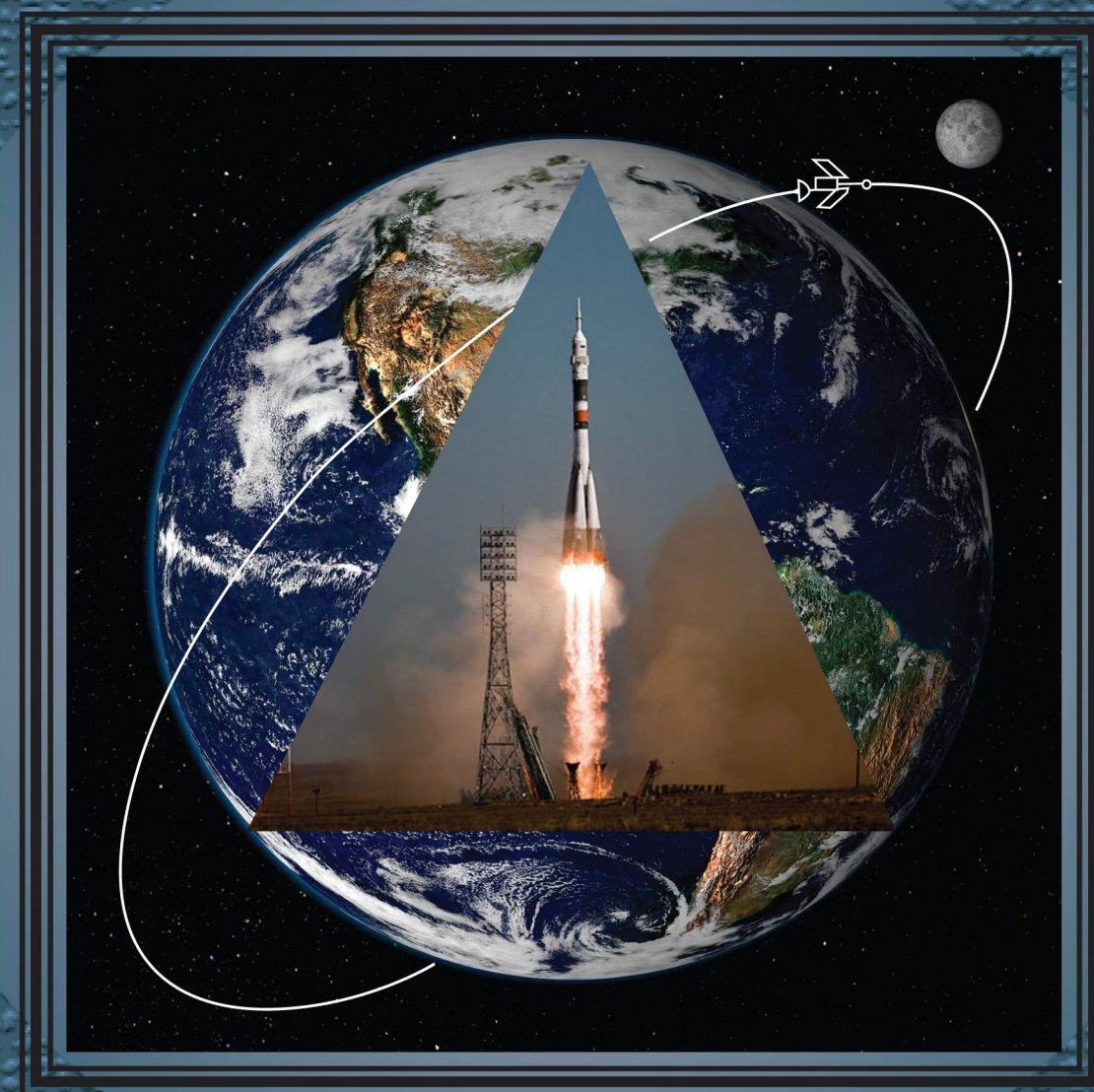


КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

4



Москва 2021



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 4 (164)

Издается с 1981 г.

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

Сарбаев Б. С., Коновалов А. В., Шишов Ю. Ю. Численный анализ напряжений и деформаций оболочки вращения из слоистого композиционного материала с учетом дефектов структуры в виде расслоений..... 3

Калашиников С. Т., Болтаев П. И. Уточненная расчетная зависимость несущей способности боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость, от геометрических и структурных параметров..... 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Острик А. В., Ким В. В., Острик М. А. Численное моделирование деформирования и разрушения контаймента АЭС при ударе двигателей падающего самолета..... 14

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И СОЕДИНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Калашиников С. Т. Контроль геометрии наружной поверхности в процессе изготовления теплозащитного экрана

из композиционного материала для спускаемых космических аппаратов 22

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Павленко А. В. Диэлектрические свойства наноразмерных пленок ниобата бария-стронция в композитной гетероструктуре Al/SBN-50/Pt/Al₂O₃ 26

Жидель К. М., Павленко А. В. Исследование структуры и свойств нанокompозитных пленок SrTiO₃ на подложках Si (001) 30

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Чернова В. В., Егорова Е. В. Использование вейвлет-преобразований для обработки акустико-эмиссионной информации при статических испытаниях образцов из углепластика 35

Смотров С. А., Смотров А. В., Иванов В. И. Сравнение выявляемости малозаметных ударных повреждений по результатам выполнения ультразвукового неразрушающего контроля и оптической профилометрии поверхности образцов полимерных композиционных материалов 43

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

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

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

Редакционная коллегия:

А. В. Беляков, д-р хим. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева; **А. А. Боков**, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет им. Саймона Фрайзера, Канада; **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; **Н. Г. Паничкин**, канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГУП "ЦНИИМаш"; **Л. А. Резниченко**, д-р физ.-мат. наук, проф., НИИ физики ЮФУ; **С. Б. Сапожников**, д-р техн. наук, проф., НОЦ "Нанотехнологии" ЮУГУ; **Б. С. Сарбаев**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; **И. Д. Симонов-Емельянов**, д-р техн. наук, проф., МИРЭА-Российский технологический университет (ИТХТ им. М. В. Ломоносова); **А. 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»), 2021;
- © Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), 2021;
- © Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС»), 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 629.76

DOI: 10.52190/2073-2562_2021_4_3

Численный анализ напряжений и деформаций оболочки вращения из слоистого композиционного материала с учетом дефектов структуры в виде расслоений

Б. С. САРБАЕВ, д-р техн. наук

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

А. В. КОНОВАЛОВ

ООО «ВР-Технологии», г. Томилино, Московская обл., Россия

Ю. Ю. ШИРШОВ, канд. техн. наук

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

Приведены результаты численного анализа напряжений и деформаций в оболочке вращения, изготовленной из слоистого композиционного материала (КМ). Предполагается, что в структуре материала имеются дефекты в виде расслоений. Расчеты выполнены с применением современного программного комплекса, основанного на методе конечных элементов. Исследовано влияние данного типа дефектов на жесткостные характеристики конструкции. Проведен анализ соответствия результатов расчетов, выполненных для различных вариантов оболочки с дефектами, экспериментальным данным по деформированию оболочки.

Ключевые слова: слоистый композиционный материал, оболочка вращения, расслоение, численное моделирование, контактная задача, адгезионные связи, колегезионные связи, статическое деформирование.

Одним из достоинств КМ, используемых при изготовлении летательных аппаратов, является возможность проектирования материала с требуемыми физико-механическими характеристиками.

Рациональный выбор наполнителя, матрицы, а также схемы армирования в случае слоистых КМ обеспечивает эффективное функционирование разрабатываемого изделия при заданных внешних нагрузках. Однако следует принимать во внимание, что даже современным технологиям изготовления элементов конструкций из КМ свойственен ряд недостатков. К одним из распространенных недостатков следует отнести образование технологических дефектов структуры КМ. Поэтому на этапе проектирования целесообразно выполнить анализ влияния того или иного дефекта на жесткостные и прочностные характеристики КМ,

образуемого одновременно с изготовлением элемента конструкции. Подобный анализ позволит также оценить допускаемые размеры дефектов, их количество и местоположение в изготавливаемом элементе конструкции.

Цель работы — исследование влияния дефектов типа "расслоение" на жесткостные свойства слоистого КМ. Такие дефекты наряду со складками могут образовываться в процессе формования изделия [1–3]. В качестве объекта исследования выбрана оболочка вращения конической формы при статическом силовом нагружении. Жесткостные характеристики такой оболочки исследованы экспериментально. Полученные значения перемещений в характерных точках оболочки оказались значительно большими по сравнению с расчетными значениями. Одной из причин подобного расхождения результатов может являться наличие расслоений в структуре слоистого КМ. Таким образом, исследование влияния дефектов в виде расслоений имеет определенное прикладное значение при разработке реальных изделий. Методика расчета напряжений и деформаций, предложенная в данной работе, может быть полезной при анализе жесткостных и прочностных характеристик элементов конструкций, изготавливаемых из слоистых КМ методом вакуумного формования.

Сарбаев Борис Сафиулович, профессор.

E-mail: BSSarbayev@mail.ru

Коновалов Алексей Владимирович, главный инженер по прочности, нагрузкам и аэроупругости.

E-mail: Alexey.VL.Kononov@gmail.com

Ширшов Юрий Юрьевич, заместитель начальника отделения.

E-mail: Shyo64@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 июля 2021 г.

© Сарбаев Б. С., Коновалов А. В., Ширшов Ю. Ю., 2021

Метод исследования

Для композитной слоистой оболочки вращения конической формы, изготовленной методом вакуумного формования, проведена серия численных экспериментов в целях определения влияния геометрических характеристик расслоений на жесткость конструкции. Оболочка изготовлена из шести слоёв. Численный анализ реализован в программном комплексе Dassault Systems Abaqus (далее Abaqus) [4]. Расчёты выполнены как для идеальной оболочки без расслоений, так и для оболочки с различными расслоениями, включая предельный случай, когда каждый из шести слоёв не имеет межслойной связи с другими слоями. При этом взаимодействие осуществляется только через нормальный контакт и межслойное трение.

Внешнее давление в конечно-элементной модели прикладывается в соответствии с условиями нагружения, реализованными в эксперименте.

Сравнительный анализ численных результатов, полученных для оболочки с различными геометрическими характеристиками расслоений, позволяет оценить влияние дефектности структуры оболочки на её жесткостные характеристики.

Описание объекта исследования

Авторами выполнен расчёт бездефектной (идеальной) слоистой оболочки вращения и оболочки с расслоениями. При этом рассмотрены расслоения по срединной поверхности и предельный вариант расслоений, когда оболочка состоит из шести отдельных слоев из КМ, взаимодействующих между собой посредством контакта в нормальном направлении и сил трения в тангенциальном направлении [4, 5]. В предельном варианте межслойная связь, обусловленная связующим, отсутствует. Для аппроксимации поверхности оболочки применяются трехмерные элементы Solid C3D8 и Continuum Shell SC8R.

Общий вид и основные геометрические параметры оболочки приведены на рис. 1.

Исследования влияния дефектов в виде расслоений на жесткостные характеристики конструкции

выполнены на примере численных расчетов конической оболочки с относительной толщиной стенки $\delta/R_{cp} \approx 0,08$ и длиной образующей $L \approx 25 (R_{cp}\delta)^{1/2}$. Здесь δ — толщина стенки оболочки; $R_{cp} = (R_0 + R_1)/2\cos\alpha$; R_0, R_1 — радиусы окружности малого и большого оснований конуса; α — угол полураствора конуса.

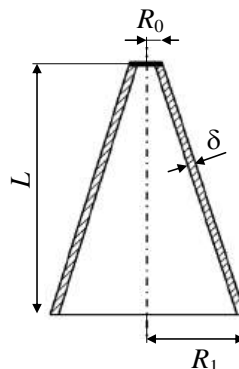


Рис. 1. Основные размеры исследуемой оболочки

Оболочка вращения выполнена из КМ на основе тканого наполнителя, уток которого ориентирован в меридиональном направлении. Эффективные характеристики упругости материала определены экспериментально на образцах КМ. Их численные значения в системе координат $OX_1X_2X_3$ приведены в табл. 1 (ось OX_1 ориентирована в направлении основы, ось OX_2 — в направлении утка, ось OX_3 направлена по нормали к плоскости тканого наполнителя). Значения модулей упругости и модулей сдвига отнесены к величине модуля сдвига G_{23} , и получены соответствующие безразмерные величины $E_1^*, E_2^*, E_3^*, G_{12}^*, G_{13}^*, G_{23}^*$. Значения коэффициентов Пуассона $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ представлены в табл. 1 без нормирования.

Внешняя нагрузка

Оболочка нагружена внешним давлением. При этом способ приложения давления к поверхности оболочки в эксперименте может иметь существенное влияние на её деформирование. В связи с этим рассматривалось два варианта приложения внешней нагрузки к поверхности оболочки, моделирующие натурные условия нагружения (рис. 2).

Таблица 1

Характеристики упругости КМ

E_1^*	E_2^*	E_3^*	G_{12}^*	G_{13}^*	G_{23}^*	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
4,14	2,18	1,1	1,27	1,22	1	0,072	0,075	0,094

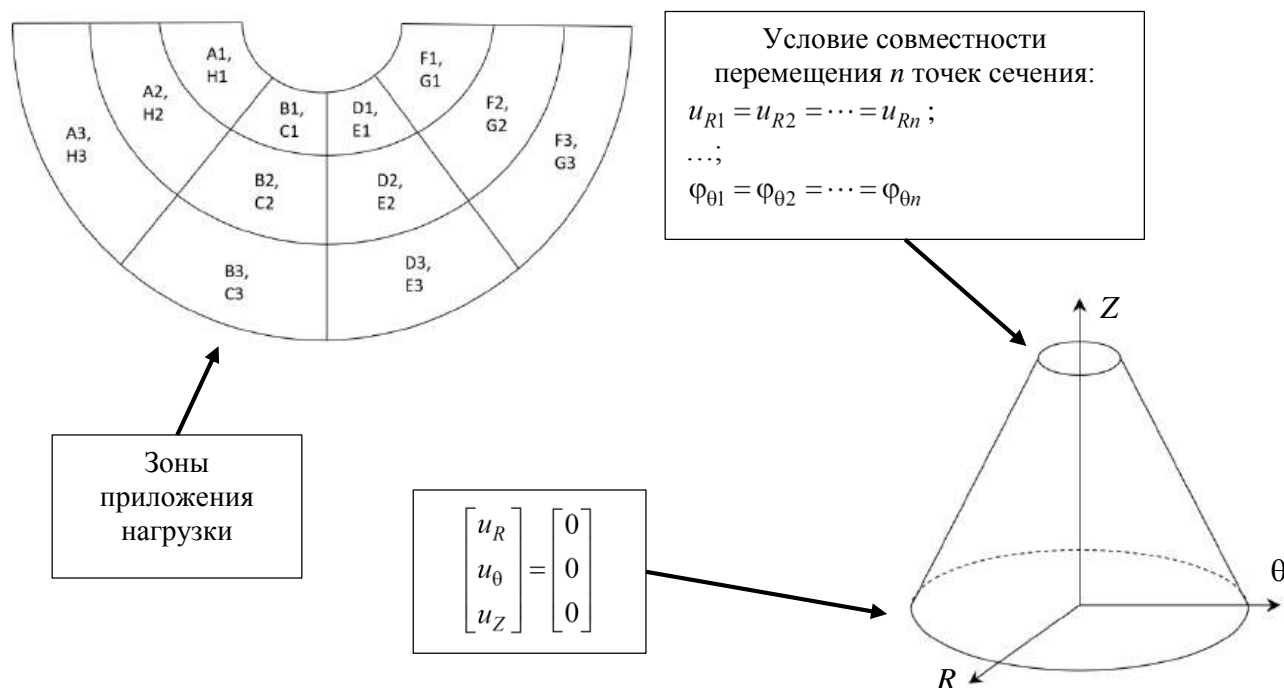


Рис. 2. Внешняя нагрузка и граничные условия для оболочки вращения конической формы

1. *Нагружение кусочно-равномерным давлением.* В рассматриваемом случае поверхность оболочки разделена на 3 зоны в меридиональном направлении и на 4 зоны в окружном направлении. В пределах каждой из 12 зон прикладывается равномерное давление p_i ($i = 1—12$). Численные значения p_i получены из отношения силы на приводе загрузочной плиты к площади плиты. Значения прикладываемого давления и равнодействующей силы, нормированные по максимальным значениям, приведены в табл. 2., моделирующие натурные условия нагружения.

Таблица 2

Параметры приложенного кусочно-равномерного давления

Зона приложения нагрузки	Безразмерное значение давления на элементе оболочки	Безразмерное значение равнодействующей силы на элементе оболочки
A1, H1	0,061	0,058
B1, C1, F1, G1	0,263	0,250
D1, E1	1,000	0,952
A2, H2	0,020	0,032
B2, C2, F2, G2	0,127	0,203
D2, E2	0,627	1,000
A3, H3	0,015	0,028
B3, C3, F3, G3	0,083	0,155
D3, E3	0,475	0,879

2. *Нагружение системой самоустанавливающихся абсолютно жестких плит* [6, 7]. В дан-

ном случае учтено, что в эксперименте используется система нагружающих плит двойной кривизны с шарнирным креплением на штоке приводного устройства. Через эту систему плит прикладывается нагрузка, моделирующая давление в реальных условиях эксплуатации. В силу свободного перемещения плит устройство нагружения не стесняет деформирование оболочки под действием внешнего давления. Для численного моделирования такого способа нагружения в расчетном комплексе Abaqus разработана конечно-элементная модель и решена контактная задача. В результате её решения получено неравномерное распределение контактного давления, обусловленного взаимодействием абсолютно жесткой самоустанавливающейся плиты и деформируемой оболочки.

Граничные условия

При численном расчёте оболочки были введены следующие граничные условия (см. рис. 2):

- при $z = 0$, т. е. для большего основания конической оболочки, запрещены линейные перемещения;
- в вершине конуса задано условие равенства линейных и угловых перемещений всех n точек сечения, т. е. сечение является абсолютно жестким.

Данные граничные условия рассматривались как для идеальной оболочки, так и для оболочки с расслоениями.

Разработка конечно-элементной модели оболочки с расслоением

Для анализа влияния расслоений на жесткостные характеристики оболочки рассмотрены следующие расчётные случаи: бездефектная оболочка (исходный вариант); оболочка с расслоением по срединной поверхности (промежуточный вариант); оболочка из шести слоёв, взаимодействующих между собой только посредством нормального контакта и трения, т. е. без адгезионной связи (предельный вариант). В последнем случае можно оценить максимальное влияния расслоения на жесткостные характеристики оболочки.

При разработке конечно-элементной модели оболочки с расслоениями использовали два подхода. При моделировании оболочки с расслоением

по срединной поверхности применяли модель с локальными разрывами межслоевых связей. В материал оболочки вводилась зона, в которой отсутствовали адгезионные связи. Взаимодействие слоёв осуществлялось только через нормальный контакт и трение между ними. Предполагалось, что на границе расслоения слои деформируются совместно. При этом конечную жесткость адгезионной связи не учитывали. Для аппроксимации геометрии использовались трехмерные элементы типа C3D8 [4] (рис. 3).

В случае оболочки из шести слоёв, взаимодействующих между собой только посредством нормального контакта и трения, рассматривали комбинацию моделей, каждая из которых моделирует определенную зону. Для моделирования каждого слоя по отдельности использовали трехмерные элементы типа SC8R [4].

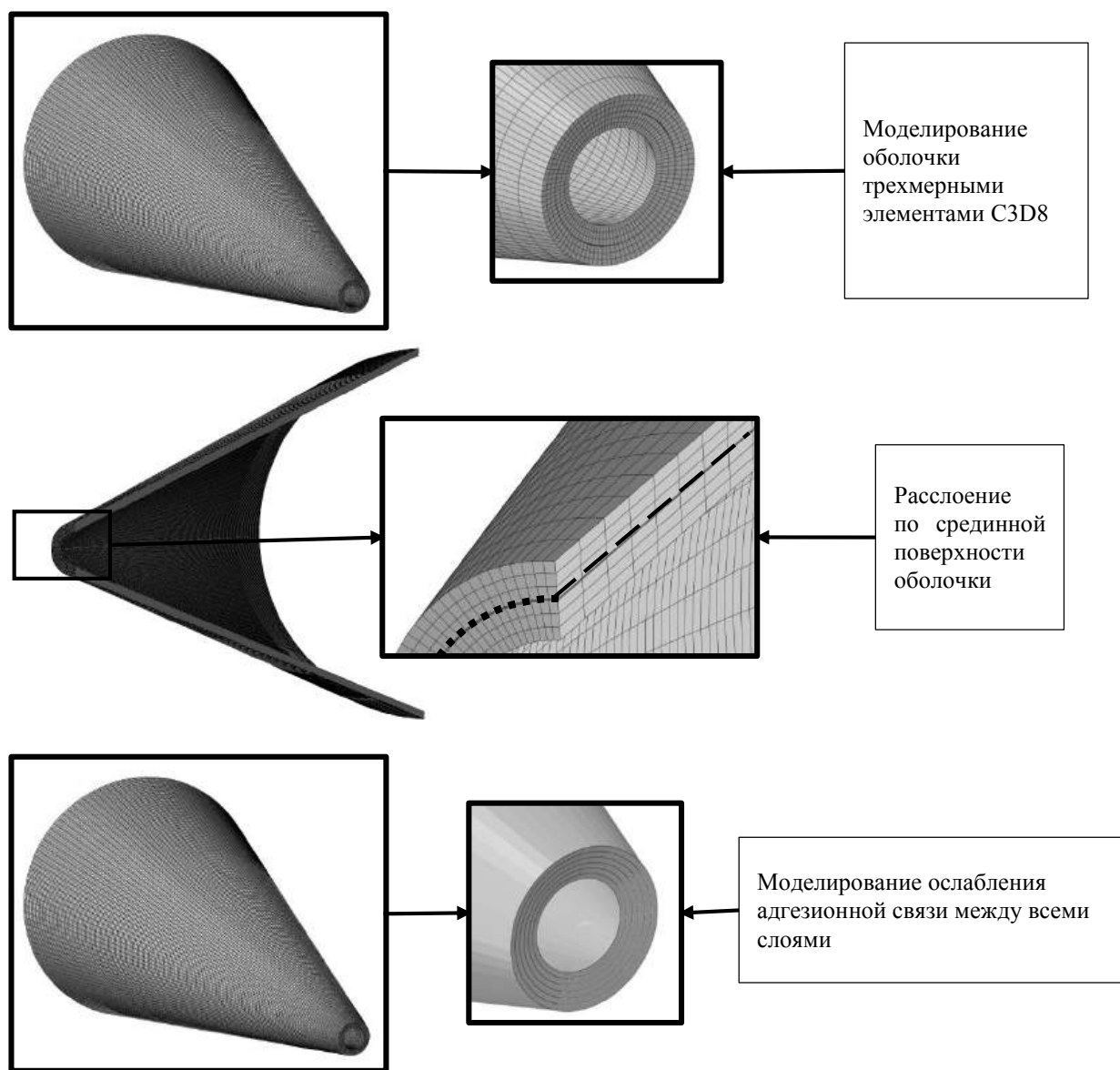


Рис. 3. Конечно-элементное моделирование расслоений в оболочке вращения

Анализ полученных результатов

Далее приведены результаты численного моделирования различных вариантов оболочки с расслоением и без. Сравнение максимальных перемещений, полученных при численном моделировании в Abaqus для исходного, промежуточного и предельного вариантов при нагружении кусочно-равномерным давлением, представлено в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение перемещений для различных вариантов оболочки, нагруженной кусочно-равномерным давлением

Исследуемая величина	Исходный вариант	Промежуточный вариант (с расслоением по срединной поверхности)	Предельный вариант (без адгезионной связи между слоями)
Максимальное нормированное перемещение	0,232	0,362	0,545

Перемещения нормированы по толщине оболочки δ . На рис. 4 представлены графики перемещений оболочки при нагружении кусочно-равномерным давлением.

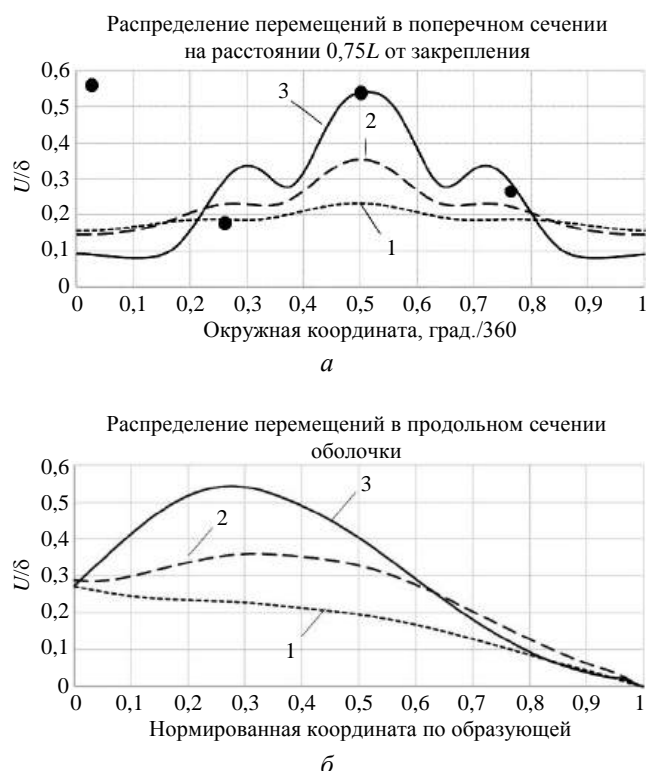


Рис. 4. Зависимость расчетных и экспериментальных значений перемещений оболочки от окружной координаты (а) и нормированной координаты по образующей (б):

1 — исходный вариант; 2 — промежуточный вариант с расслоением по срединной поверхности; 3 — предельный вариант без адгезионной связи между слоями; точки — результаты эксперимента

На представленных графиках прослеживается более чем двукратное увеличение перемещения при отсутствии адгезионной связи между слоями. Максимальные значения перемещений хорошо совпадают с экспериментом. Стоит заметить, что при появлении значительных расслоений в конструкции оболочки характер деформирования под действием кусочно-равномерного давления изменяется и преобладающую роль начинают играть локальные деформации, обусловленные уменьшением цилиндрической жесткости оболочки. Также на графиках можно заметить большое расхождение с экспериментом в зоне низкого давления. Это может быть объяснено тем, что в эксперименте давление обеспечивалось с помощью жестких плит [6, 7], воздействие которых на конструкцию отличается от воздействия кусочно-равномерного давления. На рис. 5 сопоставлены графики перемещений оболочки с расслоением по срединной поверхности при нагружении ее кусочно-равномерным давлением и системой самоустанавливающихся плит, когда распределение давления по поверхности оболочки получено в результате решения контактной задачи. При переходе от нагружения кусочно-равномерным давлением к нагружению системой самоустанавливающихся плит вклад от локальных прогибов оболочки снижается, а деформация, соответствующая по форме консольно-закрепленной балке, возрастает.

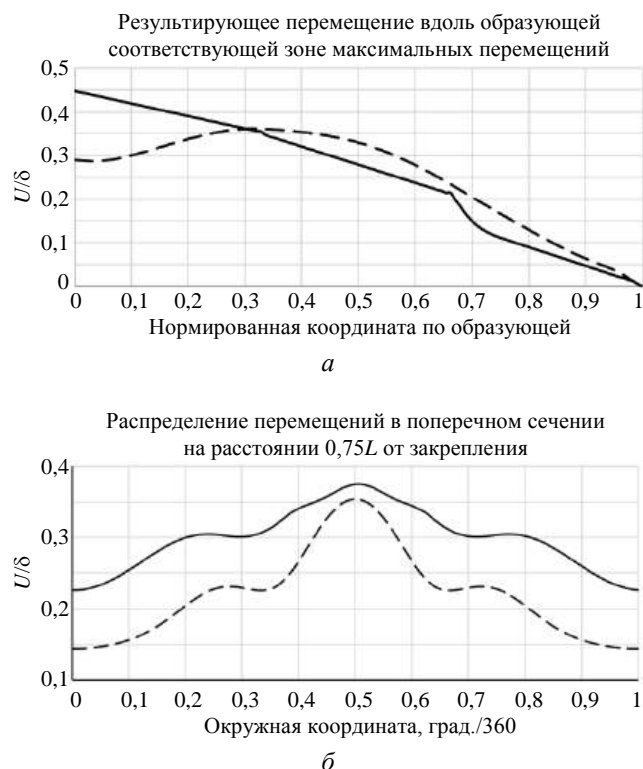


Рис. 5. Зависимость расчетных перемещений оболочки, нагруженной кусочно-равномерным давлением (штриховая линия) и системой самоустанавливающихся плит (сплошная линия), от нормированной координаты по образующей (а) и окружной координаты (б)

На рис. 6 приведены изображение компонент и распределение напряжений по образующей, нормированных по величине максимального приложенного внешнего давления, для описанных вариантов оболочки, нагруженной кусочно-равномерным давлением и системой плит. Распределение соответствует угловому положению образующей, содержащему максимальные значения напряжений в оболочке.

Помимо к сравнения значений напряжений для различных вариантов оболочки осуществлено сравнение их приведенных нормированных жесткостей, полученных отношением равнодействующей силы к перемещению центра малого основания оболочки. Нормирование выполнено по значению жесткости исходного варианта оболочки (табл. 4).

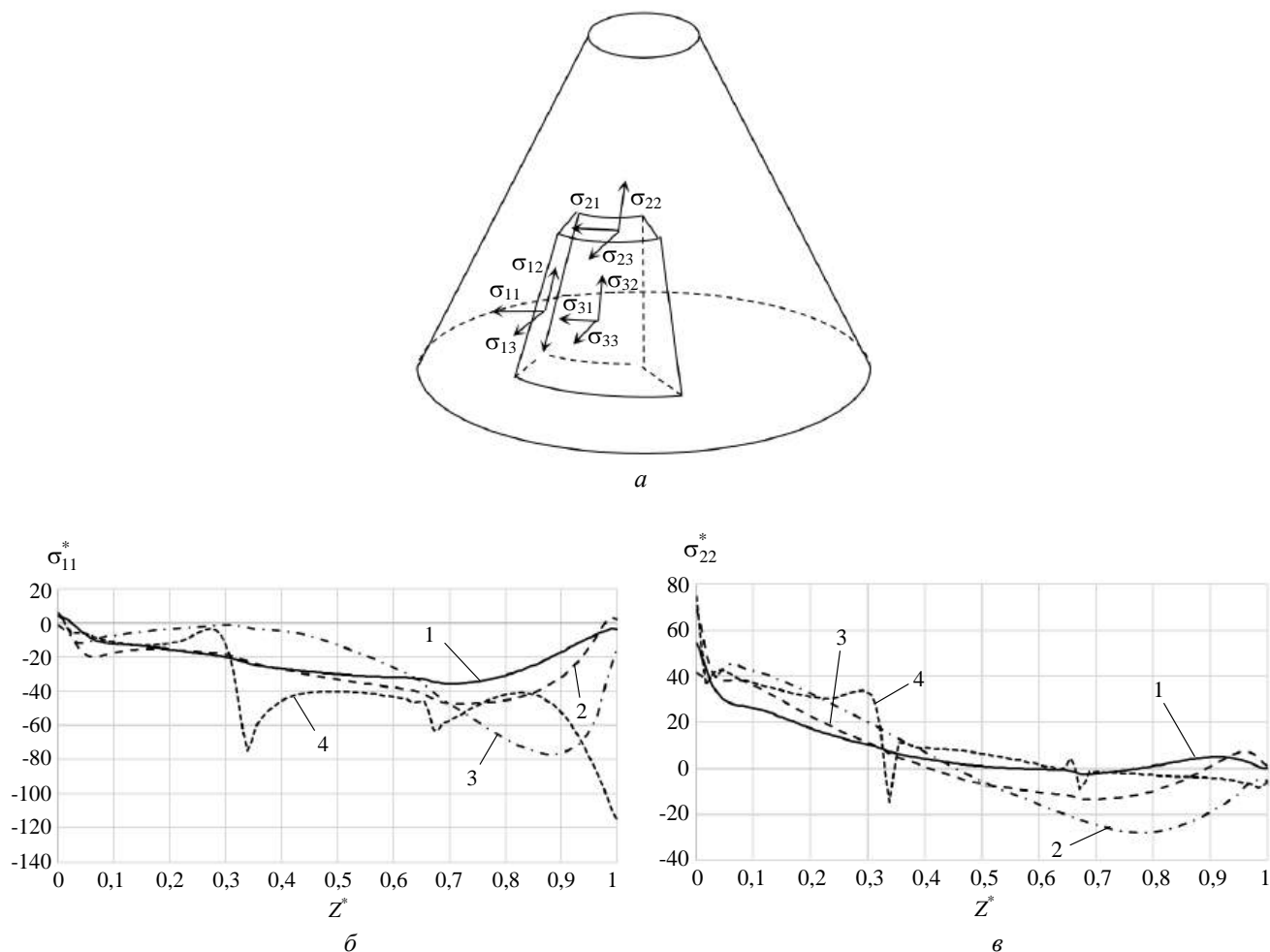


Рис. 6. Изображение компоненты напряжений (а), напряжения σ_{11}^* (б) и напряжения σ_{22}^* (в) в материале:

1 — исходный вариант; 2 — промежуточный вариант (с расслоением по срединной поверхности); 3 — предельный вариант (без адгезионной связи между слоями); 4 — промежуточный вариант (с расслоением по срединной поверхности), нагрузка приложена с помощью системы плит

Таблица 4

Приведенные жесткости различных вариантов оболочки, нагруженной кусочно-равномерным давлением и системой плит

Параметр	Нормированное значение жесткости			
Тип нагружения	Нагружение кусочно-равномерным давлением			Нагружение системой плит
Вариант оболочки	Исходный вариант	Промежуточный вариант (с расслоением по срединной поверхности)	Предельный вариант (без адгезионной связи между слоями)	Промежуточный вариант (с расслоением по срединной поверхности)
Значение параметра	1,000	0,997	0,872	0,740

Выводы

Наличие расслоений может оказывать существенное влияние на прочностные и жесткостные характеристики оболочки. При этом характер деформирования оболочки меняется в зависимости от размера расслоений. В случае варианта без расслоений превалирует изгиб оболочки, соответствующий консольно-закрепленной тонкостенной балке с переменным сечением. При наличии расслоений основной вклад в деформирование вносят локальные деформации, связанные с уменьшением цилиндрической жесткости оболочки.

Способ приложения давления вносит существенный вклад в распределение перемещений по поверхности оболочки. При переходе от нагружения кусочно-равномерным давлением к нагружению системой самоустанавливающихся плит вклад от локальных прогибов оболочки снижается, а деформация, соответствующая по форме консольно-закрепленной балке, возрастает.

Для оболочки, в конструкции которой присутствуют расслоения, уровень напряжений существенно превышает аналогичный показатель для оболочки без расслоений.

При переходе от нагружения кусочно-равномерным давлением к нагружению с помощью системы плит уровень напряжений существенно возрастает.

В расчетах на прочность и жесткость конструкций, аналогичных приведенной в статье, целесообразно учитывать наличие расслоений и способ приложения нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сарбаев Б. С., Ширшов Ю. Ю., Галаджиев С. В. Способ расчёта напряжений и деформаций в многослойном композиционном материале в области технологического дефекта в виде складки // Конструкции из композиционных материалов. 2018. № 4. С. 26—34.
2. Болотин В. В. Дефекты типа расслоение в конструкциях из композиционных материалов // Механика композиционных материалов. 1984. № 2. С. 239—256.
3. Баженов В. А., Гоцуляк Е. А., Оглобля А. И. и др. Расчет композитных конструкций с учетом расслоений. — Киев: Будивельник, 1992. — 136 с.
4. Василенко А. Т., Емельянов И. Г. Контактное взаимодействие анизотропных цилиндрических оболочек с упругими и жесткими телами // Прикладная механика. 1993. № 3. С. 38—42.
5. Пелех Б. Л., Максимук А. В., Коровайчук И. М. Контактные задачи для слоистых элементов конструкций и тел с покрытиями. — М.: Наука, 1988. — 278 с.
6. Георгиевский В. П., Малютин И. С., Прусс У. И., Пилипенко П. Б. Стенд для испытания конструкций на прочность. Описание изобретения к авторскому свидетельству СССР № 932334. 1982.
7. Клячко М. Д., Арнаутков Е. В. Летные прочностные испытания самолетов. Статические нагрузки. — М.: Машиностроение, 1985. — 128 с.

Numerical analysis of stresses and strains of a shell of revolution made from a laminate composite material with considering structural defects in the form of delamination

B. S. SARBAYEV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

A. V. KONOVALOV

LLC "VR-Technologies", Tomilino, Moscow region, Russia

Yu. Yu. SHIRSHOV

JSC «MIC «NPO Mashinostroyeniya», Reutov, Moscow region, Russia

The results of a numerical analysis of stresses and strains in a shell of revolution made of a laminate composite material (CM) are presented. It is assumed that the structure contains defects in the form of delamination. The calculations have been performed using the modern computational tool based on the finite element method. The influence of this type of defects on the stiffness characteristics of the structure is investigated. The analysis of correlation between the simulation results of multiple variants of shell and experimental data of static deformation has been performed.

Keywords: laminated composite material, shell of revolution, delamination, numerical simulation, contact simulation, adhesive coupling, cohesive coupling, static deformation.

УДК 629.73.001.63

DOI: 10.52190/2073-2562_2021_4_10

Уточненная расчетная зависимость несущей способности боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость, от геометрических и структурных параметров

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

Рассмотрено применение расчетной зависимости несущей способности боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость. Проведено исследование несущей способности в зависимости от геометрических и структурных параметров, в частности от коэффициента армирования однонаправленного анизотропного слоя боралюминия. Дан анализ использования уточненной расчетной зависимости и несущей способности боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость, по уточненному коэффициенту K , представляющему отношение критических нагрузок, полученных в эксперименте, к расчетным. Использование предложенной уточненной расчетной зависимости позволяет снизить статистические характеристики, определяющие разброс расчетных и экспериментальных значений по коэффициенту K , и тем самым более обоснованно подходить к назначению коэффициентов безопасности конструкций.

Ключевые слова: уточненная расчетная зависимость, несущая способность, структурные и геометрические параметры, критическая нагрузка, коэффициент согласия, боралюминиевая оболочка, характер укладки слоев, коэффициент безопасности.

В практике проектанта-расчетчика всегда желательно иметь теоретические материалы, которые проверены экспериментально, что позволит более обоснованно и с большей надежностью использовать их в инженерных расчетах при назначении заданного эксплуатационного коэффициента безопасности.

В данной работе рассмотрена возможность применения имеющейся методики согласования расчетных и экспериментальных значений несущей способности слоистых оболочек из композиционных материалов [1] при проектировании боралюминиевых оболочек, работающих на устойчивость.

Основываясь на проведенных ранее исследованиях с применением структурного подхода [2], отметим, что величина критической нагрузки зависит от комплекса структурных и геометрических параметров: числа слоев в пакете N , толщины слоя h , угла укладки слоя α , соотношения φ слоев, уложенных под различными углами, последовательности укладки слоев в пакете, коэффициента

армирования слоя ψ , безразмерных параметров L/R и H/R (где L — длина, R — радиус, H — толщина пакета оболочки), а также от упругих характеристик исходных компонентов, составляющих однонаправленный слой композиционного материала. Очевидно, что в зависимости от комплекса этих параметров будет изменяться также и функция согласия экспериментальных и расчетных данных.

Каждому комплексу геометрических и структурных параметров оболочки соответствует определенное значение критической нагрузки. Это говорит о том, что критическая нагрузка оболочки, состоящей из однонаправленных слоев в пакете, может быть описана функцией от целого ряда параметров геометрического и структурного характера:

$$q = F \left(\frac{L}{R}; \frac{H}{R}; N; h; \varphi; \psi; \alpha; \Pi; E_{ap}; \right. \\ \left. E_c; v_{ap}; v_c; G_{ap}; G_c \right), \quad (1)$$

где Π — вариант порядка расположения слоев в пакете;

E, v, G — упругие характеристики армирующего материала и связующего (модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига соответственно).

Следовательно, в многомерном пространстве геометрических, структурных и упругих параметров в логарифмических координатах критическую

Калашников Сергей Тимофеевич, старший научный сотрудник.

E-mail: ofpat@mail.ru

Болтаев Петр Иванович, старший научный сотрудник.

E-mail: ofpat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 7 июля 2021 г.

© Калашников С. Т., Болтаев П. И., 2021

нагрузку можно представить в виде гиперплоскости:

$$\lg q = a_1 \lg \frac{L}{R} + a_2 \lg \frac{H}{R} + \dots + a_k \lg G_c + C_1, \quad (2)$$

где a_1, \dots, a_k — искомые параметры;

C_1 — константа.

Уравнение (2) удобно представить в виде

$$Z' = \sum_{j=1}^k a'_j X_j + C', \quad (3)$$

где Z' — $\lg q$;

X_j — \lg геометрических и структурных параметров.

Поскольку теоретические значения критической нагрузки представляют собой гиперплоскость, экспериментальные значения также должны с некоторым отклонением аппроксимироваться уравнением гиперплоскости. Поэтому используя методы аналитической геометрии, можно найти корректирующую функцию для расчетных значений.

Использование уравнения (2) наиболее эффективно в случае, когда есть уверенность, что критическая нагрузка имеет экспоненциальную или близкую к ней зависимость от входящих параметров. В случае, если это не так, результаты согласования могут быть менее эффективны. Как показано в классической литературе [3], поведение критической нагрузки в зависимости от геометрических параметров L/R и H/R имеет экспоненциальный характер. Следовательно, в рассматри-

ваемом случае данный подход является приемлемым и обоснованным. Процедуру получения скорректированной зависимости возьмем из работ [1, 4].

Скорректированная зависимость, приведенная в работе [4], отражает влияние экспериментальных данных и позволяет определить разброс уточненной расчетной зависимости, что удобно делать через коэффициент K . Следует отметить, что разброс по коэффициенту K должен быть наименьшим, поскольку корректирующую функцию определяют по методу наименьших квадратов [5].

Используя разработанную методику, проведем согласование расчетных значений с имеющимися экспериментальными данными, взятыми из работ [1, 4] и представленными в объединенной табл. 1.

Для наглядности графического изображения корректирующую функцию представим зависимой только от геометрических безразмерных параметров L/R и H/R (в данном случае возьмем обратную величину $R/H = (H/R)^{-1}$). Поскольку перейти от одной величины к другой не представляет труда, имеем $\lg \frac{R}{H} = -\lg \frac{H}{R}$.

Представим корректирующую функцию в следующем виде:

$$\lg K = a \lg \frac{R}{H} + b \lg \frac{L}{R} + C, \quad (4)$$

где a, b — искомые параметры;

C — константа.

Таблица 1

Параметры оболочек при кольцевой укладке слоев и при $\psi \approx 0,3$ и $0,4$

N	ψ	$\frac{R}{H}$	$\frac{L}{R}$	h , мм	$q_{\text{рас}}$, МПа	$q_{\text{эк}}$, МПа	K	K^*	$q_{\text{рас}}^*$, МПа	$K_1 = \frac{q_{\text{эк}}}{q_{\text{рас}}}$	$(K_1 - \bar{K}_1)^2$
15	0,394	26,52	2,92	0,153	13,14	11,2	0,852	0,8596	11,295	0,99159	0,00017
15	0,410	27,55	0,85	0,147	50,70	25,2	0,497	0,4678	23,717	1,06253	0,00335
15	0,410	27,55	1,74	0,147	21,50	16,5	0,767	0,6699	14,403	1,14559	0,01987
15	0,402	27,03	2,96	0,150	12,50	11,4	0,912	0,8699	10,874	1,04837	0,00191
15	0,400	26,81	0,83	0,151	55,00	22,2	0,404	0,4588	25,234	0,87977	0,01559
15	0,400	26,81	1,73	0,151	22,90	14,4	0,629	0,6631	15,185	0,94830	0,00317
9	0,328	36,76	2,92	0,184	5,51	5,4	0,980	0,9385	5,171	1,04429	0,00157
9	0,350	39,37	0,79	0,172	20,70	11,0	0,531	0,4964	10,275	1,07056	0,00435
9	0,350	39,37	1,71	0,172	8,48	5,7	0,672	0,7311	6,199	0,91950	0,00725
15	0,400	26,81	2,92	0,151	12,87	11,2	0,870	0,8621	11,095	1,00946	0,00002
16	0,415	26,18	2,96	0,146	13,74	10,5	0,764	0,8625	11,851	0,88600	0,01407
15	0,397	26,74	2,96	0,152	12,80	9,7	0,758	0,8674	11,103	0,87364	0,01716
13	0,345	27,03	2,91	0,173	11,88	10,2	0,858	0,8625	10,246	0,99551	0,000080
12	0,271	22,68	2,96	0,224	15,45	13,1	0,848	0,8298	12,820	1,02184	0,000296
12	0,266	22,32	2,96	0,228	15,90	14,5	0,912	0,8262	13,137	1,10375	0,009820
15	0,287	19,34	2,97	0,210	23,20	16,1	0,694	0,7964	18,476	0,87140	0,01775
15	0,330	22,22	2,99	0,183	17,40	15,1	0,868	0,8295	14,433	1,04621	
14	0,296	21,74	2,96	0,200	17,40	17,8	1,006	0,8204	14,521	1,22581	
14	0,296	22,17	2,96	0,196	16,70	13,0	0,778	0,8247	13,772	0,94394	

Примечание. $(K_1 - \bar{K}_1)^2$ — среднеквадратичное отклонение.

Применяя процедуру метода наименьших квадратов и используя данные табл. 1 для рассмотренных оболочек кольцевой укладки пакета при коэффициентах армирования $\psi = 0,3$ и $0,4$, найдем уравнение плоскости, которое будет отражать корректирующую функцию.

Представим её в более предпочтительном явном виде:

$$K^* = 0,2079 \left(\frac{R}{H} \right)^{0,2691} \left(\frac{L}{R} \right)^{0,5014}. \quad (5)$$

Сравнение корректирующих функций, полученных в работах [1], [4], показывает их близкое сходство. Поскольку характер укладки слоев в обоих случаях кольцевой и основное отличие слоев оболочек заключается в значении коэффициента армирования слоя, уместно предположить, что расхождения экспериментальных значений критических нагрузок с расчетными имеют одинаковую природу. Поэтому получена общая уточненная расчетная зависимость для рассмотренных оболочек с использованием корректирующей функции (5) и теоретической расчетной зависимости, приведенной в работе [6]:

$$q_{\text{рас}}^* = 0,2079 \left(\frac{R}{H} \right)^{0,2691} \left(\frac{L}{R} \right)^{0,5014} \times \times \frac{1}{R\lambda_n^2} \left(a_{33} - \frac{a_{13}^2 a_{22} + a_{23}^2 a_{11} - 2a_{12} a_{23} a_{13}}{a_{11} a_{22} - a_{12}^2} \right). \quad (6)$$

Графическая процедура корректировки расчетных значений осуществляется аналогично их корректировке в работах [1], [4]. В данной работе остановимся на анализе статистической обработки.

По зависимости (6) проведены расчеты и статистическая обработка параметра K для значений всех трех таблиц: из работ [1], [4] и из табл. 1 данной работы. В результате расчета получены следующие значения статистических характеристик:

- среднее значение $\bar{K}_1 = 1,03159; 0,98322; 1,00463$;
- коэффициент вариации $v_{k_1} = 0,1023; 0,0951; 0,0969$.

Для наглядности и удобства анализа эти значения, а также статистические характеристики, полученные в работах [1], [4], сведены в табл. 2.

Сравнение статистических характеристик коэффициента согласия K_1 , полученных с использованием зависимостей из работ [1], [4] и обобщенной зависимости (6), показывает их большое сходство. Это говорит о том, что коэффициент армирования слоя ψ оказывает слабое влияние на разброс опытных данных критических нагрузок для оболочек из металлокомпозиата, в частности боралюминия, с кольцевой укладкой слоев в пакете.

Использование зависимостей из работ [1], [4] и обобщенной зависимости (6) адекватно отражает закономерности поведения экспериментальных значений критических нагрузок оболочек, пакет которых спроектирован из однонаправленных слоев кольцевым способом.

Таблица 2

Корректирующая функция и статистические характеристики

Количество оболочек	Коэффициент армирования слоя	Корректирующая функция K^*	Статистические характеристики	
			\bar{K}_1	v_{k_1}
8	0,3	$\frac{1}{5837} \left(\frac{R}{H} \right)^{0,54648} \left(\frac{L}{R} \right)^{0,24507}$ из работы [4]	1,03261	0,103
8	0,3	$0,2079 \left(\frac{R}{H} \right)^{0,2691} \left(\frac{L}{R} \right)^{0,5014}$	1,03159	0,1023
11	0,4	$0,1883 \left(\frac{R}{H} \right)^{0,2983} \left(\frac{L}{R} \right)^{0,4707}$ из работы [1]	1,00398	0,0901
11	0,4	$0,2079 \left(\frac{R}{H} \right)^{0,2691} \left(\frac{L}{R} \right)^{0,5014}$	0,98322	0,0951
19	0,3—0,4	$0,2079 \left(\frac{R}{H} \right)^{0,2691} \left(\frac{L}{R} \right)^{0,5014}$	1,00463	0,0969

Таким образом, разброс экспериментальных и расчетных значений по коэффициенту K , полученных с использованием обобщенной зависимости (6), составляет порядка 9,69 %, что несколько меньше, чем при использовании зависимости из работы [4] (см. первую строку табл. 2), когда он составляет порядка 10,3 %. Подобная величина разброса объясняется несколько большим количеством испытанных оболочек и сравнительно большим диапазоном значений коэффициента армирования слоя ψ .

Таким образом, разработанная методика согласования расчетных и экспериментальных значений, основанная на представлении зависимости в виде гиперплоскости логарифмических величин входящих параметров, позволяет определять уточненную расчетную зависимость благодаря введению корректирующей функции, найденной методом наименьших квадратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтаев П. И. Методика согласования расчетных и экспериментальных значений несущей способности слоистых оболочек из композиционных материалов // Технология. Сер. "Конструкции из композиционных материалов". 1987. Вып. 1. С. 47—52.
2. Болтаев П. И., Романов М. Р. Исследование схем проектирования тонкостенных цилиндрических оболочек из боралюминия, работающих на устойчивость при внешнем давлении // Техника, экономика, информация. Сер. "Техника. Конструкции из композиционных материалов". 1981. Вып. 2. С. 41—48.
3. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. — М.: Наука, 1967. — 984 с.
4. Болтаев П. И. Уточнение расчетных зависимостей несущей способности металлокомпозитных оболочек, работающих на устойчивость // Вестник ЮУрГУ. Сер. "Машиностроение". 2012. Вып. 12. С. 124—129.
5. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. — М.: Наука, 1969. — 512 с.
6. Болтаев П. И. Основные уравнения анизотропной цилиндрической оболочки // Конструкции из композиционных материалов. 2008. № 1. С. 3—11.

Refined calculated dependence of carrying capacity of boron/aluminum shells imparting stability from geometrical and structural parameters

S. T. KALASHNIKOV, P. I. BOLTAEV

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB of the RAS,
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

The article deals with the application of calculated dependence of a carrying capacity of boron/aluminum shells imparting stability. A carrying capacity is investigated versus geometrical and structural parameters, in particular, a ratio of reinforcement of an unidirectional anisotropic boron/aluminum layer. The application of refined calculated dependence and a carrying capacity of boron/aluminum shells imparting stability with respect to the refined ratio K representing a ratio of critical experimental loads to calculated ones is analyzed. Application of the refined calculated dependence proposed in the paper results in reducing statistical characteristics defining spread in calculated and experimental values with respect to ratio K and therefore assigning soundly structure safety factors.

Keywords: refined calculated dependence, carrying capacity, structural and geometrical parameters, critical load, coefficient of concordance, boron/aluminum shell, arrangement of layers, safety factor.

Численное моделирование деформирования и разрушения контаймента АЭС при ударе двигателей падающего самолета

А. В. ОСТРИК, д-р техн. наук; В. В. КИМ, канд. физ.-мат. наук

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

М. А. ОСТРИК

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

Рассмотрены новый вариант определяющих уравнений для бетонных композиций и неявный алгоритм его численной реализации. Алгоритм реализован в виде подпрограммы ЭВМ для 3D-кода метода конечно-размерных частиц. Предложено численно моделировать нестационарный процесс деформирования и разрушения контаймента при ударе самолета в две стадии: волновую и оболочечную. Проведено численное моделирование различных вариантов ударов двигателей самолета BOEING 707-320 по контайменту. Получено, что двигатели при скорости падающего самолета 100 м/с существенно повреждают контаймент, но не пробивают его (останавливаются внутри защитной конструкции). Однако при ударе сверху по сферическому куполу возможно обрушение его центральной части на внутреннюю металлическую оболочку контаймента.

Ключевые слова: падающие самолеты, низкоскоростной удар, определяющие уравнения бетонных композиций, деформирование и разрушение контаймента АЭС.

Одним из наиболее опасных источников ударного воздействия на АЭС являются падающие самолеты [1—5]. Падение самолета — крайне тяжелое, но весьма редкое событие. Вообще говоря, вероятность случайного падения тяжелого летательного аппарата (ЛА) на ядерный реактор мала, порядка 10^{-6} 1/г [6], но его последствия катастрофичны и не могут не учитываться при проектировании АЭС. Более того, вероятность существенно увеличивается для тех случаев, когда АЭС располагаются непосредственно в зоне прохода над ними воздушной трассы, что имеет место для ряда атомных станций. Нельзя исключать и специальное перенаправление самолета на реактор при террористических актах.

Вероятность падения самолета для каждой АЭС оценивается индивидуально с учетом воздушной обстановки. Если эта вероятность менее 10^{-6} 1/г, то возможность ударного воздействия ЛА игнорируется. В противном случае считается, что самолет упадет обязательно (принцип "или—или").

Принято рассматривать падение на АЭС самолетов трех видов: общего назначения (малые самолеты, в том числе частные и спортивные), военные и коммерческие. Согласно нормам удар самолетов общего назначения учитывается всегда при проектировании АЭС вследствие их высокой аварийности. Воздействие удара военных или коммерческих самолетов рассматривается в зависимости от воздушной обстановки в районе АЭС. Отметим, что несмотря на меньшую массу, военные самолеты создают большую по величине нагрузку, чем коммерческие, так как согласно формуле Риеры [7] динамическая составляющая нагрузки пропорциональна квадрату скорости самолета, которая у военных летательных аппаратов значительно выше, чем у коммерческих. Однако угон военного самолета намного менее вероятен, чем коммерческого, и поэтому именно расчету последствий падения магистральных самолетов уделяется наибольшее внимание. Среди магистральных самолетов наиболее распространены ЛА марок Boeing 707-320 (эталон коммерческого самолета при расчетах падения на АЭС во многих странах) и Boeing 747-400. Расчету воздействия удара от этих самолетов на АЭС посвящено большое количество работ (см., например, [1—5, 8]).

Защитная оболочка реактора (контаймент), как правило, двухбарьерная: первая изготавливается из бетонных композиций, вторая — внутренняя — металлическая [9]. Первая оболочка предназна-

Острик Афанасий Викторович, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: ostrik@icp.ac.ru

Ким Вадим Валерьевич, старший научный сотрудник.

E-mail: kim@icp.ac.ru

Острик Мария Афанасьевна, студентка.

E-mail: maria.ostrik@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 июля 2021 г.

© Острик А. В., Ким В. В., Острик М. А., 2021

на для защиты от механических нагрузок различной природы (ударов, ударных волн, излучения). Вторая в случае удара самолетом служит для изоляции реакторной зоны от проливающегося топлива (например, Боинг-747-400 может быть заправлен 75 тоннами авиакеросина).

Фюзеляж самолета — довольно непрочная конструкция по сравнению с контайментом. Будучи тонкостенной оболочкой, он разрушается при взаимодействии с экранирующими реактор элементами. Характерное время действия нагрузки при таком разрушении составляет десятые доли секунды [7, 8], что много больше длительности распространения возмущения по толщине бетонной защитной оболочки (порядка нескольких миллисекунд). Следовательно, при ударе легко деформируемого и разрушаемого фюзеляжа самолета будет преобладать оболочечная стадия деформирования контаймента. Отметим, что несмотря на относительную нежесткость фюзеляжа, он передает контайменту при ударе значительный импульс (для самолета 707-320 вплоть до 20 МН·с), который может привести к разрушению контаймента на оболочечной стадии деформирования.

Большой проникающей способностью обладают двигатели ЛА. Ударное взаимодействие компактных и прочных двигателей с контайментом носит ярко выраженный волновой характер. Именно удары двигателей могут привести к пробитию защитной оболочки с последующим попаданием топлива в активную зону ядерного реактора.

Новый вариант модели нестационарного деформирования и разрушения бетона

Внешнюю оболочку контаймента изготавливают из железобетона плотностью до 2500 кг/м³. При необходимости повысить уровень защищенности реактора используют специальные защитные бетоны плотностью вплоть до 4500 кг/м³. Наличие металлического армирования существенно влияет на деформационные и прочностные характеристики в плоскости армирования. В случае удара перпендикулярно этой плоскости и распространения волны по толщине контаймента усиление материала за счет армирования менее существенно для формирующегося при этом напряженно-деформированного состояния. Более того, неоднородности бетонной композиции, включающей металлическую компоненту, могут быть причиной разрушений при отражении волн напряжений от этих неоднородностей, и наличие армирования не усилит, а ослабит сопротивление конструкции к ударным нагрузкам. Поэтому в первом приближении будем считать, что внешняя оболочка контаймента — бетонная.

Рассматриваемые скорости удара элементов самолета по контайменту ограничены разумным пределом порядка 100 м/с. Такой удар (при скорости менее 1 км/с) считается низкоскоростным. Для низкоскоростного удара важен учет сдвиговых напряжений и упругопластических деформаций в материалах соударяющихся тел.

Ударное воздействие на бетон приводит к нестационарным процессам в материале, для которых характерны большие скорости деформаций, высокие уровни давлений и накопление дефектов в хрупко разрушающемся материале с их последующим ростом, приводящим к образованию систем трещин. Численное моделирование процессов в бетоне, разрушающемся при ударном воздействии, требует разработки корректных моделей описания его нестационарного поведения.

Бетон является композитным материалом, чувствительным к скоростным эффектам. Учет скорости деформации необходим прежде всего при расчете поверхности текучести. С ростом скорости деформирования бетонов поверхность текучести увеличивает свои размеры. Также на неё оказывают существенное влияние степень поврежденности и давление. Как правило, для упрощения расчетной модели влияние скорости деформации на поверхность текучести выделяется в отдельный множитель.

Таким образом, для описания поведения бетона необходимо использование связанных моделей упругопластичности и поврежденности [10] с учетом эффектов вязкости. Обзор таких моделей применительно к задачам численного моделирования проведен в [11]. Применительно к бетонным композициям только деформационная теория пластичности Гениева Г. А. [12] и модель Холмквиста—Джонсона—Кука (НКС-модель) [13] в достаточной для практики мере константно обеспечены и могут быть использованы для расчета ударного воздействия двигателей на бетонный контаймент. В работе [11] описан численный алгоритм реализации определяющих уравнений НКС-модели. Однако эта модель не чувствительна к третьему инварианту тензора напряжений. Деформационная теория пластичности бетона Гениева Г. А. не обладает этим недостатком, но она применима только к статическим задачам при траекториях нагружения, близких к простым, и не учитывает накопления поврежденности. Представляется целесообразным обобщить эти две модели посредством их синтеза.

При обобщении за основу возьмем подход к описанию поведения бетона согласно НКС-модели за исключением поверхности текучести, которая принимается в виде, синтезирующем подходы обеих моделей:

$$\left(\frac{T_s}{T_c}\right)^2 = \left(1 - D + f \frac{P}{T_c}\right) \left[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_i)\right]^2 (1 + \delta), \quad (1)$$

$$\delta = e^{\left\{ \frac{S \left[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_i)\right]}{T_s} \right\}^3}, \quad f = \frac{3T_c(R_c - R_p)}{R_c R_p},$$

$$e = \frac{R_c R_p}{3T_c^2} - 1,$$

$$T_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 2(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}, \quad (2)$$

$$S^3 = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[S_{xx}^3 + S_{yy}^3 + S_{zz}^3 - 3(\sigma_{xy}^2 S_{zz} + \sigma_{xz}^2 S_{yy} + \sigma_{yz}^2 S_{xx}) + 6\sigma_{xy} \sigma_{xz} \sigma_{yz} \right],$$

- где P — давление;
 T_s — предельная интенсивность касательных напряжений (корень из второго инварианта девиатора напряжений);
 D — скалярная мера поврежденности;
 S — инвариантная величина, куб которой с точностью до коэффициента $3^{3/2}/2$ совпадает с третьим инвариантом девиатора тензора напряжений;
 R_c, R_p, T_c — пределы прочности бетона при одноосных сжатиях, растяжениях и чистом сдвиге;
 C, f, e — константы;
 $\dot{\varepsilon}_i$ — интенсивность скоростей деформаций.

В (1) поправка $\delta = \delta(S)$ введена для учета влияния на поверхность текучести третьего инварианта S , а множитель $1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_i)$ учитывает влияние скорости деформации аналогично тому, как это делается в НИС-модели. При этом константа C имеет тот же смысл и величину, что весьма полезно, поскольку при практическом использовании НИС-модели эту константу определяли для многих марок бетона.

Расчет степени поврежденности делаем в соответствии с НИС-моделью, в которой накопление поврежденности пропорционально накоплению пластической деформации:

$$\Delta D = \frac{\Delta \varepsilon^p + \Delta \mu^p}{\max \left[\varepsilon_{fmin}, D_1 \left(P / R_c + R_{pg} / R_c \right)^{D_2} \right]},$$

$$\Delta \varepsilon^p = \Delta \varepsilon_i - \Delta T / (\sqrt{3}G),$$

$$\Delta \mu^p = \Delta [\mu - P / K(\mu)],$$

где $\Delta \varepsilon^p, \Delta \mu^p$ — приращения сдвиговой и объемной пластических деформаций;

D_1, D_2 — константы материала;

ε_{fmin} — константа, введенная для подавления накопления поврежденности от слабых волн растяжений;

R_{pg} — предел прочности при всестороннем растяжении.

Представленная модель пластического деформирования и разрушения бетона принципиально нелинейна и при своей численной реализации нуждается в организации итерационных процессов. При этом итерации необходимы в каждой расчетной ячейке численного 3D-кода и, следовательно, должны быстро сходиться. В предлагаемом алгоритме требуемая на практике точность (относительная погрешность менее 0,1 %) достигается за 3—5 итераций.

Перед расчетом считываются материальные константы и при отсутствии некоторых из них (обязательно наличие плотности ρ_0 и прочности на одноосное сжатие R_c) проводится их оценка на основе корреляционных соотношений [11]. Если это необходимо и имеются соответствующие корреляционные соотношения, делается пересчет констант, полученных на бетонных образцах, на случай бетонного массива [14].

При определении напряженного состояния $\sigma_{ij}^{n+1} = -P^{n+1} \delta_{ij} + S_{ij}^{n+1}$ ($i = x, y, z; j = x, y, z$; δ_{ij} — символ Кронекера) и степени поврежденности D^{n+1} на новый момент времени t^{n+1} должны быть известны плотности ρ^n, ρ^{n+1} , степень поврежденности D^n , давление P^n , компоненты девиатора тензора напряжений S_{ij}^n , компоненты скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2}$. Расчет предполагает итерации по степени поврежденности D^{n+1} и величине S^{n+1} , пропорциональной третьему инварианту девиатора тензора напряжений. Алгоритм каждой итерации строится по методу Уилкинса [15]. Последовательность вычислений и расчетные соотношения представлены в таблице. Расчет давления P^{n+1} по заданным плотностям и поврежденности делается в отдельной процедуре функции $P^{n+1} = Fpress(P^n, \rho^n, \rho^{n+1}, D^{n+1})$ согласно НИС-модели. Представленный численный алгоритм является дальнейшим развитием алгоритма, подробно рассмотренного в [11].

Схема алгоритма в декартовой системе координат

Рассчитываемая величина или операция	Расчетное соотношение
Скорость изменения относительного объема	$\dot{\theta} = \dot{\varepsilon}_{xx}^{n+1/2} + \dot{\varepsilon}_{yy}^{n+1/2} + \dot{\varepsilon}_{zz}^{n+1/2}$
Девiator напряжений в предположении упругости	$S_{ij}^e = S_{ij}^n + 2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2} - \frac{1}{3} \dot{\theta} \delta_{ij} \right) \Delta t$
Интенсивности касательных напряжений	$T^n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{S_{xx}^n{}^2 + S_{yy}^n{}^2 + S_{zz}^n{}^2 + 2(S_{xy}^n{}^2 + S_{xz}^n{}^2 + S_{yz}^n{}^2)}; \quad T^{en} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{S_{xx}^e{}^2 + S_{yy}^e{}^2 + S_{zz}^e{}^2 + 2(S_{xy}^e{}^2 + S_{xz}^e{}^2 + S_{yz}^e{}^2)}$
Интенсивность скорости деформаций	$\dot{\varepsilon}_i^{n+1/2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(\sqrt{(\dot{\varepsilon}_{xx} - \dot{\varepsilon}_{yy})^2 + (\dot{\varepsilon}_{xx} - \dot{\varepsilon}_{zz})^2 + (\dot{\varepsilon}_{yy} - \dot{\varepsilon}_{zz})^2 + 6(\dot{\varepsilon}_{xy}^2 + \dot{\varepsilon}_{xz}^2 + \dot{\varepsilon}_{yz}^2)} \right)^{n+1/2}$
Подготовка к итерациям (присваивание значений с предыдущего шага по времени)	$N_{iter} = -1; \quad D^{n+1} = D^n; \quad S^{n+1} = \frac{\sqrt[6]{3}}{\sqrt{2}} \left[S_{xx}^n{}^3 + S_{yy}^n{}^3 + S_{zz}^n{}^3 - 3(S_{xy}^n{}^2 S_{zz}^n + S_{xz}^n{}^2 S_{yy}^n + S_{xy}^n{}^2 S_{zz}^n) + 6\sigma_{xy}^n \sigma_{xz}^n \sigma_{yz}^n \right]^{1/3}$
Начало итераций по D^{n+1} и S^{n+1}	$M_{iter}: N_{iter} = N_{iter} + 1$
Проверка сходимости	if ($N_{iter} > 10$) then {output("all is bad"); pause; stop}
Девiator полагаем равным упругому девиатору; расчет давления	$S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^e; \quad P^{n+1} = Fpress(P^n, \rho^n, \rho^{n+1}, D^{n+1})$
Предельное значение интенсивности касательных напряжений	Численное решение уравнения пятой степени относительно T_{seq} : $\left(\frac{T_{seq}}{T_c} \right)^2 = \left(1 - D^{n+1} + f \frac{P^{n+1}}{T_c} \right) \left[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_i^{n+1/2}) \right]^2 \left\{ 1 + e \left[S^{n+1} \frac{1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_i^{n+1/2})}{T_{seq}} \right]^3 \right\};$ $T_s = \min[T_{smax}, T_{seq}]$
Корректировка девиатора напряжений	if ($T^{en} > T_s$) then $S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^e (T_s / T^{en})$
Интенсивность касательных напряжений	$T^{n+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(S_{xx}^{n+1})^2 + (S_{yy}^{n+1})^2 + (S_{zz}^{n+1})^2 + 2((\sigma_{xy}^{n+1})^2 + (\sigma_{xz}^{n+1})^2 + (\sigma_{yz}^{n+1})^2)}$
Приращение пластической деформации	$\Delta \varepsilon^p = \dot{\varepsilon}_i^{n+1/2} \Delta t - \frac{T^{n+1} - T^n}{\sqrt{3}G} + \frac{(\rho^{n+1} - \rho^n)}{\rho_0} - \left(\frac{P}{K} \right)^{n+1} + \left(\frac{P}{K} \right)^n$
Степень поврежденности	$D^{old} = D^{n+1}; \quad D^{n+1} = D^n + \Delta \varepsilon^p / \max \left\{ \varepsilon_{fmin}, D_1 \left[(P^{n+1} + P^n) / (2R_c) + R_{pg} / R_c \right]^{D_2} \right\}$
Параметр S (величина, пропорциональная третьему инварианту)	$S^{old} = S^{n+1};$ $S^{n+1} = \frac{\sqrt[6]{3}}{\sqrt{2}} \left((S_{xx}^{n+1})^3 + (S_{yy}^{n+1})^3 + (S_{zz}^{n+1})^3 - 3((\sigma_{xy}^{n+1})^2 S_{zz}^{n+1} + (\sigma_{xz}^{n+1})^2 S_{yy}^{n+1} + (\sigma_{xy}^{n+1})^2 S_{zz}^{n+1}) + 6\sigma_{xy}^{n+1} \sigma_{xz}^{n+1} \sigma_{yz}^{n+1} \right)^{1/3}$
Переход на новую итерацию при нарушении точности по D	if ($abs(D^{n+1} - D^{old}) > 10^{-5} D^{n+1} + 10^{-12}$) then go to Miter
Переход на новую итерацию при нарушении точности по S	i if ($abs(S^{n+1} - S^{old}) > 10^{-5} S^{n+1} + 10^{-12}$) then go to Miter
Новое давление	$P^{n+1} = Fpress(P^n, \rho^n, \rho^{n+1}, D^{n+1})$
Окончательная корректировка девиатора напряжений	Численное решение уравнения пятой степени относительно T_{seq} : $\left(\frac{T_{seq}}{T_c} \right)^2 = \left(1 - D^{n+1} + f \frac{P^{n+1}}{T_c} \right) \left[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_i^{n+1/2}) \right]^2 \left\{ 1 + e \left[S^{n+1} \frac{1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_i^{n+1/2})}{T_{seq}} \right]^3 \right\};$ $T_s = \min[T_{smax}, T_{seq}]; \quad \text{if } (T^{en} > T_s) \text{ then } S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^e (T_s / T^{en})$

Результаты расчетов ударов двигателей по контайменту

Первоначально рассматривался удар сверху одного из двигателей по сферическому куполу внешней защитной оболочки. Геометрия и размеры контаймента показаны на рис. 1.

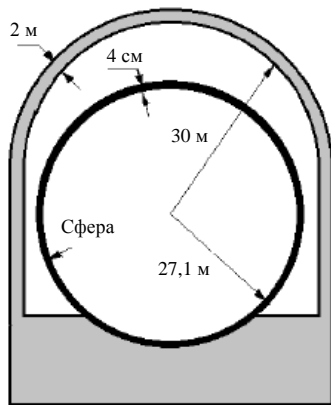


Рис. 1. Геометрия контаймента

Воздействие компактного двигателя самолета BOEING 707-320 моделировалось ударом железного шара радиусом 0,394 м (массой 2 т) со скоростью 100 м/с. Результаты расчетов для распределений степени поврежденности D и плотности представлены на рис. 2—4. Видно, что зоны разрушения ($D \geq 1$) образуются в основном на свободных поверхностях и внутри контаймента под ударником. В процессе движения ударника в бетоне перед ним образуется область уплотнения, что приводит к его торможению и остановке (ударник застревает в бетонной конструкции). Однако к моменту времени $t = 4$ мс вся область под двигателем оказывается разрушенной по всей толщине в цилиндре диаметром порядка 2 м. При этом разрушение сферического купола в окрестности удара по всей толщине оболочки может привести к обрушению разрушенного бетона на внутреннюю металлическую оболочку контаймента. Для оценки последствий такого обрушения необходимы дальнейшие исследования.

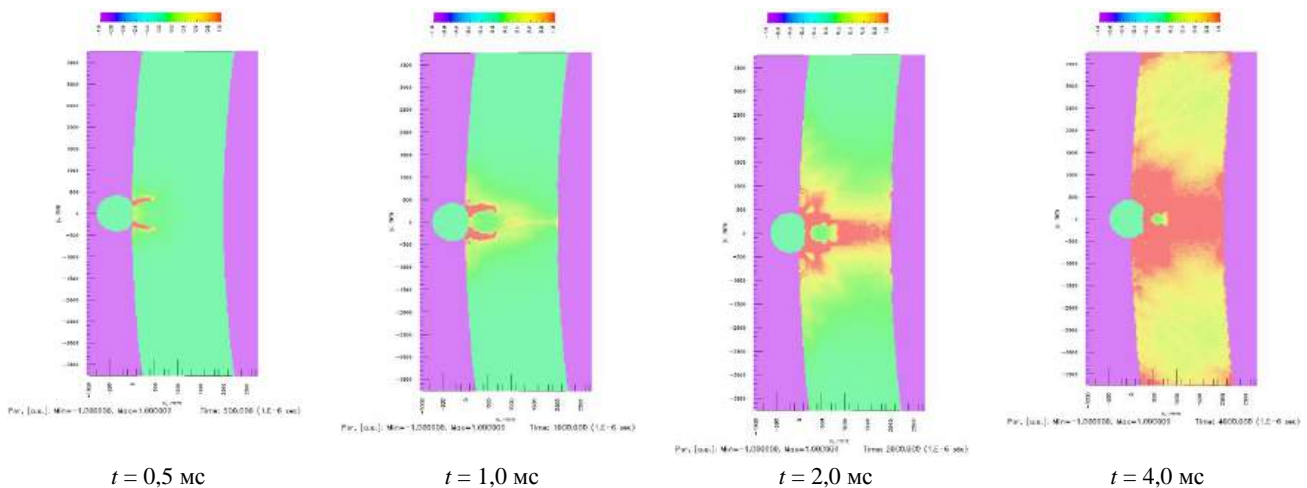


Рис. 2. 2D-распределение степени поврежденности D в сферическом куполе в различные моменты времени

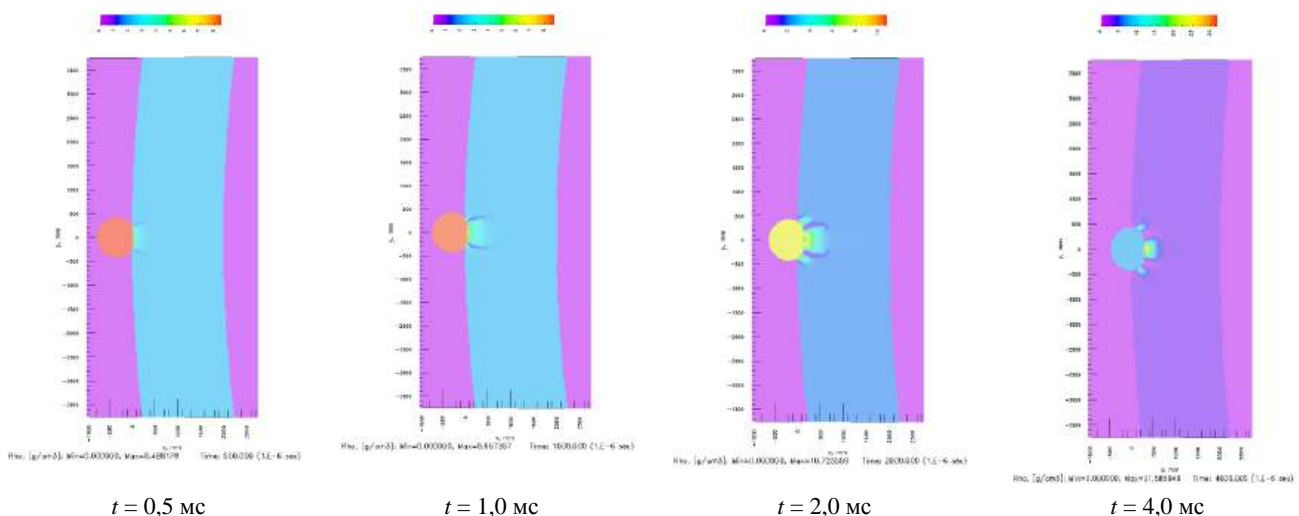


Рис. 3. 2D-распределение плотности в сферическом куполе и двигателе в различные моменты времени

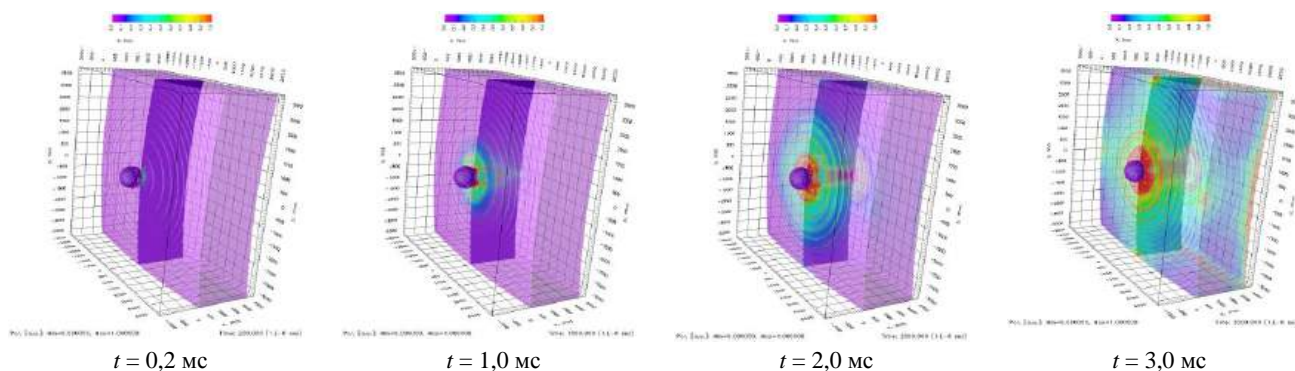


Рис. 4. 3D-распределение степени поврежденности D в сферическом куполе в различные моменты времени

На магистральном самолете BOEING 707-320 четыре двигателя. В случае перпендикулярного бокового удара ЛА по цилиндрической стенке дальние от фюзеляжа двигатели начинают взаимодействовать с контайментом значительно позже (в масштабах времени развития волновых процессов

при ударе) двух центральных. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть удар двух центральных двигателей. Результаты расчетов для распределений степени поврежденности D представлены на рис. 5.

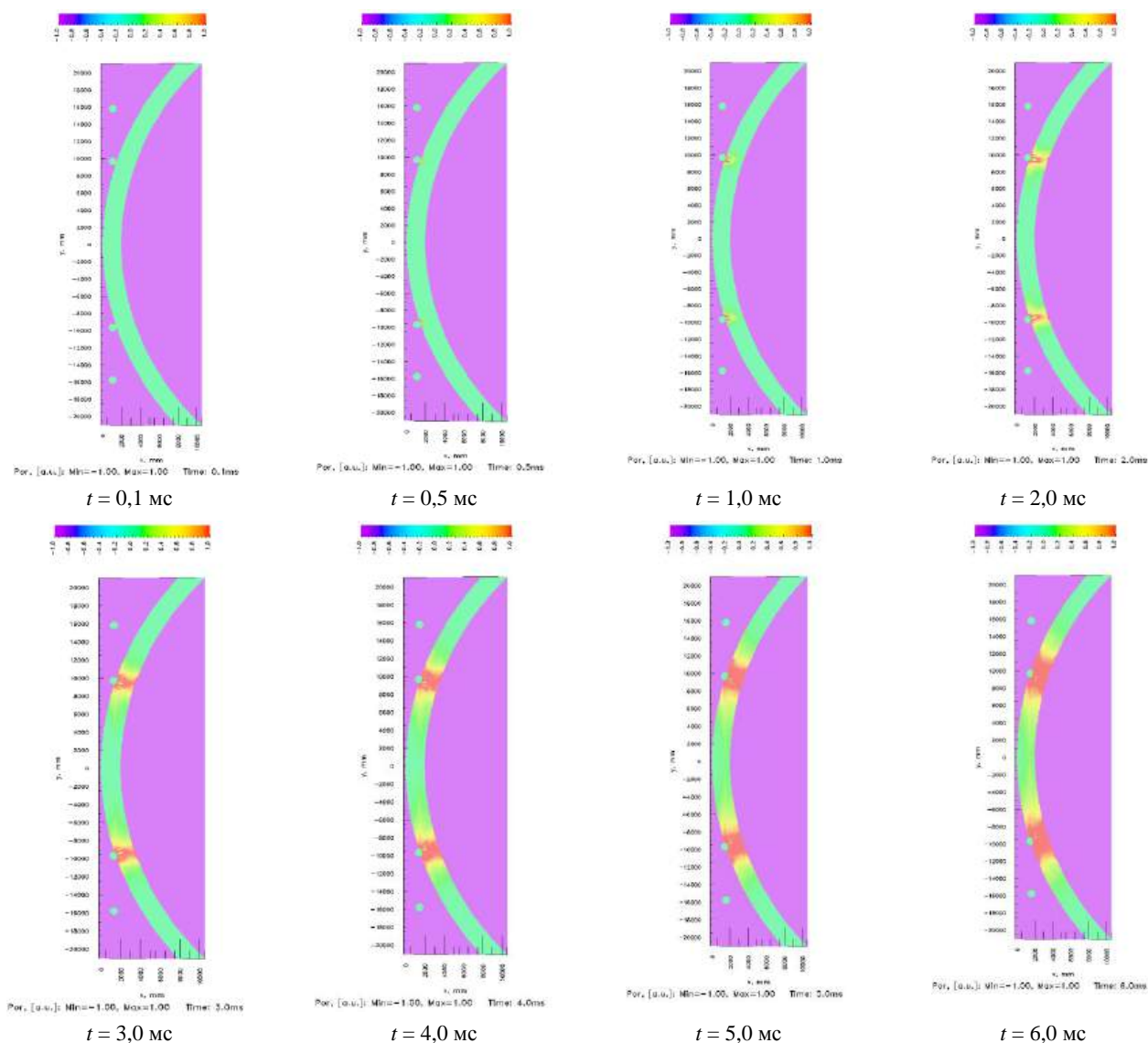


Рис. 5. 2D-распределение степени поврежденности D в цилиндрической части контаймента при ударе двух центральных двигателей в различные моменты времени

Положение еще не долетевших до контаймента двух крайних двигателей также представлено на рис. 5 для общности картины взаимодействия. Видно, что зоны поврежденности бетона локализируются в окрестности удара. Взаимодействие зон поврежденности начинается при временах порядка 5 мс от начала удара (согласно рис. 5 образуется перемычка между этими зонами ($D \approx 0,5$)), когда двигатели практически останавливаются в защитной оболочке. Следовательно, удары двигателей можно считать отдельно, а последствия воздействия определять посредством сложения распределений степени поврежденности бетона от каждого из них. При этом, если позволяют вычислительные ресурсы, удобно посчитать отдельно удары двух центральных и двух крайних двигателей, а затем сложить результаты для полей степени поврежденности.

Выводы

Предложенные определяющие уравнения для нестационарного деформирования и разрушения бетона обобщают соотношения моделей Гениева Г. А. и Холмквиста—Джонсона—Кука.

Разработанный численный алгоритм реализации этих определяющих уравнений обладает повышенной счетной устойчивостью и не создает аварийных ситуаций в численном 3D-коде, даже когда большая часть конструкции разрушена.

Области разрушений контаймента локализуются на свободных поверхностях и вблизи двигателя. При увеличении скорости удара сопротивление контаймента возрастает благодаря формированию зоны сжатия перед двигателем. Но в то же время увеличивается число трещин, выходящих на тыльную свободную поверхность, что вносит вклад в образование пробки.

Результат воздействия каждого из четырех двигателей самолета BOEING 707-320 локализован в зоне удара, и взаимным влиянием соседних ударов на волновой стадии деформирования можно пренебречь. Следовательно, удары двигателя могут рассчитываться отдельно, а последствия удара определяться путем сложения распределений степени повреждения бетона от каждого из них.

При воздействии двигателя на сферический купол со скоростью 100 м/с возможно обрушение

его центральной части на внутреннюю металлическую оболочку контаймента.

Работа проводится при финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 21-72-20023).

ЛИТЕРАТУРА

1. Iqbal M. A., Rai S., Sadique M. R., Bhargava P. Numerical simulation of aircraft crash on nuclear containment structure // Nuclear Engineering and Design. 2012. V. 243. P. 321—335.
2. Sadique M. R., Iqbal M. A., Bhargava P. Nuclear containment structure subjected to commercial and fighter aircraft crash // Nuclear Engineering and Design. 2013. V. 260. P. 30—46.
3. Kostov M., Henkel F. O., Andonov A. Safety assessment of A92 reactor building for large commercial aircraft crash // Nuclear Engineering and Design. 2014. V. 269. P. 262—267.
4. Siefert A., Henkel F. O. Nonlinear analysis of commercial aircraft impact on a reactor building — Comparison between integral and decoupled crash simulation // Nuclear Engineering and Design. 2014. V. 269. P. 130—135.
5. Duc-Kien Thai, Seung-Eock Kim. Safety Assessment of a Nuclear Power Plant Building Subjected to an aircraft Crash // Nuclear Engineering and Design. 2015. V. 293. P. 38—52.
6. Касьян А. И., Медведь А. Н., Нестеров И., Тандуров В. П. К оценке вероятности падения летательного аппарата на площадку атомной электростанции // НТЖ Двигатель. 2015. № 2(98). С. 24—27. www.dvigately.ru
7. Riera J. D. On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces // Nucl. Engng. and Des. 1968. V. 8. P. 415—426.
8. Бирбраер А. Н., Роледер А. Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 594 с.
9. Демидов А. П., Савченко В. А. Защитные оболочки реакторных отделений зарубежных АЭС // Энергетическое строительство за рубежом. 1989. № 5. С. 2—7.
10. Кукуджанов В. Н. Связанные модели упругопластичности и поврежденности и их интегрирование // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2006. № 6. С. 103—135.
11. Острик А. В., Ким В. В. Расчетные модели нестационарного деформирования и разрушения бетонов (обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2020. Вып. 4(160). С. 11—24.
12. Гениев Г. А., Киссюк В. П., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона. — М.: Стройиздат, 1974. — 316 с.
13. Holmquist T. J., Johnson G. R., Cook W. H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures: Proc. 14th Int. Symp. Ballistics. Quebec City, Canada, 26—29 September, 1993. V. 2. P. 591—600.
14. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. — М.: Наука, 1990. — 215 с.
15. Уилкинс М. Л. Расчёт упруго-пластических течений: Вычислительные методы в гидродинамике / под ред. Олдера Б., Фернбаха С., Ротенберга М. — М.: Мир, 1967. С. 212—263.

Numerical modeling of deformation and destruction of NPP containment at impact of falling aircraft engines

A. V. OSTRUK, V. V. KIM

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

M. A. OSTRUK

Leonov University of Technology, Korolev, Moscow region, Russia

A new variant of the defining equations for concrete compositions and an implicit algorithm for its numerical integration are considered. The algorithm is realized as a computer subroutine for the 3D-code of the finite-dimensional particle method. It is proposed to numerically simulate non-stationary process of containment deformation and destruction under aircraft impact in two stages (wave and shell stages). Numerical modeling of various variants of BOEING 707-320 aircraft engine impacts on containment was carried out. It was obtained that the engines of a falling aircraft having velocity 100 m/s significantly damage the containment, but do not punch it (engines stop inside the protective construction). But it is possible to collapse its central part of the spherical dome onto the inner metal shell of the containment when the impact occurs from above.

Keywords: falling aircraft, low-speed impact, defining equations of concrete compositions, deformation and destruction of NPP containment.

Контроль геометрии наружной поверхности в процессе изготовления теплозащитного экрана из композиционного материала для спускаемых космических аппаратов

С. Т. КАЛАШНИКОВ, канд. техн. наук

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия

Предложен метод определения отклонения формы наружной поверхности теплозащитного экрана из композиционного материала от теоретической. Проведен анализ структуры погрешностей на основе аппарата гармонического разложения функций. Получены зависимости для расчета фактических величин непрямолинейности образующей, овальности и огранки корпуса по результатам измерений.

Ключевые слова: теплозащитный экран, композиционный материал, корпус, непрямолинейность образующей, погрешность формы, ряды Фурье.

К теплозащитным экранам из композиционных материалов (стеклопластики, органопластики, углеродпластики) спускаемых космических аппаратов, движущихся в атмосфере, предъявляются повышенные требования к точности изготовления, что вызвано необходимостью минимизации отклонений аэродинамических характеристик летательных аппаратов от заданных значений. Самой распространенной формой теплозащитных экранов является коническая поверхность. В данной работе рассмотрен метод определения геометрии наружной поверхности теплозащитного экрана конической формы и составляющих её погрешностей изготовления.

Контроль геометрии наружной поверхности корпуса теплозащитного экрана при изготовлении ставит задачу определения величин отклонения реальной поверхности от теоретической.

Величины отклонений профиля наружной поверхности корпуса теплозащитного экрана от теоретического (Т-линии) являются случайно зависящими от расположения точек реальной поверхности, так как они есть результат совокупного проявления множества случайных погрешностей на всех операциях технологического процесса изготовления и сборки корпуса. Особое внимание необходимо уделить способу контроля, который с достаточной степенью достоверности определит отклонения точек реального наружного контура.

Для этого необходимо, чтобы сама измеряемая поверхность не являлась измерительной базой. В основу предлагаемого метода измерения величин отклонения наружной поверхности корпуса кладется постоянная измерительная база. В качестве таковой принята ось вращения планшайбы станда с установленной на ней торцовой поверхностью изделия [1]. Принципиальное отличие данного метода заключается в том, что положение измерительной базы не определяется конфигурацией контролируемой поверхности.

При вращении планшайбы вращается контур определяемого сечения вокруг оси вращения и любая точка этого контура проходит под измерительным наконечником индикатора. Полученные отклонения δ являются суммой погрешности от эксцентриситета $\delta_{\text{эк}}$ и погрешности формы наружного контура $\delta_{\text{ф}}$:

$$\delta = \delta_{\text{эк}} + \delta_{\text{ф}}.$$

Измерения проводятся по сечениям, перпендикулярным образующей корпуса, и в кольцевом направлении в каждом сечении.

Количество сечений и точек измерений зависит от структуры композиционного материала, технологических факторов и величины заданного отклонения профиля поверхности от Т-линии. Таким образом, возникает задача дифференциации комплексных показателей отклонений формы. По отношению к конической поверхности:

- в поперечном сечении — некруглость;
- в продольном — отклонение от прямолинейности.

Калашников Сергей Тимофеевич, старший научный сотрудник.

E-mail: ofpat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 августа 2021 г.

© Калашников С. Т., 2021

Схема проводимых измерений показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема измерений величин отклонений формы наружной поверхности корпуса теплозащитного экрана от теоретической

Совокупность текущих размеров в любом сечении, перпендикулярном оси вращения, дает профилограмму, характеризующую некруглость поверхности в данном сечении. Реальную поверхность корпуса можно представить как множество профилограмм поперечных сечений, собранных на общей оси.

Вводя цилиндрические координаты, уравнение реальной поверхности представим в виде (рис. 2)

$$F(\rho, \varphi, x) = 0, \text{ или } \rho = F_1(\varphi, x),$$

где ρ — радиус-вектор;

φ — угловая координата;

x — координата, направленная вдоль оси.

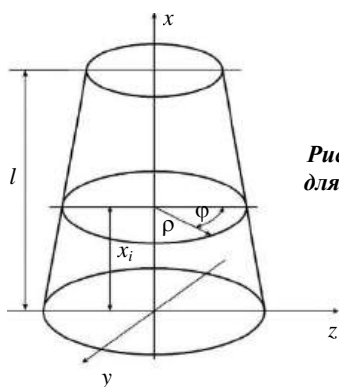


Рис. 2. Система координат для измерения профиля корпуса по сечениям

Профиль корпуса можно получить как сечение реальной поверхности $\varphi_0 = \text{const}$, или $x_0 = \text{const}$. Уравнение профилей будет иметь вид

$$\rho = F(\varphi_0, x), \text{ или } \rho = (\varphi, x_0).$$

Для геометрической поверхности конуса, т. е. для поверхности заданной геометрической формы, не имеющей неровностей и отклонений формы, введем теоретическое значение радиуса в каждом сечении:

$$r_T = f(x), 0 \leq x \leq l.$$

Тогда некруглость сечения представим в виде

$$\rho - r_T = f(\varphi),$$

а непрямолинейность в виде

$$\rho - r_T = f(x).$$

Таким образом, все комплексные отклонения могут быть представлены как разности между текущими и заданными размерами. При рассмотрении дифференцированных отклонений геометрической формы следует различать, что представляет собой сечение поверхности плоскостью: это может быть замкнутая плоская кривая, имеющая ряд участков, из которых интересен только один, например отрезок образующей.

Запишем для поперечного сечения условие замкнутости кривой:

$$f(\varphi) = f(\varphi + 2\pi).$$

Для отклонения образующей

$$f(x) \neq f(x + l).$$

Разлагая функцию погрешности в ряд Фурье, получим

$$f(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi), \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos k \frac{\pi}{L} x + b_k \sin k \frac{\pi}{L} x \right), \quad (2)$$

где a_k, b_k — коэффициенты ряда Фурье;

k — порядковый номер составляющей гармоники;

$L = 2l$ — период кривой продольного сечения корпуса.

Уравнения (1), (2) могут быть записаны в виде (например, для $f(\varphi)$):

$$f(\varphi) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(k\varphi + \varphi_k), \quad (3)$$

где c_k — амплитуда k -й гармоники.

Между коэффициентами ряда Фурье существуют следующие соотношения [2]:

$$\begin{aligned} a_k &= c_k \cos \varphi_k; \\ b_k &= c_k \sin \varphi_k; \\ c_0 &= a_0; \\ c_k &= \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \\ \text{tg } \varphi_k &= \frac{b_k}{a_k}. \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты ряда Фурье рассчитывают по формулам

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \cos k\varphi d\varphi;$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \sin k\varphi d\varphi.$$

Рассмотрим спектр отклонений текущего размера для поперечного сечения. Нулевой член разложения в ряд Фурье

$$\frac{c_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) d\varphi$$

является средним значением функции $f(\varphi)$ за период и указывает на положение $R = r_0$, соответствующее расстоянию от центра вращения поворотного стола до шупа индикаторного прибора в начальный момент измерения относительно нулевой линии, за которую принимаем окружность искомого радиуса

$$R_0 = r_0 + \frac{c_0}{2}.$$

Таким образом, нулевой член разложения представляет собой величину ошибки индикаторного прибора относительно окружности радиуса R_0 .

Первый член разложения в ряд Фурье

$$f_1(\varphi) = c_1 \cos(\varphi + \varphi_1)$$

зависит исключительно от выбора полюса полярной системы координат, или от взаимного положения геометрического центра поперечного сечения и центра вращения поворотного стола. Следовательно, первый член разложения характеризует эксцентриситет установки изделия на поворотном столе.

Выделим из ряда (3) слагаемое с номером $k = 2$:

$$f_2(\varphi) = c_2 \cos(2\varphi + \varphi_2). \quad (5)$$

Как видно из формулы (5), функция $f_2(\varphi)$ имеет за период два максимума и два минимума. Это ошибка формы поперечного сечения, называемая овальностью. Амплитуда ошибки c_2 связана с овальностью простым соотношением.

За величину овальности $\Delta_{ов}$ принимается разность между наибольшим и наименьшим диаметрами сечений. Так как $f_2(\varphi)$ является функцией погрешности радиуса, имеем

$$\Delta_{ов} = 4c_2,$$

т. е. овальность равна учетверенной амплитуде второго члена разложения.

Перейдем к рассмотрению третьего члена разложения ряда Фурье:

$$f_3(\varphi) = c_3 \cos(3\varphi + \varphi_3).$$

Такого рода отклонение называется трехвершинной огранкой. Огранкой называется погрешность формы, при которой в сечении, перпендикулярном оси, получается фигура, составленная из дуг окружностей, имеющих различные центры. Огранка с нечетным числом вершин отличается постоянством диаметра, полученного при двухточечном измерении, т. е. при измерении между двумя параллельными плоскостями или плоскостью и точкой. Таким образом, для огранки с нечетным числом вершин максимальные хорды, взятые в любом направлении, равны между собой. Происхождение огранки объясняется изменением положения центра вращения при обработке. Так, например, огранность является типичной погрешностью при бесцентровом шлифовании.

Величина огранки $\Delta_{ог}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta_{ог} = 2c_3.$$

Применим к продольному сечению корпуса методы аналитического исследования, которые были использованы для анализа отклонений поперечного сечения. Следует учитывать, что поверхность, полученная при обработке корпуса, в продольном сечении имеет отклонения, источником которых в основном являются деформации корпуса. Форма корпуса при этом зависит от его статической жесткости. Поэтому частотный метод, использованный для анализа погрешностей корпуса в поперечном сечении, требует некоторого изменения. Здесь следует применить тригонометрическое интерполирование, ограничиваясь небольшим числом номинала.

Применим формулу (2). Опуская сдвиг фаз, получаем

$$f(x) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin \frac{k\pi}{L} x.$$

Период кривой продольного сечения корпуса равен удвоенной длине корпуса, т. е. $L = 2l$. Следовательно,

$$f(x) = f(x + 2l).$$

При длине корпуса l для $k = 1$ получаем выражение

$$f_1(x) = C_1 \sin \frac{\pi}{2l} x,$$

которое показывает, что погрешность возрастает от нулевого значения на одном торце корпуса $X = 0$ до полного значения c_1 на другом торце. Эту погрешность можно рассматривать как отклоне-

ние образующей корпуса. Разложив синусоидальную функцию в ряд

$$X = X - \frac{1}{6} X^3 \dots,$$

и ограничившись первым членом разложения, для $k = 2$ получим

$$f_2(x) = c_2 \sin \frac{\pi}{l} x.$$

Функция $f_2(x)$ дает аналитическое выражение бочкообразности.

Для $k = 2$, заменив функцию \sin на \cos , получим аналитическое выражение вогнутости:

$$f_2(x) = c_2 \cos \frac{\pi}{l} z.$$

Поскольку результаты обмера корпуса носят дискретный характер, при расчете коэффициентов a_k, b_k по формулам (4) произведем замену интегралов

$$\int_0^{2\pi} f(\varphi) \cos k\varphi d\varphi, \quad \int_0^{2\pi} f(\varphi) \sin k\varphi d\varphi$$

конечными суммами, используя формулу трапеций. Тогда формулы расчета отклонений наружного контура будут иметь следующий вид:

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^k \delta_i \cos \varphi_i;$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^k \delta_i \sin \varphi_i,$$

где δ_i — радиальное биение наружного контура, отсчитанное по шкале индикатора;

φ_i — угловое положение контролируемой точки относительно начальной точки измерения;

n — число контролируемых точек в поперечном сечении.

Величину овальности рассчитывают по формуле

$$\Delta_{ов} = 4 \sqrt{\left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \cos 2\varphi_i \right)^2 + \left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \sin 2\varphi_i \right)^2}.$$

Величина огранки

$$\Delta_{ог} = 2 \sqrt{\left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \cos 3\varphi_i \right)^2 + \left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \sin 3\varphi_i \right)^2}.$$

Величина непрямолинейности образующей

$$\Delta_l = \left(\delta_i^j - \delta_i^H \right) - \frac{\delta_i^B - \delta_i^H}{l} x_j,$$

где δ_i^j — радиальное биение наружного контура в i -й точке j -го контролируемого пояса;

δ_i^H, δ_i^B — радиальное биение наружного контура, замеренное в нижнем и верхнем контролируемом поясе;

l — расстояние между верхним и нижним контролируемыми поясами;

x_j — координата контролируемого пояса.

В результате проведенного статистического анализа — разложения радиального биения на составляющие — определяются следующие погрешности (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение):

- непрямолинейности образующей;
- погрешности формы корпуса (овальность, огранка).

Определенные по предлагаемому методу фактические погрешности непрямолинейности линии наружного контура, овальности и огранки корпуса учитываются в дальнейших технологических операциях балансировки изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-машиностроителя — М.: Машиностроение, 2001. — 927 с.
2. Толстов Г. П. Ряды Фурье. — М.: Наука, 1980. — 382 с.

Control of an external surface geometry of composite thermal shield for reentry vehicles in manufacturing

S. T. KALASHNIKOV

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of the UB of the RAS,
Miass, Chelyabinsk Region, Russia

A method of defining deviation of external surface shape of composite thermal shield from the estimated one is proposed. Structure of errors is analyzed with a tool of harmonic expansion of functions. Dependencies to analyze actual values of unstraightness of generatrix, ovality and gem-cutting of body based on the measurement results are derived.

Keywords: thermal shield, composite, body, generatrix unstraightness, shape error, Fourier series.

Диэлектрические свойства наноразмерных пленок ниобата бария-стронция в композитной гетероструктуре $\text{Al/SBN-50/Pt/Al}_2\text{O}_3$

А. В. ПАВЛЕНКО, д-р физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на Дону, Россия
Федеральный исследовательский центр "Южный научный центр РАН", г. Ростов-на Дону, Россия

С использованием методов диэлектрической спектроскопии в интервале температур 20–240 °C исследованы диэлектрические свойства тонких пленок $\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$, выращенных на подложке $\text{Pt/Al}_2\text{O}_3(0001)$ методом ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода. Проведены расчёты действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, установлены температуры Бёрнса и Фогеля—Фулчера, величина энергий активации релаксационного процесса. Предложена модель для описания дисперсии диэлектрических проницаемостей пленки $\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$. Обсуждаются причины выявленных закономерностей.

Ключевые слова: ниобат бария-стронция, сегнетоэлектрик, тонкие пленки.

Материалы на основе тонких сегнетоэлектрических пленок, не содержащие в своей структуре токсичные элементы, находят все большее применение в функциональной электронике, различных СВЧ и оптоэлектронных устройствах, включая электрооптические модуляторы света. Твердые растворы (ТР) ниобата бария-стронция $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN_x , где x — стехиометрический коэффициент) благодаря высоким значениям электрооптического коэффициента, пьезоэлектрического коэффициента и низким потерям в СВЧ-диапазоне [1] являются перспективными материалами для отмеченных применений.

В интервале концентраций $\text{Sr}_{0,2}\text{Ba}_{0,8}\text{Nb}_2\text{O}_6$ – $\text{Sr}_{0,8}\text{Ba}_{0,2}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ТР являются однофазными и принадлежат к структуре незаполненных тетрагональных вольфрамовых бронз (ТВБ), в которых заполнено 5/6 катионных позиций, характеризуются тетрагональной симметрией с пространственной группой симметрии $P4bm$ [2]. Различное соотношение Ba/Sr в составе SBN может приводить к вариации свойств материала, изменению температуры Кюри, оптической анизотропии материала и т. д. На свойства материалов данного

типа влияет дизайн, в котором они получены. В частности, за счет проявления эффектов деформационной инженерии при их изготовлении в виде тонких плёнок в них реализуются принципиально новые фазовые состояния. Напряжение (и/или деформация), индуцированное в тонких пленках из-за несоответствия параметров решетки пленки и подложки, возникающие вблизи границы раздела плёнка—подложка градиенты деформации существенно влияют на макроскопические свойства пленок [3]. Настоящая работа посвящена изучению диэлектрических свойств в окрестности сегнето-параэлектрического фазового перехода c -ориентированных пленок SBN-50, выращенных на подложках $\text{Pt}(111)/\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ методом ВЧ-катодного распыления.

Методы получения и исследования объектов

RF-напыление плёнок SBN-50 на подложки Al_2O_3 (C-plane; толщина 0,43 мм; производитель "MONOCRYSTAL", г. Ставрополь), на поверхность которых предварительно осаждался гетероэпитаксиально слой электрода из Pt толщиной 150 нм, осуществлялось на напылительном комплексе "Плазма 50 СЭ" с использованием в качестве катода керамики стехиометрического состава $\text{Sr}_{0,50}\text{Ba}_{0,50}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (производитель — НИИ физики ЮФУ; диаметр 50 мм; толщина 3 мм) [4]. По результатам рентгендифракционного анализа примесных фаз в объекте не выявлено, а наличие данных только соответствующих отражений на

Павленко Анатолий Владимирович, ведущий научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела "Физика, химия, астрономия".
E-mail: antvpr@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 августа 2021 г.

© Павленко А. В., 2021

дифрактограммах свидетельствовало о сонаправленности кристаллографических осей [001] пленки SBN-50, [111] электрода Pt и [0001] подложки Al_2O_3 .

Измерения диэлектрических характеристик пленок SBN-50 при $T = 20\text{—}240\text{ }^\circ\text{C}$ и интервале частот измерительного электрического поля $f = 10^2\text{—}10^6\text{ Гц}$ проводили с помощью LCR-метра Agilent 4980A. Амплитуда измерительного сигнала составляла 40 мВ. В качестве анализируемых параметров, рассчитываемых из экспериментально измеренных значений емкости гетероструктуры и тангенса угла диэлектрических потерь, использовали действительную ($\varepsilon'/\varepsilon_0$) и мнимую ($\varepsilon''/\varepsilon_0$) части относительной комплексной диэлектрической проницаемости: $\varepsilon^*/\varepsilon_0 = \varepsilon'/\varepsilon_0 - i\varepsilon''/\varepsilon_0$ ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\text{ Ф/м}$ — электрическая постоянная). Глубину дисперсии для каждой из температур рассчитывали по формуле $\Delta\varepsilon'/\varepsilon_0 = \varepsilon'/\varepsilon_0(f_{\min}) - \varepsilon'/\varepsilon_0(f_{\max})$.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости $\varepsilon'/\varepsilon_0(T)$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0(T)$ гетероструктуры $\text{Al/Cr/SBN-50(001)/Pt(111)/Al}_2\text{O}_3$ в анализируемом температурно-частотном диапазоне, измеренные в режиме охлаждения. Хорошо видно, что в исследуемой пленке наблюдается характерное для сегнетоэлектрика (СЭ) релаксора поведение $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0(T, f)$. С уменьшением температуры в области ожидаемого сегнетопараэлектрического фазового перехода (ФП) на данных зависимостях формируются частотно-

зависимые максимумы при $T = T_{\max}$, смещающиеся в низкотемпературную область с уменьшением f .

Из зависимости $\varepsilon_0/\varepsilon'(T, f = 10^6\text{ Гц})$ установлено, что температура Бёрнса T_B (температура, ниже которой в СЭ-релаксоре появляются полярные области) составляет $\sim 190\text{ }^\circ\text{C}$, превышая более чем на $30\text{ }^\circ\text{C}$ значения T_B для монокристаллического и пленочного образцов [4] с близкими параметрами элементарной ячейки. Видно, что именно в окрестности T_B наблюдается исчезновение дисперсии $\varepsilon'(f)$ и $\varepsilon''(f)$. При этом фиксирование минимальных значений мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости, практически не изменяющейся при $T > T_B$, свидетельствует о низкой электропроводности пленки в параэлектрической фазе.

При аппроксимации зависимости $T_{\max}(f)$ наилучший результат был получен в случае использования свойственного СЭ-релаксорам эмпирического закона Фогеля—Фулчера (рис. 2):

$$f = f_0 \exp\left\{E_{\text{акт}} / [k(T_m - T_F)]\right\}, \quad (1)$$

где $E_{\text{акт}}$ — энергия активации релаксационного процесса;

f_0 — частота попыток преодоления потенциального барьера $E_{\text{акт}}$;

k — постоянная Больцмана;

T_F — температура Фогеля—Фулчера, интерпретируемая как температура "статического замораживания" электрических диполей.

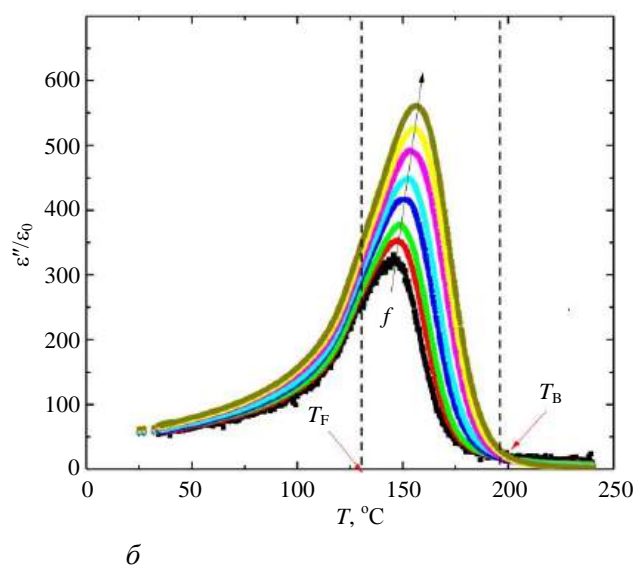
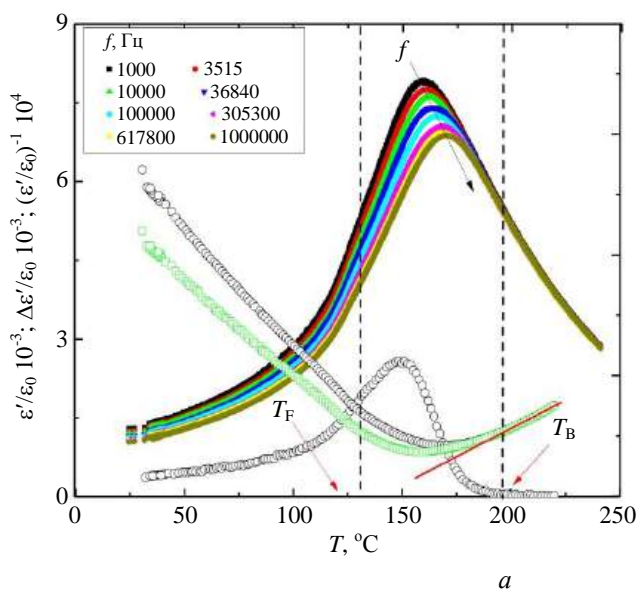


Рис. 1. Зависимость $\varepsilon'/\varepsilon_0(T)$, $(\varepsilon'/\varepsilon_0)^{-1}(T)$, $\Delta\varepsilon'/\varepsilon_0(T)$ (а) и $\varepsilon''/\varepsilon_0(T)$ (б) гетероструктуры $\text{Al/SBN-50/Pt/Al}_2\text{O}_3$ при $T = 20\text{—}250\text{ }^\circ\text{C}$ на частотах $f = 10^3\text{—}10^6\text{ Гц}$ (сплошная линия — иллюстрация выполнения закона Кюри—Вейсса)

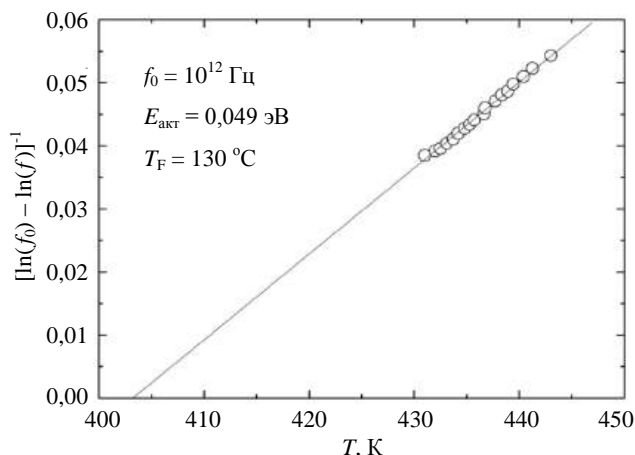


Рис. 2. Зависимость $[\ln(f) - \ln(f_0)]^{-1}(T)$ гетероструктуры Al/SBN-50/Pt/Al₂O₃ (прямая линия — результат расчёта по соотношению Фогеля—Фулчера)

Полученные величины $E_{\text{акт}} = 0,049$ эВ и $f_0 = 10^{12}$ Гц близки к наблюдаемым в СЭ-релаксаторах, а значение $T_F = 130$ °C позволяет связать выявленные ранее аномалии на кривых $\varepsilon'/\varepsilon_0(T)$ в этой области температур, вероятнее всего, с переходом SBN-50 из нанополярного состояния в макромономерное.

При анализе зависимостей $\varepsilon'/\varepsilon_0(f)$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0(f)$ при $T = 30$ — 180 °C установлено, что в рассматриваемом частотном диапазоне фиксируется низкочастотная часть релаксационного диэлектрического спектра, что не позволяет восстановить однозначно функцию распределения времен релаксации релаксаторов непосредственно из эксперимента. Аппроксимация экспериментальных спектров $\varepsilon'(f)$ и $\varepsilon''(f)$ проводилась по формулам [5]

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \int_0^{\infty} \frac{f(\tau) d\tau}{1 + (\omega\tau)^2};$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \int_0^{\infty} \frac{\omega\tau f(\tau) d\tau}{1 + (\omega\tau)^2}; \quad \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau = 1, \quad (2)$$

где ε_s и ε_{∞} — статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости соответственно. При этом были использованы различные виды функций распределения невзаимодействующих релаксаторов (дельта-функция (распределение Дебая), равновероятное распределение, Коула—Коула, Дэвидсона—Коула). Наилучшая аппроксимация экспериментальных результатов была достигнута для всех температур при использовании функции распределения времен релаксации $f(\tau)$ Коула—Коула:

$$f(\tau) = \frac{\sin(\alpha\pi)}{2\pi ch[(1-\alpha)\ln(\tau f_0)] - \cos(\alpha\pi)}. \quad (3)$$

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты аппроксимации зависимостей $\varepsilon'/\varepsilon_0(f)$, $\varepsilon''/\varepsilon_0(f)$ и $\varepsilon'/\varepsilon_0(\varepsilon''/\varepsilon_0)$ при $T = 150$ °C.

Высокие значения α свидетельствуют о широком спектре распределения времен релаксации в исследуемом объекте. Релаксорные свойства ТР $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$, по данным [6], обусловлены микроскопическим разупорядочением их структуры. Основу структуры SBN_x составляют два типа кристаллографически независимых NbO₆-октаэдров, объединенных кислородными вершинами в трехмерный структурообразующий каркас. Наиболее узкие каналы треугольного сечения (каналы С) в SBN_x пусты.

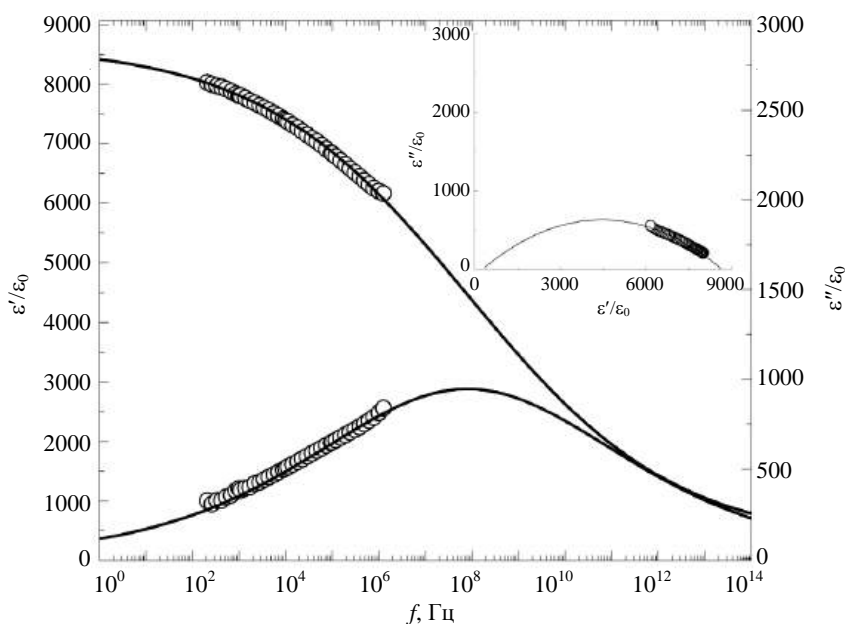


Рис. 3. Зависимость $\varepsilon'/\varepsilon_0(f)$, $\varepsilon''/\varepsilon_0(f)$ и $\varepsilon'/\varepsilon_0(\varepsilon''/\varepsilon_0)$ гетероструктуры Al/SBN-50/Pt/Al₂O₃ при $T = 150$ °C (теоретические расчеты выполнены согласно (2) для случая распределения времен релаксации Коула—Коула (3): $\varepsilon_s = 8900$; $\varepsilon_{\infty} = 266$; $\alpha \sim 0,84$; $f_0 \sim 2,7 \cdot 10^7$ Гц)

Средние по диаметру каналы четырехугольного сечения (A1) заполняются только атомами Sr. Наиболее крупные каналы пятиугольного сечения (A2) заполнены атомами Ba и Sr. В научной литературе отсутствуют экспериментальные сведения, свидетельствующие о том, что данный характер заполнения позиций в тонкопленочных образцах иной. По данным [6], заселенность канала A1 атомами Sr слабо зависит от состава, а релаксорные характеристики SBN_x в основном определяются статистикой заселения каналов A2 атомами Ba и Sr. С уменьшением концентрации Sr расщепление позиций атомов Ba и Sr (т. е. их неэквивалентность) возрастает. Иными словами, возрастает упорядочение. В случае исследуемых тонких пленок при сохранении соотношения Ba/Sr [5] возникающие при росте пленки деформации вызывают увеличение степени тетрагональности элементарной ячейки, что с учетом [6], с одной стороны, не должно существенно сказаться на релаксорных свойствах материала, а с другой — повлиять на температуру $СЭ \rightarrow ПЭ$ ФП, что и зафиксировано. Достаточно близкие значения T_F , T_{max} и T_B говорят о достаточно узком температурном размытии ФП для ТР состава SBN-50 в сравнении с классическими $СЭ$ -релаксорами, такими, как магнониобат свинца.

Заключение

Синтезированные на подложках $Al_2O_3(0001)$ методом ВЧ-катодного распыления тонкие пленки ниобата бария-стронция $Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb_2O_6$ являются сегнетоэлектриками-релаксорами, а в интервале температур 20—240 °C характеризуются высокими значениями относительной диэлектрической проницаемости (от 1000 до 8000) и низкими диэлектрическими потерями.

Фиксируемые на зависимостях $\epsilon'/\epsilon_0(T, f)$ и $\epsilon''/\epsilon_0(T, f)$ аномалии при температурах $T_F = 130$ °C,

$T_{max} = 150—170$ °C и $T_B = 180$ °C обусловлены размытым фазовым превращением в пленке SBN-50 из параэлектрической фазы в сегнетоэлектрическую, что обусловлено, как и в случае монокристаллических образцов, микроскопическим разупорядочением их структуры.

Дисперсия диэлектрических параметров пленки SBN-50 при $T < 180$ °C хорошо описывается в рамках дисперсионной модели с использованием функции распределения времен релаксации Коула—Коула.

Полученные в работе результаты целесообразно использовать при разработке функциональных элементов на основе тонких пленок ниобатов бария-стронция.

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. Buixaderas E., Savinov M., Kempa M., Veljko S., Kamba S., Petzelt J., Pankrath R., Kapphan S. // J. Phys. Condens. Matter. 2005. V. 17. P. 653.
2. Кузьминов Ю. С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. — М.: Наука, 1982. — 400 с.
3. Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд / под ред. Рабе К. М., Ана Ч. Г., Трискона Ж.-М. / Пер. с англ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. — 440 с.
4. Павленко А. В., Захарченко И. Н., Анохин А. С., Куприна Ю. А., Киселева Л. И., Юзюк Ю. И. // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. Вып. 5. С. 888.
5. Богатин А. С., Турик А. В. Процессы релаксационной поляризации в диэлектриках с большой сквозной проводимостью. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. — 256 с.
6. Черная Т. С., Максимов Б. А., Волк Т. Р., Ивлева Л. И., Симонов В. И. // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. Вып. 9. С. 1668—1672.

Dielectric properties of barium-strontium niobate nanoscale films in composite heterostructures Al/SBN-50/Pt/Al₂O₃

A. V. PAVLENKO

Research Institute of Physics Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
Federal Research Center Southern Scientific Center of the RAS, Rostov-on-Don, Russia

The dielectric properties of thin $Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb_2O_6$ films grown on a $Pt/Al_2O_3(0001)$ substrate by RF cathode sputtering in an oxygen atmosphere were studied using dielectric spectroscopy in the temperature range 20—240 °C. Calculations of the real and imaginary parts of the complex permittivity have been carried out. The Burns and Vogel—Fulcher temperatures and the activation energies of the relaxation process have been established. A model is proposed to describe the dispersion of the dielectric constants for the $Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb_2O_6$ film. The reasons for the revealed regularities are discussed.

Keywords: barium-strontium niobate, ferroelectrics, thin films.

УДК 538.911, 539.216.2, 544.023, 535.3, 535.5, 537.2

DOI: 10.52190/2073-2562_2021_4_30

Исследование структуры и свойств нанокompозитных пленок SrTiO_3 на подложках Si (001)

¹ К. М. ЖИДЕЛЬ; ^{1, 2} А. В. ПАВЛЕНКО, д-р физ.-мат. наук¹ Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на Дону, Россия² Федеральный исследовательский центр "Южный научный центр РАН", г. Ростов-на Дону, Россия

Представлены результаты исследования структуры, диэлектрических и оптических свойств тонких пленок SrTiO_3 , выращенных методом ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода на подложках Si (001). Показано, что пленки имеют слабое поглощение, нормальный ход дисперсии показателя преломления и интердиффузионные слои на границах раздела фаз.

Ключевые слова: композитные пленки, структура, оптические константы, диэлектрические свойства, шероховатость поверхности, неразрушающий контроль.

В последние годы в физическом материаловедении отмечается большой интерес к разработке и исследованию свойств композиционных материалов. Одно из наиболее перспективных направлений в этой области — создание нанокompозитных пленок на основе активных диэлектриков (сегнетоэлектриков, мультиферроиков, пироэлектриков и т. д.) [1—3], а возникающие в тонких пленках новые фазовые состояния, обусловленные наличием гетерограницы плёнка—подложка, делают актуальными исследования их структуры и физических свойств, без знания которых невозможна их успешная интеграция в многочисленные микро- и нанoeлектронные приложения.

В частности, оксиды переходных металлов, такие, как TiO_2 , NiO , ZnO и SrTiO_3 (STO) [4, 5], могут открыть путь для гетерогенных новых функций в недорогой кремниевой технологии.

SrTiO_3 — важный диэлектрический материал (относительная диэлектрическая проницаемость объемного монокристалла достигает $\epsilon/\epsilon_0 = 300$) с постоянной решетки $a = 3,905 \text{ \AA}$, что близко к значению большого числа других оксидов перовскита и хорошо согласуется с поверхностной элементарной ячейкой Si (001) [6]. STO можно выращивать на подложке Si (001) с очень низкой плотностью ловушечных состояний интерфейса [7, 8]. Кроме применения в МОП-устройствах (MOSFET, "металл—оксид—полупроводник") в качестве аль-

тернативного материала с высокой ϵ , тонкую эпитаксиальную пленку STO на Si можно использовать в качестве псевдоподложки для эпитаксиального роста других оксидов [9] или функциональных композитных материалов. Это обеспечивает эффективное решение для монолитной интеграции кристаллических оксидных устройств с кремниевой техникой, такой, как фильтры на поверхностных акустических волнах, энергонезависимые сегнетоэлектрические запоминающие устройства и т. д. [9]. С другой стороны, STO прозрачен для видимого света ($E_g \sim 3,2 \text{ эВ}$ для объемного материала [10]) и обладает хорошей структурной и химической стабильностью. Предметом ряда исследований является его потенциальное применение в области интегрированной оптики, поэтому изучение оптических свойств также представляет интерес [11, 12].

В целом тонкопленочная технология внесла большой вклад в развитие различных электронных устройств для оптической памяти и связи [13—15]. Из многих известных тонких сегнетоэлектрических пленок лучшие имеют самые высокие пьезоэлектрические связи и электрооптические коэффициенты [16—18].

Информация об оптических константах слоев в сложном материале может быть получена при обработке спектров пропускания и отражения [19], однако такая задача не является вполне корректной, так как из двух измеряемых параметров — коэффициента пропускания и коэффициента отражения — необходимо получить три неизвестных: показатель преломления, коэффициент экстинкции и толщину пленки. Задача может быть решена более точно при использовании эллипсометрических методов.

В работе представлены результаты исследования структуры, диэлектрических и оптических свойств тонких пленок STO, выращенных методом

Жидель Карина Михайловна, аспирант 2-го курса физического факультета.

E-mail: karinagidele@gmail.com

Павленко Анатолий Владимирович, ведущий научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела "Физика, химия, астрономия".

E-mail: antvpr@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 августа 2021 г.

© Жидель К. М., Павленко А. В., 2021

ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода на подложках Si (001).

Методы получения и исследования объектов

Гетероструктуры SrTiO_3 на подложках (001) Si (КДБ-12, p -type, 12 Ом/см) создавались высокочастотным распылением в режиме сильноточного γ -разряда (> 100 Вт/см²) керамических мишеней стехиометрического состава SrTiO_3 [20]. При таком разряде рост пленок происходит из дисперсной фазы оксида, образующейся в плазме высокочастотного разряда при распылении керамической мишени при высоких давлениях кислорода ($> 0,5$ Торр) на кластерном уровне. Подготовка подложек кремния перед осаждением включала удаление оксидного слоя в плавиковой кислоте (2 мин) с последующими промывкой в деионизированной воде и сушкой сухим азотом.

Структурное совершенство пленок, параметры элементарной ячейки в направлении нормали к плоскости подложки, а также ориентационные соотношения между пленкой и подложкой устанавливали рентгенографированием на дифрактометре ДРОН-4-07 методом $\theta/2\theta$ (CuK_α -излучение).

Для проведения диэлектрических измерений на поверхность пленки осаждались электроды Al методом термического испарения через маску с отверстиями диаметром ~ 200 мкм. Измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик (зависимости емкости C образца на измерительной частоте $f = 10^5$ Гц с $U = 40$ мВ при наличии изменяющегося смещающего электрического поля величиной от -12 до 12 В) конденсаторных структур при комнатной температуре осуществляли на анализаторе TFAalyzer2000 с модулем FE.

Для определения оптических параметров тонкопленочных структур были проведены спектральные исследования методом эллипсометрии, основанным на изучении изменения состояния поляризации отраженного света после взаимодействия его с поверхностью границ раздела этих сред. Измерения проводили на спектральном эллипсометре ЭЛЛИПС-1991 производства ООО НПК "ЦНТ" (г. Новосибирск, Россия). ЭЛЛИПС-1991 создан на основе статической измерительной схемы. Описываемая установка позволяет проводить исследования в спектральном диапазоне 350—1000 нм с разрешением 2,5 нм. Спектральная зависимость эллипсометрических параметров ψ и Δ снималась с шагом 2 нм при фиксированном угле падения света 65° . Для расчета показателя преломления n и коэффициента экстинкции k применяли встроенное программное обеспечение "Спектроскан" к ЭЛЛИПС-1991.

Основное уравнение эллипсометрии, связывающее между собой ψ и Δ и комплексные значения коэффициентов отражения Френеля r_p и r_s для p - и s -компонент эллиптически поляризованного света, записывается в виде [21]

$$\text{tg}(\psi) \exp(i\Delta) = \frac{r_p}{r_s}. \quad (1)$$

Выбор адекватной оптической модели, правильно описывающей отражательные свойства исследуемого образца, является одним из важных этапов при эллипсометрических исследованиях. Для непоглощающих или слабо поглощающих слоев дисперсия $n(\lambda)$ может быть описана формулой Коши [22], а оптические постоянные гетерогенных материалов, представляющих композицию двух или более сред, хорошо описываются моделью Бруггемана [23]. Для интерпретации измеренных эллипсометрических спектров выбирали ту или иную модель и определяли параметры этой модели путем минимизации.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рентгенограмме $\theta/2\theta$ сканирования гетероструктуры $\text{SrTiO}_3/\text{Si}(001)$, представленной на рис. 1, присутствовали только отражения от плоскостей (110) и (002) пленки SrTiO_3 , что свидетельствует об отсутствии примесных фаз и её поликристалличности.

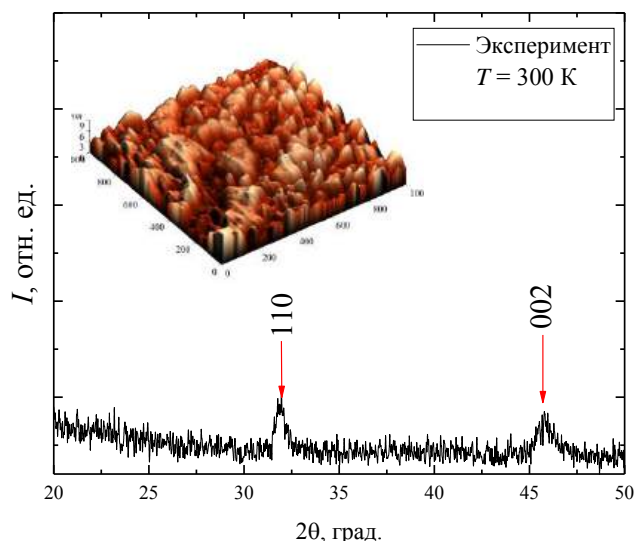


Рис. 1. $\theta/2\theta$ -рентгенограмма гетероструктуры $\text{SrTiO}_3/\text{Si}(001)$. На вставке — изображение рельефа поверхности плёнки SrTiO_3 , полученное на АСМ

Последнее сказалось на структуре поверхности пленки, сформированной из кристаллитов различной ориентации, шероховатость которой составляла 5—7 нм (см. вставку на рис. 1).

Из полученных данных в тетрагональном приближении рассчитаны значения параметров элементарной ячейки пленки SrTiO_3 : $c = (3,957 \pm 0,005) \text{ \AA}$ и $a = (3,963 \pm 0,005) \text{ \AA}$, что свидетельствует о наличии деформации элементарной ячейки SrTiO_3 [10]. Выявленные эффекты отразились на диэлектрических и оптических характеристиках пленки SrTiO_3 .

Зависимость $C(U)$ исследуемой гетероструктуры (рис. 2) имеет вид, по характеру близкий к высокочастотным $C(U)$ -характеристикам структур металл—сегнетоэлектрик—диэлектрик—полупроводник и металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) (при измерении емкости структуры используется малый переменный сигнал высокой частоты (10^4 — 10^6 Гц); при этих условиях емкость области пространственного заряда (ОПЗ) в обогащении обусловлена основными носителями заряда, а в обеднении и инверсии — только слоем обеднения).

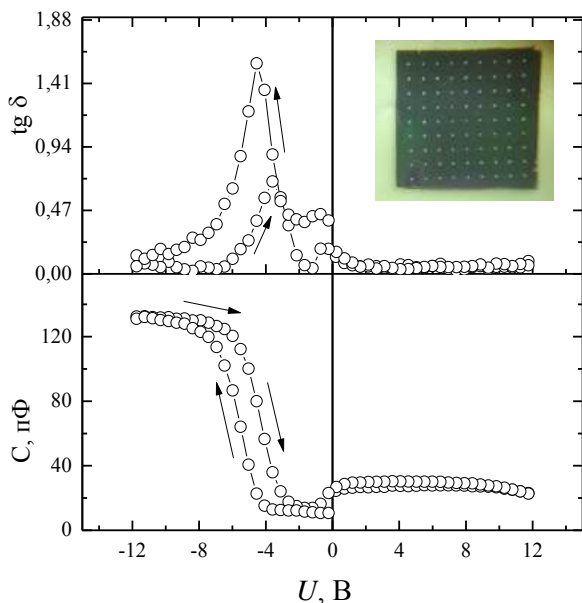


Рис. 2. Зависимость $C(U)$ и $\text{tg } \delta(U)$ гетероструктуры $\text{Al/SrTiO}_3/\text{Si}(001)$ при комнатной температуре. На вставке — вид исследуемой конденсаторной структуры

До полевого воздействия емкость исследуемой гетероструктуры составляет ~ 10 пФ (см. рис. 2), что свидетельствует о нахождении поверхности подложки Si (p -типе) в режиме обеднения и проявлении эффекта поля. Учитывая величину сдвига $C(U)$ зависимости на 4 В относительно идеального случая [24] и достаточно высокие значения относительной диэлектрической проницаемости SrTiO_3 (более 100), наблюдаемое обусловлено, скорее всего, возникновением в пленке самопроизвольной поляризации, направленной к подложке, что отмечалось и в [25]. После периода полевого воздействия, при котором происходят переключение

поляризации в пленке и перезарядка, возможны поверхностные состояния на границе плёнка—подложка. При $U = 0$ В образец характеризуется новым состоянием с $C = 20$ пФ, быстро релаксируя к исходному стабильному состоянию.

На рис. 3 представлены спектры $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ исследованных образцов с результатами подгонки в рамках подобранной оптической модели структуры.

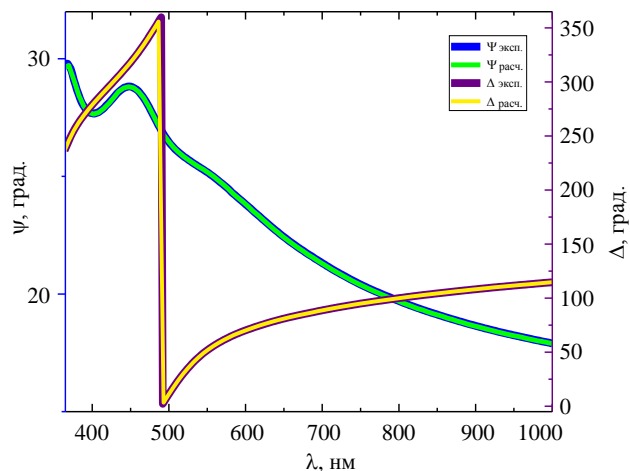


Рис. 3. Спектры $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ для $\text{STO/SiO}_2/\text{Si}(001)$ и восстановленные по результатам эллипсометрических измерений значения параметров данной структуры

Используя стандартную модель STO на Si, авторы сумели подобрать толщины всех слоев таким образом, чтобы максимально совместить измеренные спектры с расчетными. Однако при этом всё-таки равно имело место некоторое расхождение между экспериментом и расчетом. Это расхождение удалось устранить только введением в модель переходного слоя на границах Si и слоя STO — оксида кремния SiO_2 . Как известно, SiO_2 образуется уже при комнатной температуре в результате адсорбции кислорода на поверхности кремния [26]. Наилучшее согласование рассчитанных и измеренных спектров $\psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ было достигнуто для модели шероховатый слой—пленка—буферный слой—подложка. Использование известных данных для оптических констант кристаллического p -Si и SiO_2 позволило оценить содержание каждого компонента системы в рамках модели эффективной среды Бруггемана и получить следующие результаты: толщина шероховатого слоя $d = 5,4$ нм (по данным АСМ шероховатость структуры поверхности пленки 3—6 нм); слой, содержащий STO, имеет 4 % пустоты (пористости) и 96 % SrTiO_3 ; $d_{\text{STO}} = 57$ нм; $d_{\text{SiO}_2} = 0,3$ нм.

Таким образом, в результате моделирования найдены толщины переходных слоев и их структурный состав, при которых наблюдается полное совпадение экспериментальных и расчетных спектров. Подгонка модели и экспериментальных дан-

ных была выполнена с использованием стандартного алгоритма Левенберга–Марквардта.

Вычисленные дисперсионные зависимости $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ для исследуемой структуры приведены на рис. 4.

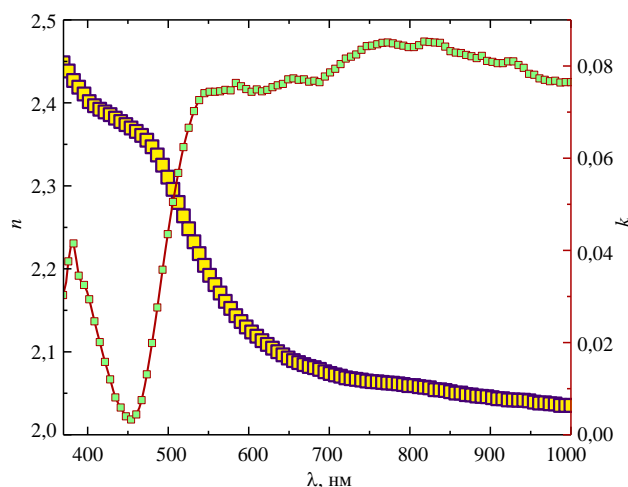


Рис. 4. Зависимость показателя преломления n и коэффициента экстинкции k для слоя STO от длины волны

Как видно, n уменьшается с увеличением λ . Кроме того, получены значения n очень близки к значениям, измеренным в работах [27, 28]. Значения k во всем измеренном спектральном диапазоне для заданной толщины не превышают 0,08. Благодаря сравнительно малому коэффициенту поглощения в пленке возможно глубокое проникновение падающего излучения в образец. Глубина проникновения оптического излучения может быть оценена из соотношения $\lambda/2\pi k$. В рассматриваемом случае d верхнего рабочего слоя ~ 60 нм. Для оптического излучения видимого диапазона при анализе системы можно утверждать, что при эллипсометрических исследованиях получается информация не только от верхнего слоя исследуемого многослойного покрытия. Поскольку на исследованных слоях $n \gg k$, вещественная часть эффективной диэлектрической проницаемости этих слоев определяется только показателем преломления: $\varepsilon = n^2 - k^2 \approx n^2$. Поэтому основная и наиболее существенная информация о слоях может быть получена из анализа измерений n .

Поскольку дисперсия SiO_2 в видимом диапазоне спектра незначительна, а пустота не имеет дисперсии, STO — единственный компонент, определяющий вид дисперсионной зависимости (см. рис. 4). Следует отметить, что показатель преломления n полученной пленки меньше, чем у объемного монокристалла STO [10]. Ухудшение оптических характеристик пленок может быть связано, как указано в [28], с тем, что оптические потери увеличиваются с увеличением количества границ зерен, а наличие взаимодиффузионного

слоя между подложкой и STO, в свою очередь, приводит к неоднородности n и наличию k в довольно широкой области.

Заключение

На примере структуры STO/SiO₂/Si (001) показана возможность эффективного неразрушающего исследования морфологии границы раздела и поверхности слоистых систем методами спектральной эллипсометрии. Показано, что объект, полученный ВЧ-катодным распылением в атмосфере кислорода, содержит незначительное количество окисла кремния.

Подобранная оптическая модель структуры (шероховатый слой–пленка–буферный слой–подложка) позволила достигнуть хорошего совпадения с экспериментальными данными по спектральным характеристикам ψ и Δ . Получены значения оптических констант слоев нанокompозитной пленки STO и их толщины. Вычислены и приведены дисперсионные зависимости $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$.

Полученные поликристаллические пленки STO на кремниевых подложках, находящиеся, по данным диэлектрических измерений, в сегнетоэлектрической фазе, обладают высоким показателем преломления ($n = 2,4$) по сравнению с обычными планарными материалами ($n(\text{SiO}_2) = 1,46$), что выгодно для миниатюризации устройств планарных волноводов. Это предоставляет некоторые полезные результаты для потенциального применения тонких пленок STO в областях интегральной оптики.

В работе использовано оборудование ЦКП "Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)".

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. Pan D. M., Zhou G. K., Zhi X. D., Hsu T., Yeh J. Performance of nano-SiO₂-filled poly (ether ketone ketone) substrate for fifth-generation communication // J. Elec. Materi. 2021. V. 50. P. 5327.
2. Matavž A., Koželj P., Winkler M., Geirhos K., Lunkenheimer P., Bobnar V. Nanostructured multiferroic Pb(Zr,Ti)O–NiFeO thin-film composites // Thin Sol. Films. 2021. V. 732. P. 138740.
3. Li F., Yao M., Su Z., Chen J., Peng Y., Li Q., Yao X. Enhancement of breakdown strength of SrTiO₃/nano-SiO₂ composite

film prepared by sol-gel technology // *Ceram. Int.* 2017. V. 43. Iss. 4. P. 3495.

4. Guo R., Wang Z., Zeng S., Han K., Huang L., Schlom D., Venkatesan G., Ariando T., Chen J. Functional ferroelectric tunnel junctions on silicon // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. P. 12576.

5. Wang J., Nonnenmann S. S. Area-dependent electroforming and switching polarity reversal across $\text{TiO}_2/\text{Nb}: \text{SrTiO}_3$ oxide interfaces // *J. Mater. Sci.* 2017. V. 52. P. 6469.

6. Hao J. H., Gao J., Wang Z., Yu D. P. Interface structure and phase of epitaxial SrTiO_3 (110) thin films grown directly on silicon // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 131908.

7. Niu G., Saint-Girons G., Vilquin B., Delhay G., Maurice J. L., Botella C., Robach Y., Hollinger G. Molecular beam epitaxy of SrTiO_3 on Si (001): Early stages of the growth and strain relaxation // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. P. 062902.

8. Zhou X. Y., Miao J., Dai J. Y., Chan H. L. W., Choy C. L., Wang Y., Li Q. Epitaxial growth of SrTiO_3 thin film on Si by laser molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 012902.

9. Eisenbeiser K., Droopad R., Yu Z., Overgaard C., Kulik J., Finder J., Smith S. M., Voight S., Penunuri D. Crystalline oxide-passed devices on silicon substrates // *J. Electron. Mater.* 2003. V. 32. № 8. P. 868.

10. Cardona M. Optical properties and band structure of SrTiO_3 and BaTiO_3 // *Phys. Rev.* 1965. V. 140. P. A651.

11. Cottier R. J., Steinle N. A., Currie D. A., Theodoropoulou N. Band gap tuning of epitaxial $\text{SrTiO}_3/\text{Si}(001)$ thin films through strain engineering // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 107. P. 221601.

12. Bayrak T., Goldenberg E. Growth and characterization of nanocrystalline SrTiO_x films: room temperature deposition using RF sputtering system in a pure argon environment // *Mater. Res. Express.* 2017. V. 4. P. 055016.

13. Tokumitsu E., Nakamura R.-I., Ishiwara H. Nonvolatile memory operations of metal-ferroelectric-insulator-semiconductor (MFIS) FETs using PLZT/STO/Si(100) structures // *IEEE Electr. Device L.* 1997. V. 18. № 4. P. 160.

14. Wasa K., Yamazaki O., Adachi H., Kawaguchi T., Setsune K. Optical TIR switches using PLZT thin-film waveguides on sapphire // *J. Light. Technol.* 1984. V. 2. № 5. P. 710.

15. Higashino H., Kawaguchi T., Adachi H., Makino T., Yamazaki O. High-speed optical TIR switches using PLZT thin-film waveguides on sapphire // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1985. V. 24. P. 284.

16. Yi G., Wu Z., Sayer M. Preparation of $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ thin films by sol gel processing: electrical, optical, and electro-optic properties // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. № 5. P. 2717.

17. Boudrioua A., Loulergue J. C., Dogheche E., Remiens D. Electro-optic characterization of $(\text{Pb,Lu})\text{TiO}_3$ thin films using prism-coupling technique // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 85. № 3. P. 1780.

18. Adachi H., Kawaguchi T., Setsune K., Ohji K., Wasa K. Electro-optic effects of $(\text{Pb,Lu})(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ thin films prepared by rf planar magnetron sputtering // *Appl. Phys. Lett.* 1983. V. 42. № 10. P. 867.

19. Иванов-Омский В. И., Криворотов И. Н., Ястребов С. Г. Алмазоподобный гидрогенизированный углерод, легированный медью: спектральная интерферометрия // *ЖТФ.* 1995. Т. 65. С. 121.

20. Мухомтов В. М., Юзюк Ю. И. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение. – Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2008.

21. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. — М.: Физматлит, 2005.

22. Handbook of ellipsometry / Ed. by Tompkins H. G., Irene A. E. — William Andrew Publishing: Springer, 2005.

23. Aspnes D. E. Optical properties of thin films // *Thin Sol. Films.* 1982. V. 89. P. 249.

24. Zhang J. J., Sun J., Zheng X. J. A model for the C–V characteristics of the metal–ferroelectric–insulator–semiconductor structure // *Solid State Electron.* 2009. V. 53. P. 170.

25. Zeng Y., Shi S., Zhou L., Ling F., Yao J. Optical modulation of BST/STO thin films in the terahertz range // *J. Elec. Materi.* 2018. V. 47. P. 3855.

26. Королёв М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. и др. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Ч. 1 — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.

27. Wang Z., Kugler V., Helmersson U., Konofaos N., Evangelou E. K., Nakao S., Jin P. Electrical properties of SrTiO_3 thin films on Si deposited by magnetron sputtering at low temperature // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79. P. 1513.

28. Gaidi M., Stafford L., Amassian A., Chaker M., Margot J., Martinu L., Kulishov M. Influence of the microstructure on the optical characteristics of SrTiO_3 thin films // *J. Mater. Res.* 2005. V. 20. № 1. P. 68.

SrTiO_3 nanocomposite films on Si (001) substrates

¹ K. M. ZHIDEL, ^{1,2} A. V. PAVLENKO

¹ Research Institute of Physics Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

² Federal Research Center Southern Scientific Center of the RAS,
Rostov-on-Don, Russia

The results of studying the structure, dielectric, and optical properties of STO thin films grown by RF cathodic sputtering in an oxygen atmosphere on Si (001) substrates are presented. It was shown that the films have weak absorption, the normal dispersion of the refractive index, and interdiffusion layers at the interfaces.

Keywords: composite films, structure, optical constants, dielectric properties, surface roughness, non-destructive testing.

Использование вейвлет-преобразований для обработки акустико-эмиссионной информации при статических испытаниях образцов из углепластика

Л. Н. СТЕПАНОВА, д-р техн. наук; С. И. КАБАНОВ, канд. техн. наук
Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина, Новосибирск, Россия

В. В. ЧЕРНОВА, канд. техн. наук; Е. В. ЕГОРОВА
Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Проведен анализ процесса обработки акустико-эмиссионной (АЭ) информации при статическом нагружении образцов из углепластика с предварительно нанесенным ударным повреждением. Регистрацию сигналов АЭ осуществляли антенной, состоящей из двух волоконно-оптических датчиков Фабри—Перо и двух пьезодатчиков. Образцы с установленными датчиками статически нагружали до разрушения при температуре +20 °С. В режиме реального времени проводили локацию дефектов. При обработке информации применяли вейвлет-преобразование с использованием энергетических и частотных характеристик сигналов АЭ. Проведен анализ их основных информативных параметров (амплитуда, частота, структурный коэффициент, MARSE). Это позволило осуществить оценку типа разрушения (матрицы, волокна, расслоения) материала образца.

Ключевые слова: углепластик, статическое нагружение, дефект, локация, акустическая эмиссия, вейвлет-преобразование, энергия, структурный коэффициент.

Авиационные конструкции, изготовленные из углепластика, не подвержены коррозии, обладают высокой прочностью, износостойкостью, стойкостью к тепловому удару и облучению. Использование композиционных материалов (КМ) при создании объектов авиационной техники позволяет снизить их массу, повысить несущую способность, жесткость и тактико-технические характеристики (дальность полета, увеличение полезной нагрузки, экономия топлива) и т. д. [1—3].

При проведении натурных прочностных испытаний композиционных авиационных конструкций

из КМ необходимо учитывать, что их материал характеризуется неоднородностью структуры, анизотропией свойств, разнообразием типов армирования, низкой ударной вязкостью. Композиты обладают большим разбросом свойств, способны поглощать влагу из окружающей среды. Это может приводить к повреждаемости конструкций из углепластика, возникновению скрытых дефектов, которые определяют в основном методами неразрушающего контроля (НК). Удары, перегрузки, усталость материала углепластика могут вызывать растрескивание матрицы, разрыв упрочняющих волокон, расслоение. Температурные и механические напряжения, испытываемые авиационной конструкцией в полете, приводят к повышенному риску образования усталостных трещин, возникновению микродефектов, приводящих к ее внезапному разрушению.

В процессе производства конструкций из углепластика наиболее распространенными являются дефекты, связанные с нарушением сплошности, к которым относятся расслоения, непроклеи, трещины, воздушные или газовые раковины, инородные включения. При эксплуатации таких конструкций, работающих в условиях статического и динамического нагружения, происходит образование и развитие наиболее опасных дефектов, вызванных нарушением целостности материала в виде усталостных трещин и приводящих к разрушению.

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

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

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

E-mail: aergruop@ngs.ru

Чернова Валентина Викторовна, доцент кафедры "Электротехника, диагностика и сертификация".

E-mail: aergruop@ngs.ru

Егорова Елена Владимировна, инженер второй категории патентно-информационного отдела.

E-mail: aergruop@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 21 июля 2021г.

© Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Чернова В. В., Егорова Е. В., 2021

Применение методов НК объектов из углепластика зависит от типа материала, размеров объекта, условий испытаний. К основным задачам при контроле объектов из углепластика относятся:

- локация дефектов в процессе нагружения конструкции;
- определение типа дефектов;
- оценка степени опасности.

Сложная структура материала углепластика создает значительные трудности в выявлении и идентификации дефектов. Механизмы разрушения КМ включают пористость, растрескивание матрицы, обрыв волокон, расслоения, появляющиеся на границе раздела материала.

При прочностных испытаниях элементов авиационных конструкций из углепластика как в России [1—3], так и за рубежом [4—11] используют метод акустической эмиссии (АЭ). Метод обладает высокой чувствительностью и эффективен на ранней стадии развития дефектов. Он позволяет проводить испытания в режиме реального времени, осуществляет локацию и браковку дефектов, определяет тип разрушения и степень опасности [3—8, 12]. Методом АЭ "прослушивается" конструкция, которая находится в напряженном состоянии из-за приложенной к ней нагрузки. При нагружении дефект конструкции излучает звуковые волны, регистрируемые преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ), с выхода которых сигналы передаются в диагностическую АЭ-систему. Однако метод АЭ обладает высокой чувствительностью к разнообразным помехам (акустическим, электромагнитным, вибрационным), что осложняет решение задачи выделения полезных сигналов из шумов.

Согласно результатам исследования NASA [4], микроструктура композитов оказывает влияние не только на прочность и механические свойства объектов, изготовленных из углепластика, но и на структуру сигналов АЭ, что значительно отражается на результатах локации, получаемых при обработке информации.

При диагностировании авиационных конструкций из КМ за рубежом [5—11] и в нашей стране [1, 2, 12—15] получают распространение волоконно-оптические датчики (ВОД), работающие совместно с АЭ-системой. Среди их основных преимуществ (по сравнению с пьезодатчиками ПАЭ) следует отметить малые габариты и массу, нечувствительность к электромагнитным шумам и помехам, линейность амплитудно-частотной характеристики, возможность при многоточечных измерениях использовать одно оптическое волокно [5, 6]. Однако волоконно-оптические датчики Фабри—Перо обладают низкой чувствительностью [15]. Известны исследования, в которых при

прочностных испытаниях образцов из КМ использовали антенны, состоящие из ВОД Фабри—Перо и ПАЭ [12—14].

Для повышения достоверности результатов контроля с использованием антенны с двумя типами датчиков в процессе прочностных испытаний необходимо разработать метод обработки АЭ-информации. Одним из возможных решений является использование для этих целей теории вейвлет-преобразований (ВП) [16, 17].

Цель работы — обработка АЭ-информации в процессе прочностных испытаний образцов из углепластика с использованием вейвлет-преобразований.

Методика исследования

Сигналы АЭ являются нестационарными и состоят из нескольких волновых составляющих (мод) [18, 19]. Форма волны, полученная в анизотропных средах, зависит от дисперсии, многомодового распространения, отражения от границ, искажения сигнала акустическими датчиками. Из-за размытости формы сигнала АЭ возникают погрешности локации, вызывающие разброс координат дефектов. Каждая мода обладает своей амплитудой, скоростью распространения и несущей частотой, которые зависят от свойств материала и особенностей конструкции.

Статическое нагружение образцов из углепластика Т700 с геометрическими размерами 500×100 мм осуществляли на электрогидравлической машине MTS-100. Первый образец состоял из 7 монослоев с укладкой $[\pm 45/90/0/90/\pm 45]$. Его толщина составляла 1,4 мм. Второй и третий образцы были выполнены из 12 монослоев с укладкой $[\pm 45/90/0/90/\pm 45]$ и толщиной, равной 2,3 мм. В центральной части образцов находилось отверстие диаметром 14 мм. На второй и третий образцы вначале наносили ударное повреждение грузом массой 3,54 кг, сбрасываемым с высоты 0,8 м. Энергия удара составляла 28 Дж и определялась как [19]

$$E = mgh,$$

где m — масса груза, кг;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

h — высота падения груза, м.

Для регистрации сигналов АЭ использовали диагностическую микропроцессорную АЭ-систему СЦАД-16.14 с плавающим порогом селекции и с автоматической фильтрацией помех [20]. Регистрацию информации выполняли антенной, состоящей из двух волоконно-оптических датчиков с размером решетки Брэгга, равным 10 мм, подключенных к измерительным каналам 1 и 2 АЭ-сис-

темы, и двух ПАЭ типа ПК–01–07 с полосой пропускания 0,1—0,7 МГц, соединенных с каналами 0 и 3 системы. Для измерения деформаций использовали проволочные тензодатчики типа ПКС–8 (свидетельство об утверждении типа RU.C.28.007. А № 30935) сопротивлением 120 Ом с базой, равной 8 мм, и коэффициентом тензочувствительности $K = 2,14$ (рис. 1).

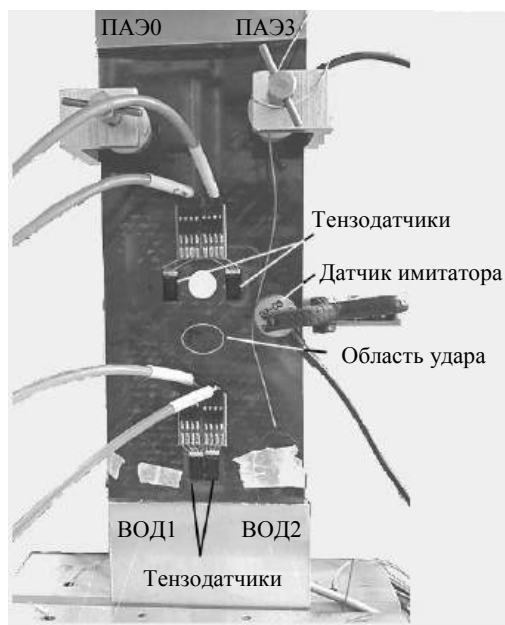


Рис. 1. Расположение датчиков, составляющих антенну, и датчика имитатора сигналов АЭ на образце из углепластика

Волоконно-оптические датчики являются распределенными широкополосными преобразователями с равномерными амплитудно-частотными характеристиками. Однако они в основном используются для измерения деформаций и температуры [15], а их применение для работы с АЭ-системами весьма ограничено [5, 6, 14]. Это объясняется тем, что локация дефектов методом АЭ, используемая для однородных материалов, осуществляется с погрешностями не более 2—3 %, однако при контроле конструкций из углепластиков возникают погрешности локаций порядка 10 % и более. Дело в том, что в формулы для расчета координат дефектов входит скорость звука, которая при нагружении конструкций из углепластиков неоднородна в различных направлениях и зависит от типа укладки монослоев [12].

При статическом нагружении образцов из углепластика Т700 датчики антенны были расположены на расстоянии 100 мм друг от друга и 40 мм — от гидрозахватов (см. рис. 1). Первый образец (рис. 2, а) нагружали до разрушения без нанесения ударного повреждения. Сигналы АЭ из области отверстия регистрировали, начиная с нагрузки $P = 10$ кН. При нагрузках, равных 15—35 кН, локация наблюдалась в области концентратора напряжений. Затем при увеличении нагрузки до 40 кН возникала дополнительная область локации 4 (см. рис. 2) в верхней части образца, где происходило его разрушение при изменении нагрузки от 45 до 50 кН.

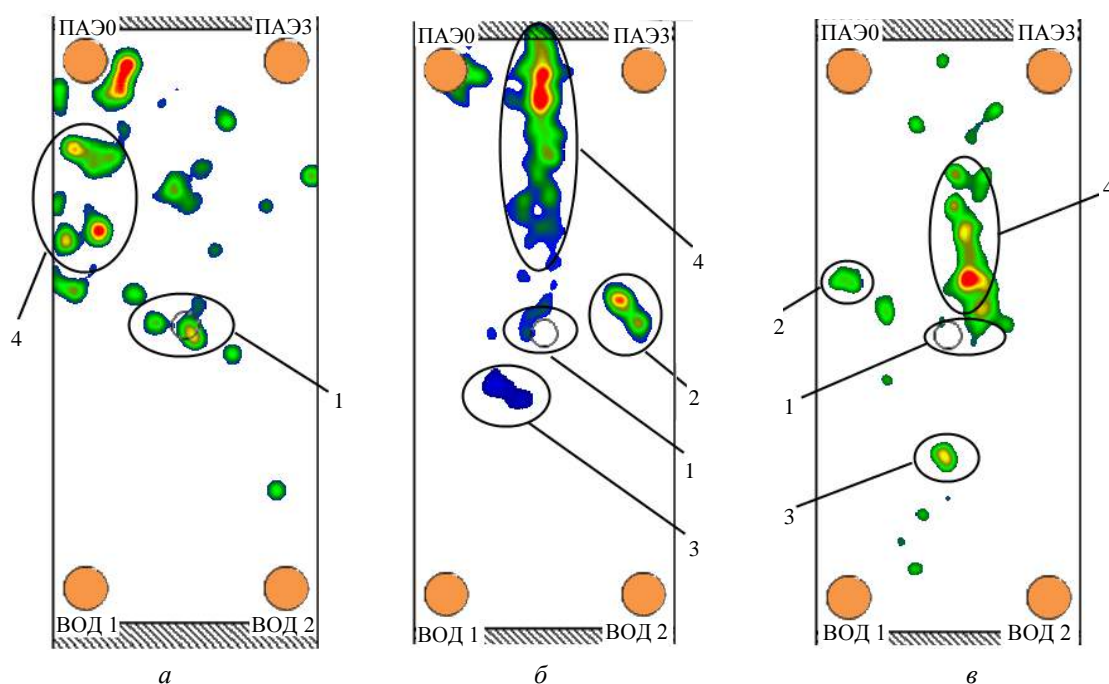


Рис. 2. Локация сигналов АЭ при статическом нагружении первого образца без удара (а), второго и третьего образцов — с ударом (б, в):

1 — область отверстия; 2 — область установки датчика имитатора; 3 — область ударного повреждения; 4 — область разрушения образца

Растягивающие нагрузки второго образца увеличивали по 20 кН до максимального значения $P = 190$ кН, при котором он разрушился. Нагрузки в процессе испытания измеряли параметрическим каналом, входящим в виде отдельной платы в состав АЭ-системы СЦАД-16.14.

Регистрацию сигналов АЭ и их локацию осуществляли в непрерывном режиме. В процессе нагружения образца на этапе выдержки нагрузки сигналы регистрировали антенной. Кроме того, подключался датчик имитатора, работающий в режиме обратного пьезоэффекта и осуществляющий проверку работоспособности волоконно-оптических датчиков (см. рис. 1).

На локационной картине второго образца было выделено четыре области (рис. 2, б). Сигналы первой из них соответствовали процессам разрушения материала в области отверстия. Область 4 характеризовала процесс разрушения монослоев второго образца. Сигналы АЭ из данной области обладали максимальной амплитудой и высокой активностью.

Третий образец при нагружении также доводили до разрушения, которое происходило при нагрузке 230 кН. Анализ локации сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе нагружения третьего образца, показал, что их суммарная амплитуда в области отверстия 1, равная 3,2 В, в 2—3 раза меньше, чем в области разрушения 4 (рис. 2, в). В области ударного повреждения 4 были активными источники сигналов АЭ, максимальная суммарная амплитуда которых за все время испытаний составила 7,5 В. Работоспособность и чувствительность датчиков ВОД при нагружении третьего образца проверяли при включении датчика имитатора (область 2) в режим излучения.

При определении типа разрушения образцов из углепластика Т700 использовали вейвлет-преобразование, структурный коэффициент, парциальную энергию [7, 16, 17, 19—21]. Анализ структуры сигналов АЭ сложной формы проводили с использованием вейвлет-преобразования [16, 17], осуществляющего частотно-временной анализ, связанный с разложением исходного сигнала по базису системы функций, порожденному материнским вейвлетом $\psi(x)$.

Известно, что шумы влияют на разброс точек локации сигналов АЭ, а частотная фильтрация, проводимая на схемотехническом уровне, не позволяет их устранять. Для повышения точности обработки сигналов АЭ и исключения шумов из результатов измерений выполняли преобразование сигналов АЭ на структурном уровне с использованием вейвлет-анализа. Сигналы АЭ, локализованные в рабочей области образца, анализировали с

использованием непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования. При этом локацию сигналов АЭ, регистрируемых из области крепления образца захватами нагружающей машины, не проводили.

Непрерывное вейвлет-преобразование CWT_ψ функции $f(x)$ вычисляли с использованием свертки сигнала с двухпараметрической вейвлетной функцией [16, 17]:

$$\begin{aligned} \text{CWT}_\psi[f](a, b) &= (f, \psi_{a,b}) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \end{aligned} \quad (1)$$

$$a, b \in R, a \neq 0,$$

где $\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ — сдвиги и растяжения вейвлета;

$\psi(x)$ — материнский вейвлет;

a, b — масштаб и смещение вейвлета по оси времени;

R — множество рациональных чисел.

Применение дискретного вейвлет-преобразования при обработке цифровой АЭ-информации позволило сократить число выполняемых операций и объем требуемой памяти. При этом применяли дополнительные условия для материнского вейвлета и вычисления выполняли по формуле (1) только для масштаба a и смещения b вида

$$a = 2^{-i}, \quad \frac{b}{a} = j, \quad i, j \in Z,$$

где Z — множество целых чисел.

С использованием вейвлет-преобразований получены вейвлет-скалограммы для сигнала АЭ, зарегистрированного датчиками антенны ПАЭ и ВОД (рис. 3).

Обработку выполняли в программе Wallen. Для преобразования информации был применен материнский вейвлет Габора. Для анализа был выбран сигнал, источником которого являлся датчик имитатора, а приемниками — датчики ПАЭ0 и ВОД1 (см. рис. 1). Установлено, что вейвлет-коэффициенты сигналов АЭ, а следовательно, и амплитуды, регистрируемые пьезодатчиком ПАЭ0, в 10 раз больше, чем при его регистрации волоконно-оптическим датчиком ВОД1. При этом максимум энергии сигнала, зарегистрированного ПАЭ0, был сосредоточен в полосе частот 200—250 кГц (рис. 3, а), а для датчика ВОД1 энергия распределялась в полосе частот 100—120 кГц (рис. 3, б).

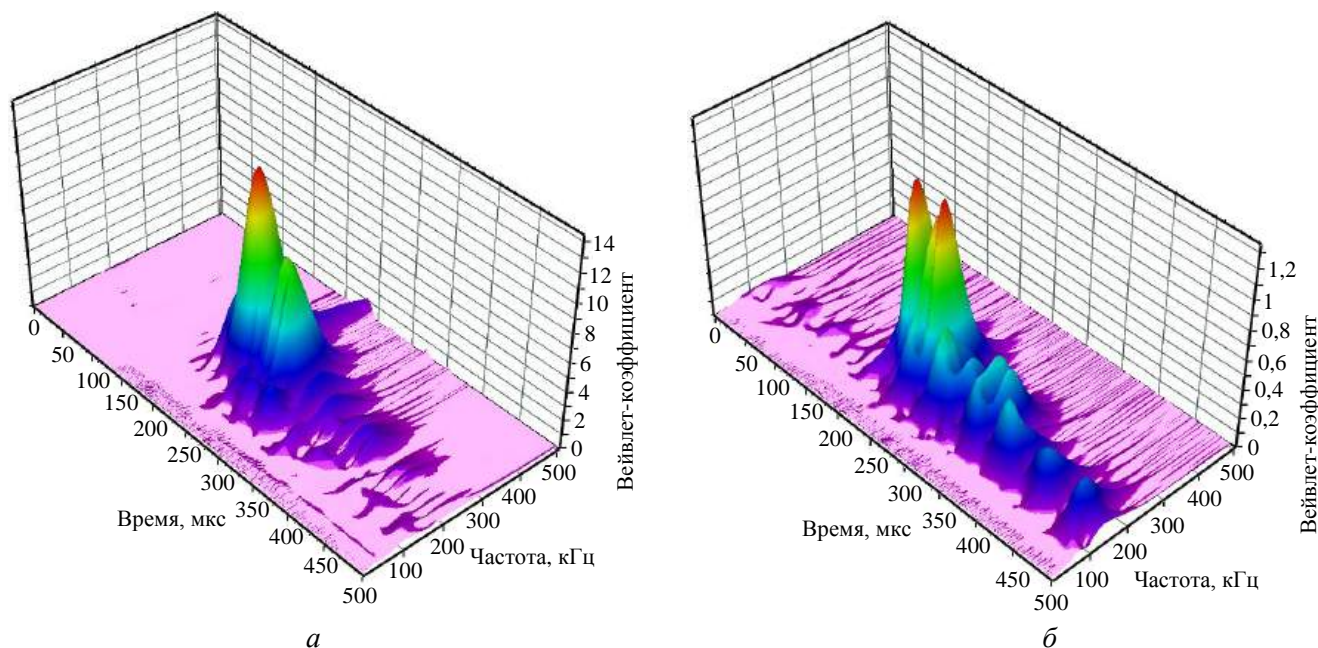


Рис. 3. Вейвлет-скалограммы сигнала АЭ от датчика имитатора, зарегистрированного пьезопреобразователем ПАЭ0 (а) и волоконно-оптическим датчиком ВОД1 (б)

Использование вейвлет-преобразования позволяет получать более подробные данные о структуре сигналов АЭ и выполнять дальнейшую обработку информации с использованием уточнения времени их прихода и анализа распределения энергии.

Для ускорения расчетов применяли быстрое вейвлет-преобразование, при котором использовали минимальный набор значений параметра смещения b по оси времени, достаточный для выполнения условия полного восстановления сигнала.

С использованием вейвлет-преобразований рассчитывали структурный коэффициент, связанный со структурой сигнала АЭ при нагружении образца из углепластика, его изменением при развитии дефектов и определяемый как [21]

$$P_{Dij}(f) = \frac{\max D_i}{\max D_j}, \quad (2)$$

где D_i , D_j — наборы коэффициентов вейвлет-разложения i -го и j -го уровней детализации.

Внутренние повреждения углепластика влияют на энергетические и частотные характеристики сигналов АЭ [1, 4, 17, 21, 22]. Как следует из формулы (2), отношение коэффициентов вейвлет-разложения i -го и j -го уровней детализации соответствует смещению положения частотно-временного максимума энергии и отражает энергию сигналов АЭ на одной частоте, определяя ее отличие от энергии на другой частоте. Это является признаком изменения типа разрушения углепластика (разрыв волокна, разрушение матрицы, расслоение).

Поскольку пьезодатчики ПАЭ надежно работают в частотном диапазоне 100—700 кГц, был рассчитан структурный коэффициент P_{D32} , который определяется как отношение максимумов коэффициентов детализации D_3 и D_2 :

$$P_{D32}(f) = \frac{\max D_3}{\max D_2}, \quad (3)$$

где частотам 250—500 кГц соответствует коэффициент детализации D_2 , частотам 125—250 кГц — коэффициент детализации D_3 [21].

Другой подход к оценке изменения частотно-временного распределения сигналов АЭ использован в работах [7, 8]. В них рассчитывается коэффициент, отражающий энергию в сигнале АЭ как парциальную (частичную):

$$E = \frac{\int_{f_1}^{f_2} U^2(f) df}{\int_{f_3}^{f_4} U^2(f) df}, \quad (4)$$

где $f_1 = 125$ кГц и $f_2 = 250$ кГц — минимальное и максимальное значения частоты сигнала АЭ выбранного диапазона;

$f_3 = 0$ кГц и $f_4 = 700$ кГц — частоты сигналов всего диапазона;

$U(f)$ — амплитуда сигнала АЭ.

В знаменателе формулы (4) стоит энергия спектра сигнала АЭ, соответствующая полному диапазону частот, а в числителе — энергия сигнала в выбранном диапазоне частот. Сравнение формул

(3) и (4) показало, что наиболее информативным параметром является структурный коэффициент P_{D32} , так как он основан на отношении максимумов коэффициентов детализации в рабочей области частот пьезодатчика ПАЭ, а не во всем диапазоне частот. Поэтому влияние на него шумов меньше.

При нагрузках, близких к разрушающим, шумы могут увеличиваться и оказывать влияние на результат расчета парциальной энергии E , так как она определяется в таком же диапазоне частот (125—250 кГц), что и структурный коэффициент. Однако эта энергия находится в числителе формулы (4). При расчете структурного коэффициента энергия данной полосы частот (125—250 кГц) находится в знаменателе формулы (3), а следова-

тельно, повышение уровня шумов уменьшает влияние на структурный коэффициент.

Увеличение нагрузки P более 30 кН приводило к уменьшению структурного коэффициента, что характеризовало активный процесс разрушения матрицы [22].

Локация сигналов АЭ в процессе нагружения образцов из углепластика T700 показала, что их разрушение начиналось в области отверстия. Активность сигналов АЭ в данной области начинала увеличиваться при нагрузке более 80 кН (рис. 4; таблица). При этом наблюдалось уменьшение структурного коэффициента сигналов, регистрируемых ПАЭ0. В соответствии с работами [22, 23] это означало, что в образце происходило разрушение матрицы.

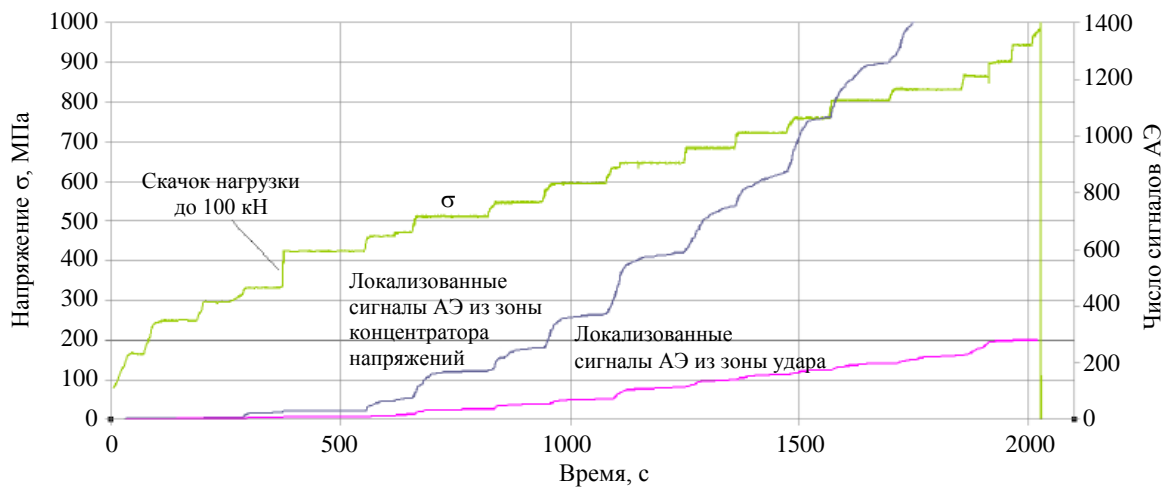


Рис. 4. Зависимость от времени числа сигналов АЭ, локализованных в зонах концентратора напряжений, ударного повреждения и механических напряжений

Информативные параметры сигналов АЭ в процессе нагружения третьего образца

Нагрузка, кН	Механическое напряжение, МПа	Количество локализованных сигналов		Средний структурный коэффициент			
				Область удара		Область отверстия	
		Область удара	Область отверстия	ПАЭ0	ВОД1	ПАЭ0	ВОД1
40	164,7	1	2	—	—	4,94	1,92
60	248,8	2	1	5,1	3,2	—	—
70	294,8	2	4	—	—	4,59	2,77
80	331,6	3	16	3,91	4,15	3,57	3,33
100	423,8	2	7	3,56	3,66	3,10	2,21
110	465,5	8	42	3,76	3,17	5,32	2,11
120	511,0	18	98	4,43	1,91	4,29	1,86
130	547,9	18	82	3,72	1,49	3,74	1,78
140	590,0	17	116	4,41	2,36	4,17	2,06
150	645,5	43	215	4,14	1,85	4,13	1,87
160	685,7	25	162	3,19	1,90	3,56	1,77
170	722,5	18	121	3,45	1,87	3,62	1,91
180	760,3	15	195	3,49	2,45	3,51	2,13
190	818,2	25	190	3,48	2,15	3,40	1,84
200	831,0	27	145	3,17	1,74	3,28	1,71
210	864,4	47	—	2,91	1,91	—	—
220	902,2	8	—	3,55	2,65	—	—

При достижении нагрузкой 100 кН был зарегистрирован скачок напряжений с $\sigma_1 = 337$ МПа до $\sigma_2 = 430$ МПа в зоне наклейки тензодатчика (см. рис. 4; таблицу). При переходе на нагрузку 110 кН отмечалось увеличение среднего структурного коэффициента сигналов, регистрируемых ПАЭ0 в области отверстия, до значения 5,32, что характеризовало начало процесса разрушения волокон. При этом отмечалось увеличение количества сигналов АЭ, локализованных в области отверстия, в шесть раз (см. таблицу). Дальнейшее увеличение нагрузки более 110 кН приводило к постепенному уменьшению структурного коэффициента.

Для сигналов, зарегистрированных датчиком ВОД1 в области отверстия, максимальное значение среднего структурного коэффициента составило 3,33 при нагрузке 80 кН. При скачке механических напряжений изменений данного параметра не наблюдалось, что соответствовало низкой чувствительности волоконно-оптических датчиков при разрушении материала в данной области.

Волоконно-оптический датчик ВОД1 был более чувствителен к процессам разрушения, которые происходили в области ударного повреждения. Анализ структурного коэффициента показал, что при нагрузке 80 кН данный параметр принимал максимальное значение 4,15, после чего наблюдалось его уменьшение до 1,49 при нагрузке 130 кН. Это характеризовало процесс разрушения матрицы в данной области. Для структурных коэффициентов сигналов АЭ, регистрируемых ПАЭ0, их максимальное значение в области ударного повреждения при нагрузках в диапазоне от 80 до 220 кН составило 4,43, а минимальное — 2,91. Это объяснялось тем, что удар был нанесен близко к волоконно-оптическим датчикам (см. рис. 1 и рис. 2, в).

Активность локализованных сигналов АЭ в области ударного повреждения была значительно меньше, чем в области отверстия (см. рис. 4 и таблицу). При этом в данных областях увеличение числа сигналов АЭ происходило при одинаковых нагрузках. Изменение нагрузки от 110 до 120 кН приводило к увеличению числа сигналов в два раза, а при нагрузке 150 кН регистрировалось их максимальное число.

Заключение

Выполнена обработка сигналов АЭ при статическом нагружении образцов из углепластика Т700 с концентратором напряжений в виде отверстия. Регистрация АЭ-информации осуществлялась диагностической системой СЦАД-16.14, работающей с антенной, состоящей из пьезоэлектрических преобразователей ПК 01-07 и волокон-

но-оптических датчиков. На второй и третий образцы предварительно было нанесено ударное повреждение энергией 28 Дж.

Проанализированы основные информативные параметры сигналов АЭ, локализованных в области отверстия и ударного повреждения. Рассчитаны значения усредненных структурных коэффициентов и суммарной амплитуды локализованных сигналов, зарегистрированных при увеличении нагрузки. Рассмотрена связь между процессом разрушения, изменением механических напряжений и основными информативными параметрами сигналов АЭ.

С использованием вейвлет-преобразования получена информация о частотно-временной структуре сигналов АЭ, на основании которой построены скалограммы, отражающие их особенности в процессе регистрации информации датчиками ПАЭ и ВОД. Структурные коэффициенты сигналов АЭ позволили проанализировать процесс разрушения образцов из углепластика. Установлено, что если при растягивающей статической нагрузке, прикладываемой к образцу, наблюдается уменьшение структурного коэффициента, то это соответствует смещению энергии в область частот 250—500 кГц. Это, как показано в работах [22, 23], является признаком активно протекающего процесса дефектообразования с разрушением как матрицы, так и волокон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масхидов В. В., Кашарина Л. А., Смирнов О. И. и др. Построение оптоволоконной системы встроенного контроля авиационных конструкций, изготовленных с применением полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 1. С. 65—73.
2. Савин С. П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолета семейства МС-21 // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 686—693.
3. Барсуک В. Е., Степанова Л. Н., Кабанов С. И. Акустико-эмиссионный контроль дефектов при статических испытаниях конструкции композиционного самолета // Контроль. Диагностика. 2018. № 4. С. 14—19.
4. Madaras E. Underscore the NASA role in the development of the nondestructive testing of the composite // NASA Langley research center, scientific department of non-destructive testing of structures and materials. Gempston. VA23681 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cs.odu.edu/~mln/ltrs-pdfs/NASA-2001-ahsiss-eim.pdf>
5. Pappu R. P. Acoustic emission detection using optical fiber sensors for the aerospace applications. — Birmingham: Astor Univ, 2011. — 177 p.
6. Kahandawa G. C., Epaachchi J., Wang H. Use of FBG sensors for SHM in aerospace structures // Photonic Sensors. 2012. V. 2. № 3. P. 203—214.
7. Sause M. G. R. Acoustic emission signal propagation in damaged composite structures // J. Acoustic Emission. 2013. V. 31. P. 1—18.
8. Sause M. G. R. On use of signal features for acoustic emission source identification in fibre-reinforced composites // J. Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 125—136.

9. Aljets D. Acoustic emission location in composite aircraft structures using modal analysis. — University of Glamorgan, 2011. — 163 p.
10. Hill E. K. Neural network burst pressure prediction in tall graphite — epoxy pressure vessels from acoustic emission data // J. Acoustic Emission. 2012. V. 30. P. 167—179.
11. Ono K., Gallego A. Research and applications of AE on advanced composites // J. Acoustic Emission. 2012. V. 30. P. 180—229.
12. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И. и др. Локация сигналов акустической эмиссии в образцах из дюралюминия и углепластика с использованием антенны, состоящей из волоконно-оптических датчиков и пьезопреобразователей // Контроль. Диагностика. 2021. № 2. С. 18—29.
13. Бочкова С. Д., Волковский С. Д., Ефимов М. Е. и др. Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 73—77.
14. Башков О. В., Ромашко Р. В., Зайков В. И., Панин С. В. и др. Детектирование сигналов акустической эмиссии волоконно-оптическими интерференционными преобразователями // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 18—25.
15. Гончаров В. А., Федотов М. Ю., Шиенок А. М. и др. Распределенные опто-волоконные сенсоры для контроля напряженно-температурного состояния конструкций // Вопросы материаловедения. 2016. № 1. С. 73—79.
16. Степанова Л. Н., Рамазанов И. С., Чернова В. В. Вейвлет-анализ структуры сигналов акустической эмиссии при прочностных испытаниях образцов из углепластика // Контроль. Диагностика. 2015. № 7. С. 54—61.
17. Степанова Л. Н., Серьезнов А. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С. Использование вейвлет-преобразований для локации сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2017. № 10. С. 18—26.
18. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Кабанов С. И. Анализ модового состава сигналов акустической эмиссии при одновременном тепловом и статическом нагружении образцов из углепластика Т800 // Контроль. Диагностика. 2018. № 11. С. 4—13.
19. Степанова Л. Н., Чернова В. В., Милосердова М. А. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов и кессона крыла из углепластика от ударных нагрузок // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 9. С. 4—11.
20. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Чернова В. В. Диагностический модуль акустико-эмиссионной системы с автоматической фильтрацией помех // Датчики и системы. 2020. № 5. С. 3—14.
21. Степанова Л. Н., Чернова В. В. Анализ структурных коэффициентов сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении образцов из углепластика с ударными повреждениями // Контроль. Диагностика. 2017. № 6. С. 34—41.
22. Степанова Л. Н., Батаев В. А., Лапердина Н. А., Чернова В. В. Акустико-эмиссионный способ определения типа дефекта структуры образца из углепластика. Патент № 2 676 209 РФ. МПК G 01 N 29/14. Заяв. 25.12.2017. Опубл. 26.12.2018. Бюл. 2018. № 36. — 17 с.
23. Степанова Л. Н., Батаев В. А., Чернова В. В. Определение связи структуры образцов из углепластика с параметрами сигналов акустической эмиссии при одновременном статическом и тепловом нагружении // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 4—13.

Wavelet transform application for acoustic-emission information processing during static loading of carbon fiber samples

L. N. STEPANOVA, S. I. KABANOV

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

V. V. CHERNOVA, E. V. EGOROVA

Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

The analysis of the processing of acoustic emission (AE) information during static loading of CFRP specimens with preliminary impact damage is presented. The AE signals were registered by two Fabry—Perot fiber-optic sensors and two piezoelectric sensors combined antenna. Samples with installed sensors were statically loaded until fracture at a temperature of + 20 °C. Defects were located in real time mode. Wavelet transform was applied for processing of the information accounting the energy and frequency characteristics of the AE signals. The analysis of their main informative parameters (amplitude, frequency, structural coefficient, MARSE) was carried out. This made it possible to define the type of destruction (matrix, fiber, delamination) of the sample material.

Keywords: carbon fibre reinforced plastic, static loading, defect, location, acoustic emission, wavelet transform, energy, structural coefficient.

УДК 621.4(075+620.19075); 678.747.2:620.179

DOI: 10.52190/2073-2562_2021_4_43

Сравнение выявляемости малозаметных ударных повреждений по результатам выполнения ультразвукового неразрушающего контроля и оптической профилометрии поверхности образцов полимерных композиционных материалов

С. А. СМОТРОВА, канд. техн. наук; А. В. СМОТРОВ, канд. техн. наук
ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского»,
г. Жуковский, Московская обл., Россия

В. И. ИВАНОВ, д-р техн. наук
ЗАО «НИИИМ МНПО «Спектр», Москва, Россия

Приведены результаты экспериментов по обнаружению малозаметных ударных повреждений глубиной до 0,2–1,0 мм на образцах полимерных композиционных материалов (ПКМ) в виде пластин 150×100×6 мм. Выполнено сравнение результатов оценки размеров малозаметных ударных повреждений образцов, полученных референсным методом ультразвукового контроля (УЗК) и методом оптической профилометрии. Определена количественная разница внешних размеров ударных повреждений образцов ПКМ с размерами (параметрами) их внутренних разрушений. Экспериментально подтверждено, что величины площадей визуально/оптически регистрируемых вмятин от ударов на образцах ПКМ на порядок меньше величины площадей разрушенных областей (расслоение и растрескивание), выявленных референсным УЗК-методом. Выявлены зоны нечувствительности использованных методов неразрушающего контроля для обнаружения малозаметных ударных повреждений образцов ПКМ: ≤ 10 Дж для углепластиков, ≤ 20 Дж для стеклопластиков. Построены регрессионные модели корреляционных связей повреждаемости образцов ПКМ, выраженные через зависимость площади повреждений от энергии нормированных ударов. Корреляционно-регрессионные модели описаны полиномиальными уравнениями. Коэффициенты корреляции и детерминации показали высокое качество созданных математических моделей.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, малозаметные ударные повреждения, ультразвуковой контроль, оптическая профилометрия, корреляционно-регрессионный анализ, математические модели.

Нарушение структуры и целостности авиационных конструкций, изготовленных из ПКМ, в результате ударов посторонних предметов при эксплуатации — один из наиболее характерных типов случайных повреждений [1]. Визуально-измерительный контроль (ВИК) [2, 3] ввиду его простоты является доминирующим методом их обнаружения, хотя он позволяет в основном выявлять большие наружные повреждения (видимые — Visible Impact Damage, VID), а практически незаметные на поверхности (малозаметные — Barely

Visible Impact Damage, BVID) часто остаются обнаруженными. Самым надежным, весьма трудоемким, способом регистрации и количественной оценки параметров ударных повреждений авиационных конструкций из ПКМ считается акустический (ультразвуковой) неразрушающий контроль (НК), применяют и другие методы. Выбор методов и средств неразрушающего контроля авиационной техники в процессе технической эксплуатации осуществляется эксплуатационными и ремонтными организациями [4].

В [5–7] было отмечено, что инновационным методом решения задачи обнаружения и регистрации малозаметных ударных повреждений (МЗУП) является создание чувствительных к удару индикаторных покрытий. Так, люминесцентное smart-покрытие (ЛСП), разработку которого финансирует РФФИ, позволит увеличить обнаруживаемость и надежность выявления МЗУП на поверхности элементов авиаконструкций из ПКМ. При этом технология применения этого покрытия является экономически эффективной и не требует специальной квалификации обслуживающего персонала.

Смотрова Светлана Александровна, начальник научно-исследовательской лаборатории "Перспективные методы испытаний и контроля состояния конструкций".

E-mail: svetlana.smotrova@tsagi.ru

Смотров Андрей Васильевич, ведущий научный сотрудник Комплекса прочности летательных аппаратов.

E-mail: andrey.smotrov@tsagi.ru

Иванов Валерий Иванович, главный научный сотрудник, профессор.

E-mail: ivi444@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 августа 2021 г.

© Смотрова С. А., Смотров А. В., Иванов В. И., 2021

Стандартная методика установления границы контролепригодности методов НК основана на статистическом анализе результатов серии испытаний при участии достаточно большого количества экспертов одной квалификации, которые должны при заданных в ходе эксперимента условиях обнаружить повреждения в предъявляемых им для контроля образцах с предварительно нанесенными в определенных зонах ударами с различной энергией (см., например, [8]). В отношении натуральных конструкций на вероятность обнаружения повреждений (Probability Of Detection — POD) определенного размера с избранной процедурой ВИК влияют следующие основные факторы (см., например, [9]):

- состояние контролируемой поверхности (чистая/грязная);
- текстура поверхности — вид обработки (диффузно отражающая или зеркальная, наличие грунтовочных или лакокрасочных/цветных покрытий и т. п.);
- условия освещенности (например, естественный или искусственный свет, величина светности) и угол обзора;
- расстояние, с которого выполняют контроль, а также место расположения на объекте контроля (верхняя, нижняя или боковая поверхность).

С учетом того факта, что при визуальном контроле обнаружение повреждений происходит при помощи природного оптического прибора — человеческого глаза [2], авторы провели сравнение результатов обнаружения МЗУП на поверхности образцов ПКМ при использовании бесконтактного оптического устройства — профилометра и контактного ультразвукового дефектоскопа.

Как правило, выполняя ВИК для обнаружения повреждений в виде вмятин, оперируют величинами их глубины [3], однако, по мнению авторов, правильнее применять такую характеристику, как площадь поврежденного участка, т. е. той области, где нарушена регулярность поверхностного слоя образца/конструкции. Такой подход к решению задачи позволит снизить погрешности оценки внешней зоны разрушений. Так, например, в [10] приведены результаты испытаний на удар падающим грузом с шаровым ударником $\varnothing 25,4$ мм по методике [11]. Энергия ударов, вызвавших повреждения, варьировалась от 20 до 30 Дж, что приводило к появлению зон нерегулярности поверхности ("отпечатков" — вмятин от ударов) с размерами от 0,18 до 7,54 мм в глубину. При этом площади видимых поврежденных областей составили от 232 до 6087 мм².

На основе результатов экспериментов по обнаружению МЗУП на образцах ПКМ при помощи бесконтактной оптической профилометрии и УЗК

построены математические модели повреждаемости при ударе для нескольких вариантов укладки слоев в ПКМ.

Материалы и методы исследования

Испытаниям подвергались неокрашенные образцы угле- и стеклопластиков, изготовленные методом прессования в виде призматических прямоугольных пластин размерами $l_1 \times l_2 \times l_3 = 150 \times 100 \times 6$ мм, с двумя типами волокнистого армирующего наполнителя:

- образцы углепластиков на основе углеродной ленты-полотна 300-24K-200 (нить основы Toho Tenax IMS65 E23 24K) и связующего КПП-150 со следующими схемами укладки:

- 1-ый тип $[+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45]_3$ (маркер \blacklozenge на графиках);
- 2-ой тип $[-45/90/+45/90/90/0/90/90/+45/90/-45]_3$ (маркер \blacktriangle на графиках);
- 3-ий тип $[0/+45/-45/0/0/90/0/0/-45/+45/0]_3$ (маркер $+$ на графиках);

- образцы стеклопластиков на основе стеклоткани конструкционной Т-10-14(92) и связующего КПП-150 со следующими схемами укладки:

- тип А $[0/90]_5$ (маркер \bullet на графиках);
- тип Б $[90/0]_5$ (маркер \blacksquare на графиках).

Выполненный до проведения основных исследований входной контроль позволил отобрать образцы без производственных дефектов (дефекты пропитки, пористость, непрочей, наличие посторонних предметов). Для нанесения нормированных ударных повреждений в диапазоне 5–45 Дж был использован испытательный копер с вертикально падающим грузом INSTRON Dynatup 9250HV. Согласно [11] удары наносились стальным цилиндрическим бойком массой $(5,50 \pm 0,25)$ кг с гладким полусферическим наконечником $\varnothing (24,5 \pm 0,1)$ мм. Количественная оценка повреждений была выполнена следующими методами:

- эхо-метод ультразвукового контроля с использованием ручного сканирования; применение дефектоскопа Sonatest SiteScan D20 с раздельно-совмещенными преобразователями типа Sonatest THM4-10Z [12];

- оптический метод бесконтактной профилометрии; применение компьютеризированной оптической координатно-измерительной топометрической системы GOM ATOS Capsule 12M с программным пакетом GOM inspect. Система GOM ATOS Capsule 12M позволяет выполнять оптическое сканирование практически любых поверхностей при любых условиях освещения, обладает малым уровнем отражений и шумов [13].

Выходными данными при использовании аппаратно-программного комплекса бесконтактной оптической профилометрии, используемыми в данных исследованиях, были измеренные площади вмятин от удара. Результатами измерений с применением УЗК-дефектоскопа явились наибольшие протяженности (L_1 — размер вдоль длинной стороны; L_2 — размер вдоль короткой стороны) выявленных разрушенных областей в образцах ПКМ как со стороны удара, так и с обратной стороны. Для удобства сравнения по этим характеристикам были определены осредненные площади эллипсов повреждений: $S = (\pi L_1 L_2) / 4$.

Для сравнения внешних размеров ударных повреждений образцов угле- и стеклопластиков с параметрами внутренних разрушений была выполнена оценка величин площадей S визуаль-но/оптически регистрируемых вмятин (рис. 1) и внутренних разрушенных областей — зон расслоений и растрескиваний (рис. 2), выявленных референсным УЗК-методом.

На основе указанных экспериментальных данных были построены математические модели зависимостей площади повреждения образцов ПКМ от энергии удара. Закономерности процессов разрушения ПКМ из-за воздействий на образцы единичными нормированными ударами смоделированы при статистической обработке результатов экспериментов с применением корреляционно-регрессионного анализа [14]. За результативный признак (зависимая переменная) принят размер повреждения — площадь S , а в качестве признака-фактора (независимая, объясняющая переменная) использована величина энергии ударного воздействия E . Наилучшее качество (коэффициент детерминации $R^2(S) \rightarrow 1,0$) построенных математических моделей повреждаемости угле- и стеклопластиков достигнуто при использовании линейной регрессии — полиномиальных функций 3-го порядка ($S = a_3 E^3 + a_2 E^2 + a_1 E + a_0$), аппроксимирующие линии которых при графическом представлении моделей рассчитывали с применением известного метода наименьших квадратов.

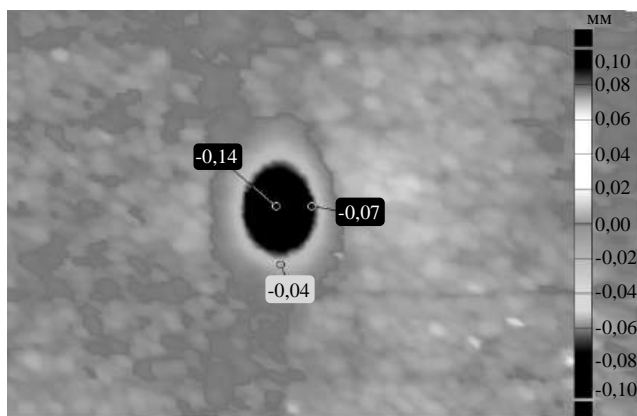


Рис. 1. Типичная топографическая карта отпечатка от удара с энергией 15 Дж на углепластиковом образце, зарегистрированная при помощи метода бесконтактной профилометрии

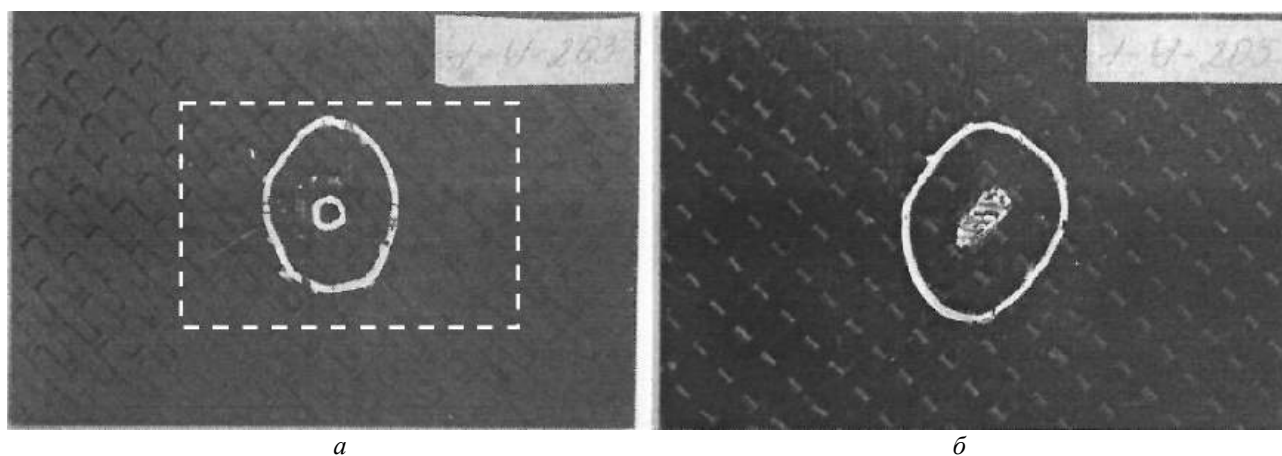


Рис. 2. Зарегистрированные при использовании УЗК разрушенные области (зоны расслоений и растрескиваний) углепластикового образца, представленного на рис. 1:

а — вид со стороны нанесения удара (пунктиром показана область выполнения профилометрии);
б — вид с обратной стороны

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Поля корреляции — графическое представление регрессионных моделей полиномиальной связи площади повреждения с энергией удара для образцов угле- и стеклопластика, определенные при помощи методов УЗК и бесконтактной профилометрии, приведены на рис. 3 и 4.

На рисунках использованы следующие обозначения для разных схем укладки образцов углепластика: \blacklozenge — $[+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45]_3$; \blacktriangle — $[-45/90/+45/90/90/0/90/90/+45/90/-45]_3$; $+$ —

$[0/+45/-45/0/0/90/0/0/-45/+45/0]_3$, и образцов стеклопластика: \bullet — $[0/90]_s$; \blacksquare — $[90/0]_s$.

В табл. 1 приведены выражения для аппроксимирующих кривых — полиномов 3-й степени, являющихся математическими моделями повреждаемости ПКМ в результате воздействия нормированных ударов. В скобках указаны математические модели повреждаемости, построенные только по экспериментальным данным, отличным от нуля, т. е. кусочно-полиномиальные функции.

В табл. 2 приведены коэффициенты корреляционно-регрессионного анализа.

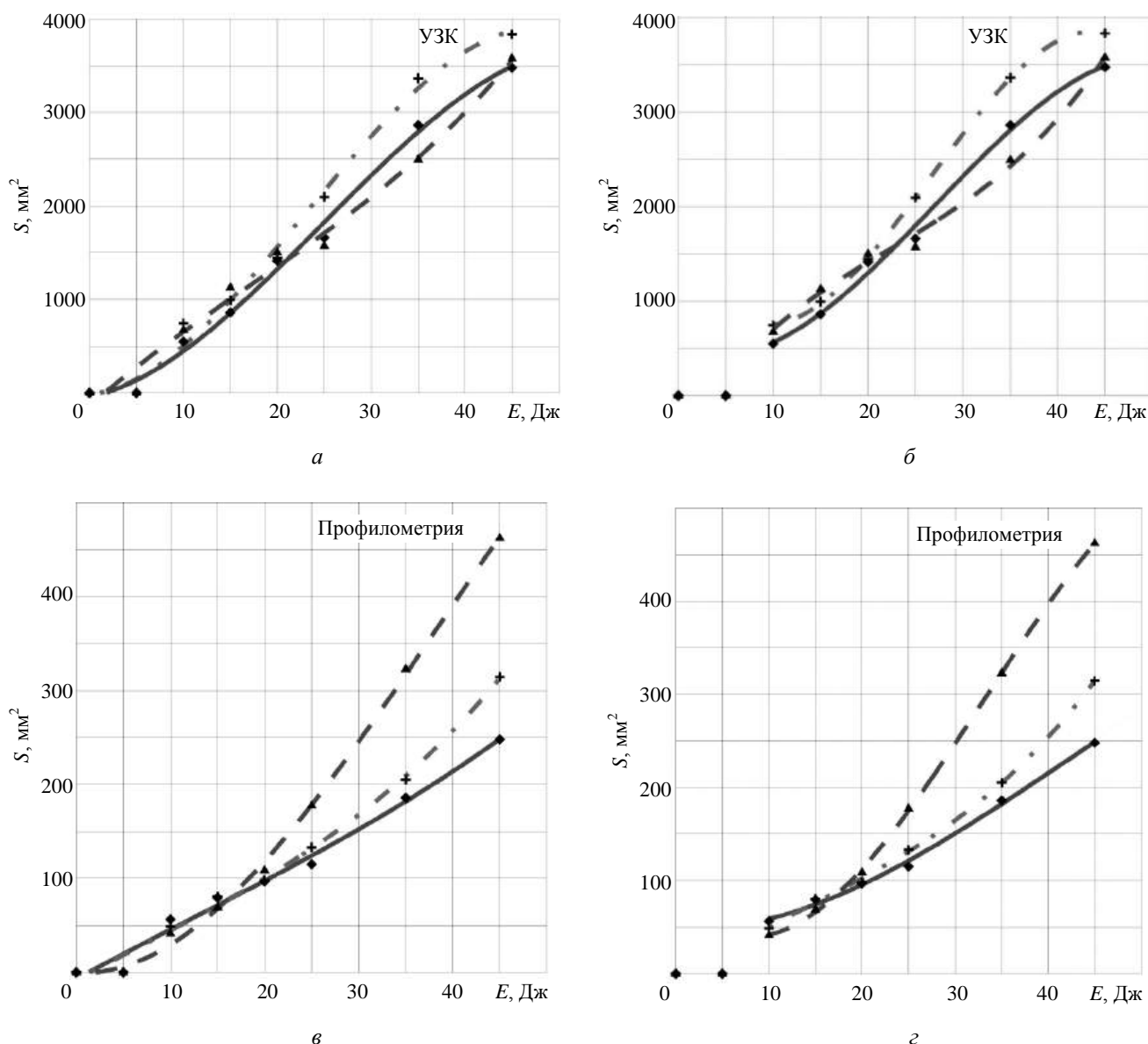


Рис. 3. Зависимость площади повреждения S , определенной при ультразвуковом методе и при помощи метода бесконтактной профилометрии, образцов углепластика от энергии удара E :

$a, в$ — аппроксимирующие кривые построены для всех экспериментальных данных;

$б, г$ — аппроксимирующие кривые построены только для ненулевых значений

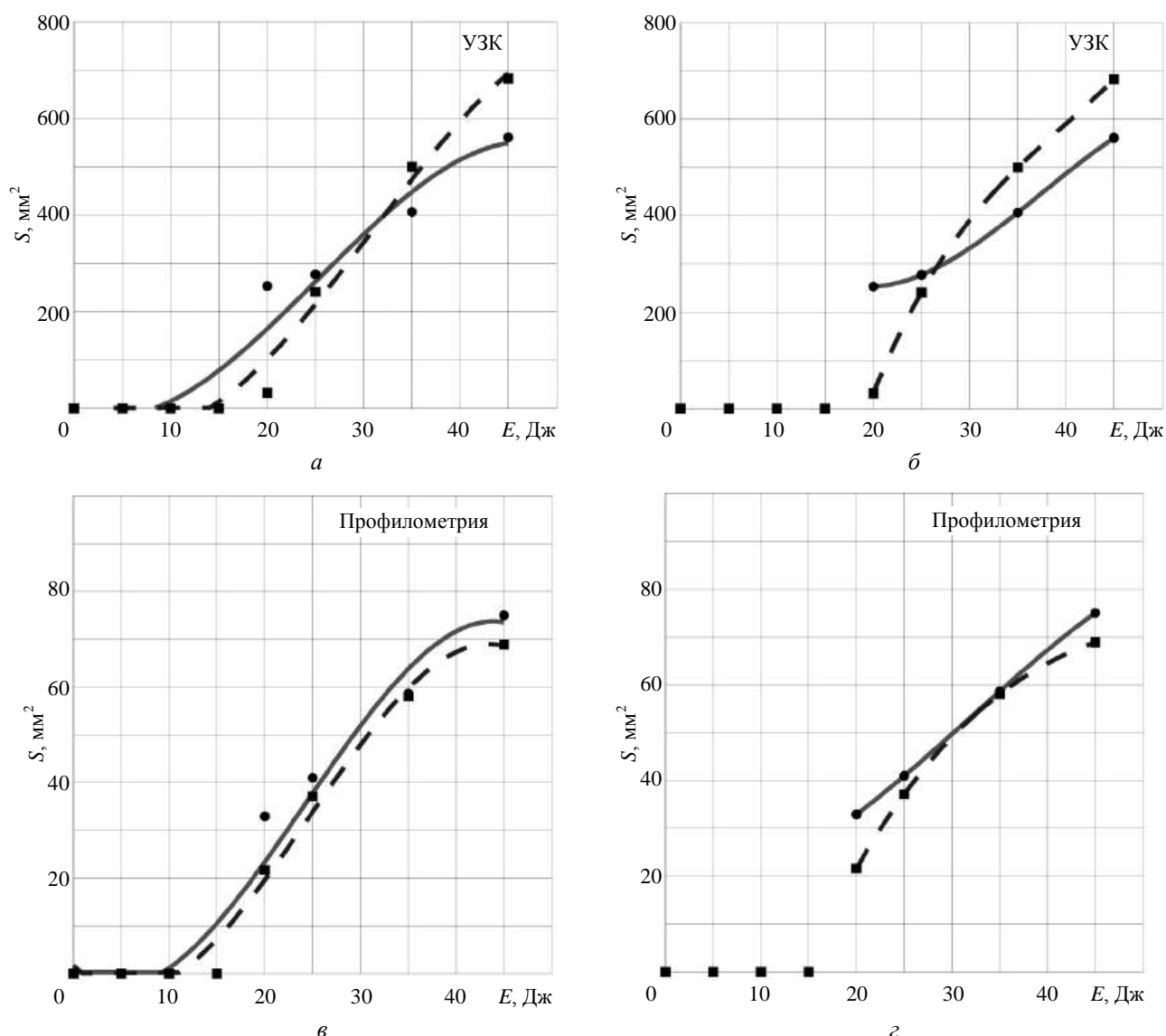


Рис. 4. Зависимость площади повреждения S , определенной при ультразвуковом методе и при помощи метода бесконтактной профилометрии, образцов стеклопластика от энергии удара E :

$a, в$ — аппроксимирующие кривые построены для всех экспериментальных данных;
 $б, г$ — аппроксимирующие кривые построены только для ненулевых значений

Таблица 1

Математические модели повреждаемости при различных схемах армирования образцов угле- и стеклопластиков

Метод определения экспериментальных данных по результативному признаку S	
Ультразвуковой контроль	Профилометрия
Углепластики со схемой армирования $[+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45]_3$	
$S = -0,0472E^3 + 3,5326E^2 + 14,152E$ ($S = -0,069E^3 + 5,5762E^2 - 45,599E + 530,75$)	$S = 0,00003E^3 + 0,0258E^2 + 4,2981E$ ($S = -0,0014E^3 + 0,1749E^2 - 0,5815E + 48,524$)
Углепластики со схемой армирования $[-45/90/+45/90/90/0/90/90/+45/90/-45]_3$	
$S = 0,0097E^3 - 0,1475E^2 + 65,826E$ ($S = 0,0592E^3 - 3,9764E^2 + 148,72E - 446,29$)	$S = -0,0035E^3 + 0,4006E^2 - 0,7221E$ ($S = -0,0081E^3 + 0,8052E^2 - 11,398E + 83,318$)
Углепластики со схемой армирования $[0/+45/-45/0/0/90/0/0/-45/+45/0]_3$	
$S = -0,0695E^3 + 4,8351E^2 + 9,0325E$ ($S = -0,1538E^3 + 12,228E^2 - 188,34E + 1565,6$)	$S = 0,0009E^3 + 0,0238E^2 + 4,1293E$ ($S = 0,0029E^3 - 0,127E^2 + 6,9919E - 9,9939$)
Стеклопластики со схемой армирования $[0/90]_s$	
$S = -0,0147E^3 + 1,1137E^2 - 8,1937E$ ($S = -0,0164E^3 + 1,852E^2 - 53,53E + 714$)	$S = -0,0025E^3 + 0,1799E^2 - 1,4353E$ ($S = -0,0007E^3 + 0,0658E^2 - 0,3011E + 18,136$)
Стеклопластики со схемой армирования $[90/0]_s$	
$S = -0,0136E^3 + 1,2937E^2 - 15,162E$ ($S = 0,0272E^3 - 3,236E^2 + 145,94E - 1810$)	$S = -0,0026E^3 + 0,1887E^2 - 1,7537E$ ($S = 0,0007E^3 - 0,1186E^2 + 7,433E - 84,762$)

Таблица 2

Коэффициенты корреляционно-регрессионного анализа при различных схемах армирования

Схемы армирования	Коэффициенты			
	Ультразвуковой контроль		Профилометрия	
	$R(S)$	$R^2(S)$	$R(S)$	$R^2(S)$
Углепластики				
[+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45] ₃	0,9961 (0,9946)	0,9921 (0,9946)	0,9919 (0,9921)	0,9810 (0,9968)
[-45/90/+45/90/90/0/90/90/+45/90/-45] ₃	0,9906 (0,9887)	0,9791 (0,9937)	0,9879 (0,9914)	0,9982 (0,9998)
[0/+45/-45/0/0/90/0/0/-45/+45/0] ₃	0,9916 (0,9886)	0,9906 (0,9999)	0,9908 (0,9874)	0,9907 (0,9991)
Стеклопластики				
[0/90] _s	0,9667 (0,9901)	0,9447 (1,0000)	0,9667 (0,9999)	0,9558 (1,0000)
[90/0] _s	0,9542 (0,9877)	0,9774 (1,0000)	0,9714 (0,9808)	0,9817 (1,0000)

В скобках указаны значения коэффициентов для математических моделей, построенных только по экспериментальным данным, отличным от нуля, т. е. для кусочно-полиномиальных функций. На адекватность построенных математических моделей физическим процессам указывают значения приведенных в ней коэффициентов корреляции $R(S)$ и детерминации $R^2(S)$ [15]. Все представленные математические модели свидетельствуют о весьма сильной корреляционной связи результативного признака с признаком-фактором: $R(S) > 0,95$, а также демонстрируют высокое качество моделирования: $R^2(S) > 0,94$.

Заключение

На основе проведенных исследований можно заключить, что использование методов УЗК в эхо-импульсном варианте со сканированием поверхности образца, изготовленного из ПКМ, позволяет с достаточно высокой надежностью обнаружить дефекты, полученные в результате ударного воздействия постороннего предмета на объект и установить границы внутренних разрушений в результате такого воздействия. Минимальное значение энергии единичных ударов, при которой надежно обнаруживаются повреждения в образцах углепластиков, составляет 10 Дж, а в образцах стеклопластиков — 20 Дж.

Параллельное применение визуально-измерительного контроля с использованием компьютеризированного сканирующего оптического координатно-измерительного топометрического профилометра модели GOM ATOS Capsule 12M показало, что величины площадей визуально/оптически регистрируемых последствий ударов на поверхности образцов ПКМ на порядок меньше

величины площадей разрушенных внутренних областей (расслоений и растрескиваний), выявленных референсным УЗК-методом. Метод УЗК дает существенно больше информации о поврежденности объектов, чем лабораторный контроль с использованием визуальных/оптических лабораторных установок, например GOM ATOS Capsule 12M. В то же время корреляционные связи как для коэффициента корреляции, так и для коэффициента детерминации при графическом представлении регрессионных моделей зависимости площадей повреждений от энергии ударов для обоих использованных методов практически одинаковы. Однако известно, что производительность ВИК почти в 100 раз выше, чем метода УЗК: процедура визуального осмотра участка поверхности площадью 1 м² длится примерно 18 с, а выполнение ультразвуковой диагностики требует около получаса [16, 17]. Поэтому существенно выше и стоимость процедур УЗК по сравнению с использованием ВИК.

Графическое представление регрессионных моделей полиномиальной связи повреждаемости стеклопластиков с энергией ударов хорошо иллюстрирует, что корректность моделирования сильно зависит от полноты использованных экспериментальных данных.

Выводы

Показаны возможности и ограничения применения традиционного эхо-импульсного метода УЗК и эквивалентного ВИК лабораторного оптического метода профилометрии. Для использования этих методов в полевых условиях в целях выявления повреждений машиностроительных изделий из ПКМ необходимо проведение дополнительных работ по совершенствованию в направ-

лении как упрощения процедур и удешевления контроля, так и повышения чувствительности этих методов НК. В связи с этим возрастает актуальность продолжения исследований по применению визуального контроля с использованием люминесцентного смарт-покрытия, что позволит увеличить чувствительность метода ВИК в полевых условиях, не повышая стоимости.

Авторы выражают благодарность Боеву Е. А., Ермолину И. Ю., Гулевскому И. В., Калинину А. Г. и Трубчаткину И. В. за помощь при выполнении экспериментальных работ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13019.

ЛИТЕРАТУРА

- Дубинский С. В., Фейгенбаум Ю. М., Селихов А. А., Гвоздев С. А., Ордынцев В. М. Закономерности реализации случайных ударных воздействий на конструкцию крыла коммерческого самолета // Изв. Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4(3). С. 604—611.
- ГОСТ Р ЕН 13018-2014 Контроль визуальный. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2016. — 6 с.
- MIL-HDBK-793(AR). Military handbook. Nondestructive active testing techniques for structural composites. Chap. 2. Non-destructive testing techniques: Availability and limitations. 2-2.1 Visual NDT. — USA: Department of Defense, 1989. P. 2-1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.everyspec.com> (дата обращения: 27.10.2013).
- ГОСТ Р 55253-2012 Воздушный транспорт. Контроль неразрушающий авиационной техники. Требования к применению, организации и проведению работ. — М.: Стандартинформ, 2013. — 11 с.
- Смотрова С. А. Методы и технологии создания специальных покрытий с целью обнаружения малозаметных повреждений агрегатов авиационных конструкций из ПКМ // Оборонная техника. 2016. № 10—11. С. 66—88.
- Чернышев С. Л., Зиченков М. Ч., Смотрова С. А., Новоторцев В. М., Музафаров А. М. Технология обнаружения малозаметных ударных повреждений силовых элементов авиационных конструкций из армированных ПКМ с использованием ударочувствительных полимерных покрытий с оптическими свойствами // Конструкции из композиционных материалов. 2018. № 4(152). С. 48—53.
- Смотрова С. А. Отработка технологии обнаружения малозаметных ударных повреждений с помощью чувствительного к ударам индикаторного покрытия на конструкции летательного аппарата из полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 2(162). С. 14—19.
- Дубинский С. В., Сеник В. Я., Сидоров И. С., Дубинский В. С. Определение минимального количества осмотров, необходимого для установления границы визуальной контролепригодности ударных повреждений в композитных авиаконструкциях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 1. С. 65—72.
- Asada H., Sotozaki T., Endoh S., Tomita T. Practical evaluation of crack detection capability for visual inspection in Japan: Proceedings of RTO AVT Workshop on "Airframe inspection reliability under field/depot conditions" (13–14 May 1998, Brussels, Belgium). RTO MP-10. 1998. P. 15–1.
- Erhart D., Ostrom L. T., Wilhelmsen C. A. Visual detectability of dents on a composite aircraft inspection specimen: An initial study // International J. Applied Aviation Studies. 2004. V. 4. № 2. P. 111—122.
- ГОСТ 33496-2015 Композиты полимерные. Метод испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом. — М.: Стандартинформ, 2016. — 18 с. (аналогичен стандарту ASTM D 7136/D 7136M-12 Standard test method for measuring the damage resistance of a fibre-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event).
- СТО СМК 7-134-2016 Стандарт организации. Система менеджмента качества. Конструкционные полимерные композиционные материалы. Методика неразрушающего ультразвукового контроля плоских элементов из полимерных композиционных материалов. — ФГУП "ЦАГИ", 2016. — 24 с.
- Приложение к свидетельству № 74046 об утверждении типа средств измерений. Описание типа средства измерений "Системы оптические координатно-измерительные топометрические ATOS" [Электронный ресурс] URL: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/75187-19.pdf> (дата обращения: 03.12.2020).
- Шашков В. Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: учеб. пособие. — Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. — 363 с.
- Кочетков П. А. Краткий курс теории вероятностей и математической статистики: учеб. пособие. — М.: МГИУ, 1999. С. 28—29.
- Дубинский С. В., Фейгенбаум Ю. М., Сеник В. Я. Определение критериев прочности по условиям визуальной контролепригодности ударных повреждений в композитных авиационных конструкциях // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 06. С. 86—99.
- Троицкий В. А., Карманов М. Н., Троицкая Н. В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2014. № 3. С. 29—33.

Barely visible impact damage vid detectability comparison of execution results of nondestructive ultrasonic control and optical sureace profilometry of polymer composite materials-samples

S. A. SMOTROVA, A. V. SMOTROV

Federal State Unitary Enterprise "Central Aerohydrodynamic Institute named after professor N. E. Zhukovsky",
Zhukovsky, Moscow region, Russia

V. I. IVANOV

JSC "NIIIN MNPO "Spectr", Moscow, Russia

A experiments series on barely visible impact damage (BVID) detection by depth to 0,2–1,0 mm on polymer composite materials (PCM) samples in the form of plates 150×100×6 mm is made. BVID detectability comparison by results of ultrasonic control (USC) of samples (reference method) with experimental data optical surface profilometry is executed. The quantitative difference of external signs of PCM samples impact damages with their internal fractures are determined. It is experimentally confirmed that quantities of the areas of visually/optical registered impact dents in plastics 10 times less the destroyed fields (delaminations and crackings), revealed by the reference USC-method. The used methods tolerance zones of nondestructive testing for PCM BVID detection are revealed: ≤ 10 J for carbon-plastics, ≤ 20 J for glass-plastics. Are constructed regression the model of correlative connections of damageability of PCM expressed through square of damage, and energy of normalized impacts. Correlatively-regression model is described by polynomial equations. Coefficients of correlation and determination showed high quality of the created models.

Keywords: polymer composite materials, barely visible impact damage, ultrasonic control, optical surface profilometry, correlatively-regression analysis, mathematical models.

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». 2021. Вып. 4 (164). С. 1—52.

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

Подписано в печать 21.10.2021. Формат 60x84 1/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,. Уч.-изд. л. 6,2.
Тираж 250 экз. Заказ 1982. 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 2021 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, 8 (495) 491-77-20.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».