоя для рассматриваемых вариантов расчета

№ варианта	$\psi_1^* / k_v^{чз}$, %	$\psi_2^* / k_v^{чз}$, %	$\psi_6^* / k_v^{чз}$, %	$\psi_{12}^* / k_v^{чз}$, %
1	0,59/9,8	4,21/8,1	5,04/6,1	4,06/9,8
2	0,59/8,6	4,33/10,1	5,03/7,4	4,44/41,5
3	0,59/8,6	3,92/17,5	5,04/7,4	4,15/40,3
4	0,59/8,5	4,34/9,5	5,43/10,3	4,24/11,6
5	0,59/8,5	4,04/16,0	4,90/8,2	3,99/40,0

Предельные значения интервалов предельно допустимых отклонений в ВИД численного эксперимента во всех расчетах были приняты равными $\pm 10\%$ от экспериментальных значений ТПД пакетов. Характеристики упругости слоя были приняты равными: модули упругости вдоль и поперек волокон $E_1 = 104$ ГПа, $E_2 = 7,6$ ГПа, модуль сдвига $G_{12} = 3,8$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_{12} = 0,3$. Эти характеристики определены при решении задачи идентификации характеристик упругости слоя по экспериментально определенным модулям упругости и коэффициентам Пуассона пакетов, приведенных в табл. 1, в соответствии с алгоритмом, приведенным в [8].

Расчетные ТПД всех пакетов (см. табл. 1) вычислены в соответствии с (19), где ТПД слоя взяты из решения соответствующего варианта задачи идентификации (табл. 2).

Для варианта 1 коэффициенты вариации в численном эксперименте для всех ТПД слоя меньше

предельно допустимых отклонений в ВИД, что соответствует хорошей устойчивости решения к случайным отклонениям в исходных данных. При уменьшении количества ТПД пакетов, используемых в качестве исходных данных (варианты 2—5), наблюдается ухудшение устойчивости отдельных ТПД слоя к случайным отклонениям в исходных данных. Наиболее чувствительной к таким отклонениям является ψ_{12}^* , а наименее чувствительной — ψ_1^* , значение которой входит в число исходных данных для представленных вариантов расчета. Если исключить ее из числа исходных данных, то $k_v^{чз}$ для нее резко возрастает (более 100 %), существенно увеличиваются $k_v^{чз}$ и для других ТПД слоя. Это объясняется высокой степенью анизотропии рассматриваемого материала, приводящей к существенному отличию величины ψ_1^* от ТПД других рассматриваемых пакетов.

Из представленных вариантов расчетов с уменьшенным количеством ТПД пакетов в исходных данных наилучшая устойчивость расчетных ТПД слоя к случайным отклонениям в исходных данных получена для варианта 4. Это говорит о том, что и при небольшом количестве известных ТПД пакетов можно достаточно достоверно определить все ТПД слоя, причем все ТПД пакетов можно определить при простейшем одноосном нагружении. Здесь большую роль играют удачно выбранные углы укладки пакетов, ТПД которых используют в качестве исходных данных. Выбор таких углов укладки предлагается проводить после анализа результатов численного эксперимента для разных вариантов ТПД пакетов, вычисленных по приближенным значениям ТПД слоя в соответствии с (19) (можно использовать ТПД материала — аналога).

Для вариантов 4, 5 расчетные значения ТПД, использовавшихся в качестве исходных данных при расчете, равны соответствующим экспериментальным значениям. Это является следствием того, что для этих вариантов количество искомым ТПД слоя равно количеству заданных ТПД многослойных пакетов, т. е. задача решается без минимизации функции цели, а сводится к решению системы четырех линейных алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными.

Приведенный пример расчетов показывает возможности идентификации ТПД слоя с использованием предлагаемого алгоритма.

Заключение

Использование предлагаемого метода идентификации ТПД слоя многослойных КМ позволяет отказаться от сложных, дорогостоящих экспери-

ментальных методов и определить все необходимые коэффициенты диссипации слоя из сравнительно простых испытаний и воспользоваться эффективно всей имеющейся экспериментальной информацией, что существенно уменьшит влияние на искомые характеристики слоя многослойных КМ отдельных случайных ошибок.

Предлагаемый метод даст возможность провести оценку достоверности полученного решения (оценку чувствительности к случайным отклонениям экспериментально определяемых величин) с помощью численного эксперимента, что позволяет выбрать схемы армирования образцов для испытаний, обеспечивающих определение ТПД слоя, лучше соответствующих реальному исследуемому материалу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zinoviev P. A., Ermakov Y. N. Energy Dissipation in Composite Materials. — Lancaster-Basel: Technomic Publishing Co., Inc. 1994. — 246 p.
2. Зиновьев П. А. Энергетические структурно-феноменологические модели диссипативных свойств анизотропных тел и волокнистых композитов: дисс. на соискание уч. ст. д-ра техн. наук. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 1997. — 373 с.
3. Жарин Д. Е. Научные основы получения вибропоглощающих строительных полимерных композитов: дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. — Казань.: Камская государственная инженерно-экономическая академия. 2006. — 384 с.
4. Димитриенко Ю. И., Губарева Е. А., Федонюк Н. Н., Сборщиков С. В. Моделирование упруго-диссипативных характеристик слоисто-волокнистых композитов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 4. С. 1—14. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/material/1234.html>. (дата обращения: 2014).
5. Сагомонова В. А. Слоистые вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов и органических волокон и технология их изготовления: дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. — Москва. ВИАМ. 2021. — 154 с.
6. Нежданов Р. О. Определение механических характеристик волокнистых композитов методами идентификации: дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук — Казань.: Казанская государственная архитектурно-строительная академия. 2004. — 200 с.
7. Каюмов Р. А., Луканкин С. А., Паймушин В. Н., Холмогоров С. А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2015. Т. 157. Кн. 4. С. 112—132.
8. Смердов А. А., Таирова Л. П. Идентификация характеристик упругости и прочности однонаправленного слоя многослойных углепластиков — особенности реализации при исследовании влияния нанодобавок // Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 2. С. 52—58.
9. Tairova L. P. Determination of conditional plies characteristics for braided CFRP structures by identification method // AIP Conference Proceedings, 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.5133253>.
10. Зиновьев П. А., Смердов А. А., Кулиш Г. Г. Экспериментальное исследование упругодиссипативных характеристик углепластиков // Механика композитных материалов. 2003. Т. 39. № 5. С. 595—602.
11. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. — М.: Мир. 1980. — 280 с.

Identification of energy dissipative characteristics of unidirectional layers from energy dissipative properties of multilayered composite materials

L. P. TAIROVA

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article demonstrates the solution of the problem for determining the energy dissipation characteristics of the layers from energy dissipative properties of composites laminates with the aid of the identification method. An energy structural-phenomenological model by Zinoviev — Ermakov is applied as the energy dissipation model in CM under vibrations. Apparent advantages can be obtained with the use of the identification procedure of all characteristics of the layers from the results of simple (standard) tests of CM with various reinforcing structures. The advantages of the proposed approach are shown in the analysis of experimental data of a carbon fiber reinforced plastic. The feature of the present paper is an analysis for stability of computed values of layers characteristics to random deviations in experimental initial data.

Keywords: composite materials, energy dissipation, identification, experiment, strip test specimens, carbon fiber reinforced plastic.

Исследование физических параметров волоконных световодов для диагностики композитных конструкций

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

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

С. А. ВАСИЛЬЕВ, канд. физ.-мат наук
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова, Москва, Россия

М. В. ГРЕКОВ
ООО «Уникальные волоконные приборы», Москва, Россия

Рассмотрены и проанализированы особенности функционирования конструктивных элементов волоконно-оптических датчиков на основе решеток показателя преломления. В качестве чувствительного элемента предложено использовать волоконные брэгговские решетки (ВБР), в качестве спектрально-селективного оптического фильтра — длиннопериодные волоконные решетки. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по выбору и адаптации конструктивно-технологических параметров волоконных световодов для создания интегрированной комплексной системы встроенной диагностики композитных конструкций и представлены полученные результаты. Показано, что исследованные типы волоконных световодов могут быть успешно применены для создания интегрированных систем встроенного контроля композитов и конструкций на их основе. Реализован технологичный метод защиты волоконного световода в зоне ввода—вывода в композитный материал с применением эластичного фторопластового капилляра. Обоснована целесообразность восстановления полимерного покрытия в зоне нанесения волоконных брэгговских решеток с использованием УФ- или термоотверждаемых полимеров для повышения надежности внедренных чувствительных элементов.

Ключевые слова: встроенная диагностика, композитная конструкция, волоконный световод, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, защитное покрытие.

Внедрение в авиационно-космические конструкции новых материалов [1] приводит к необходимости обеспечения требуемого уровня безопасности при эксплуатации конструкций, что влечет за собой разработку и внедрение систем диагностики их технического состояния в реальных условиях испытаний и эксплуатации.

Федотов Михаил Юрьевич, заместитель президента академии.
E-mail: fedotovmyu@gmail.com

Будадин Олег Николаевич, главный научный сотрудник.
E-mail: oleg.budadin@yandex.ru

Козельская Софья Олеговна, старший научный сотрудник.
E-mail: kozelskaya.sofik1977@yandex.ru

Васильев Сергей Александрович, заведующий лабораторией волоконной оптики.
E-mail: sav@fo.gpi.ru

Греков Михаил Владимирович, главный конструктор.
E-mail: an1dan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2022 г.

© Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О.,
Васильев С. А., Греков М. В., 2022

Особенно актуальна эта проблема для полимерных композиционных материалов (ПКМ) [2, 3], которые находят все более широкое применение в авиационно-космической технике благодаря своим уникальным свойствам (они технологичны, не подвержены коррозии, обеспечивают минимальную массу конструкций при заданных требованиях к прочности, устойчивости к агрессивным воздействиям и по некоторым характеристикам значительно превосходят металлы).

Особенностью ПКМ является то, что формирование самого материала и изделия из него осуществляется в едином технологическом процессе. При этом существует вероятность образования в материале скрытых нарушений сплошности, которые могут проявляться как на стадии изготовления и испытания изделий, так и в условиях их эксплуатации под действием нагрузок — силовых динамических, циклических, ударных.

Физико-механические и прочностные характеристики ПКМ зависят от условий эксплуатации

(температуры, влажности), а также изменяются в процессе длительной эксплуатации (тепловое, влажностное и радиационное старение, механические воздействия и т. п.). Это существенно образом влияет на образование в ПКМ скрытых дефектов и снижает ресурс их эксплуатации.

В связи с этими особенностями разработку новых конструкций из ПКМ, работающих в экстремальных условиях, и создание технологий контроля их технического состояния необходимо осуществлять практически одновременно.

Эксплуатация крупногабаритных композитных конструкций сопряжена с необходимостью проведения регулярных регламентных работ и технического обслуживания, в том числе диагностики с применением классических средств неразрушающего контроля (НК), например, ультразвукового контроля (УЗК), по результатам которого оценивают их текущее техническое состояние и возможность продления срока назначенного ресурса [4—6].

Такой подход является весьма трудоемким и требует привлечения квалифицированных специалистов и соответствующего дорогостоящего оборудования.

При этом возникает ряд проблем, связанных с наличием труднодоступных зон, а также сложностью осуществления мониторинга в реальных условиях эксплуатации изделий.

Как показали проведенные исследования, многие указанные проблемы решаются путем применения оптического мониторинга на основе интегрированных в композитные конструкции квазираспределенных волоконно-оптических сенсорных систем [7, 8].

Однако внедрение данной технологии мониторинга происходит медленно, что связано с рядом технологических проблем, в том числе с проблемами интегрирования волоконных световодов (ВС) в ПКМ и обеспечением при этом достоверных и метрологически точных результатов измерений.

Говоря о современном состоянии и масштабах исследований в области оптического неразрушающего контроля и диагностики ПКМ интегрированными волоконно-оптическими датчиками (ВОД) на основе ВБР для контроля напряженно-деформированного состояния образцов ПКМ при статическом и динамическом нагружении, стоит отметить, что системы контроля на базе ВОД (технология Structural Health Monitoring) активно развиваются за рубежом. Например, для измерения распределения механических нагрузок в высоконагруженных конструкциях летательных аппаратов (ЛА) — лопастях вертолетов [9], фюзеляже [10] и крыльях самолетов [11]. Подобные проекты

реализуются и в России [12, 13], что подтверждает актуальность и практическую значимость разработок в рассматриваемой области для различных отраслей промышленности.

Одной из наиболее важных и перспективных сфер практического применения ВОД является создание систем встроенной диагностики сложных пространственных композитных конструкций, прежде всего, из ПКМ [14].

Во многих случаях, в частности, если речь идет о распределенных измерениях в условиях повышенной взрыво- и пожароопасности, об удаленной регистрации стационарных и динамических процессов, авторы опубликованных работ отмечают полное отсутствие альтернативных способов измерения [15].

Наибольший интерес во всем мире вызывает применение волоконных решеток для измерения температуры и деформации объектов. Во-первых, такие системы востребованы во многих областях науки и техники, во-вторых, эти факторы непосредственно (без применения вспомогательных узлов и устройств) воздействуют на спектральное положение резонанса решетки, поэтому являются непосредственно измеряемыми параметрами. Чувствительность ВОД при измерении температуры может достигать $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при измерении деформации объектов (растяжение/сжатие) — около 10^{-6} [16].

Волоконно-оптическим датчикам присущи следующие достоинства:

- высокая чувствительность и стабильность измерений; помехозащищенность;
 - химическая инертность;
 - возможность использования во влажных и химически агрессивных средах и в условиях повышенной радиации; электрическая и пожарная безопасность;
 - значительные расстояния (десятки километров) от аналитического оборудования до места проведения измерений.
- К ряду достоинств датчиков с чувствительными элементами на ВБР можно также отнести:
- полностью волоконное исполнение, позволяющее исключить использование объемных оптических элементов при проведении измерений, что значительно улучшает эксплуатационные характеристики датчика (надежность, воспроизводимость, широкий динамический диапазон измерений);
 - высокую чувствительность, обусловленную сравнительно малой спектральной шириной резонанса решетки;
 - возможность спектрального и пространственного мультимплексирования чувствительных элементов, расположенных в одном или в не-

скольких ВС для измерения пространственных распределений физических величин;

- сравнительно малые габариты и вес;
- малое время отклика на изменение измеряемой величины.

Основными областями применения систем дистанционного измерения температуры и механических деформаций являются: авиация, космонавтика, ядерная энергетика, химические производства и другие области, где применение традиционных систем осложнено экстремальными условиями испытаний и эксплуатации изделий, радиационной обстановкой, высоким уровнем электромагнитных помехи т. п.

На основе решеточных волоконных датчиков также возможно создание и адаптация датчиков ускорения, давления и вибрации под конкретные условия эксплуатации, что позволяет говорить о полностью волоконных телеметрических комплексах, например, о комплексах телеметрии ЛА или ядерных энергетических установок.

Однако, широкое внедрение оптического мониторинга сдерживается трудностями технологического характера: условиями "взаимодействия" ВОД с ПКМ, недостаточно развитыми технологиями интеграции ВОД в ПКМ, учета влияния температурных режимов и различных механических эксплуатационных нагрузок (вибрация, удар) на погрешность результатов измерений и т. п.

Цель работы — систематизация информации по основным конструктивным элементам ВОД и проведение экспериментальных исследований физических параметров ВС для создания системы диагностики композитных конструкций на основе ВБР.

Структура и принцип работы волоконно-оптического датчика

Главными конструктивными элементами ВОД являются решетки показателя преломления (ПП), которые играют роль чувствительного элемента — волоконные брэгговские решетки и спектрально-селективного оптического фильтра — длиннопериодные волоконные решетки (ДПВР). Для создания таких волоконных элементов используют явление фоточувствительности (фоторефрактивности) волоконных ВС, под которым понимают стабильное при комнатной температуре в течение длительного времени изменение ПП кварцевого стекла при его облучении ультрафиолетовым (УФ) излучением.

Структура и свойства волоконной брэгговской решетки

Волоконная брэгговская решетка представляет собой структуру с периодической модуляцией ПП

в сердцевине ВС, которая за счет конструктивной дифракции на штрихах решетки связывает основную моду ВС с модой, имеющей противоположное направление распространения. В результате такой межмодовой связи возникает эффективное спектрально-селективное отражение на резонансной длине волны λ_B , задаваемое соотношением [17]

$$\lambda_B = 2n_{eff}^{core} \Lambda, \quad (1)$$

где n_{eff}^{cor} — эффективный ПП основной моды ВС;

$\Lambda \leq 1$ мкм — период модуляции ПП.

Спектральные характеристики ВБР (спектральная ширина и коэффициент отражения) могут варьироваться в широких пределах на стадии изготовления. Вместе с тем, спектральную ширину резонанса $\sim 0,5$ нм, что соответствует геометрической длине ВБР ~ 3 мм, можно считать оптимальной для ВОД при регистрации с помощью ВБР-интеррогаторов. Коэффициент отражения ВБР для ВОД обычно не превышает 90 %, т. к. превышение этой величины приводит к нежелательному уширению спектра отражения.

На рис. 1 приведены графики экспериментального и расчетного спектров отражения ВБР типичных для ВОД.

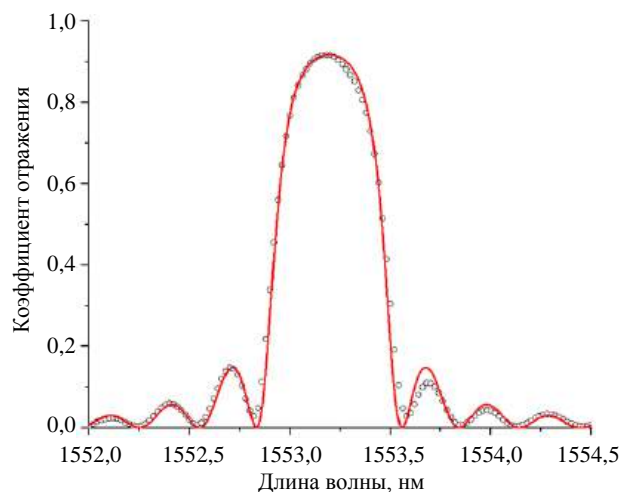


Рис. 1. Экспериментальный (кружки) и расчетный (сплошная) спектры отражения ВБР, обычно используемых для волоконно-оптических датчиков (геометрическая длина ВБР 2,7 мм, коэффициент отражения в максимуме ~ 90 %)

Хорошее совпадение приведенных зависимостей свидетельствует о том, что современные голографические методы записи ВБР обеспечивают высокую однородность параметров (прежде всего периода и амплитуды модуляции показателя преломления) по всей длине ВБР.

Структура и свойства длиннопериодной волоконной решетки

Длиннопериодная волоконная решетка имеет на несколько порядков больший в сравнении с ВБР период модуляции ПП (10^2 — 10^3) мкм и связывает моду, направляемую сердцевинной, с распространяющимися в том же направлении модами, направляемыми оболочкой ВС или, как правило, границей кварцевое стекло—воздух, которая образуется после удаления защитного покрытия с облучаемого участка [18]. Энергия, перешедшая в оболочечную моду, поглощается в защитном покрытии на неочищенном от защитного полимерного покрытия участке световода, что приводит к появлению в спектре пропускания ВС с записанной в нем решеткой резонансных полос поглощения. Уравнение резонансной связи основной моды и одной из мод, направляемых оболочкой ВС, имеет вид

$$\lambda_B = (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}}) \Lambda, \quad (2)$$

где $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$, $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ — эффективные ПП мод сердцевинны и оболочки.

Характерный спектр пропускания длиннопериодной волоконной решетки, записанной в одномодовом ВС, приведен на рис. 2. Показаны экспериментальный и расчетный спектры, а также указаны моды оболочки, с которыми реализуется связь основной моды HE_{11} в конкретном резонансном пике.

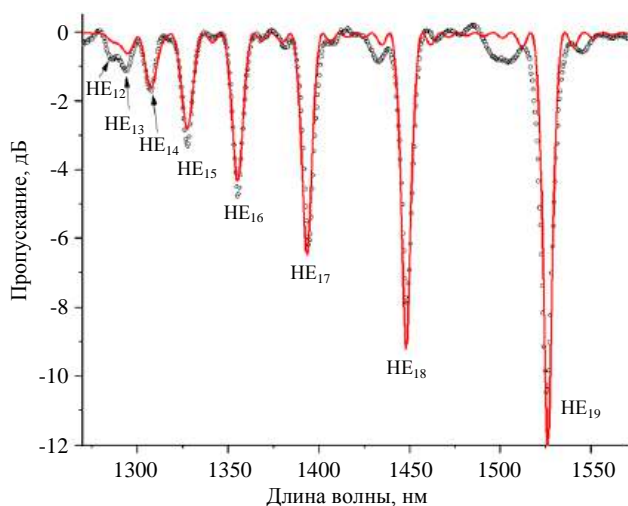


Рис. 2. Экспериментальный (кружки) и расчетный (сплошная) спектры пропускания ДПВР с периодом 200 мкм

Спектральные параметры ДПВР определяются параметрами ВС и геометрией решетки. Спектральная ширина резонанса ДПВР обычно составляет 10—30 нм при геометрической длине 10—30 мм.

Принцип работы чувствительного элемента датчика

Сдвиг спектрального положения резонансной длины волны ВБР $\Delta\lambda_B$ почти линейно зависит от изменения температуры окружающей среды ΔT и от приложенного к ВС механического напряжения $\Delta\varepsilon$. Зависимость сдвига $\Delta\lambda_B$ от указанных параметров описывается уравнением

$$\Delta\lambda_B(\varepsilon, T) = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left[\Delta\varepsilon \left(1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right) + \Delta T \left(\alpha + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right) \right] \quad (3)$$

где p_{11} , p_{12} — коэффициенты Поккельса упруго-оптического тензора;

ν — коэффициент Пуассона ВС;

α — коэффициент линейного температурного расширения ВС.

Это соотношение дает типичные значения сдвига λ_B в зависимости от температуры ~10 пм/К и от относительного удлинения ВС ~1,2 пм/мк.

Отметим что, несмотря на незначительные абсолютные значения указанных сдвигов, их величины, отнесенные к спектральной ширине решетки, достаточно велики, что, позволяет использовать такие решетки в качестве высокочувствительных элементов при измерении температуры и механических деформаций.

Регистрация спектрального смещения резонансной длины волны ВБР

Для регистрации спектрального смещения резонансной длины волны ВБР используют специальные спектральные приборы — ВБР-интеррогаторы, обеспечивающие проведение измерений в рабочем диапазоне ~100 нм. Интеррогаторы позволяют с высокой точностью проводить многоканальные измерения, однако частота опроса датчиков в таких приборах не превышает нескольких килогерц. Кроме того, ВБР-интеррогаторы имеют достаточно высокую стоимость.

Более простым решением, применяемым для высокочастотного опроса ВОД на основе ВБР, является использование спектрально-селективного фильтра, основной функцией которого является преобразование сдвига резонансной длины волны ВБР в изменение интенсивности прошедшего через фильтр оптического сигнала. Для того чтобы получить взаимно-однозначное соответствие указанных величин во всем рабочем диапазоне измеряемого параметра, можно использовать наклонный фильтр соответствующей спектральной

ширины, который технологично может быть реализован на основе ДПВР [19].

Очевидно, что крутизна склона характеристики пропускания фильтра определяет диапазон измеряемых механических напряжений и при фиксированном отношении сигнал/шум измерительной системы в целом влияет на чувствительность датчика (чем круче склон, тем выше чувствительность и меньше измеряемый диапазон, и наоборот).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Экспериментальные исследования по выбору и адаптации конструктивно-технологических параметров ВС для создания интегрированной комплексной системы встроенной диагностики проводили по следующей методике:

Решали задачу выбора оптимального типа ВС, его геометрии, типа защитного покрытия, выбора способа снятия защитного покрытия (ЗП), оценки необходимости его восстановления тем или иным методом. Для этого выбирали коммерчески доступные ВС, планируемые к интеграции в образцы из ПКМ, в целях экономии средств и ускорения исследований ВБР не наносились. Типы ВС отличались геометрией сердцевины и оболочки, определяющей оптические свойства ВС (поддерживаемый модовый состав), а также химическим составом и структурой ЗП.

Изготавливали отрезки выбранных ВС длиной 0,8 м, осуществляли зачистку участков некоторых ВС (удаление ЗП) для последующей интеграции в образцы из ПКМ.

Проводили наблюдение прохождения оптического излучения от широкополосного источника света LED ПОМ-460М через тестируемый ВС с регистрацией излучения на выходе с использованием оптического спектроанализатора ANDO AQ6317B с разрешением 10 пм. Таким образом, фиксировался спектр излучения, проходящего через ВС, для последующей оценки влияния интеграции ВС в ПКМ на его оптические свойства.

Методом прессового формования были изготовлены панели из углекомпозиата на основе препрега из однонаправленной углеродной ленты УОЛ-300-2 ЗК и эпоксидного растворного связующего ЭНФБ-2М. Первая панель представляла собой однонаправленную плоскую пластину с га-

баритами 70×300 мм, состоящую из 4 монослоев, причем между центральными слоями в направлении армирования были интегрированы ВС в количестве 6 шт. с шагом 1 см. Вторая панель имела аналогичную форму, габариты 60×300 мм, ВС в количестве 5 шт. были расположены также с шагом 1 см. Третья панель также представляла собой однонаправленную плоскую пластину, имела габариты 180×300 мм, состояла из 8 монослоев, между центральными слоями в направлении армирования были интегрированы ВС в количестве 17 шт. также с шагом 1 см. Вывод ВОД во всех случаях осуществляли через боковые торцы панелей, при этом часть ВС выводили непосредственно из панелей без каких-либо защитных приспособлений, а часть — с использованием защитных капилляров из различных материалов.

Анализировали влияние процесса формования ПКМ на механическую целостность ВС. Это включало в себя внешний осмотр ВС в месте вывода из образца ПКМ и регистрацию прохождения оптического излучения по ВС в целях проверки имеющихся повреждений.

Изучали влияние процесса формования ПКМ на оптические свойства ВС, в частности, измеряли оптические потери в отрезках ВС, введенных в панели из ПКМ. Спектр излучения, проходящего через образец из ПКМ, сравнивали со спектром излучения в ВС до ввода в ПКМ.

Выбирали наиболее приемлемые с точки зрения интеграции в ПКМ типы ЗП ВС, способы защиты ВС в зоне ввода—вывода из ПКМ, а также исследовали необходимость восстановления ЗП на оголенных участках ВС перед интеграцией в ПКМ. Исследовали ВС с различными ЗП: алюминий, медь, акрилат. В качестве способа механической защиты ВС на границе ПКМ было предложено использовать защитные капилляры (кембрики) из различных материалов: ПВХ, капрон, фторопласт. В целях восстановления ЗП рассматривали варианты применения УФ- и термоотверждаемых полимеров, традиционно используемых в волоконной оптике.

Типы ВС, использованные для проведения экспериментальных исследований по созданию системы встроенной диагностики конструкций из ПКМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Типы ВС для проведения экспериментальных исследований

Условный номер ВС	Тип ВС
1	Одномодовый кварцевый — в непрерывном однородном медном ЗП
2	Одномодовый кварцевый — в непрерывном однородном алюминиевом ЗП
3	Одномодовый телекоммуникационный кварцевый (SMF-28) — в непрерывном однородном акрилатном ЗП
4	Многомодовый — с геометрией (сердцевина—оболочка—металл) 50/220/305 мкм с числовой апертурой NA > 0,2 в непрерывном однородном алюминиевом ЗП
5	Многомодовый — с геометрией (сердцевина—оболочка—металл) 50/125/174 мкм и числовой апертурой NA > 0,2 в непрерывном однородном алюминиевом ЗП

Подготовленные ВС указанных типов были интегрированы в панели из углекомпозиата УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М и отформованы по штатному режиму для данного материала.

На рис. 3 и 4 показаны отформованные панели 1 и 2 с интегрированными ВС в антиадгезионной пленке, препятствующей натеканию связующего в пресс-форму в процессе формования до прохождения механической обработки.

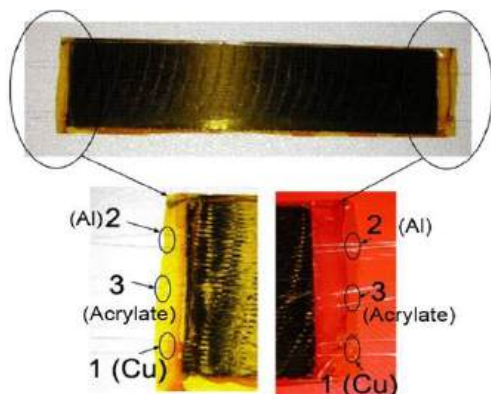


Рис. 3. Панель 1 из углекомпозиата УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М с интегрированными волоконными световодами в защитных покрытиях:
1 — в медном (Cu); 2 — в алюминиевом (Al);
3 — в акрилатном (Acrylate)

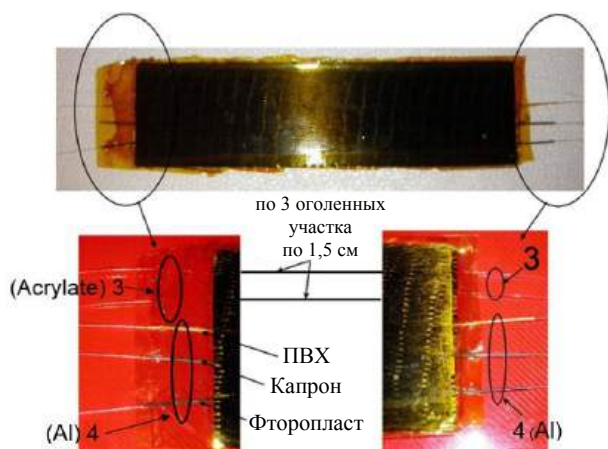


Рис. 4. Панель 2 из углекомпозиата УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М с интегрированными волоконными световодами в защитных покрытиях:
3 — в акрилатном (Acrylate); 4 — в алюминиевом (Al)

В панель 1 были интегрированы одномодовые кварцевые ВС (6 шт.) с ЗП трех типов: 1-й — в медном покрытии, 2 шт.; 2-й — в алюминиевом покрытии, 2 шт.; 3-й — в акрилатном покрытии, 2 шт. При этом ВС выводили через торцы панели без использования защитных приспособлений. ЗП присутствовало на всех ВС на всем протяжении (см. рис. 3).

В панель 2 были интегрированы кварцевые ВС (5 шт.) с ЗП двух типов: 3-й — в акрилатном покрытии, 2 шт.; 4-й — с геометрией (сердцевина—оболочка—металл) 50/220/305 с числовой апертурой $NA > 0,2$ в непрерывном однородном алюминиевом ЗП, 3 шт. (см. рис. 4).

ВС 3-го типа выводили по аналогии с первой панелью без использования защитных приспособлений, при этом на каждом ВС присутствовали 3 оголенных участка по 1,5 см. Данные ВС были интегрированы в панель таким образом, чтобы все оголенные участки находились внутри ПКМ.

ВС 4-го типа выводили через торцы панели, но при этом вывод осуществлял с использованием защитных капилляров (кембриков) из поливинилхлорида (ПВХ), капрона и фторопласта. На каждый из трех ВС в зоне вывода были надеты кембрики одного из указанных материалов. При этом ЗП присутствовало на всех ВС на всем протяжении.

В панель 3 были интегрированы кварцевые ВС (17 шт.) с ЗП трех типов: 1-й — в медном покрытии, 4 шт.; 2-й — в алюминиевом покрытии, 3 шт.; 3-й — в акрилатном покрытии, 2 шт.; 4-й — с геометрией (сердцевина—оболочка—металл) 50/220/305 с числовой апертурой $NA > 0,2$ в непрерывном однородном алюминиевом ЗП, 4 шт.; 5-й — с геометрией (сердцевина—оболочка—металл) 50/125/174 и числовой апертурой $NA > 0,2$ в непрерывном однородном алюминиевом ЗП, 4 шт. Все ВС панели 3 на выходе из ПКМ не были защищены в зоне ввода—вывода, ЗП присутствовало на всем протяжении указанных ВС.

Результаты проведенных экспериментальных исследований панелей из УОЛ-300-2 3К/ЭНФБ-2М с интегрированными ВС по описанной выше методике приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований ВС в составе первой панели

№ п/п	№ волоконного световода	Тип волоконного световода	Тип защитного покрытия	Состояние защитного покрытия, способ вывода из ПКМ	Результат эксперимента
1	1-1	Одномодовый	Cu	Однородное/ через торец без защиты	ВС не поврежден
2	1-2		Al		
3	2-1		Acrylate		
4	2-2		Acrylate		
5	3-1	SMF-28	Acrylate	Однородное/ через торец без защиты	ВС не поврежден
6	3-2				

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований ВС в составе второй панели

№ п/п	№ волоконного световода	Тип волоконного световода	Тип защитного покрытия	Состояние защитного покрытия, способ вывода из ПКМ	Результат эксперимента
1	3-3	SMF-28	Acrylate	3 оголенных участка по 1,5 см/ через торец без защиты	ВС не поврежден при формовании, но надломлен при удалении облоя
2	3-4				ВС поврежден внутри панели в процессе формования
3	4-1	Многомодовый BC NA > 0,2, 50/220/305	Al	Однородное/ кембрик из ПВХ	ВС не поврежден, облой отделяется с трудом
4	4-2			Однородное/ кембрик из капрона	
5	4-3			Однородное/ кембрик из фторопласта	ВС не поврежден, облой отделяется легко

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований ВС в составе третьей панели

№ п/п	№ волоконного световода	Тип волоконного световода	Тип защитного покрытия	Состояние защитного покрытия, способ вывода из ПКМ	Результат эксперимента
1	1-3	OVC	Cu	Однородное/ через торец без защиты	ВС не поврежден
2	1-4				
3	1-5				
4	1-6				
5	2-3		Al		
6	2-4				
7	2-5				
8	3-5	SMF-28	Acrylate		ВС не поврежден при формовании, но надломлен при удалении облоя
9	3-6				
10	4-4	MM BC NA>0,2, 50/220/305	Al		ВС не поврежден
11	4-5				
12	4-6				
13	4-7	MM BC NA>0,2, 50/125/174			
14	5-1				
15	5-2				
16	5-3				
17	5-4				

Анализируя результаты экспериментальных исследований ВС, введенных в первую панель, стоит отметить, что традиционно применяемые одномодовые кварцевые телекоммуникационные ВС как с металлическими ЗП (медь, алюминий), так и с полимерным ЗП (акрилат) в рассматриваемом случае сохранили свою целостность в процессе выкладки между слоями препрега, при сборке технологического пакета заготовки для прессового формования в пресс-форме, а также после формования при механической обработке готовой панели, удаления технологических припусков и облоя (наплывов связующего). Такие результаты обусловлены тем, что для указанных ВС отсутствовали оголенные участки оптического волокна в структуре ПКМ, выкладка ВС осуществлялась в лабораторных условиях высококвалифицированными специалистами, удаление облоя также осуществлялось вручную. На производственных площадках для

изготовления реальных изделий добиться похожих результатов не всегда возможно.

Экспериментальные результаты, полученные в ходе исследований второй панели, показали, что наличие оголенных участков ВС как в структуре ПКМ, так и в зоне ввода—вывода из материала может приводить к нарушению целостности ВС как в ходе технологических операций по изготовлению панелей, так и в процессе механической обработки. При этом для вывода из ПКМ целесообразно применять защитные капилляры, которые препятствуют нарушению целостности ВС в локальной зоне вывода из материала. Дополнительно стоит отметить, что из трех типов исследованных капилляров с технологической точки зрения наиболее целесообразно применять именно фторопластовые.

Подобная ситуация наблюдалась и для ВС, интегрированных в третью панель.

При внешнем осмотре ВС в месте вывода из ПКМ, а также по результатам проверки прохождения оптического излучения по ВС было установлено, что из всего массива исследованных ВС 3 шт. разрушены при удалении облоя (после формования) и 1 шт. (с оголенными участками) — при воздействии технологического процесса формования.

Изучение оптических свойств ВС после интеграции в ПКМ показало, что процесс формования ПКМ не вносит каких-либо регистрируемых дополнительных оптических потерь в ВС в рабочем спектральном диапазоне длин волн от 1,5 до 1,6 мкм при надежно регистрируемой величине потерь в ВС до 0,1 дБ.

Вместе с тем, все типы ЗП исследованных ВС обеспечивают надежное сохранение механических и оптических свойств ВС после введения их в ПКМ. При этом для формирования зоны ввода—вывода ВС из ПКМ наиболее целесообразно использовать фторопластовые капилляры.

Эксперименты также показали, что ВС с незащищенными участками с большой вероятностью (около 40 %) разрушаются в ходе технологического процесса изготовления ПКМ, следовательно, необходимо восстанавливать ЗП ВС после формирования ВБР. Для восстановления ЗП можно использовать как УФ-, так и термоотверждаемые полимеры стандартного для волоконной технологии типа.

Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований по разработанной методике подтверждено, что для обеспечения целостности ВС в составе ПКМ можно использовать различные типы ВС, имеющие как металлические, так и полимерные ЗП, при этом экспериментальное значение величины оптических потерь, не превышает 0,1 дБ. С точки зрения совместимости с компонентами ПКМ наиболее целесообразно использовать ВС в полимерном ЗП, например в акрилатном (как наиболее стандартный и дешевый вариант). Для обеспечения надежного формирования зоны ввода—вывода ВС наиболее целесообразно использовать защитные фторопластовые капилляры, при этом на оголенных участках ВС, предназначенных для нанесения волоконных брэгговских решеток, необходимо проводить восстановление ЗП с использованием УФ- или термоотверждаемых полимеров.

Стоит отметить, что создание встроенных волоконно-оптических систем диагностики напряженно-деформированного состояния и температуры композитных конструкций является актуальным

прикладным научным направлением, т. к. подобные системы напрямую влияют на безопасность эксплуатации конструкций. Важной задачей на пути создания подобных систем является всестороннее исследование конструктивных и технологических параметров встраиваемых элементов, а также влияния технологических процессов изготовления ПКМ на оптические и механические свойства ВОД в целях адаптации и оптимизации полученных результатов к условиям эксплуатации конкретных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: материалы V Всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 19 июля 2021 г.), ФГУП "ВИАМ". — М.: ВИАМ, 2021. — 315 с.: ил. [Электронный ресурс] <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1353.pdf> (дата обращения: 16.01.2022).
2. Барынин В. А., Будадин О. Н., Кульков А. А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. — М.: Издательский дом "Спектр", 2013. — 242 с.
3. Ключев В. В., Будадин О. Н., Абрамова Е. В., Пичурин А. Н., Козельская С. О. Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения. — М.: Издательский дом "Спектр", 2019. — 200 с.
4. Анискович В. А., Будадин О. Н., Далинkevич А. А., Разин А. Ф. Прогнозирование сроков эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов // Вопросы оборонной техники. 2021. Вып. 3 (202). С. 31—39.
5. Котельников В. В., Акимов Д. А., Козельская С. О., Гурьянова Е. О. Разработка программного обеспечения и методики прогнозирования ресурса эксплуатации сложных конструкций на основе результатов хронологической диагностики технического состояния и искусственного интеллекта // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 1. С. 26—37.
6. Козельская С. О., Котельников В. В., Акимов Д. А., Кутюрин Ю. Г., Будадин О. Н. Экспериментальные исследования возможности оценки ресурса эксплуатации композитных конструкций при их силовом нагружении и промышленных строительных конструкций // Вестник ТГТУ. 2021. Т. 27. № 1. С. 132—148. DOI: 10/17277/vestnik. ISSN 0136-5835
7. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Дианов Е. М. Фотоиндуцированные волоконные решетки показателя преломления и их применения // Фотон-Экспресс. 2004. № 6. С. 163—183.
8. Варжель С. В. Волоконные брэгговские решетки. — СПб.: Университет ИТМО, 2015. — 65 с.
9. Wada D., Igawa H., Kasai T., Arizono H. Vibration monitoring of a helicopter blade model using the optical fiber distributed strain sensing technique // Applied Optics. 2016. V. 55(25). P. 6953—6959. [Электронный ресурс] <https://doi.org/10.1364/AO.55.006953>
10. Wada D., Igawa H., Tamayama M., Kasai T., Arizono H. Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system // Smart Materials and Structures. 2018. V. 27(2). P. 025014. [Электронный ресурс] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/a588> (дата обращения: 24.12.2021).
11. Ma G., Chen X. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: recent applications and technical analysis // Sensors. 2019. V. 19(1). P. 55. [Электронный ресурс] <https://doi.org/10.3390/s19010055>

12. Nigmatullin R. R., Agliullin T., Mikhailov S., Morozov O., Sakhabutdinov A., Ledyankin M., Karimov K. Noise cancellation of helicopter blade deformations measurement by fiber Bragg gratings // *Sensors*. 2021. V. 21(12). P. 4028. [Электронный ресурс] <https://doi.org/10.3390/s21124028>
13. Lvov N. L., Khabarov S. S., Todorov A. V., Barabanov A. A. Versions of fiber-optic sensors for monitoring the technical condition of aircraft structures // *Civil Engineering Journal*. 2018. V. 4(12). P. 2895—2902. [Электронный ресурс] <http://www.nicirt.ru/wp-content/uploads/2017/12/Versions-of-fiber-optic-sensors-for-monitoring-the-technical-condition-of-aircraft-structures.pdf> (дата обращения: 24.12.2021).
14. Беловолов М. И., Беловолов М. М., Семенов С. Л., Будадин О. Н., Козельская С. О., Кутюрин Ю. Г. Разработка волоконно-оптических датчиков контроля технических характеристик и оценки работоспособности композитных узлов изделий авиационной и ракетно-космической техники (Обзор) // *Конструкции из композиционных материалов*. 2020. № 3 (159). С. 45—53.
15. Буймистрюк Г. Я., Сафонов С. И., Ильин А. В. Оптоволоконные измерительные каналы автоматизированных систем управления объектами атомной энергетики в экстремальных условиях // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2018. № 9(110). С. 52—58.
16. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Божков А. С., Курков А. С., Дианов Е. М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // *Квантовая электроника*. 2005. № 35(12). С. 1085—1103.
17. Kogelnik H. Theory of optical-waveguides in guided wave optoelectronics Part of the Springer Series in Electronics and Photonics book series (SSEP). — Springer-Verlag, Berlin. 1988. V. 26. P. 7—88.
18. Васильев С. А., Дианов Е. М., Курков А. С., Медведков О. И., Протопопов В. Н. Фотоиндуцированные внутриволоконные решетки показателя преломления для связи мод сердцевина-оболочка // *Квантовая электроника*. 1997. № 24(2). С. 151—154.
19. Protopopov V. N., Karpov V. I., Medvedkov O. I., Vasiliev S. A., Grekov M. V., Dianov E. M., Palto S. P. Temperature sensor based on fiber Bragg grating. In *Advances in Fiber Optics*. International Society for Optics and Photonics. 2000. May. V. 4083. P. 224—228.

Researching of the physical parameters of optical fibers for the diagnostics of composite structures

M. Yu. FEDOTOV

Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia

O. N. BUDADIN, S. O. KOZEL'SKAYA

JSC "Central Research Institute of Special Machinery", Khotkovo, Moscow Region, Russia

S. A. VASILIEV

Prokhorov General Physics Institute of RAS, Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

M. V. GREKOV

LLC "Unuque Fiber Devices", Moscow, Russia

This article describes the features of the functioning of structural elements of fiber-optic sensors based on refractive index gratings. It is proposed to use fiber Bragg gratings as a sensitive element, and long-period fiber Bragg gratings as a spectrally selective optical filter. A method for conducting experimental researches on the selection and adaptation of the design and technological parameters of optical fibers to create an embedded system for built-in diagnostics of composite structures has been developed and the results obtained are presented. It is shown that the investigated types of optical fibers of various types can be successfully applied to create integrated systems for built-in control of composites and structures based on them. A technological approach for protecting optical fibers in the input-output zone of composite construction using an elastic fluoroplastic capillary has been implemented. The expediency of restoring the protective polymer coating in the zone of deposition of fiber Bragg gratings using UV or thermosetting polymers to improve the reliability of embedded sensitive elements is shown.

Keywords: embedded diagnostics, composite structure, optical fiber, fiber optic sensor, fiber Bragg grating, protective coating.

УДК 629.7.018
DOI: 10.52190/2073-2562_2022_2_56
EDN: BWHRNA

Взрывные и нагревательные устройства для прочностных испытаний тонкостенных композитных конструкций на совместное действие нестационарных теплосиловых нагрузок различной физической природы

А. В. ОСТРИК, д-р техн. наук; А. А. ЧЕПРУНОВ, канд. техн. наук
Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

И. В. БУГАЙ, канд. техн. наук
Технологический университет им. А. А. Леонова, г. Королев, Московская обл., Россия

Рассмотрены взрывные и нагревательные устройства для испытаний на прочность композитных конструкций летательных аппаратов к совместному тепловому и механическому воздействию потоков излучений и частиц различной физической природы. Предложены два новых взрывных устройства для генерации малоимпульсных нагрузок микросекундной длительности. Для моделирования теплового действия разработаны устройства на основе термоэлектрических нагревательных элементов, токопроводящих пластин и пиротехнических составов, наносимых на поверхность испытываемой конструкции. Сконструирован универсальный испытательный стенд, использующий предлагаемые наборы устройств. Стенд позволяет проводить испытания на прочность композитных конструкций к совместному воздействию тепловых и механических нагрузок, имеющих заданные пространственно-временные распределения.

Ключевые слова: композитные конструкции летательных аппаратов; комплексное тепловое и механическое действие потоков излучений и частиц; прочностные испытания.

Интенсивное развитие генераторов излучений и частиц различной физической природы требует конструирования летательных аппаратов (ЛА), работающих в условиях воздействия потоков высокой плотности энергии. Не менее интенсивно идёт разработка и конструктивных средств защиты ЛА на основе гетерогенных пористых материалов и покрытий нового поколения. Внедрение в конструкцию ЛА защитных гетерогенных пакетов требует экспериментального подтверждения их эффективности.

Экспериментальное исследование последствий теплового и механического воздействий потоков излучений и частиц (ПИЧ) на элементы конструкций ЛА путём их непосредственного облучения не представляется возможным в связи с отсутствием мощных лабораторных источников излучения, способных генерировать необходимые плотности энергии на поверхностях с размерами порядка

нескольких метров. Поэтому основным методом исследования последствий воздействия ПИЧ на современном этапе являются испытания натурных конструкций ЛА при их нестационарном нагружении взрывными и нагревательными устройствами для моделирования этого воздействия [1, 2].

Разработка набора таких устройств актуальна и имеет большое практическое значение [2—5]. Однако отсутствует набор устройств, удовлетворяющих в полном объёме требованиям практики. В частности, требуются устройства генерации малоимпульсных нагрузок субмикросекундной длительности, обеспечивающие одновременность приложения давления к поверхности испытываемой конструкции. Кроме того, имеются лишь отдельные устройства для моделирования совместного теплового и механического действия ПИЧ, но во многих реализующихся в полете случаях ЛА подвергается совместному многократному тепловому и механическому действию ПИЧ, при котором проявляется его комплексный характер [5, 6]. Под комплексностью [6] понимается такое совместное (не обязательно одновременное) действие, когда общий эффект (повышение температуры, тепловой унос материала, накопление пластических деформаций и микроразрушений, трещинообразование и расслоение) от него не определяется простым суммированием результата действия каждого фактора, т.е. не справедлив принцип суперпозиции ущерба. Взаимное влияние нагрева и

Острик Афанасий Викторович, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: ostrik@icp.ac.ru

Чепрунов Александр Александрович, ведущий научный сотрудник.

E-mail: alexander.cheprunov@yandex.ru

Бугай Ирина Владимировна, заведующая кафедрой "Математика и естественнонаучные дисциплины".

E-mail: ibug@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 января 2022 г.

© Острик А. В., Чепрунов А. А., Бугай И. В., 2022

механического разрушения являются одним из случаев проявления комплексности действия ПИЧ.

Для испытаний на прочность к комплексному тепловому и механическому действию ПИЧ используют подход, основанный на совместном применении устройств нагрева и взрывной генерации механических нагрузок. В свою очередь, совместное применение устройств требует разработки универсальных испытательных стендов. Под универсальностью стенда понимается: двойное предназначение (пригоден для верификации отдельных устройств и для проведения испытаний); многофункциональность (применим для различных сочетаний воздействий ПИЧ); широкая область использования (помимо действий ПИЧ может быть использован для любых нестационарных воздействий теплосиловых нагрузок, имеющих сложный пространственно-временной профиль). Универсальность достигается модульностью отдельных моделирующих устройств и их взаимозаменяемостью в составе стенда.

Цель работы — разработка нового набора моделирующих действия ПИЧ устройств и универсального стенда для испытаний конструкций ЛА на прочность к комплексному действию ПИЧ.

Тепловое действие потока излучений и частиц

Эксплуатационным источником теплового действия являются газовые потоки (например, аэродинамические и истекающие из камер сгорания ракетных двигателей) [7]. При этом, как правило, полетные тепловые потоки близки к квазистационарным, и в конструкции устанавливается медленно меняющийся температурный профиль. Кроме того, ЛА могут быть подвергнуты импульсным воздействиям различных видов ПИЧ [6].

В таблице приведены некоторые практически важные (применительно к тепловому действию) виды воздействий ПИЧ и соответствующие им режимы поглощения энергии [6].

Следует отметить, что не все возможные сочетания рассмотренных видов воздействий реализуются на практике для ЛА. Однако известен целый ряд практически важных сочетаний, когда имеет место комплексное действие ПИЧ. Наиболее опасными являются воздействия объемно поглощаемых излучений (ОПИ) [2, 5, 6]. Отметим, что в случае ОПИ, имеющего в своем спектре жесткую и мягкую части, комплексность действия проявляется наиболее полно: нагрев жестким излучением изменяет термодинамические и механические характеристики материала, что оказывает влияние на формирование термомеханического импульса, а мягкая часть приводит к уносу материала (тепловому действию) и формированию испарительной части механического импульса. Следовательно, даже само разделение на тепловое и механическое действия в этом случае оказывается весьма условным.

В зависимости от свойств ПИЧ и композитных материалов (КМ) (в частности, длины пробега частиц в поглощающем материале и его температуропроводности), а также толщины конструкции, тепловое действие приводит к различным распределениям температуры. Как минимум, при исследовании комплексного теплового и механического действия перед генерацией механического импульса возникает необходимость создавать в тонкостенной конструкции ЛА следующий набор ее тепловых состояний:

- приповерхностный нагрев, когда материал прогрет на некоторую толщину, а тыльная сторона конструкции остается практически холодной;

Воздействия потока излучений и частиц и соответствующие режимы поглощения

Вид воздействия	Пространственный режим	Временной режим
Радиоизлучение высокой частоты	Объемное поглощение	Постепенное поглощение
Монохроматическое излучение оптического диапазона	Поверхностное поглощение	Постепенное поглощение
Световое излучение мощного взрыва	Поверхностное поглощение	Постепенное поглощение
Мягкое рентгеновское излучение мощного взрыва или реактора лазерного термоядерного синтеза	Поверхностное поглощение	Мгновенное поглощение
Жесткое рентгеновское излучение мощного взрыва	Объемное поглощение	Мгновенное поглощение
γ -излучение мощного взрыва или реактора лазерного термоядерного синтеза	Объемное поглощение	Мгновенное поглощение
Электроны радиационных поясов	Объемное поглощение	Постепенное поглощение
Нейтроны мощного взрыва или реактора лазерного термоядерного синтеза	Объемное поглощение	Мгновенное поглощение
Нейтроны ядерного реактора	Объемное поглощение	Постепенное поглощение
Тяжелые ионы ускорителя	Объемное поглощение	Мгновенное поглощение

- объемный неравномерный нагрев, когда КМ прогрет по всей толщине конструкции, но со значительной разницей температур облучаемой и тыльной поверхностей;

- равномерный нагрев, когда температура КМ по толщине конструкции — постоянная.

Приповерхностный нагрев характерен при воздействии монохроматического излучения, светового импульса мощного взрыва или аэродинамических потоков в режиме развитого испарения [7, 8]. При этом температура вблизи аблирующей (испаряющейся или сублимирующей) поверхности составляет 1000—2000 °С.

Объемный неравномерный нагрев по толщине имеет место при воздействии жесткого ОПИ с энергией фотонов более 20 кэВ и невысокими уровнями плотности энергии (при высоких уровнях превалирует механическое действие, сопровождающееся разрушением КМ). Причиной неравномерного нагрева может быть воздействие монохроматического излучения, светового импульса, гамма-нейтронного излучения и аэродинамических потоков в режиме теплопроводности. В этом случае температура меняется в диапазоне 100—1000 °С. Неравномерный нагрев также реализуется для сопел и сопловых насадков из углеродных и углерод-углеродных КМ [9] работающих ракетных двигателей. Температуры сопел составляют 1000—3000 °С.

Механическое действие потока излучений и частиц

Для испытаний на прочность к комплексному тепловому и механическому действию используется подход, основанный на совместном применении устройств нагрева и взрывной генерации механических нагрузок. Взрывные технологии воспроизведения механического действия ПИЧ достаточно развиты, их широко используют для испытаний конструкций из КМ [1—5, 10]. Поэтому рассмотрим лишь два сравнительно новых взрывных устройства из используемого набора.

Как уже отмечалось, необходима разработка малоимпульсных устройств для моделирования механического действия излучения. Наиболее перспективными из взрывных устройств генерации малоимпульсных нагрузок микросекундной длительности представляются ленточный заряд [11] и заряд с управляемым инициированием [12].

Ленточный заряд выполняют из лент взрывчатого вещества (ВВ), которые размещают на трубках круглого сечения (рис. 1).



Рис. 1. Ленточный заряд взрывчатого вещества

Трубки равноудалены от поверхности нагружаемого объекта. Для обеспечения одновременности приложения нагрузки используется многоточечная лучевая система инициирования с торцов лент ВВ.

Заряд с управляемым инициированием изготавливают в виде тонкой (≤ 3 мм) оболочки из волокнистого материала с фрезерованными каналами, заполненными пластическим взрывчатым веществом (рис. 2). Размещение в каналах даёт ряд преимуществ по сравнению с другими способами локализации ВВ (например, сплошным слоем или секторами на пористой подложке). Управляемое инициирование реализуется методом, заимствованным из технологии создания давлений мегабарного уровня [13].

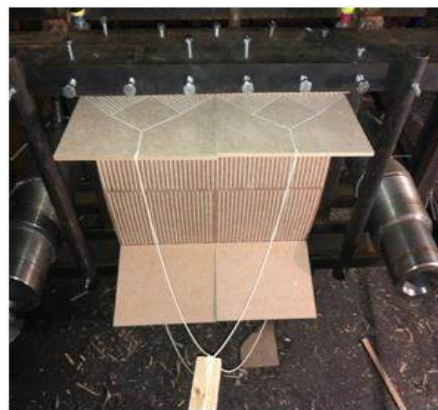


Рис. 2. Заряд взрывчатого вещества с управляемым инициированием

Набор устройств [2], дополненный этими новыми разработками, имеет более широкие возможности. Такой набор используют для испытаний тонкостенных конструкций ЛА на прочность к воздействию ПИЧ различной физической природы.

Комплексное действие потока излучений и частиц на плоские пакеты композиционного материала

При моделировании комплексного действия на элементы конструкции ЛА возможно применение нескольких способов создания теплового состоя-

ния преграды (с помощью контактной токопроводящей пластины, листовых пиротехнических зарядов, СВЧ-излучения и др.) в комбинации с различными видами взрывных генераторов механических нагрузок в зависимости от видов и сочетаний воздействующих ПИЧ.

Для верификации устройств, воспроизводящих тепловое действие ПИЧ, необходимо произвести измерение распределения температуры по толщине тонкостенной конструкции. Используется бесконтактный способ измерения профиля температуры в конструкционных материалах [14]. Суть способа заключается в том, что в исследуемом образце делают каналы разной глубины и при испытаниях проводят температурное сканирование в подготовленных каналах системой дистанционных инфракрасных пирометров, а затем по измерительной информации определяют профиль температуры в образце. При конкретной реализации способа моделирования комплексного действия ПИЧ на плоские пакеты КМ (рис. 3) измерение температуры проводится бесконтактным портативным пирометром марки Raytek Raynger MX.



Рис. 3. Схема испытаний плоских пакетов композиционного материала

Воспроизведение заданного потока $q(t)$ поглощаемой энергии ПИЧ обеспечивается регулированием изменения тока в электрической цепи. Предварительная оценка зависимости $I = I(t)$ может быть сделана по формуле

$$I(t) = \sqrt{\frac{q(t)S}{\eta R}},$$

где S — площадь нагрева, см²;

R — сопротивление токопроводящего слоя, Ом;

$q(t)$ — плотность потока ПИЧ, Вт/см²;

η — определяемый экспериментально коэффициент передачи энергии от токопроводящего слоя к образцу ($\eta < 1$).

Затем, необходимая для формирования заданного пространственного температурного профиля

временная зависимость, уточняется экспериментально.

Один из возможных вариантов зависимости тока от времени представлен на рис. 4.

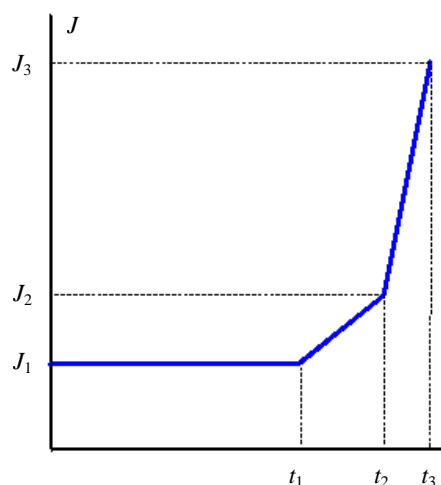


Рис. 4. Зависимость электрического тока от времени в нагревающей пластине

Испытания показали, что предложенный способ позволяет воспроизводить требуемые температурные профили с погрешностью не более 15 %.

На рис. 5 показано сравнение полученного температурного профиля с заданным в случае моделирования поглощения ОПИ.

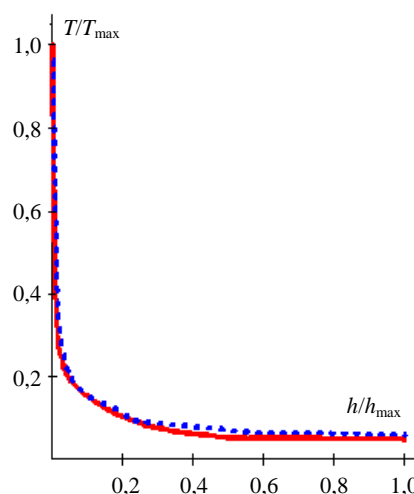


Рис. 5. Температурный профиль энергоснабжения (пунктирная линия — расчетный от потока излучений и частиц; сплошная линия — воспроизведенный нагревательным устройством) [6]

По достижению в образце необходимого распределения температуры его нагружают импульсом давления, формирующимся при разряде батареи конденсаторов, через металлическую фольгу (см. рис. 3) [2].

Рассмотренный способ применим для создания монотонно убывающих от поверхности облучения

температурных профилей. При необходимости воспроизведения более сложных распределений температуры в многослойных композитных пакетах предложено использовать комбинированный нагрев в общем случае от различных источников энергии. На рис. 6 представлен вариант комбинированной схемы нагрева от токопроводящего слоя и КВЧ-излучения (излучения крайне высокой частоты с длиной волны 1—10 мм).

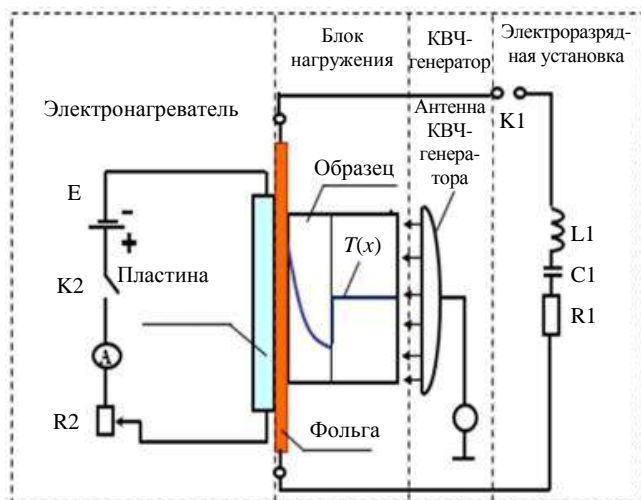


Рис. 6. Схема комбинированного нагрева образца

Результат нагрева двухслойного образца из КМ показан на рис. 7.

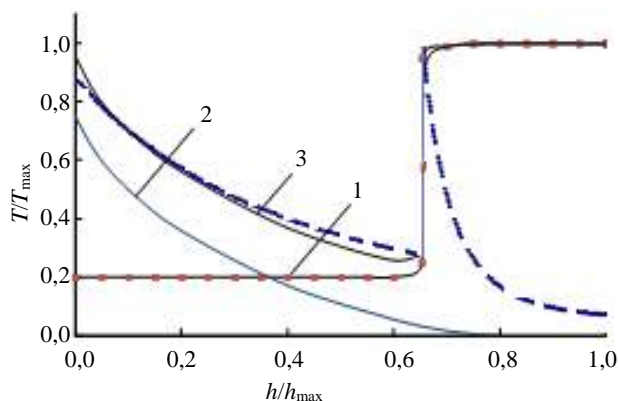


Рис. 7. Профили температуры при комбинированном нагреве двухслойной композитной преграды:

1 — КВЧ-нагрев; 2 — электронагрев; 3 — суммарный; (пунктир) — моделируемый

Видно, что суммарный профиль — немонотонный и испытывает скачок на границе слоев, что характерно для воздействия жесткого ОПИ (скачок в энерговыделении от ОПИ возникает вследствие резкого изменения сечений взаимодействия квантов излучения с веществом). Во втором слое КМ-моделируемый профиль, соответствующий ОПИ, оказывается меньше, чем суммарный от

нагрева. При этом тепловое действие оказывается завышенным по сравнению с имеющим место при воздействии ОПИ, но это идет в запас прочности разрабатываемой конструкции.

При достижении в образце необходимого распределения температуры его также нагружают импульсом давления, формирующимся при разряде батареи конденсаторов через металлическую фольгу (см. рис. 6).

Комплексное действие потока излучений и частиц на конструкции ЛА

Испытания крупногабаритных элементов конструкции ЛА предполагают наличие мощных источников нагрева и взрывных генераторов механической нагрузки. Одним из наиболее удобных и пригодных при моделировании комплексного действия ПИЧ устройств оказывается эквидистантно-поверхностный заряд (ЭПЗ) [2] и заряд с управляемым инициированием (ЗУИ) [12]. Для моделирования теплового действия используют термоэлектрические нагревательные элементы (ТЭН-элементы) и пиротехнические составы, наносимые на поверхность испытываемой конструкции. Устройства, моделирующие действия ПИЧ, располагают для совместного функционирования на универсальном испытательном стенде.

Возможный вариант снаряжения универсального испытательного стенда показан на рис. 8, 9 (рис. 8 — вид сбоку; рис. 9 — фронтальный вид). Испытываемая тонкостенная композитная конструкция 3 подвешивается на баллистическом маятнике (1, 2). Она герметично закрывается двумя прочными стальными крышками.

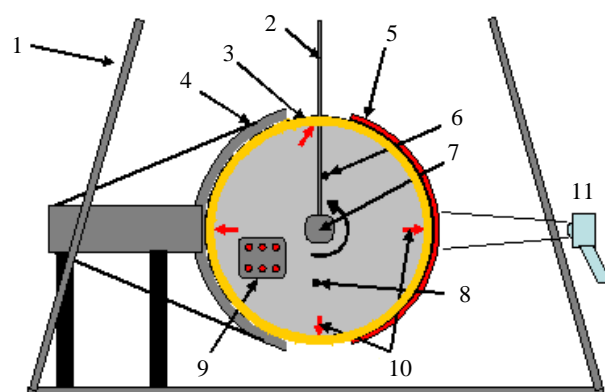


Рис. 8. Схема стенда (вид сбоку):

1 — стойка маятника (верхний шарнир не показан); 2 — подвес маятника; 3 — испытываемая цилиндрическая оболочка с крышками; 4 — взрывное устройство ЗУИ или ЭПЗ на стойке; 5 — пиротехнический состав или ТЭН; 6 — съемный стопор; 7 — пружинный поворотный механизм; 8 — несъемный стопор; 9 — герметичная электрическая колодка; 10 — места расположения тензодатчиков; 11 — оптический пирометр

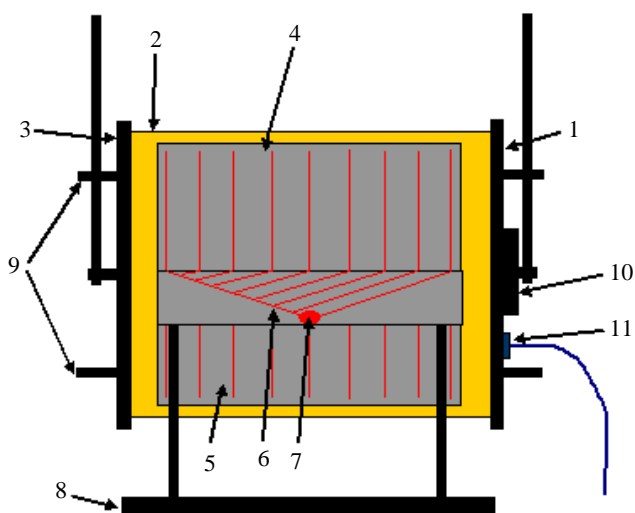


Рис. 9. Схема стэнда (вид с фронта):

1 — подвес маятника; 2 — испытываемая цилиндрическая оболочка; 3 — герметичные крышки; 4 — взрывное устройство распределенного импульсного нагружения, верхняя деталь; 5 — взрывное устройство, нижняя деталь; 6 — детонационная разводка; 7 — точка инициирования; 8 — стойка взрывного устройства нагружения; 9 — стопора; 10 — пружинный поворотный механизм; 11 — герметичная электрическая колодка

С одной стороны конструкция нагревается сгорающим пиротехническим составом 5, ее температура измеряется промышленным оптическим пирометром 11 и непрерывно записывается в память компьютера. Одновременно сгорает жгут из пиротехнического состава, подвешенный внутри конструкции, создавая внутреннее давление (величина внутреннего давления измеряется пьезодатчиком, а также рассчитывается по изменению показаний тензодатчиков). В момент догорания состава 5 открывается стопор 6, и пружинный поворотный механизм поворачивает конструкцию на 180° в положение, для которого нагретая часть оказывается напротив взрывного нагружающего устройства ЗУИ 4, установленного неподвижно. Как только новое положение конструкции фиксируется стопором 8, происходит подрыв устройства 4. Для диагностики состояния нагружаемой конструкции измеряются окружные и продольные нестационарные деформации в различных точках внутренней поверхности оболочки при помощи тензодатчиков 10. Электрические выводы тензодатчиков подключены при помощи герметичной колодки 9, она же используется для электроподжига пиротехнического состава внутри.

При конструировании универсального стэнда учтены предыдущие наработки. В частности, за основу стэнда был принят ранее разработанный стендовый ракетный двигатель с телом вращения [2]. Однако в стенд внесено принципиальное изменение, расширившее возможности его универсализации. Ранее, моделирующие устройства пе-

ремещались над испытываемой конструкцией при их замене. В новом варианте, испытываемая конструкция проворачивается при смене нагревательного устройства для моделирования теплового действия ПИЧ и полетных тепловых потоков на взрывное для моделирования механического действия ПИЧ. Необходимость поворота оболочки на 180° вызвана тем, что в противном случае при сгорании слоя пиротехнического состава 5 (см. рис. 8) может быть повреждено нагружающее устройство 4, (см. рис. 8).

Выводы

Предложены и верифицированы методы и устройства для моделирования комплексного теплового и механического действия ПИЧ на плоские пакеты КМ и натурные (с площадью нагружения от 2 до 5 м²) элементы композитных конструкций ЛА.

Сконструирован универсальный испытательный стенд для исследования прочности композитных конструкций ЛА к комплексному действию ПИЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоборов В. М., Острик А. В., Петровский В. П., Чепрунов А. А. Методы моделирования механического действия излучений на материалы и конструкции. Научно-техн. сб. № 1. — Сергиев Посад: ЦФТИ МО РФ, 1997. — 75 с.
2. Бакулин В. Н., Грибанов В. М., Острик А. В., Ромадинова Е. А., Чепрунов А. А. Механическое действие рентгеновского излучения на тонкостенные композиционные конструкции. — М.: ФМЛ, 2008. — 256 с.
3. Yongjian Mao, Hongjian Deng, Yulong Li, Rongjian He, Hongwei Xiao, Xiaohong Yue, Haiying Huang, Qing Zhou A Rod-explosive Technique for Testing Structural Responses Induced by X-ray Blow-off Impulses // Applied Mechanics and Materials. 2010. V. 29–32. P. 72–77.
4. Герасимов С. И., Кузьмин В. А. К проблеме моделирования механического импульса рентгеновского излучения на крупномасштабные тонкостенные конструкции // Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 3(105). С. 202–209.
5. Физика ядерного взрыва. В 5 т. Т. 3 // Воспроизведение факторов взрыва. — М.: ФМЛ, 2013. — 472 с.
6. Бакулин В. Н., Острик А. В. Комплексное действие излучений и частиц на тонкостенные конструкции с гетерогенными покрытиями. — М.: ФМЛ, 2015. — 288 с.
7. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. — М.: Машиностроение, 1976. — 224 с.
8. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. — М.: Мир, 1974. — 468 с.
9. Ellis R. A. et al. Development of a carbon-carbon translating nozzle extension for the RL10B-2 liquid rocket engine // American Institute of Aeronautics and Astronautics Papers. 1997. № 2672. P. 1–7.
10. Ostriak A. V., Bakulin V. N., Nikolaev D. N. The strength tests of thin-walled composite shells under non-stationary loads of different physical nature // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 927 012068.

11. Гирин Ю. В., Мартынов А. Г., Чепрунов А. А., Первов А. Ю. Ленточный заряд из листового взрывчатого вещества. Пат. № 2557298. Оpubл. 24.06.2015.

12. Ostriak A. V., Nikolaev D. N., Bugay I. V. New gasdynamic device for modeling of mechanical action of radiation // Book of Abstracts of XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 1—6 March, 2019, Elbrus, Moscow, 2019. P. 87.

13. Nikolaev D., Ternovoi V. et al. Plane shock compression generators, utilizing convergence of conical shock waves // J. Physics: Conference Series. 2014. V. 500. № 14. P. 1—5.

14. Гирин Ю. В., Слободчиков С. С., Потапенко А. И., Ульяненок Л. В., Чепрунов А. А. Способ измерения профиля температуры в конструкционных материалах. Пат. № 2521217. Оpubл. 26.12.2012.

Explosive and heating devices for strength testing thin-walled composite constructions for joint action of non-stationary heat and power loads having various physical nature

A. V. OSTRIK, A. A. CHEPRUNOV

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

I. V. BUGAY

Leonov Technological University, Korolev, Moscow Region, Russia

Explosive and heating devices for testing the strength of composite constructions of aircraft to the combined thermal and mechanical action of radiation flows and particles of various physical nature are considered. Two new explosive devices for generating low-pulse loads of microsecond duration are proposed. Thermoelectric heating elements, current-conducting plates and pyrotechnic compositions applied to the surface of the tested constructions are used as the basis of devices for modeling the thermal action of radiation.

A universal test bench using the proposed sets of devices is designed. The bench allows to carry out tests for the strength of composite constructions to the joint action of thermal and mechanical loads, having given space-time distributions.

Keywords: composite constructions of aircraft; complex thermal and mechanical action of radiation and particle flows; strength tests.

Конструкции из композиционных материалов: Межотр. науч.-техн. журн. / Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»; Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». 2022. Вып. 2 (166). С. 1—64.

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

Подписано в печать 26.04.2022. Формат 60x84 1/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,4. Уч.-изд. л. 7,7.
Тираж 250 экз. Заказ 1992. Свободная цена.
Адрес редакции: 125424, Москва,
Волоколамское ш., д. 77,
ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».
www.ntckompas.ru; E-mail: izdanie@ntckompas.ru
Отпечатано: 101000, Москва,
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.
ИП Кириченко Алексей Викторович.
Индекс 80089.

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2022 г.
на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»**

Наименование издания	Периодичность в год	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	4	1550,00		
Конструкции из композиционных материалов	4	1700,00		
Экология промышленного производства	4	1500,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	4	1750,00		
Вопросы защиты информации	4	1750,00		
<i>В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.</i>				

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

Наши реквизиты:

Полное наименование организации: _____

Сокращенное наименование организации: _____

ИНН/КПП _____

ОКПО _____

Расчётный счёт № _____ в _____

к/с _____ БИК _____

Юридический адрес: _____

Почтовый адрес: _____

Контактное лицо _____ тел. _____

E-mail: _____

(Для оформления счёта и бухгалтерских документов просьба заполнить все строчки).

Справочно:

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

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

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

8 (495) 491-43-17.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».