

В. Н. Зимин, Г. Н. Кувыркин, Д. Р. Рахимов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАЛЛОНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

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

Аннотация. Статья содержит результаты проектирования металлокомпозитного баллона высокого давления сферической формы. Предложена методика проведения поверочного расчета с использованием эндохронной теории пластичности для учета нелинейных свойств как материала силовой оболочки, так и материала лайнера. По результатам поверочного расчета предложены рекомендации по улучшению конструкции и оценено влияние нелинейного поведения силовой оболочки из углепластика на общее напряженно-деформированное состояние баллона давления.

Ключевые слова: Металлокомпозитный баллон высокого давления, эндохронная теория пластичности, нелинейное деформирование, композитные материалы, проектировочный расчет, прочностной расчет, напряженно-деформированное состояние.

DOI: 10.37972/chgpu.2022.54.4.002

УДК: 621.642

Введение

В настоящее время в мире широко применяют современные композитные баллоны давления с металлическим лайнером. Они обладают рядом преимуществ: высокая удельная прочность, превышающая удельную прочность стали и титановых сплавов, безосколочное разрушение и взрывобезопасность при экстремальных воздействиях, стойкость к коррозии и массовое совершенство. В связи с этим создание таких баллонов давления является актуальной прикладной задачей [1].

© Зимин В. Н., Кувыркин Г. Н., Рахимов Д. Р. 2022

Зимин Владимир Николаевич

e-mail: zimmin@bmstu.ru, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Космические аппараты и ракеты носители", Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия.

Кувыркин Георгий Николаевич

e-mail: fn2@bmstu.ru, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Прикладная математика", Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия.

Рахимов Даниэль Рустамович

e-mail: danrus1996@gmail.com, аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия.

Поступила 11.11.2022

Экспериментальные исследования металлокомпозитных баллонов высокого давления (МКБВД) свидетельствуют о нелинейном деформировании конструкции [2]. Для обеспечения надежности и безопасности в эксплуатации таких баллонов давления на этапе проектирования необходимо рассматривать нелинейное поведение как лайнера, так и композитного материала силовой оболочки. Учет пластической деформации также необходим для некоторых технологических операций, таких как предварительная опрессовка давлением [3]. В статье для этих целей предлагаем использовать эндохронную теорию пластичности, позволяющую учитывать нелинейные свойства изотропных и ортотропных материалов.

По результатам проведенного исследования был спроектирован высокоэффективный МКБВД сферической формы объемом $2,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ с эксплуатационным давлением $p_e = 34 \text{ МПа}$ и коэффициентом запаса $n = 2$.

Особенности конструкции

Металлокомпозитный баллон высокого давления (МКБВД) состоит из сферического лайнера, выполненного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, обмотанного слоем композитных лент из углепластика [4]. Лейнер баллона с одной стороны имеет горловину с резьбой, а с противоположной стороны — технологический фланец.

Проведение проектировочного расчета

При проведении проектировочного расчета приняты следующие предпосылки [5,6]:

- Методика проектирования основана на безмоментной теории тонкостенных оболочек вращения, нитяной модели композитного материала, а также условия равнопрочности;
- При изготовлении МКБВД реализуется зонная непрерывная геодезическая намотка двойными спиральными слоями. Для разграничения в обозначении "двойных спиральных слоев" и "всех слоев зон" будем использовать i и j индексы соответственно. Здесь под термином "зона" подразумевается элемент оболочки баллона давления, расположенный в диапазоне $r_{0i-1} \leq r \leq r_{0i}$;
- Металлический лайнер считаем несжимаемым изотропным материалом и рассматриваем его как первый слой композитного пакета.

Основные расчетные зависимости

Введем следующие безразмерные величины

$$\bar{r} = \frac{r}{R}, \quad \bar{r}_{0i} = \frac{r_{0i}}{R}, \quad \bar{b} = \frac{b}{R}, \quad (1)$$

где r — текущий радиус, \bar{r}_{0i} — радиус полюсного отверстия i -го слоя, R — радиус баллона на экваторе, $b = \sqrt{1,5} \cdot r_{01}$ — радиус точки перегиба.

Углы армирования i -го слоя в произвольном сечении φ_i и на экваторе φ_{Ri} определяются из условия геодезической намотки

$$\varphi_i = \arcsin \frac{\bar{r}_{0i}}{\bar{r}}, \quad \varphi_{Ri} = \arcsin \bar{r}_{0i} \quad (2)$$

Толщину силовой оболочки i -го слоя в произвольном сечении h_i и на экваторе h_{Ri} определяют из соотношений

$$h_i = h_{Ri} \frac{\sqrt{1 - \bar{r}_{0i}^2}}{\sqrt{\bar{r}^2 - \bar{r}_{0i}^2}}, \quad h_{Ri} = \frac{pR/2 - \sigma_m h_m}{F_{1+} \sum_{i=1}^k (1 - \bar{r}_{0i}^2)}, \quad (3)$$

где $p = n \cdot p_e$ — расчетное давление, σ_m — предел текучести материала лейнера, h_m — толщина лейнера, F_{1+} — предел прочности материала силовой оболочки, k — число слоев.

Форму меридиана баллона $y(r)$ определяют из решения дифференциального уравнения (4) для участка $b < r \leq R$ и (5) для участка $r_{01} \leq r \leq b$. На стыке при $r = b$ профиль меридиана $y(r)$ и первая производная $y'(r)$ непрерывны.

$$y' = \frac{dy}{dr} = \frac{p\bar{r}^3 R}{\sqrt{\left(2\sigma_m h_m \bar{r}^2 + 2F_{1+} \sum_{i=1}^k h_{Ri} \sqrt{1 - \bar{r}_{0i}^2} \cdot \sqrt{\bar{r}^2 - \bar{r}_{0i}^2}\right)^2 - \bar{r}^6 p^2 R^2}} \quad (4)$$

$$y' = \frac{dy}{dr} = \frac{\bar{r} (\bar{r}^2 - \bar{r}_{01}^2)}{\sqrt{\left(\frac{F_{1+} \sum_{i=1}^k h_{Ri} \sqrt{1 - \bar{r}_{0i}^2} \cdot \sqrt{\bar{r}^2 - \bar{r}_{0i}^2} \cdot (\bar{b}^2 - \bar{r}_{01}^2)}{\frac{p\bar{b}^2 R}{2} - \sigma_m h_m \bar{b} \sin \theta_b}\right)^2 - \bar{r}^2 (\bar{r}^2 - \bar{r}_{01}^2)^2}}, \quad (5)$$

$$\sin \theta_b = \frac{pR\bar{b}^3}{2\sigma_m h_m \bar{b}^2 + 2F_{1+} \sum_{i=1}^{k_b} h_{Ri} \sqrt{1 - \bar{r}_{0i}^2} \cdot \sqrt{\bar{b}^2 - \bar{r}_{0i}^2}},$$

где θ_b — угол наклона профиля меридиана при $r = b$, k_b — число слоев при $r = b$.

Вторую производную меридиана баллона $y''(r)$, необходимую для нахождения внутренних силовых факторов, определяют из уравнения (6) для участка $b < r \leq R$ и уравнения (7) для участка $r_{01} \leq r \leq b$

$$y'' = \frac{d^2 y}{dr^2} = \frac{Ry'(1 + y'^2)}{\bar{r}} \left(2 - \frac{\sigma_m h_m + F_{1+} \sum_{i=1}^k h_{Ri} \frac{\sqrt{1 - \bar{r}_{0i}^2}}{\sqrt{\bar{r}^2 - \bar{r}_{0i}^2}} \cdot \bar{r}_{0i}^2}{\sigma_m h_m + F_{1+} \sum_{i=1}^k h_{Ri} \sqrt{1 - \bar{r}_{0i}^2} \cdot \sqrt{\bar{r}^2 - \bar{r}_{0i}^2}} \right) \quad (6)$$

$$y'' = \frac{d^2 y}{dr^2} = \frac{Ry'(1 + y'^2)}{\bar{r}} \left(\frac{2\bar{r}^2}{\bar{r}^2 - \bar{r}_{01}^2} - \frac{\sum_{i=1}^k h_{Ri} \frac{\sqrt{1 - \bar{r}_{0i}^2}}{\sqrt{\bar{r}^2 - \bar{r}_{0i}^2}} \cdot \bar{r}_{0i}^2}{\sum_{i=1}^k h_{Ri} \sqrt{1 - \bar{r}_{0i}^2} \cdot \sqrt{\bar{r}^2 - \bar{r}_{0i}^2}} \right) \quad (7)$$

Толщину силовой оболочки h_i в произвольном сечении i -го слоя с учетом ширины наматываемой ленты t определяют из соотношений [7].

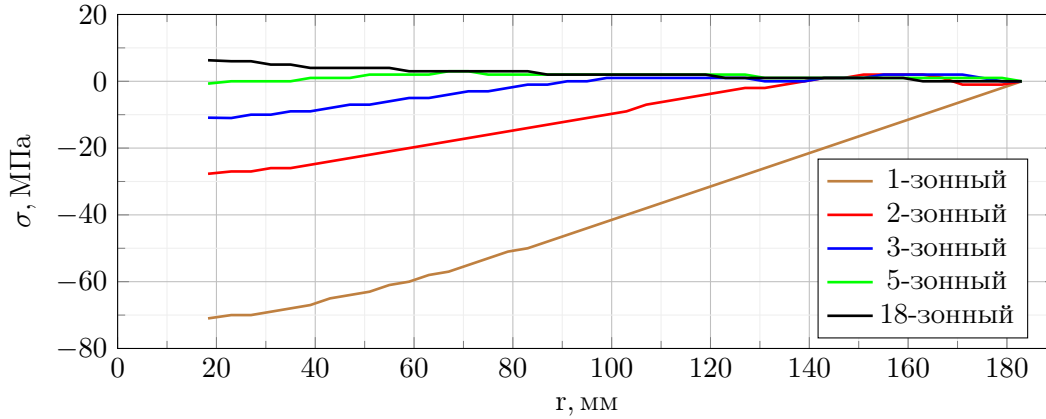


Рис. 1. Зависимость отклонения формы меридиана от окружности для баллонов с различным количеством зон

$$\varphi_t = \begin{cases} \pi/2, & \bar{r} \leq \bar{r}_{0i} + \frac{t}{R\sqrt{1+y'^2}} \\ \arcsin\left(\frac{1}{\bar{r}}\left(\bar{r}_{0i} + \frac{t}{R\sqrt{1+y'^2}}\right)\right), & \bar{r} > \bar{r}_{0i} + \frac{t}{R\sqrt{1+y'^2}} \end{cases} \quad (8)$$

Уточненную толщину силовой будем использовать для проведения поверочного расчета методом конечных элементов.

Анализ проектных параметров баллона

Определим необходимое число слоев и радиусы полюсных отверстий для сферического МКБВД. В качестве исходных данных будем использовать требования, предъявляемые к баллонам давления разгонного блока «Фрегат» [8]: $p = 68$ МПа, $r_{01} = 18,3$ мм, $R = 183$ мм. Толщину лайнера и ширину наматываемой ленты примем равными 0,5 мм и 14 мм соответственно.

Известно, что для управления формой меридиана баллона, необходимо определенным образом располагать слои оболочки. Так для получения баллона строго сферической формы необходимо предположение о бесконечном количестве тонких слоев, а также о существовании непрерывной зависимости между толщиной слоев на экваторе и радиусами полюсных отверстий (9). В данной работе используем приближенную аппроксимацию зависимости из-за ограниченного числа слоев, а также вводим условие равенства толщин слоев на экваторе [1]

$$\bar{h}_R(\bar{r}_{0i}) = \frac{h_R(\bar{r}_{0i}) F_{1+}}{pR} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{1-\bar{r}_{0i}^2}}{\sqrt{1-\bar{r}_{01}^2}}\right) \right) \quad (9)$$

Оценим отклонение формы меридиана от окружности для баллонов с различным количеством зон (рис. 1).

Из данного графика видим, что для создания баллона давления сферической формы необходимо использовать более 5 зон намотки. Расчет на прочность показывает, что такое малое число зон приводит к разрушению волокон силовой оболочки, связанного с неравномерным распределением толщины материала вдоль меридиана. Для обеспечения равенства толщины будем проектировать баллон с 18-ю зонами намотки, радиусы полюсных отверстий вычислены согласно зависимости (9) и представлены в табл. 1.

№ слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r_{0i} , мм	18,3	30,5	43,6	57,8	72,0	86,0	99,5	112,5	124,4
№ слоя	10	11	12	13	14	15	16	17	18
r_{0i} , мм	135,5	145,6	155,0	162,5	169,0	174,6	179,0	181,5	182,8

Таблица 1. Радиусы полюсных отверстий

После определения число зон и радиусов полюсных отверстий по формулам (1)–(8) находим форму профиля меридиана, углы армирования и толщины i -х слоев баллона давления.

Эндохронная теория пластичности

Эндохронная теория является одним из вариантов теории пластичности, в которой, как и в теории течения, устанавливается связь между приращениями деформации и приращениями напряжений, но в отличие от теории течения в ней не используют понятие поверхности нагружения, а также нет деления деформации на упругую и пластическую составляющие. Для учета истории нагружения материала в эндохронной теории пластичности вводят неубывающую скалярную величину — меру внутреннего времени $d\xi$, являющуюся аналогом параметра Удквиста для классических теорий пластичности.

Обобщив результаты работ для изотропного и ортотропного материалов соответственно [9, 10], запишем в матричном виде определяющее соотношение эндохронной теории пластичности для монослоя композитного пакета

$$d\sigma = \mathbf{D} \cdot d\varepsilon - \mathbf{A} \cdot \sigma \frac{d\xi}{1 + \beta\xi} \quad (10)$$

где $\sigma = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$, $\varepsilon = (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \gamma_{12})^T$ — векторы напряжений и деформаций, β — параметр упрочнения, определяемый из экспериментальных данных материала.

Из-за того что нелинейные эффекты в изотропном и ортотропном материале имеют различную физическую природу, вид вспомогательной матрицы \mathbf{A} и зависимости для меры внутреннего времени $d\xi$ отличаются для этих материалов.

Для изотропного материала матрица жесткости \mathbf{D} , вспомогательная матрица \mathbf{A} в уравнение (10) принимают следующий вид:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \frac{a}{3} \begin{bmatrix} \frac{2-\nu}{1-\nu} & -\frac{1-2\nu}{2-\nu} & 0 \\ -\frac{1-2\nu}{1-\nu} & \frac{1-\nu}{2-\nu} & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

где E, ν — характеристики упругости изотропного материала; a — материальный параметр модели для изотропного материала, характеризующий нелинейные свойства материала.

Мера внутреннего времени ξ изотропного материала определена следующей формулой [9]:

$$\begin{aligned} d\xi &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_{11} - d\varepsilon_{22})^2 + (d\varepsilon_{11} - d\varepsilon_{33})^2 + (d\varepsilon_{33} - d\varepsilon_{22})^2 + \frac{3}{2} d\gamma_{12}^2}, \\ d\varepsilon_{33} &= -\frac{\nu}{\nu - 1} (d\varepsilon_{11} + d\varepsilon_{22}) - \frac{a(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{3(1 - \nu)} \cdot \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{1 + \beta\xi} d\xi \end{aligned} \quad (12)$$

Для ортотропного материала матрица жесткости \mathbf{D} , вспомогательная матрица \mathbf{A} в уравнение (10) принимают следующий вид:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \text{diag}(a_1, a_2, a_3) \quad (13)$$

где $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{21}$ — характеристики упругости ортотропного материала; a_1, a_2, a_3 — материальные параметры модели для ортотропного материала, характеризующие нелинейные свойства материалов.

Выражение для меры внутреннего времени ξ ортотропного материала представим в следующем виде [10]:

$$d\xi = \sqrt{d\varepsilon^T \cdot \mathbf{R} \cdot d\varepsilon} \quad (14)$$

где \mathbf{R} — положительно определенная матрица материальных параметров

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Используя соотношение (10) и допущение о совместном деформировании слоев, получим уравнение для композитного материала, состоящего из n элементарных слоев, каждый из которых характеризуется углом армирования φ_j и относительной толщиной δ_j

$$d\varepsilon_c = \mathbf{S}_c \cdot \left(d\sigma_c + \sum_{j=1}^n \mathbf{T}_{1j} \cdot \mathbf{A}_j \cdot \mathbf{T}_{1j}^{-1} \cdot \sigma_j \delta_j \frac{d\xi_j}{1 + \beta_j \xi_j} \right) \quad (16)$$

где $\varepsilon_c = (\varepsilon_{11c}, \varepsilon_{22c}, \gamma_{12c})^T$, $\sigma_c = (\sigma_{11c}, \sigma_{22c}, \sigma_{12c})^T$ — векторы деформации и напряжений композитного пакета, $\mathbf{S}_c = \left(\sum_{j=1}^n \mathbf{T}_{1j} \cdot \mathbf{D}_j \cdot \mathbf{T}_{1j}^T \delta_j \right)^{-1}$ — матрица податливости пакета, матрицу поворота \mathbf{T}_{1j} определяют как

$$\mathbf{T}_{1j} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi_j & \sin^2 \varphi_j & 2 \sin \varphi_j \cos \varphi_j \\ \sin^2 \varphi_j & \cos^2 \varphi_j & -2 \sin \varphi_j \cos \varphi_j \\ -\sin \varphi_j \cos \varphi_j & \sin \varphi_j \cos \varphi_j & \cos^2 \varphi_j - \sin^2 \varphi_j \end{bmatrix} \quad (17)$$

В задаче о нагружении баллона внутренним давлением компоненты вектора напряжений пакета σ_c определяют как

$$\sigma_{11c} = \frac{T_1}{\sum_{j=1}^n h_j}, \quad \sigma_{22c} = \frac{T_2}{\sum_{j=1}^n h_j}, \quad \sigma_{12c} = 0 \quad (18)$$

где меридиональные и окружные погонные усилия T_1 и T_2 равны

$$T_1 = \begin{cases} \frac{pR\bar{r}\sqrt{1+y'^2}}{2} \frac{y'}{y'}, & \bar{r} \geq \bar{b} \\ \sigma_m h_m - \frac{p\bar{b}^2 R - 2\bar{b}\sigma_m h_m \sin \theta_b \bar{r}^2 - \bar{r}_{01}^2}{\bar{b}^2 - \bar{r}_{01}^2} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{2\bar{r}} \frac{y'}{y'}, & \bar{r} < \bar{b} \end{cases} \quad (19)$$

$$T_2 = \begin{cases} -\frac{pR\bar{r}\sqrt{1+y'^2}}{2} \frac{y'}{y'} \left(2 - \frac{\bar{r}Ry''}{y'(1+y'^2)} \right), & \bar{r} \geq \bar{b} \\ \sigma_m h_m - \frac{p\bar{b}^2 R - 2\bar{b}\sigma_m h_m \sin \theta_b \bar{r}\sqrt{1+y'^2}}{\bar{b}^2 - \bar{r}_{01}^2} \frac{y'}{y'} - \frac{\bar{r}Ry''T_1}{y'(1+y'^2)}, & \bar{r} < \bar{b} \end{cases} \quad (20)$$

Алгоритм численного интегрирования

Приведенную систему уравнений (10)–(20) решаем с помощью метода последовательных приближений. При интегрировании шаг по напряжениям будем задавать, то есть

$$\Delta\sigma_{c(p)} = \Delta\sigma_{c(p=0)}$$

где p — номер шага нагружения.

Запишем соотношение (16) в разностной постановке

$$\Delta\epsilon_{c(p)} = \mathbf{S}_c \cdot \left(\Delta\sigma_{c(p)} + \sum_{j=1}^n \mathbf{T}_{1j} \cdot \mathbf{A}_j \cdot \mathbf{T}_{1j}^{-1} \cdot \sigma_{j,(p-1)} \delta_j \frac{\Delta\xi_{j,(p)}}{1 + \beta_j \xi_{j,(p-1)}} \right)$$

Здесь

$$\Delta\xi_{j,(p)} = f(\mathbf{T}_{1j}^T \cdot \Delta\epsilon_{c(p)})$$

где функцию $f(\mathbf{T}_{1j}^T \cdot \Delta\epsilon_{c(p)})$ определяют из уравнений (12) или (14).

На p -м шаге итерационная процедура имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_{c(p)}^{(q+1)} = \mathbf{S}_c \cdot \left(\Delta\sigma_{c(p)} + \sum_{j=1}^n \mathbf{T}_{1j} \cdot \mathbf{A}_j \cdot \mathbf{T}_{1j}^{-1} \cdot \sigma_{j,(p-1)} \delta_j \frac{\Delta\xi_{j,(p)}^{(q)}}{1 + \beta_j \xi_{j,(p-1)}} \right) \\ \Delta\xi_{j,(p)}^{(q)} = f(\mathbf{T}_{1j}^T \cdot \Delta\epsilon_{c(p)}^{(q)}) \end{cases}$$

где q — номер итерации. При $q = 1$ принимаем $\Delta\epsilon_{c(p)}^{(q=1)} = \Delta\epsilon_{c(p-1)}$

За критерий останова итерационной процедуры принимаем следующее условие:

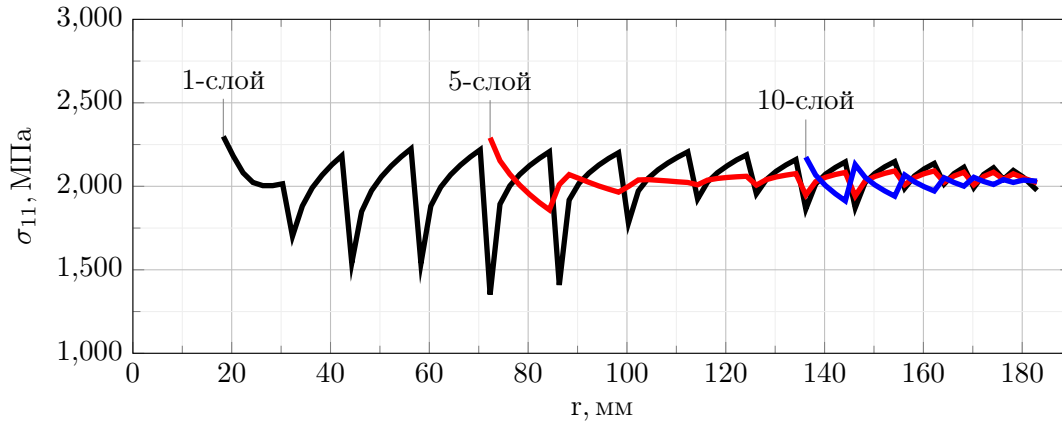
$$\Delta\epsilon_{c(p)}^{(q+1)} - \Delta\epsilon_{c(p)}^{(q)} \leq 0,001 \cdot \Delta\epsilon_{c(p)}^{(q+1)}$$

При $p = 1$ используем соотношения для упругого тела

$$\Delta\epsilon_{c(p=1)} = \mathbf{S}_c \cdot \Delta\sigma_{c(p=1)}$$

Определив приращение вектора деформации пакета $\Delta\epsilon_{c(p)}$ и меры внутреннего времени $\Delta\xi_{j,(p)}$, находим приращения напряжений $\Delta\sigma_{j,(p)}$ и деформации $\Delta\epsilon_{j,(p)}$ в слоях в СК монослоя

$$\Delta\epsilon_{j,(p)} = \mathbf{T}_{1j}^T \cdot \Delta\epsilon_{c(p)}, \quad \Delta\sigma_{j,(p)} = \mathbf{D}_j \cdot \Delta\epsilon_{j,(p)} - \mathbf{A}_j \cdot \sigma_{j,(p-1)} \frac{\Delta\xi_{j,(p)}}{1 + \beta_j \xi_{j,(p-1)}}$$


 Рис. 2. Напряжения вдоль волокон σ_{11} в силовой оболочке для 1, 5 и 10-го слоя

Текущие значения величин вычисляют как

$$\begin{aligned} \sigma_{c(p)} &= \sigma_{c(p-1)} + \Delta\sigma_{c(p)}, & \varepsilon_{c(p)} &= \varepsilon_{c(p-1)} + \Delta\varepsilon_{c(p)}, \\ \sigma_{j,(p)} &= \sigma_{j,(p-1)} + \Delta\sigma_{j,(p)}, & \varepsilon_{j,(p)} &= \varepsilon_{j,(p-1)} + \Delta\varepsilon_{j,(p)}, \\ \xi_{j,(p)} &= \xi_{j,(p-1)} + \Delta\xi_{j,(p)}, & (j &= 1 \dots n) \end{aligned}$$

Для валидации предложенной методики был проведен расчет цилиндрической части МКБВД из работы [2]. Результаты удовлетворительным образом согласуются с экспериментальными данными.

Проведение поверочного расчета

Для проведения поверочного расчета были использованы следующие характеристики материала лейнера: $E = 200$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 250$ МПа, $\sigma_V = 650$ МПа, $\varepsilon_V = 35\%$, $\rho = 7800$ кг/м³, $a = 301,5$, $\beta = 3,45$. Для характеристик материала силовой оболочки использовались следующие значения [11, 12]: $E_1 = 136,5$ ГПа, $E_2 = 11,1$ ГПа, $G_{12} = 7,5$ ГПа, $\nu_{12} = 0,31$, $F_{1+} = 2300$ МПа, $F_{1-} = 1200$ МПа, $F_{2+} = 58$ МПа, $F_{2-} = 190$ МПа, $F_{12} = 88$ МПа, $\rho = 1550$ кг/м³, $a_1 = a_2 = 0$, $a_3 = 38$, $\beta = 0,1$, $R_{11} = R_{22} = R_{12} = 0$, $R_{33} = 3,6$. Приведенные материальные параметры модели были найдены из условия минимального отклонения расчетных диаграмм деформирования, полученных по эндохронной теории, от экспериментальных кривых деформирования. В качестве экспериментальных кривых для материалов лейнера и силовой оболочки использовались диаграммы деформирования при растяжении и при чистом сдвиге соответственно [11, 12].

На рис. 2, 3 представлены результаты расчета внутренних силовых факторов в лейнере и в силовой оболочке баллона давления для некоторых слоев. Из графиков видно, что напряжения σ_{11} и σ_{12} не превосходят пределов прочности при растяжении вдоль волокон и при сдвиге соответственно. Напряжение σ_{22} выше предела прочности при растяжении поперек волокон, следовательно, матрица силовой оболочки полностью разрушается, после чего всю нагрузку воспринимают волокна. Аналогичное поведение наблюдается и в реальной конструкции.

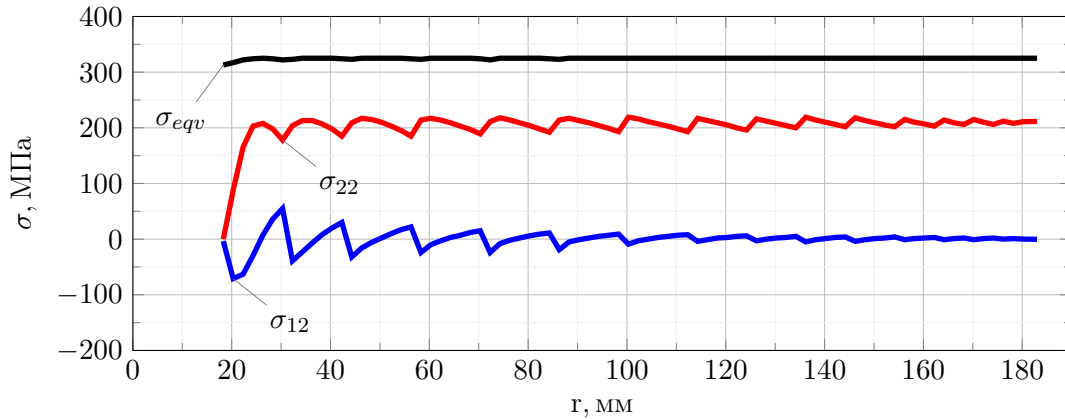


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в лейнере σ_{eqv} , напряжения поперек укладки волокон σ_{22} и касательные напряжения σ_{12} в силовой оболочке для 1-го слоя

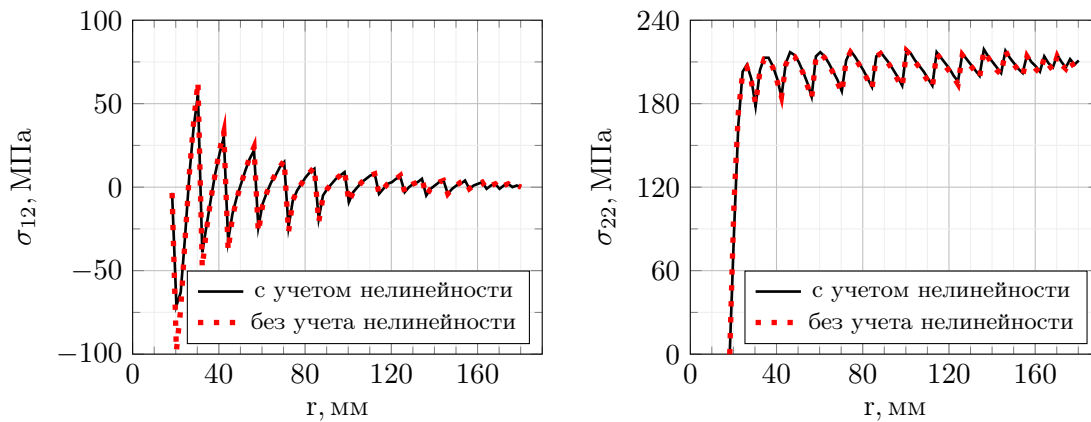


Рис. 4. Влияние нелинейности ортотропного материала для 1-го слоя

Для оценки влияния нелинейности материала силовой оболочки на общее напряженно-деформированное состояние (НДС) МКБВД был проведен аналитический расчет с учетом и без учета нелинейных свойств ортотропного материала. Анализ результатов показал, что нелинейные свойства оказывают наибольшее влияние на напряжения в силовой оболочке 1-го слоя (Рис. 4). Различие между решениями для касательных напряжений σ_{12} составляет 25 % в области фланцевого соединения, в остальных областях не превышает 13 %. Различие для напряжений поперек волокон σ_{22} составляет 15 % и 3 % соответственно. Поскольку нелинейность практически не оказывает влияния на напряжения σ_{22} , которые в отличие от напряжений σ_{12} значительно превосходят предел прочности, допустимо проводить расчет без учета нелинейных свойств силовой оболочки из углепластика.

Для учета моментных напряжений, возникающих в силовой оболочке, был проведен расчет методом конечных элементов в программе «MSC PATRAN/NASTRAN».

По результатам расчета было принято решение увеличить на 0,3 мм 1-й, 3-й и 6-й двойной спиральный слой, а также добавить адгезионную прокладку из резины в районе фланцевых соединений. Итоговая масса баллона составила 5,78 кг.

Заключение

В данной работе был проведен проектировочный и поверочный расчет металлокомпозитного баллона высокого давления. В проектировочном расчете было установлено необходимое число зон и значение радиусов полюсных отверстий для получения баллона сферической формы. В поверочном расчете было рассчитано общее НДС баллона, а также показано незначительное влияние нелинейных свойств силовой оболочки из углепластика. По результатам данного расчета было предложено увеличить некоторые двойные спиральные слои силовой оболочки.

В результате проведенного исследования был спроектирован высокоэффективный сферический МКБВД с 18-ю зонной силовой оболочкой из углепластика, намотанной на лейнер из стали 12X18H10T. Суммарная масса баллона составила 5,78 кг при полезном объеме в $2,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильев В. В., Мороз Н. Г. Композитные баллоны давления. Проектирование, расчет, изготовление и испытания : справ. пособие. Москва: Машиностроение, 2015. 373 с.
- [2] Vasiliev V. V. Composite pressure vessels: Design, analysis, and manufacturing. Blacksburg: Bull Ridge Publishing, 2009. 704 p.
- [3] Воробей В. В., Маркин В. Б. Основы проектирования и технология сверхлегких композитных баллонов высокого давления : монография. Барнаул: Изд-во АлГТУ, 2014. 166 с.
- [4] Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин [и др.]. Москва: Машиностроение, 1990. 512 с.
- [5] Сарбаев Б. С. Расчет силовой оболочки композитного баллона давления : учеб. пособие. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 96 с.
- [6] Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. Москва: Машиностроение, 1977. 144 с.
- [7] Васильев В. В., Криканов А. А. Равнонапряженные безмоментные оболочки вращения, образованные методом непрерывной намотки армированной лентой // Известия РАН. Механика твердого тела. 2002. № 4. С. 119–133.
- [8] Создание высокоэффективного металлокомпозитного баллона высокого давления / А. В. Асюшкин, В. П. Викуленков, К. Н. Лебедев [и др.] // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2015. № 1(27). С. 19–27.
- [9] Valanis K. C. A theory of viscoplasticity without a yield surface // Archives of Mechanics. 1971. Vol. 23, no. 4. P. 517–551.
- [10] Зиновьев П. А., Сарбаев Б. С. Эндохронная теория неупругого деформирования волокнистых композитов // Механика композитных материалов. 1985. № 3. С. 423–430.
- [11] Расчетно-экспериментальное исследование нелинейных свойств углепластиков / А. М. Думанский, Л. П. Таирова, И. Горлач [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 5. С. 91–97.
- [12] Раскутин А. Е., Соколов И. И. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. № 4.

V. N. Zimin, G. N. Kuvyrkin, D. R. Rakhimov

DESIGN OF A HIGHLY EFFECTIVE METAL COMPOSITE HIGH-PRESSURE VESSEL OF SPHERICAL SHAPE

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The article contains the results of design a spherical metal composite high-pressure vessel. A method of performing a verification calculation using the endochronic theory of plasticity is proposed to take into account the nonlinear properties of both the composite shell material and the liner material. Based on the results of the verification calculation, recommendations for improving the design are proposed and the influence of the nonlinear behavior of the carbon fiber shell on the stress-strain state of the pressure vessel is estimated.

Keywords: High-pressure metal composite vessel, endochronic theory of plasticity, nonlinear deformation, composite materials, design calculation, strength calculation, stress-strain state

REFERENCES

- [1] Vasiliev V. V., Moroz N. G. Composite pressure vessels. Design, analysis, manufacturing and testing : reference manual. Moscow: Mashinostroenie, 2015. 373 p. (in Russian).
- [2] Vasiliev V. V. Composite pressure vessels: Design, analysis, and manufacturing. Blacksburg: Bull Ridge Publishing, 2009. 704 p.
- [3] Vorobej V. V., Markin V. B. Basics of design and technology of ultra light composite high-pressure vessels : monograph. Barnaul: AltGTU, 2014. 166 p. (in Russian).
- [4] Composite materials : guide / V. V. Vasiliev, V. D. Protasov, V. V. Bolotin et al. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 512 p. (in Russian).
- [5] Sarbayev B. S. Calculation of the power shell of a composite pressure vessel : training manual. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2001. 96 p. (in Russian).
- [6] Obrazcov I. F., Vasiliev V. V., Bunakov V. A. Optimal reinforcement of rotation shells made of composite materials. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 144 p. (in Russian).
- [7] Vasiliev V. V., Krikanov A. A. Equistressed Membrane Shells of Revolution Formed by Continuous Winding of a Reinforced Tape // Izvestiya RAN, Mekhanika Tverdogo Tela. 2002. no. 4. P. 119–133. (in Russian).
- [8] Development of higheffective metal-base composite high-pressure vessel / A. V. Asyushkin, V. P. Vikulenkov, K. N. Lebedev et al. // Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina. 2015. no. 1(27). P. 19–27. (in Russian).
- [9] Valanis K. C. A theory of viscoplasticity without a yield surface // Archives of Mechanics. 1971. Vol. 23, no. 4. P. 517–551.
- [10] Zinov'ev P. A., Sarbayev B. S. Endochronic theory of fiber composite non-elastic deformation // Mechanics of Composite Materials. 1985. no. 3. P. 423–430. (in Russian).
- [11] A design-experiment study of nonlinear properties of coal-plastic / A. M. Dumansky, L. P. Tairova, I. Gorchach et al. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2011. no. 5. P. 91–97. (in Russian).
- [12] Raskutin A. E., Sokolov I. I. Ugleplastiki i stekloplastiki novogo pokoleniya // Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn. 2013. no. 4. (in Russian).

Zimin Vladimir Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Kuvyrkin George Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Rakhimov Daniel Rustamovich, postgraduate student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.