



**Данг Хоанг Минь**  
аспирант



**ГАВРЮШИН**  
**Сергей Сергеевич**  
профессор, зав. кафедрой  
«Компьютерные системы  
автоматизации  
производства»



**СЕМИСАЛОВ**  
**Виталий Иванович**  
доцент кафедры  
«Компьютерные системы  
автоматизации  
производства»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail: gss@rk9.bmstu.ru

## Анализ и синтез процесса намотки композиционного баллона в рамках концепции управления жизненным циклом продукции

**Данг Хоанг Минь, С.С. Гаврюшин, В.И. Семисалов**

*Рассмотрены вопросы автоматизации этапов проектирования, прочностного анализа и изготовления изделия в рамках концепции управления жизненным циклом продукции. Показано как с помощью автоматизированной системы можно осуществить комплексное решение задачи производства композиционного баллона. При решении задачи синтеза изделия, удовлетворяющего заданным требованиям, использован многопараметрический подход, позволяющий разрешить противоречия, которые возникают на стыке отдельных этапов жизненного цикла. Приведен пример автоматизации процесса проектирование — расчет — изготовление баллона давления методом плоскостной намотки.*

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

## Analysis and synthesis of composite vessel winding within the framework of production life cycle control concept

**Dang Hoang Minh, S.S. Gavryushin, V.I. Semisalov**

*The problems of automation of the designing and manufacturing processes are stated within the framework of the uniform information space concept. It is shown as by means of the automated system the end-to-end solution of a composite product manufacture task can be fulfilled. When solving the task of the product synthesis satisfying the given requirements, the multiparametric approach allowing to solve the contradictions, arising at the turn of separate life cycle stages is used. An example of the automation of the designing — calculation — manufacturing process of a pressure vessel by a plane winding method is given.*

**Keywords:** automation, computer-aided design, CAD/CAE/CAM, synthesis, plane winding, composite material, pressure vessel.

**В** настоящее время одним из самых распространенных и совершенных процессов изготовления высокопрочных армированных оболочек является процесс непрерывной намотки. Конструкторами, технологами и производственниками накоплен большой опыт

в области проектирования, расчета и изготовления композиционных изделий [1–6].

Вместе с тем на стыке отдельных этапов жизненного цикла (формулировка исходных требований при проектировании, прочностной анализ, технология изготовления) остаются элементы несогласованности и даже противоречивость требований. Разрешение возникающих конфликтов возможно при использовании единого информационного подхода в соответствии с концепцией управления жизненным циклом продукции.

Практический интерес представляет создание единого программного комплекса, в рамках которого можно будет доступно и гибко управлять параметрами изделия на протяжении жизненного цикла изделия. В работе изложена методика и практический опыт использования единого информационного подхода с целью автоматизации этапов: проектирование — расчет — изготовление баллона давления методом плоскостной намотки.

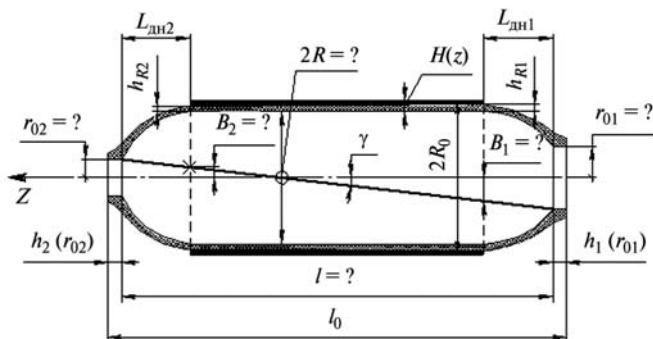


Рис. 1. Эскиз баллона давления. Параметры, подлежащие определению помечены знаком «?»

Рассмотрим задачу изготовления композиционного баллона давления, эскиз которого показан на рис. 1.

Полагаем, что в соответствии с требованиями заказчика, баллон должен отвечать следующим требованиям и ограничениям: допустимая масса не более  $M_0$ ; объем  $V_0$ ; рабочее давление не менее  $p$ . При этом габаритные размеры баллона должны соответствовать следующим параметрам:  $R_0$  — наружный радиус;  $L_0$  — габаритная длина.

В рабочем состоянии полюсные отверстия полностью закрыты, форма днищ баллона в рамках заданных габаритов произвольна. Исходными данными являются  $[\sigma_{\pm 1}]$ ,  $[\sigma_{\pm 2}]$  — допускаемые напряжения при растяжении/сжатии композиционного материала в направлении вдоль/поперек армирующего волокна;  $E_1$ ,  $E_2$  — модули упругости в направлении вдоль/поперек армирующих элементов слоя, соответственно,  $\nu_{12}$  — коэффициент Пуассона;  $\delta$  — ширина ленты;  $\rho$  — плотность композита.

В связи с наличием определенного технологического оборудования для намотки, в качестве технологического способа изготовления баллона давления выбрана схема плоскостной (планарной) намотки. К основным достоинствам данного способа намотки можно отнести технологичность и относительную простоту исполнения [1]. При плоскостной намотке спиральный виток лежит в одной плоскости, составляющей угол  $\gamma$  с осью вращения оболочки  $z$  (см. рис. 1). Для дополнительного усиления цилиндрического участка оболочки в окружном (поперечном) направлении на цилиндрическую оправку наматываются окружные слои под углом  $\pi/2$  [3].

Вопросы изготовления баллона методом планарной намотки подробно рассмотрены в работах [1–5]. Наиболее близкое по постановке решение рассматриваемой задачи приведено в [1, 2]. Авторами предлагаемой статьи рассмотрена задача синтеза баллона методом планарной намотки при следующих допущениях:  $r_{01} = r_{02} = r_0$  и, соответственно,  $B_1 = B_2 = B$ . По существу, авторы сосредоточили свое внимание на проектировании только одного днища с позиций прочности, не затрагивая вопросов обеспечения заданных заказчиком габаритов и объема баллона. При этом, разработанная авторами, методика прямого проектирования предполагала следующую последовательность действий.

Исходя из имеющегося опыта, субъективно назначаются размеры  $r_0$  и  $B$ . После чего выполняется расчет по известным зависимостям, в результате которого определяется профиль днища, закон армирования, объем и масса баллона. При этом в случае, если полученные ре-

зультаты не удовлетворяют исходным требованиям, расчет рекомендуется повторить при других исходных данных, что требует повторного согласования измененных исходных данных с заказчиком.

Примененная итерационная расчетная процедура не позволила рассмотреть процесс комплексно для баллона в целом, поскольку не рассматривался случай для полюсных отверстий, в общем случае различного радиуса. Кроме того, в расчетах использовалась нитяная, а не ленточная модель армирующего материала, что обусловлено дополнительным допущением об отсутствии напряжений поперек армирующих элементов слоя.

Поскольку в доступной литературе не удалось найти решения рассматриваемой задачи в принятой постановке, для решения задачи синтеза композиционного баллона методом плоскостной намотки авторами предлагается новая методика проектирования, основанная на использовании многопараметрического подхода.

Исходные требования не накладывают ограничений на форму куполов, высоту днищ ( $L_{дн\ i}$ ,  $i = 1, 2$ ), радиусы отверстий ( $r_{0i}$ ) и габариты внутреннего профиля баллона ( $l$  и  $R$ ), что позволяет трактовать эти величины как неизвестные параметры. Рациональные значения неизвестных параметров определяются в процессе синтеза изделия. Необходимо отметить, что высота днища  $L_{дн\ i}$  непосредственно зависит от параметра  $B_i$  — расстояния от оси вращения до пересечения между плоскостью намотки с экватором. Поэтому, задача синтеза, представленная в виде схемы на рис. 2, сводится к нахождению формы профиля купола и набора значений параметров управления.

Суть многопараметрического подхода отражена на рис. 2. Параметры, характеризующие изделие на всех этапах жизненного цикла подразделены на три группы:

- 1) параметры управления, значение которых нужно найти при решении задачи синтеза (технологические и конструктивные параметры);
- 2) задаваемые заказчиком целевые параметры, характеризующие требования к проек-



Рис. 2. Схема задачи синтеза

тируемому изделию (габариты, объем, масса, рабочее давление и т. д.);

- 3) неизменяемые фиксированные параметры (физико-механические свойства материалов, характеристики используемого оборудования и т. д.).

На основе алгоритма проектирования в рамках используемой технологии [1, 2, 4] сформулированы функции невязки, которые характеризуют уровень близости изделия к требованиям заказчика. Функции  $f_i(r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R)$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) отвечают за высоту днищ, за длину баллона, за соответствие габариту радиуса цилиндрической части, за заданный объем и заданную  $f_6(r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R)$  невязкой массу соответственно.

Таким образом, задача сводится к решению системы операторных уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} f_1(r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R) = 0; \\ f_2(r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R) = 0; \\ f_3(r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R) = 0; \\ f_4(r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R) = 0; \\ f_5(r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R) = 0; \\ f_6(r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Алгоритм численного решения системы (1) основан на использовании метода продолжения

решения по параметру [6, 7]. При анализе используются отдельные положения, изложенные в [8–11].

Пусть априори известно некоторое параметрическое приближение проектируемой конструкции:

$$r_{01} \in [A, B]; r_{02} \in [A, r_{01}]; B_i \in \left[ \frac{r_{0i}}{2}, \frac{7r_{0i}}{8} \right];$$

$$l \in [0,8L_0, 0,98L_0]; R \in [0,86R_0, 0,95R_0].$$

Итерационный процесс нахождения рациональных значений параметров начинается с проведения операции нормирования (обезразмеривания) величин разной размерности, что позволяет привести функции невязки к одному уровню точности. Затем осуществляется аддитивная операция по невязкам соотношений (1), позволяющая вычислить обобщенную невязку, которая используется в качестве критерия качества конструкции:

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^6 |f_i(\bar{x})|, \quad (2)$$

где  $\bar{x} = \{r_{01}, r_{02}, B_1, B_2, l, R\}$ .

Таким образом, решение системы (1) приводится к задаче поиска минимума функции  $F(\bar{x})$ . Для решения используется метод Нелдера – Мида [12], суть которого заключается в сравнении значений функции  $F$  в семи вершинах симплекса и последовательном перемещении и деформировании в направлении точки экстремума с помощью итерационной процедуры. Если в результате работы программы минимальное значение функции удовлетворяет критерию сходимости

$$F_{\min} \leq \varepsilon, \quad (3)$$

решение считается найденным.

Предложенный алгоритм реализован в виде прикладной программы для ЭВМ PVRK9. Программа создана на языке MAPLE [10].

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

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

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

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

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

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

$$k = 1; \rho_{\text{км}} = 2 \text{ 200 кг / м}^3.$$

Результаты работы программы представлены ниже. Алгоритм работы программы следующий: для  $k$ -й итерации процесса рассматривается невырожденный симплекс  $\Delta_k$ , состоящий из седьмой вершины, каждая из которых является точкой в  $R^7$ . Каждая итерация начинается с упорядочения вершин  $\bar{x}_1^{(k)}, \dots, \bar{x}_7^{(k)}$  таким образом, что  $F_1^{(k)} \leq F_2^{(k)} \leq \dots \leq F_7^{(k)}$ , где  $F_i^{(k)}$  — значение целевой функции  $F(\bar{x}_i^{(k)})$  в точке  $\bar{x}_i^{(k)}$ . На  $k$ -й итерации строится новый симплекс для  $(k+1)$ -й итерации, такой, что  $\Delta_{k+1} \neq \Delta_k$ . При поиске минимума функции  $F$  принимаем  $\bar{x}_1^{(k)}$  за лучшую вершину, а  $\bar{x}_7^{(k)}$  — за худшую вершину. Аналогично, значение  $F(\bar{x}_7^{(k)})$  будем считать наихудшим значением функции. Далее осуществляется итерационный процесс поиска точки минимума [12], интерпретация которого показана на рис. 3.

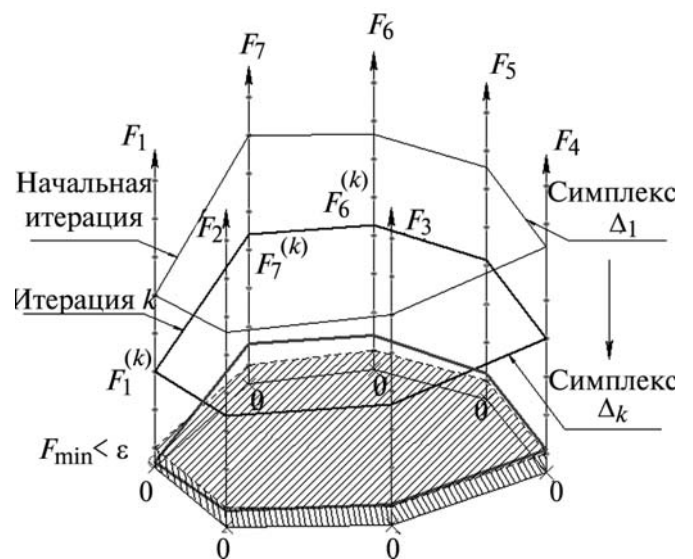


Рис. 3. Интерпретация результата синтеза решения системы (1)

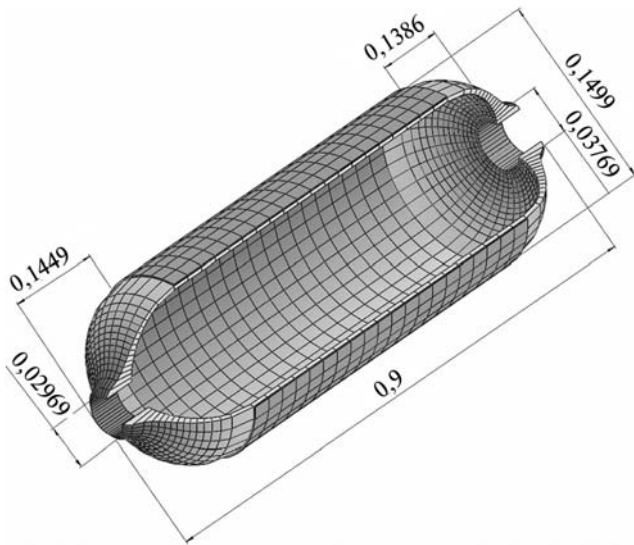


Рис. 4. Модель проектируемого баллона, изготавливаемого из композиционного материала методом плоскостной намотки

В конкретном случае было получено минимальное значение целевой функции  $F$  при значении параметров:  $r_{01}=0,03769$ ,  $r_{02}=0,02969$ ,  $B_1=0,0289$ ,  $B_2=0,0209$ ,  $l=0,7309$ ,  $R=0,133$ . В результате решения задачи синтеза получены следующие данные для дальнейших этапов проектирования (рис. 4):

- проверка свойств баллона:
- высота первого днища  $0,1386047$  м;
- высота второго днища  $0,14486623$  м;
- $h_{R1}=0,0072714$  м;  $h_{R2}=0,0072707$  м;
- длина цилиндрической части  $0,545446$  м;
- объем полученного баллона  $0,039$  м<sup>3</sup>;
- масса полученного баллона  $19,891$  кг.

### Выводы

Использование многопараметрического подхода в рамках концепций единого информационного пространства и управления жиз-

ненным циклом продукции позволяет осуществить комплексное решение задачи производства композиционного баллона.

Разработанную программу можно использовать для решения задачи синтеза при намотке баллона методом плоскостной намотки на базе ленточной модели армирующего материала.

### Литература

1. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
2. Буланов И.М., Смыслов В.И., Комков М.А., Кузнецов В.М. Сосуды давления из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов. М.: ЦНИИ информации, 1985. 308 с.
3. Сарбаев Б.С. Расчет силовой оболочки композитного баллона давления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 96 с.
4. Справочник по композиционным материалам. В 2 кн. Кн. 2 / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; под ред. Б.Э. Геллера. М.: Машиностроение, 1988. 580 с.
5. 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.
6. V. Vasiliev, V. Eugene. V. Morozov. Advanced mechanics of composite materials. Elsevier science ltd, 2001. 491 с.
7. Гаврюшин С.С. Анализ и синтез тонкостенных элементов робототехнических устройств с предписанным законом деформирования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 12. С. 22—32.
8. Белкин А.Е., Гаврюшин С.С. Расчет пластин методом конечных элементов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 232 с.
9. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / Научные редакторы А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. М.: Готика, 2003. 516 с.
10. Maple Introductory / M.V. Monagan, K.O. Geddes, K.M. Heal et al. Advanced Programming Guide. Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc, 2010. 398—452 с.
11. George Z. Voyiadjis, Peter I. Kattan. Mechanics of Composite Materials with MATLAB. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. P. 336.
12. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров. М.: Высш. шк., 1994. 544 с.

Статья поступила в редакцию 26.04.2012