

УДК 65.011.56:621.778.068

Анализ напряженно-деформированного состояния композиционного баллона с учетом ограничений, наложенных на этапах проектирования и изготовления

Данг Хоанг Минь, С.С. Гаврюшин

Изложена единая методика синтеза композиционного баллона методом намотки в рамках концепции управления жизненным циклом продукции. Предложен алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния баллона в рамках ограничений, наложенных на смежных этапах жизненного цикла. Расчет выполнен методом конечных элементов с использованием схемы циклической симметрии.

Ключевые слова: автоматизация, автоматизированное проектирование, САПР, анализ, плоскостная намотка, композиционный материал, баллон давления.

Analysis of the composition-cylinder stress-strain state with limitations imposed at designing and manufacturing stages

Dang Hoang Minh, S.S. Gavryushin

The paper presents a unified method of synthesis, design and analysis to solve the problem of manufacturing composite balloons by winding through the concept of Continuous Acquisition and Life-cycle Support. The algorithm for stressed-deformed state analysis is offered within the framework of restrictions imposed at adjacent stages of life cycle. The analysis will be carried out by the finite elements method with the use of the cyclically symmetric scheme.

Keywords: automation, computer-aided design, CAD, analysis, plane winding, composite material, pressure vessel.

Процесс непрерывной намотки — один из наиболее распространенных и совершенных процессов изготовления высокопрочных композитных оболочек, нашедших широкое применение в авиационной технике, судостроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности.

Создание рациональных конструкций требует научно обоснованного подхода на этапе проектирования конструкции, удовлетворяющей исходным требованиям заказчика, что требует проведения анали-



ДАНГ
Хоанг Минь
аспирант



ГАВРЮШИН
Сергей Сергеевич
доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой
«Компьютерные системы
автоматизации
производства»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
e-mail: gss@rk9.bmstu.ru

за напряженно-деформированного состояния в условиях ограничений, накладываемых на смежных этапах жизненного цикла изделия [1, 2].

К основным ограничениям при решении задачи анализа композиционных баллонов методом намотки следует отнести необходимость соблюдения заданных заказчиком параметров баллона, учет конструктивного исполнения соединения композитной оболочки и металлического закладного элемента, а также выполнение требований, накладываемых технологическим оборудованием, используемым на этапе изготовления (рис. 1).



Рис. 1. Упрощенный жизненный цикл баллона давления, изготовленного из композиционного материала методом намотки

Процесс изготовления и расчета композиционного баллона, изготовленного методом намотки, достаточно хорошо описан в литературе [3–9].

В работе [10] конструкция композиционного баллона рассматривается в виде совокупности квазиоднородных слоев с усредненными по объему физико-механическими характеристиками, при этом предполагается, что волокнистый композит ведет себя как линейно-упругий материал (рис. 2). Расчет проводится в рамках безмоментной теории оболочек [4, 6, 9]. В первом приближении дан алгоритм анализа напряженно-деформационного состояния (НДС) в монослоях, основанный на макромеханическом (феноменологическом) подходе.

К недостаткам такого подхода следует отнести сложность учета структуры слоев в области дна, где волокнистые наполнители со свя-

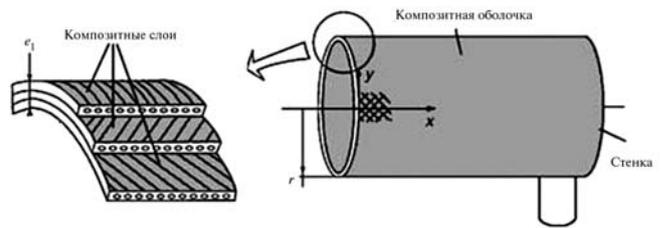


Рис. 2. Традиционный подход к представлению структуры слоев в стенке композиционного баллона

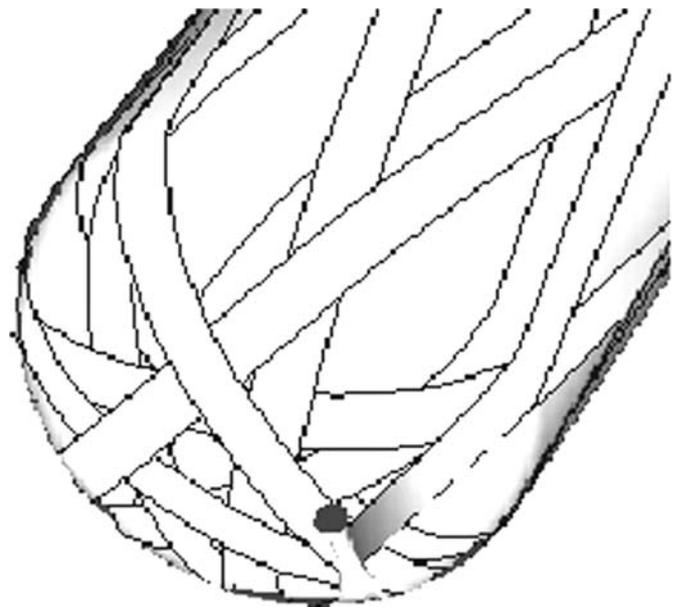


Рис. 3. Реальная структура слоев в стенке композиционного баллона при намотке

зующим материалом наматываются на оправке с перекрытием, усложняя тем самым структуру стенки баллона (рис. 3). Кроме того, при аналитическом определении внутренних силовых факторов и проектной толщины оболочки возникает сингулярность в окрестности полюсного отверстия.

В настоящее время для расчета широко используют метод конечных элементов (МКЭ) [8, 10, 11]. Данный подход имеет недостатки, поскольку требует проведения ряда операций, связанных с описанием структуры многослойного изделия. В частности, при импорте модели из программ 3D-моделирования очень трудоемко задаются углы ориентации волокон в стенке баллона по длине меридиана оболочки.

В предлагаемой работе излагается авторский численный метод расчета напряженно-дефор-

мированного состояния композиционного баллона, свободный от перечисленных недостатков. К особенностям предлагаемого подхода следует отнести использование концепции единого информационного пространства (ЕИП). В соответствии с данной методикой проектирование конструкции баллона, конструкции слоистого материала и проведение расчета рассматриваются как единая задача.

Дискретизация конструкции баллона проводится в три этапа в соответствии с алгоритмом, представленным в таблице.

Геометрия баллона задается функциями, описывающими форму внешнего и внутреннего меридиана на этапе проектирования [1]. В соответствии с методикой изопараметрического описания [10, 11] матрица жесткости конечного слоистого элемента $[k^{(e)}]$ вычисляется по формуле:

$$[k^{(e)}] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \times [B^{(e)}] \det[J^{(e)}] d\xi d\eta d\zeta. \quad (1)$$

Вычисления компонентов матрицы функций формы деформаций $[B^{(e)}]$ и Якобиана $\det[J^{(e)}]$ проводятся стандартным способом [10, 11]. Особого внимания заслуживает вопроса рациональной нумерации глобальных узловых точек и элементов для автоматического процесса получения их координат, проектирования и матричных операций в расчете. В разработанной программе координаты узловых точек в цилиндрической системе координат генерировались по заданной твердотельной модели с последующим пересчетом в декартовую систему.

Для вычисления матрицы упругих констант слоистого композита конечного элемента $[D^{(e)}]$

каждый элемент e рассматривался согласно модели многослойного волокнистого композиционного материала, состоящего из $n^{(e)}$ монослоев (рис. 4).

При вычислениях использовались: глобальная система координат — $OXYZ$, система координат слоистого элемента e — $O_e X_e Y_e Z_e$; ло-

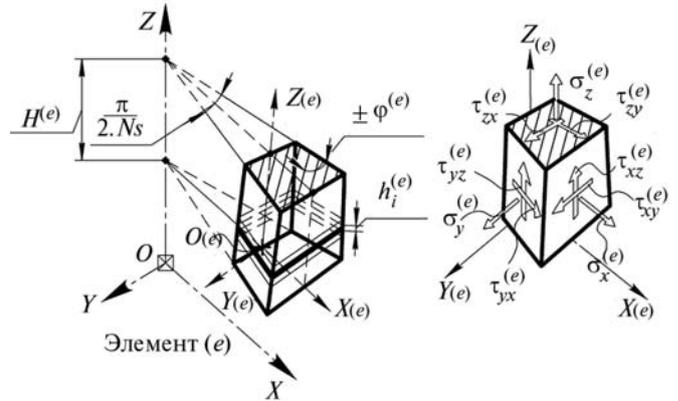


Рис. 4. Конечный элемент многослойного композиционного материала при трехосном напряженном состоянии

кальная система координат i -го монослоя в элементе e — $O_i^{(e)} 1_i^{(e)} 2_i^{(e)} 3_i^{(e)}$.

Рассмотрим монослой i -го слоистого элемента e (рис. 5). Каждый i -й монослой слоистого элемента e характеризуется углом армирования $\varphi^{(e)}$ и толщиной $h_i^{(e)}$.

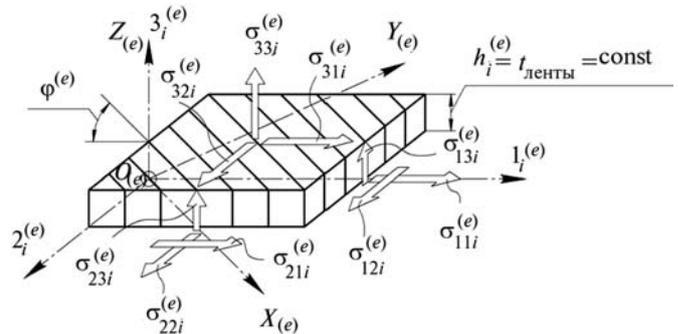


Рис. 5. Монослой i -го слоистого элемента e при трехосном напряженном состоянии

Предполагается, что толщина каждого монослоя постоянна во всех слоистых элементах и равна толщине наматываемого материала $t_{л.}$

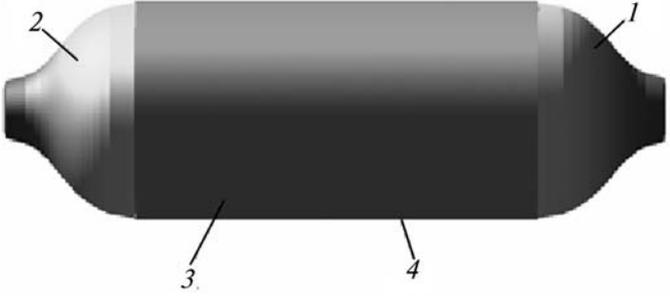
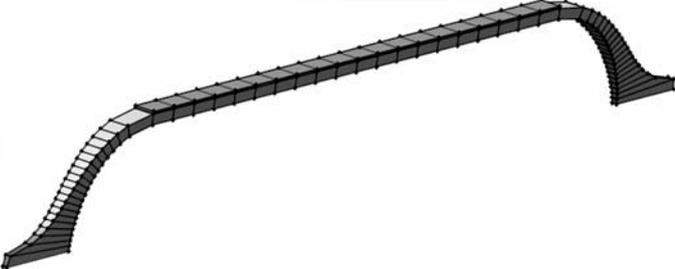
$$h_i^{(e)} = t_{л.} = \text{const.}$$

Суммарная толщина слоистого элемента e :

$$H^{(e)} = \sum_1^{n^{(e)}} h_i^{(e)}.$$

При этом предполагается, что угол армирования $\varphi_i^{(e)}$ и толщина $H^{(e)}$ вычисляется по координатам (r и z) центральной узловой точки в элементе e .

Алгоритм дискретизации конструкции

<p>Предполагается, что согласно требованиям заказчика, проектируется твердотельная модель баллона, изготовленного из композиционных материалов методом намотки. При этом в качестве схемы армирования выбрана технология плоскостной намотки [1, 4, 6, 7]</p>	 <p>Континуальная твердотельная модель композитного баллона: 1, 2 — композитная оболочка первого, второго днища; 3, 4 — двойного перекрестного и кольцевого слоистого материала цилиндрической части</p>
<p>На первом этапе дискретизации проводится разбиение конструкции на циклические повторяющиеся сегменты</p>	 <p>Первый этап дискретизации</p>
<p>На втором этапе дискретизации сегмент аппроксимируется конечно-элементной моделью с использованием гексагональных многослойных изопараметрических элементов</p>	 <p>Второй этап дискретизации</p>
<p>На третьем этапе дискретизации многослойные элементы разбиваются на монослои</p>	 <p>Третий этап дискретизации</p>

Для определения матрицы упругих констант слоистого композита конечного элемента $[D^{(e)}]_{6 \times 6}$

в работе применен вариант определяющих соотношений, предложенный в работе [12]. Соотношения получены для упругих многослойных волокнистых композиционных материалов, деформирующихся в условиях трехосного напряженного состояния. Каждый монослой рассматривается как упругое трансверсально изотропное тело, образованное монослоями, многослойная среда подчиняется гипотезам Фойхта и Рейсса [12].

Посредством операции ассемблирования матрицы жесткости отдельных конечных элементов $[k^{(e)}]_{24 \times 24}$ собираются в глобальную матрицу жесткости $[K]_{3N_N \times 3N_N}$, где N_N — общее количество узлов сегмента. Разрешающая система линейных алгебраических уравнений для сегмента

$$[K]_{3N_N \times 3N_N} \{a\}_{3N_N \times 1} = \{F\}_{3N_N \times 1} \quad (2)$$

модифицируется в соответствии с граничными условиями и условиями циклической симметрии. В предлагаемой методике используется метод дублирующего сегмента [13, 14]. В соответствии с данным методом виртуально создается дублирующий сегмент (Д) с одинаковыми геометрическими структурами элементов относительно базового сегмента (Б) (рис. 6).

Нагрузки, граничные условия, а также связи и уравнения связей из базового сегмента переносятся в дублирующий. Таким образом обеспечивается выполнение граничных условий циклической симметрии на краях сектора [14].



Рис. 6. Связь между нижней и верхней гранями базового (Б) и дублирующего сегментов (Д)

Предложенный алгоритм реализован в виде прикладной программы для ЭВМ — PVRK9. Программа создана на языке MAPLE.

Ниже приведен пример проектирования и анализа композитного баллона, удовлетворяющего следующим исходным данным и требованиям:

$$R_0 = 0,15 \text{ м}; L_0 = 0,9 \text{ м}; V_0 = 0,04 \text{ м}^3;$$

$$M_0 = 20 \text{ кг}; p = 30 \text{ МПа}; \delta = 0,005 \text{ мм}.$$

Механические характеристики материала соответствуют данным, приведенным в работе [11]:

$$[\sigma_{+1}] = 1600 \text{ МПа}; [\sigma_{-1}] = 700 \text{ МПа};$$

$$[\sigma_{+2}] = 60 \text{ МПа}; [\sigma_{-2}] = 170 \text{ МПа};$$

$$E_1 = 48 \text{ ГПа}; E_2 = 10 \text{ ГПа}; \nu_{12} = 0,25;$$

$$k = 1; \rho_{\text{км}} = 2200 \text{ кг / м}^3.$$

Решение задачи синтеза для нахождения рациональных параметров с данными требованиями было получено в работе [1]. Предполагается, что при эксплуатации баллон жестко закрепляется по обоим торцам (рис. 7).

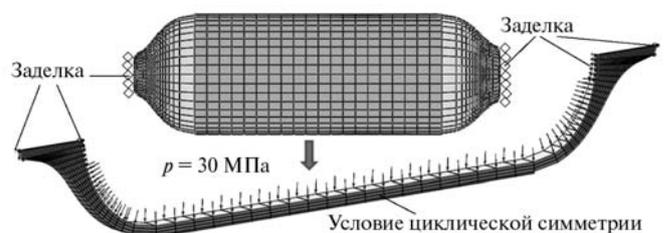


Рис. 7. Граничные условия и нагрузки

С помощью разработанной программы были получены результаты расчета. Максимальное эквивалентное напряжение по теории Хубера–Мизеса составляет 640 МПа, максимальное суммарное перемещение узловых точек 3,69 мм.

Полное НДС баллона, изготовленного из композита методом плоскостной намотки представлено на рис. 8.

Предложенная методика синтеза, проектирования и анализа может быть рекомендована для решения задач изготовления композиционного баллона методом намотки. В отличие от ранее существовавших, новая методика позво-

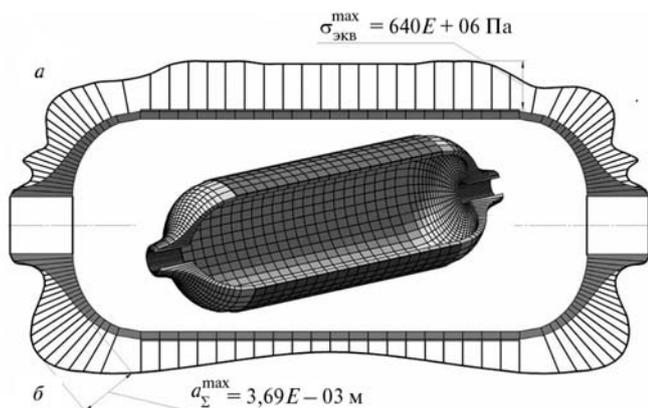


Рис. 8. Распределение полных векторных перемещений (а) и эквивалентных напряжений по теории Хубера–Мизеса (б) вдоль меридиана внешней поверхности баллона

ляет контролировать основные параметры всего процесса синтеза изделия и устранять противоречия, возникающие на стыке отдельных этапов жизненного цикла.

Литература

1. Данг М.Х., Гаврюшин С.С., Семисалов В.И. Анализ и синтез процесса намотки композиционного баллона в рамках концепции управления жизненным циклом продукции // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 7. С. 12–17.
2. Гаврюшин С.С. Анализ и синтез тонкостенных элементов робототехнических устройств с предписанным законом деформирования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 12. С. 22–32.
3. Братухин А.Г., Боголюбов В.С., Сироткин О.С. Технология производства изделий и интегральных конструкций из

композиционных материалов в машиностроении. М.: Готика, 2003. 516 с.

4. Васильев В.В., Тарнопольский Ю.М. Композиционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

5. Сосуды давления из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов / И.М. Буланов, В.И. Смыслов, М.А. Комков и др. М.: ЦНИИ информации, 1985. С. 155–158.

6. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.

7. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.

8. Кузьмин М.А., Лебедев Д.Л., Попов Б.Г. Прочность, жесткость, устойчивость элементов конструкций. Теория и практикум. Расчеты на прочность элементов многослойных композитных конструкций. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 314 с.

9. Сарбаев Б.С. Расчет силовой оболочки композитного баллона давления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 96 с.

10. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / Пер. с англ. под ред. Н.С. Бахвалова М.: Мир, 1986. 318 с.

11. Белкин А.Е., Гаврюшин С.С. Расчет пластин методом конечных элементов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 232 с.

12. Сарбаев Б.С. Деформирование упругих многослойных композиционных материалов при трехосном напряженном состоянии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2005. С. 63–81.

13. Vasilescu Andrei. Cyclic symmetry in geometrical nonlinear analysis of structure // Ninth International Conference on Domain Decomposition Methods. 1993. С. 99–105.

14. Mechanical APDL. Solving a Cyclic Symmetry Analysis Guide. ANSYS 12 Help system.

Статья поступила в редакцию 24.09.2012