

УДК 629.78

DOI: 10.15372/PMTF202315285

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОСУДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНОГО МЕТОДА, ПОСТРОЕННОГО НА ОСНОВЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ И МЕТОДА СТАИ СЕРЫХ ВОЛКОВ

Ц. Лю, М. Чжун, Ш. Е, Ч. Ли, Ч. Кан, Б. Дэн

Цзянсуский университет науки и технологий, Чжэньцзян, Китай

E-mails: zanlau@126.com, 1944619025@qq.com, 624128901@qq.com,

lcj349@126.com, kaochao_017@163.com, dengbo1025@just.edu.cn

Проводится оптимизация конструктивных параметров композитных сосудов высокого давления (углов намотки волокон, их объемной доли, модуля упругости волокон, отношения внутреннего радиуса сосуда к внешнему) с целью получения равнопрочного сосуда. Используется гибридный метод оптимизации, построенный на основе метода роя частиц и метода стаи серых волков. При численном решении задачи используется трехмерная линейная теория упругости.

Ключевые слова: композитные сосуды высокого давления, волокна, прочность, оптимизация, гибридный метод

Введение. Композитные цилиндрические оболочки широко используются в аэрокосмической и авиационной промышленности при изготовлении сосудов высокого давления [1–3]. При проектировании композитных цилиндрических оболочек необходимо определить оптимальную укладку волокон композитных оболочек, а также зависимость прочности оболочки от ее геометрических параметров [4–6]. Разработка методов, позволяющих выбрать параметры композитной оболочки, обеспечивающие ее лучшие механические свойства при наименьшем весе, является сложной задачей.

В работах [7–9] анализировались различные параметры с целью оптимизации композитных конструкций. В [10] показано, что укладка волокон под различными углами оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние сосудов, находящихся под действием внутреннего давления. В работе [11] предложены различные алгоритмы выбора оптимальных параметров процесса укладки волокон. В [12] приведены результаты экспериментального исследования разрушения композитных оболочек, находящихся под действием растягивающих нагрузок. Установлено, что в зависимости от угла укладки волокон возможны три режима разрушения. В работах [13, 14] приведены результаты экспериментальных исследований поведения композитных цилиндров при радиальном сжатии и предложен модифицированный метод конечных элементов для определения такого поведения. Установлено, что схема намотки волокон оказывает существенное влияние на несущую нагрузку и меньшее влияние на жесткость оболочки. В работе [15]

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда естественных наук провинции Цзянсу (грант № BK20200999) и Фонда поддержки научных исследований молодых ученых Цзянсуского университета науки и технологий (грант № 1022931904), а также в рамках инновационной программы последиplomных исследований провинции Цзянсу (грант № SJCX22.1931).

© Лю Ц., Чжун М., Е Ш., Ли Ч., Кан Ч., Дэн Б., 2024

экспериментально определен оптимальный угол намотки композитных полимерных трубок, армированных углеродным волокном и подвергаемых ветровым нагрузкам. В [16] с использованием концепции трехмерной повторяющейся единичной ячейки исследовано влияние ширины пучка волокон на механические свойства цилиндрических конструкций. В работе [17] с использованием нелинейных моделей изучены механические свойства композитов с различной объемной долей волокон. Установлено, что при произвольном постоянном напряжении и объемной доле волокон, равной 30, 50 и 70 %, модуль сдвига в плоскости G_{12} уменьшается на 47, 41 и 31 % соответственно. В [18] с использованием разностного метода и гибридного метода оптимизации исследовано влияние угла намотки и объемной доли волокон на устойчивость и несущую способность композитного цилиндра и определен диапазон значений оптимальных параметров. В [19] численно определены оптимальные значения параметров композитного цилиндра, армированного волокнами, при сложном нагружении. Вычислялись значения оптимальных параметров в композитной конструкции, в которой объемная доля волокон изменялась в диапазоне 40–60 %, углы намотки — в диапазоне от $\pm 44,5^\circ$ до $\pm 52,5^\circ$. В работе [20] с использованием аналитических и численных методов, а также экспериментальных данных исследовано разрушение многослойных эллипсоидальных тканых композитных куполов из стеклопластика, находящихся под действием внутреннего давления. Установлено, что локализация областей разрушения не зависит от укладки ламината и геометрии сплюснутых куполов. В [21] разработана программа для определения разрушающего давления композитных трубок, находящихся под действием внутреннего давления. Обнаружено, что разрушающее давление первого слоя уменьшается по мере увеличения объемной доли волокон и увеличивается с увеличением угла намотки. В работах [22–24] предложен метод послойного определения напряженного состояния в цилиндре, армированном волокнами. На основе этого подхода определена несущая способность армированных волокнами конструкций при различных видах нагружения.

Помимо указанных выше конструктивных параметров существенное влияние на свойства композитных конструкций оказывают другие факторы. В работе [25] исследовано влияние ускорения Кориолиса и градиента температуры на напряженно-деформированное состояние композитных трубок. В [26] с использованием искусственных нейронных сетей и метода планирования эксперимента разработан метод, позволивший уменьшить время вычислений. Данный метод учитывает различные многомасштабные факторы. В работе [27] решена задача оптимизации толщины слоев многослойных балок с целью уменьшения их веса. В [28] с использованием теории надежности и метода аппроксимации Крикинга решена задача оптимизации композитных балок с учетом неопределенности углов намотки волокон. Установлено, что балки с переменной жесткостью обладают большей несущей способностью. Задача оптимизации формы крышки сосуда высокого давления решалась в работе [29] с использованием метода конечных элементов и метода роя частиц. В работе [30] с помощью генетического алгоритма недоминируемой сортировки определялись оптимальные технологические параметры обработки поверхности композитов с металлической матрицей (Al–SiC).

Ряд исследований посвящен изучению факторов, влияющих на разрушение композитных конструкций и на его тип [31–33]. Поскольку в конструкциях, полученных путем намотки волокон, имеются зоны как высокой, так и низкой прочности, оптимизация несущей способности таких конструкций является сложной задачей [34]. Неравномерное распределение прочности в слоистых композитных конструкциях приводит к их разрушению начиная с менее прочного слоя, при этом несущая способность более высокопрочных слоев используется неэффективно. Следовательно, в композитных конструкциях необходимо обеспечить равномерное распределение прочности.

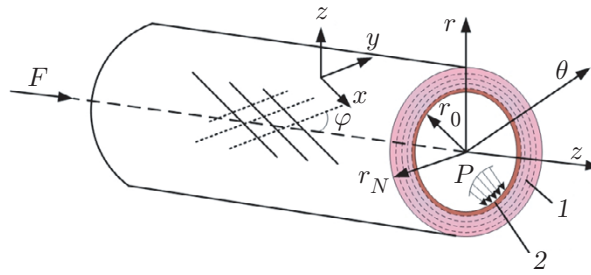


Рис. 1. Многослойный сосуд высокого давления:
1 — композитный материал, 2 — металлический лайнер

Целью данной работы является решение задачи о равномерном распределении относительной прочности в композитной конструкции, полученной путем намотки волокон, и выборе ее параметров, обеспечивающих повышение несущей способности. Для этого одновременно используются метод оптимизации роя частиц (PSO) и метод оптимизации стаи серых волков (GWO).

1. Основные положения теории. Рассматривается полученный путем намотки волокон композитный цилиндр (сосуд) с внутренним радиусом r_0 , внешним радиусом r_N и числом слоев N . Каждый слой имеет свой угол намотки волокна. Сосуд находится под действием равномерного внутреннего давления q_0 и осевой нагрузки F (рис. 1).

1.1. *Основные соотношения теории.* На рис. 1 величины r , θ , z — радиальная, окружная и осевая координаты соответственно. Рассматривается осесимметричная задача, т. е. напряжения, деформации и смещения не зависят от переменной θ . Выражения для компонент вектора смещения записываются в виде

$$u_r = u_r(r), \quad u_\theta = u_\theta(r, z), \quad u_z = u_z(z).$$

Используются следующие соотношения между компонентами вектора смещения и компонентами тензора деформаций [9, 10]:

$$\varepsilon_r^{(i)} = \frac{du_r^{(i)}}{dr}, \quad \varepsilon_z^{(i)} = \frac{du_z^{(i)}}{dz} = \varepsilon_0, \\ \gamma_{zr}^{(i)} = 0, \quad \gamma_{\theta r}^{(i)} = \frac{\partial u_\theta^{(i)}}{\partial r} - \frac{u_\theta^{(i)}}{r}, \quad \gamma_{z\theta}^{(i)} = \frac{du_\theta^{(i)}}{dz} = \gamma_0 r.$$

Здесь γ_0 — кручение трубы; ε_0 — константа; индекс i соответствует номеру слоя.

Соотношения между напряжениями и деформациями записываются в матричной форме

$$[\bar{\sigma}]^{(i)} = [\bar{C}]^{(i)}[\bar{\varepsilon}]^{(i)},$$

где $[\bar{\sigma}]^{(i)}$, $[\bar{\varepsilon}]^{(i)}$ — тензоры напряжения и деформации; $[\bar{C}]^{(i)}$ — матрица жесткости.

Решение для радиальной компоненты вектора смещения представим в виде [11]

$$u_r^{(i)} = A_0^{(i)} r^{\beta(i)} + B_0^{(i)} r^{-\beta(i)} + b_1^{(i)} \varepsilon_0 r + b_2^{(i)} \gamma_0 r^2,$$

где

$$b_1^{(i)} = \frac{\alpha_1^{(i)}}{1 - \beta(i)}, \quad b_2^{(i)} = \frac{\alpha_2^{(i)}}{4 - \beta(i)}, \quad \alpha_1^{(i)} = \frac{\bar{C}_{12}^{(i)} - \bar{C}_{13}^{(i)}}{\bar{C}_{33}^{(i)}}, \quad \alpha_2^{(i)} = \frac{\bar{C}_{26}^{(i)} - \bar{C}_{36}^{(i)}}{\bar{C}_{33}^{(i)}}, \quad \beta(i) = \sqrt{\frac{\bar{C}_{22}^{(i)}}{\bar{C}_{33}^{(i)}}}.$$

Поскольку в сосуде давления, полученном путем намотки волокон, имеется металлический лайнер, его радиальное смещение можно представить следующим образом:

$$u_r = Ar + B/r + b_3 \varepsilon_0 r \ln(r) + b_4 \gamma_0 r^2,$$

где $b_3 = \alpha_1/2$; $b_4 = \alpha_2/3$.

1.2. *Матрица жесткости.* Определяющие соотношения для i -го слоя запишем в виде

$$[\sigma]^{(i)} = [C]^{(i)}[\varepsilon]^{(i)},$$

где $[\sigma]^{(i)}$, $[\varepsilon]^{(i)}$ — матрицы напряжений и деформаций соответственно; $[C]^{(i)}$ — матрица жесткости композита.

Выражение для энергии деформации можно получить с использованием матриц жесткости в осевом и поперечном направлениях. Связь между этими матрицами можно представить в виде [35, 36]

$$[\bar{C}]^{(i)} = [T_\sigma]^{(i)}[C]^{(i)}[T_\varepsilon]^{(i)},$$

где $[T_\sigma]^{(i)}$, $[T_\varepsilon]^{(i)}$ — матрицы перехода.

Выражения для модулей упругости зависят от объемной доли волокон V_f . С использованием уравнения смесей выражения для модулей упругости записываются в виде [37]

$$\begin{aligned} E_1 &= V_f E_f + (1 - V_f) E_m + \frac{4(\nu_m - \nu_f^2) k_f k_m G_m (1 - V_f) V_f}{(k_f + G_m) k_m + (k_f - k_m) G_m V_f}, \\ E_2 &= \frac{1}{(4k_T)^{-1} + (4G_{23})^{-1} + \nu_m^2/E_1}, \\ G_{12} &= G_m \frac{(G_{12f} + G_m) + (G_{12f} - G_m) V_f}{(G_{12f} + G_m) - (G_{12f} - G_m) V_f}, \\ G_{23} &= \frac{G_m [k_m (G_{23f} + G_m) + 2G_{23f} G_m + k_m (G_{23f} - G_m) V_f]}{k_m (G_{23f} + G_m) + 2G_{23f} G_m - (k_m + 2G_m) (G_{23f} - G_m) V_f}, \\ \nu_{12} &= V_f \nu_f + (1 - V_f) \nu_m + \frac{(\nu_m - \nu_f) (k_m - k_f) G_m (1 - V_f) V_f}{(k_f + G_m) k_m + (k_f - k_m) G_m V_f}, \\ \nu_{23} &= \frac{2E_1 k_T - E_1 E_2 - 4\nu_{12}^2 k_T E_2}{2E_1 k_T}, \end{aligned}$$

где

$$k_m = \frac{E_m}{2(1 - \nu_m - 2\nu_m^2)}, \quad k_f = \frac{E_f}{2(1 - \nu_f - 2\nu_f^2)}, \quad k_T = \frac{(k_f + G_m) k_m + (k_f - k_m) G_m V_f}{(k_f + G_m) - (k_f - k_m) V_f}.$$

1.3. *Краевые условия.* Предполагается, что на внутреннюю поверхность сосуда высокого давления действует однородное давление P , в то время как на внешней поверхности давление отсутствует. Таким образом, граничные условия для сосуда высокого давления, полученного путем намотки волокон записываются в виде

$$\sigma_r^{(1)}(r_0) = -P, \quad \sigma_r^{(N)}(r_N) = 0,$$

условия сопряжения на границе слоев — в виде

$$u_r^{(i)}(r_i) = u_r^{(i+1)}(r_i), \quad \sigma_r^{(i)}(r_i) = \sigma_r^{(i+1)}(r_i).$$

Уравнения равновесия имеют следующий вид:

$$2\pi \sum_{i=1}^N \int_{r_{i-1}}^{r_i} \sigma_z^{(i)}(r) r dr = \pi r_0^2 P + F, \quad 2\pi \sum_{i=1}^N \int_{r_{i-1}}^{r_i} \sigma_{z\theta}^{(i)}(r) r^2 dr = M_0.$$

Здесь F — осевая сила; M_0 — крутящий момент. В данной работе предполагается, что крутящий момент равен нулю. С использованием приведенных выше уравнений можно определить напряженно-деформированное состояние в композитном сосуде высокого давления.

1.4. *Критерий разрушения.* Целью данной работы является определение оптимальной прочности сосудов высокого давления, полученных путем намотки волокон, при комбинированных нагрузках. Таким образом, коэффициент прочности (относительная прочность) рассматривается в качестве функции цели. Принимается критерий разрушения, в котором коэффициент прочности определяется следующим образом [38, 39]:

$$R = -\frac{\xi}{2\rho} + \sqrt{\left(\frac{\xi}{2\rho}\right)^2 + \frac{1}{\rho}}.$$

Здесь

$$\rho = F_{11}\sigma_1^2 + F_{33}(\sigma_2^2 + \sigma_3^2) + F_{44}\tau_{12}^2 + 2F_{31}(\sigma_3 + \sigma_2)\sigma_1 + 2F_{32}\sigma_3\sigma_2, \quad \xi = F_3(\sigma_2 + \sigma_3) + F_1\sigma_1,$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_t X_c}, \quad F_{33} = \frac{1}{Y_t Y_c}, \quad F_{44} = \frac{1}{S^2}, \quad F_3 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c},$$

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, \quad F_{31} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{33} F_{11}}, \quad F_{32} = -\frac{1}{2} F_{33},$$

X, Y — прочность сосуда в направлении укладки волокон и в поперечном направлении соответственно; индексы t, c соответствуют растяжению и сжатию; S — прочность на сдвиг; σ — напряжение; нижние индексы 1, 2, 3 соответствуют продольным и поперечным направлениям; τ_{12} — напряжение сдвига. Прочность сосуда высокого давления, полученного путем намотки волокон, зависит от прочности волокна и матрицы [40]:

$$X_t = X_f V_f, \quad Y_t = [1 - (\sqrt{V_f} - V_f)(1 - E_m/E_f)] X_m, \quad X_c = V_f Y_f,$$

$$Y_c = [1 - (\sqrt{V_f} - V_f)(1 - E_m/E_f)] Y_m, \quad S = [1 - (\sqrt{V_f} - V_f)(1 - G_m/G_f)] S_m.$$

Здесь X, Y — прочность на растяжение и сжатие соответственно; индексы f, m соответствуют волокну и матрице; S_m — прочность на сдвиг матрицы.

Для металлического лайнера используется теория прочности Мизеса. Критерий разрушения можно записать в виде [41]

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{32}^2)} / \sqrt{2}.$$

Коэффициент прочности определяется следующим образом:

$$R_l = \frac{\sigma_s}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{32}^2)} / \sqrt{2}}.$$

2. Метод оптимизации относительной прочности. Целью данной работы является определение конструктивных параметров сосуда высокого давления, обеспечивающих его равномерную прочность. Коэффициент прочности используется для оценки несущей способности каждого слоя. Угол намотки волокон и их объемная доля являются параметрами задачи оптимизации.



Рис. 2. Алгоритм вычислений с использованием гибридного метода PSO–GWO

2.1. *Параметры оптимизации.* На расчетные параметры накладываются ограничения. Задача оптимизации ставится следующим образом: найти вектор

$$x = (\varphi, V_f),$$

доставляющий оптимальное значение для строки

$$\text{str}(R(r_i)) \quad (i = 1, \dots, N - 1)$$

при выполнении неравенств

$$\begin{aligned} \varphi_{\min} \leq \varphi_f \leq \varphi_{\max} \quad (i = 1, \dots, N - 1), \\ V_{f\min} \leq V_f \leq V_{f\max}, \quad 0,2 \leq V_f \leq 0,8, \quad 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ, \end{aligned}$$

где $R(r_i)$ — относительная прочность слоев; φ, V_f — угол намотки и объемная доля волокон соответственно.

2.2. *Процедура оптимизации.* По сравнению с другими интеллектуальными алгоритмами оптимизации метод GWO имеет преимущества, заключающиеся в простоте программирования и простоте его настройки [42, 43]. Однако у этого метода оптимизации имеется также ряд недостатков: малая скорость сходимости, недостаточная точность решения и возможность попадания в точку локального оптимума. Метод PSO за счет небольшого количества параметров и простоты реализации позволяет эффективно находить точку глобального оптимума при решении как нелинейных задач, так и задач с большим числом точек оптимума. Поэтому в данной работе для нахождения оптимального угла намотки волокон и объемной доли волокон V_f , обеспечивающих оптимальное значение функции цели $\text{str}(R(i))$, применяется гибридный метод PSO–GWO. Метод PSO используется для изменения скорости частиц и их положения на каждой итерации, а метод GWO — для нахождения оптимальных значений переменных на каждой итерации. Таким образом, улучшается эффективность работы не только алгоритма PSO, но и алгоритма GWO. Процесс оптимизации показан на рис. 2.

Процесс оптимизации включает следующие шаги.

Шаг 1. Задаются основные параметры сосуда, полученного путем намотки волокон, и диапазоны значений угла намотки и объемной доли волокон.

Шаг 2. Создается теоретическая модель полученного путем намотки волокон сосуда высокого давления, нагруженного внутренним давлением и осевой силой.

Шаг 3. Задаются начальные значения параметров алгоритмов PSO и GWO. Для стаи серых волков $G = (G_1, G_2, \dots, G_N)$ задается позиция каждого волка $G_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iD})^T$, $i = 1, 2, \dots, N$.

Шаг 4. Вычисляется качество каждого индивидуума и записываются текущие значения оптимального индивидуума α , субоптимального индивидуума β и третьего по значимости оптимального индивидуума δ , а также их соответствующие положения G_α , G_β и G_δ .

Шаг 5. Повторяется шаг 4, до тех пор пока не будет получено оптимальное решение или не будет достигнуто максимально допустимое число шагов.

Гибридный алгоритм позволяет определить некоторые важные параметры. Расчет положения волков α , β и δ проводится в соответствии с методом GWO. На следующей итерации позиции всех волков должны быть обновлены. Кроме того, в алгоритме PSO вводится инерционный вес w для скорости и положения частицы, для того чтобы обновить эти значения на следующей итерации. Инерционный вес w в алгоритме PSO увеличивает эффективность разведки, а процедуры gbest и pbest позволяют отслеживать оптимальное положение встречающихся частиц. В гибридном алгоритме модифицированные уравнения положения и скорости серого волка задаются следующим образом:

$$A = 2ar_1 - a, \quad C = 2r_2.$$

Здесь компоненты вектора a убывают по линейному закону от 2 до 0 по мере увеличения числа итераций; r_1, r_2 — случайные векторы на отрезке $[0, 1]$.

В методе GWO положения G_α^d , G_β^d , G_δ^d на следующих итерациях определяются по формулам

$$\begin{aligned} G_\alpha^d(t+1) &= G_\alpha^d(t) - A_0 |C_0 G_\alpha^d(t) - w G_i^d(t)|, \\ G_\beta^d(t+1) &= G_\beta^d(t) - A_0 |C_1 G_\beta^d(t) - w G_i^d(t)|, \\ G_\delta^d(t+1) &= G_\delta^d(t) - A_0 |C_2 G_\delta^d(t) - w G_i^d(t)|. \end{aligned}$$

В гибридном методе PSO–GWO скорости и обновленные положения i -й частицы вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} G_i^d(t+1) &= G_i^d(t) + v_i^d(t+1), \\ v_i^d(t+1) &= w(v_i^d(t) + C_0 r_1 (G_1 - G_i^d(t)) + C_1 r_2 (G_2 - G_i^d(t)) + C_2 r_3 (G_3 - G_i^d(t))), \end{aligned}$$

где w , $v_i(t)$, $G_i(t)$ — инерционный вес, скорость i -й частицы и ее положение соответственно.

3. Сравнение методов оптимизации. Ниже проводится сравнение результатов, полученных методом GWO и гибридным методом PSO–GWO. Принята схема спиральной намотки $[\pm\varphi_1, \pm\varphi_2, \pm\varphi_3]$, в качестве нитей используется стекловолокно. Лайнер изготовлен из алюминиевого сплава. Для стекловолокна и металлического лайнера приняты следующие значения механических параметров: $E_f = 74$ ГПа, $E_m = 5,17$ ГПа, $\nu_f = 0,2$, $\nu_m = 0,25$, $G_{12f} = 74$ ГПа, $G_{23f} = 30,8$ ГПа, $G_m = 1,92$ ГПа, $X_{tf} = 2150$ МПа, $X_{tm} = 103$ МПа, $Y_{cf} = 1450$ МПа, $Y_{cm} = 207$ МПа, $S_m = 90$ МПа, $E = 71$ ГПа, $\nu = 0,3$, $G = 27$ ГПа, $\sigma_s = 325$ МПа [44].

Для обоих алгоритмов задаются следующие начальные параметры: максимальное число итераций $t = 200$, размерность переменных оптимизации равна 4, размер популяции $N = 15$. Результаты тестовых вычислений для функции, имеющей глобальный оптимум, могут свидетельствовать об эффективности алгоритма. Каждая функция качества вычисляется 15 раз при указанных выше начальных параметрах. Процесс достижения оптимального решения показан на рис. 3. Для получения оптимального результата методом GWO

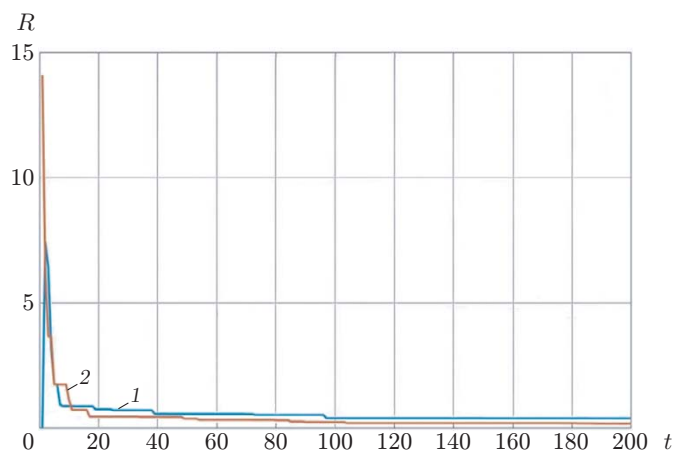


Рис. 3. Результаты оптимизации функции качества R методом GWO (1) и гибридным методом PSO–GWO (2)

и гибридным методом PSO–GWO требуется не менее 80 итераций. Тем не менее оптимизация функции качества с использованием гибридного метода PSO–GWO эффективнее оптимизации с использованием метода GWO.

4. Результаты исследования и их обсуждение. Ниже исследуется распределение в радиальном направлении относительной прочности в полученном путем намотки волокон композитном сосуде, находящемся под действием осевой силы и внутреннего давления, при различных числе слоев, значениях отношения внутреннего радиуса сосуда к внешнему и модуля упругости волокон. Проводится сравнение результатов оптимизации, выполненной различными методами.

4.1. Влияние отношения внутреннего радиуса сосуда к внешнему на распределение относительной прочности. Использовались значения отношения внутреннего радиуса сосуда к внешнему $r_0/r_N = 0,80; 0,85; 0,90$. Целью оптимизации является обеспечение максимально равномерного распределения относительной прочности в композитном сосуде высокого давления за счет выбора угла намотки волокон φ и их объемной доли V_f . Распределения относительной прочности по толщине сосуда, полученные с использованием теоретической модели и предложенного гибридного метода оптимизации, представлены на рис. 4. При $r_0/r_N = 0,8$ разность максимального R_{\max} и минимального R_{\min} значений относительной прочности, полученных с использованием метода GWO и гибридного метода PSO–GWO, близка к 10. При $r_0/r_N = 0,85$ для метода PSO–GWO $R_{\max} - R_{\min} = 4$, для метода GWO $R_{\max} - R_{\min} = 8$. Следовательно, с использованием метода GWO сложнее получить равномерное распределение относительной прочности. Аналогичные вычисления проведены при $r_0/r_N = 0,9$. По мере увеличения отношения r_0/r_N относительная прочность, вычисленная с использованием обоих методов оптимизации, уменьшается. Относительная прочность, полученная с помощью гибридного метода PSO–GWO, больше относительной прочности, полученной с помощью метода GWO. С увеличением отношения r_0/r_N значение объемной доли волокон V_f , оптимизированное с использованием гибридного метода PSO–GWO, увеличивается с 0,46 до 0,60, тогда как значение объемной доли волокон, оптимизированное с помощью метода GWO, сначала увеличивается, а затем уменьшается до 0,52 (рис. 5). По мере увеличения отношения r_0/r_N угол намотки волокон, вычисленный с использованием метода GWO, изменяется существенно, в то время как угол намотки волокон, полученный с использованием гибридного метода, изменяется незначительно. Из полученных результатов следует, что при оптимизации с использова-

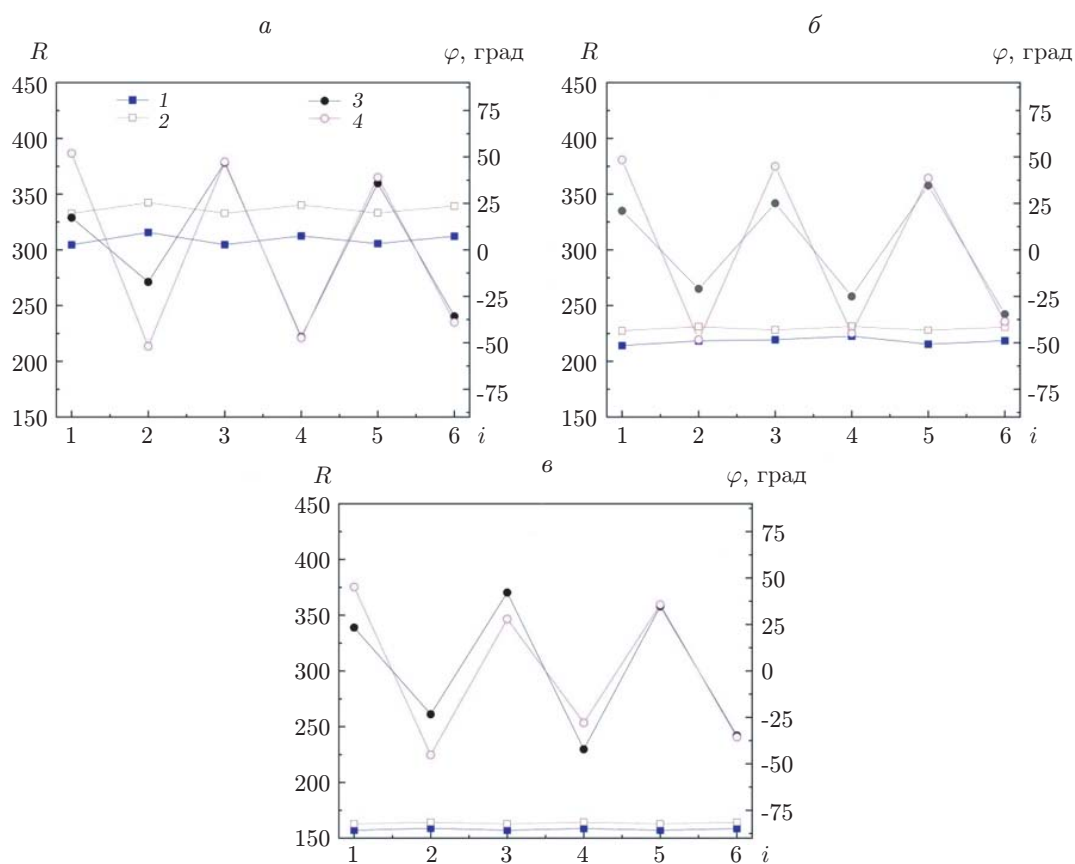


Рис. 4. Зависимости коэффициента прочности R (1, 2) и оптимального угла намотки волокон φ (3, 4) от номера слоя i при различных значениях r_0/r_N :
 а — $r_0/r_N = 0,8$, б — $r_0/r_N = 0,85$, в — $r_0/r_N = 0,9$; 1, 3 — метод GWO, 2, 4 — гибридный метод PSO-GWO

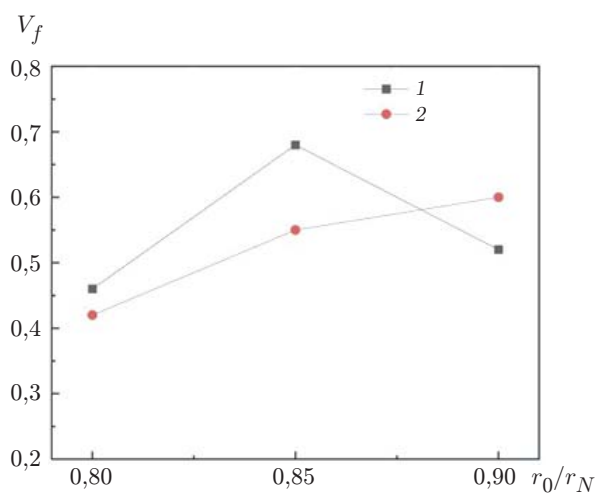


Рис. 5. Зависимости объемной доли волокон V_f от отношения r_0/r_N , полученные методом GWO (1) и гибридным методом PSO-GWO (2)

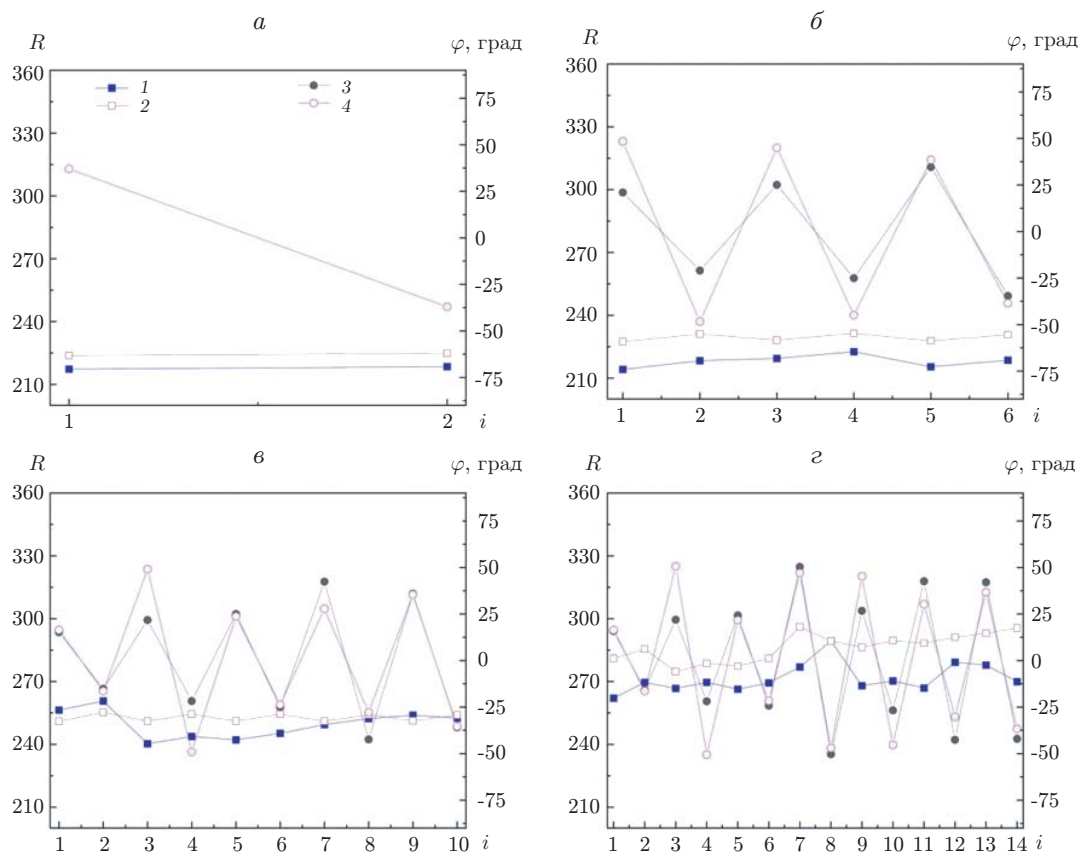


Рис. 6. Зависимости коэффициента прочности R (1, 2) и оптимального угла намотки волокон φ (3, 4) от номера слоя i при различном числе слоев: а — $N = 2$, б — $N = 6$, в — $N = 10$, г — $N = 14$; 1, 3 — метод GWO, 2, 4 — гибридный метод PSO-GWO

нием метода GWO отношение радиуса к толщине сосуда играет важную роль как при определении оптимального угла намотки, так и при определении объемной доли волокон. Однако при использовании гибридного метода PSO-GWO отношение радиуса сосуда к его толщине играет важную роль только при определении объемной доли волокон.

4.2. *Влияние числа слоев на распределение относительной прочности.* Рассматривается схема намотки волокон $[\pm\varphi_1, \pm\varphi_2, \dots, \pm\varphi_n]$, значение отношения r_0/r_N принято равным 0,85. Количество слоев волокон в сосуда высокого давления равно $N = 2, 6, 10, 14$. На рис. 6 приведены оптимальные значения угла намотки и относительной прочности для каждого слоя намотки. При числе слоев $N = 2$ оптимальные значения относительной прочности в сосуда высокого давления, полученные с использованием метода GWO и гибридного метода PSO-GWO, практически одинаковы. Для композитного сосуда с числом слоев $N = 6$ разность максимального и минимального значений относительной прочности, полученных с использованием метода PSO-GWO, равна $R_{\max} - R_{\min} = 4$, тогда как при использовании метода GWO $R_{\max} - R_{\min} = 8$. При увеличении числа слоев до $N = 14$ разность максимального и минимального значений относительной прочности, полученных с использованием гибридного метода PSO-GWO, увеличивается с 4 до 22, а разность максимального и минимального значений относительной прочности, полученных с помощью метода GWO, — с 8 до 27. Значения относительной прочности, полученные с использованием обоих методов оптимизации, увеличиваются с увеличением количества слоев. Зна-

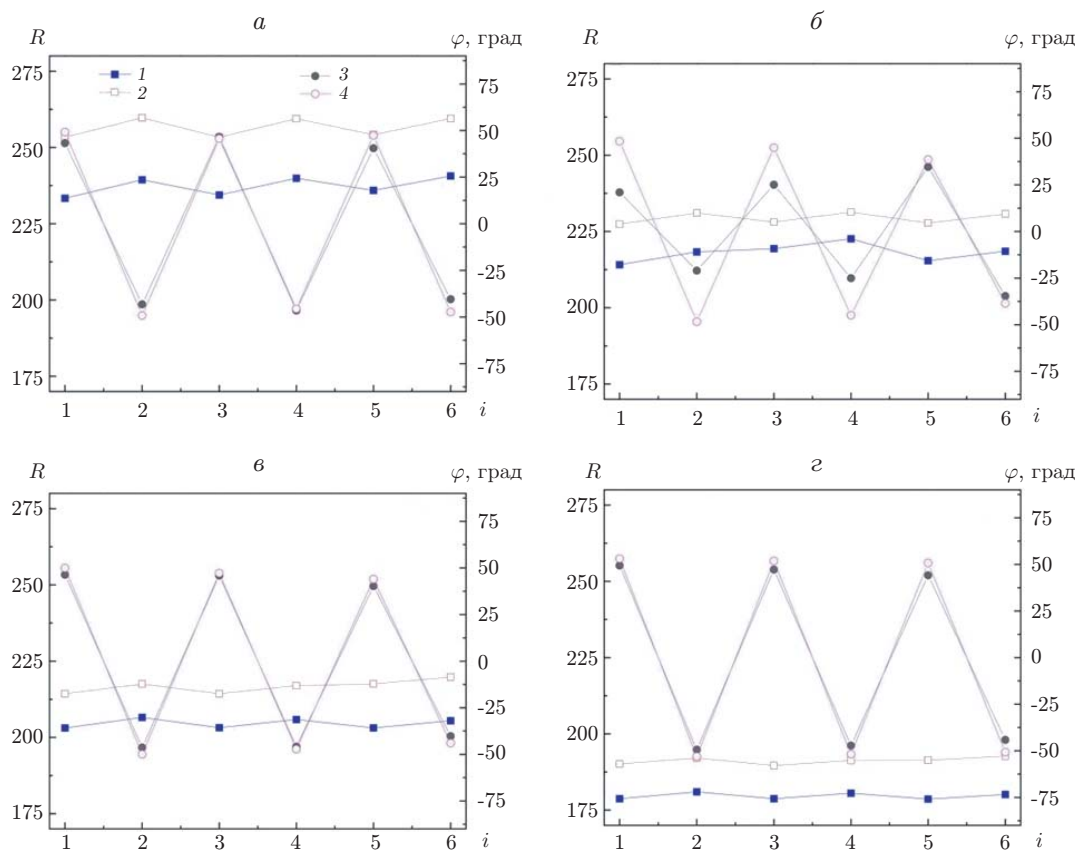


Рис. 7. Зависимости коэффициента прочности R (1, 2) и оптимального угла намотки волокон φ (3, 4) от номера слоя i при различных значениях коэффициента нагрузки:

a — $F/P = 0,5$, $б$ — $F/P = 1$, $в$ — $F/P = 1,5$, $г$ — $F/P = 2$; 1, 3 — метод GWO, 2, 4 — гибридный метод PSO–GWO

чение относительной прочности, полученное с помощью метода PSO–GWO, больше, чем значение, полученное с помощью метода GWO. При большом количестве слоев получить равномерное распределение относительной прочности не удастся.

С увеличением количества слоев оптимальная объемная доля волокон, вычисленная с использованием гибридного метода PSO–GWO, увеличивается с 0,45 до 0,72, а оптимальная объемная доля волокон, вычисленная с помощью метода GWO, сначала увеличивается, а затем уменьшается. При $N = 2$ оптимальный угол намотки близок к 40° . По мере увеличения числа слоев различие значений оптимального угла намотки, полученных с использованием обоих методов оптимизации, увеличивается. Таким образом, варьируя угол намотки и объемную долю волокон, чрезвычайно сложно получить равномерное распределение относительной прочности.

4.3. Влияние отношения нагрузок F/P на распределение относительной прочности.

При анализе влияния коэффициента нагрузки F/P на распределение относительной прочности композита внутреннее давление принято равным 0,1 МПа, количество слоев $N = 6$, значения коэффициента нагрузки равны $F/P = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$. На рис. 7 приведены оптимальные значения угла намотки и относительной прочности сосудов высокого давления, полученных путем намотки волокон, при различных значениях коэффициента нагрузки.

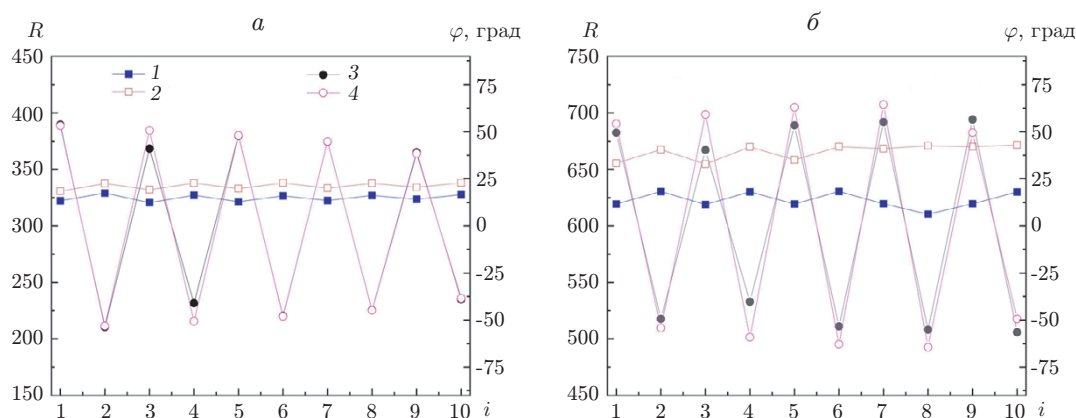


Рис. 8. Зависимости коэффициента прочности R (1, 2) и оптимального угла намотки волокон φ (3, 4) от номера слоя i :

a — стекловолокно, b — углеродное волокно; 1, 3 — метод GWO, 2, 4 — гибридный метод PSO-GWO

С увеличением коэффициента нагрузки равномерность распределения относительной прочности увеличивается. Также с увеличением коэффициента нагрузки разность максимального и минимального значений относительной прочности, полученных с использованием гибридного метода PSO-GWO, уменьшается с 6 до 3. Указанная разность, вычисленная с использованием метода GWO, уменьшается с 7 до 3. Значение относительной прочности, полученное с использованием обоих методов оптимизации, уменьшается с увеличением отношения r_0/r_N . При различных значениях отношения F/P значения относительной прочности, вычисленные с использованием метода PSO-GWO, больше соответствующих значений, вычисленных с использованием метода GWO. Кроме того, при использовании обоих методов оптимизации оптимальная объемная доля волокон растет с увеличением отношения F/P . Коэффициент нагрузки F/P оказывает существенное влияние на объемную долю волокон. Оптимальные углы намотки, вычисленные с использованием обоих методов оптимизации, практически одинаковы и находятся в интервале от 40 до 50° во всех рассмотренных случаях, за исключением случая $F/P = 1$. При $F/P = 1$ оптимальный угол намотки, полученный с использованием гибридного метода PSO-GWO, такой же, как и при других значениях отношения F/P . Оптимальный угол намотки, полученный с использованием метода GWO, существенно зависит от отношения F/P .

4.4. Влияние модуля упругости на распределение относительной прочности. Результаты исследования влияния модуля упругости волокна на распределение относительной прочности приведены на рис. 8. Использовалось углеродное волокно T300 с модулем упругости $E = 231$ ГПа, модулями сдвига $G = 15; 7$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,2$ и прочностью на растяжение и сжатие $X = 2500$ МПа, $Y = 2000$ МПа соответственно. Приняты следующие значения параметров: $r_0/r_N = 0,8$, $N = 10$, $F/P = 1$. Оптимизированные значения угла намотки стекловолокна, полученные с помощью двух методов, относительно близки (см. рис. 8). Однако в случае использования углеродного волокна наблюдается существенное различие результатов оптимизации с помощью двух методов. Причем в случае углеродного волокна распределение относительной прочности менее равномерное, чем в случае стекловолокна. В случае волокна с большим модулем упругости и большей прочностью оптимизируемые параметры имеют большие диапазоны значений.

Заключение. В работе приведены результаты оптимизации с использованием методов GWO и PSO–GWO конструктивных параметров композитного сосуда высокого давления, полученного путем намотки волокон, с целью достижения более равномерного распределения прочности в слоях.

Установлено, что по мере увеличения количества слоев и модуля упругости волокна относительная прочность увеличивается, при этом ее распределение в слоях становится менее равномерным. С увеличением отношения F/P от 0,8 до 0,9 относительная прочность постепенно уменьшается и ее распределение в слоях становится более равномерным.

Вычисление параметров, обеспечивающих оптимальные углы намотки волокон в каждом слое, выполняется достаточно эффективно, в то время как оптимизировать объемную долю волокон для получения максимального значения коэффициента прочности достаточно сложно.

При использовании гибридного метода PSO–GWO можно получить больший коэффициент прочности, чем при использовании метода GWO.

ЛИТЕРАТУРА

1. **An C., Duan M., Toledo Filho R. D., et al.** Collapse of sandwich pipes with PVA fiber reinforced cementitious composites core under external pressure // *Ocean Engng.* 2014. V. 82. P. 1–13.
2. **Serovaev G. S., Shestakov A. P., Oshmarin D. A.** Numerical study of vibrational processes in composite material for the development of a delamination control system // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2018. V. 59, N 7. P. 1261–1270.
3. **Kumar S., Saha A.** Effects of stacking sequence of pineapple leaf-flax reinforced hybrid composite laminates on mechanical characterization and moisture resistant properties // *Proc. Inst. Mech. Engrs. C. J. Mech. Engng Sci.* 2022. V. 236, N 3. P. 1733–1750.
4. **Ramesh M., Rajeshkumar L., Balaji D.** Influence of process parameters on the properties of additively manufactured fiber-reinforced polymer composite materials: A review // *J. Materials Engng Performance.* 2021. V. 30, iss. 7. P. 4792–4807.
5. **Ke Chun S., Guang P.** Optimizing the buckling strength of filament winding composite cylinders under hydrostatic pressure // *J. Reinforc. Plastics Composites.* 2018. V. 37, N 13. P. 892–904.
6. **Kolpakov A. G.** Design problem of laminated plates with specified characteristics // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2003. V. 44, N 2. P. 290–297.
7. **Xu J., Fu T., Hui Z.** Studies on changes in the temperature field and recrystallization properties of glass fiber reinforced polypropylene composite strip winding process // *Proc. Inst. Mech. Engrs. C. J. Mech. Engng Sci.* 2021. V. 235, N 19. P. 4171–4180.
8. **Kang C., Liu Z., Shirinzadeh B., et al.** Multiparametric sensitivity analysis of multilayered filament-wound cylinder under internal pressure // *Mech. Adv. Materials Structure.* 2020. V. 29, N 1. P. 1–12.
9. **Cagdas I. U.** Optimal design of filament wound truncated cones under axial compression // *Composite Structures.* 2017. V. 170. P. 250–260.
10. **Xia M., Takayanagi H., Kemmochi K.** Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure // *Composite Structures.* 2001. V. 53, N 4. P. 483–491.
11. **Geng P., Xing J. Z., Chen X. X.** Winding angle optimization of filament-wound cylindrical vessel under internal pressure // *Arch. Appl. Mech.* 2017. V. 87, N 3. P. 365–384.
12. **Rotem A., Hashin Z.** Failure modes of angle ply laminates // *J. Composite Materials.* 1975. V. 9, N 2. P. 191–206.

13. **Lisbôa T. V., Almeida J. H. S. (Jr), Dalibor I. H., et al.** The role of winding pattern on filament wound composite cylinders under radial compression // *Polymer Composites*. 2020. V. 41, N 6. P. 2446–2454.
14. **Lisbôa T. V., Almeida J. H. S. (Jr), Spickenheuer A., et al.** FEM updating for damage modeling of composite cylinders under radial compression considering the winding pattern // *Thin-Wall. Structures*. 2022. V. 173. 108954.
15. **Tashnizi E. S., Gohari S., Sharifi S., et al.** Optimal winding angle in laminated CFRP composite pipes subjected to patch loading: Analytical study and experimental validation // *Intern. J. Pressure Vessels Piping*. 2020. V. 180. 104042.
16. **Pourahmadi E., Taheri-Behrooz F.** The influence of fiber bundle width on the mechanical properties of filament-wound cylindrical structures // *Intern. J. Mech. Sci.* 2020. V. 178. 105617.
17. **Taheri-Behrooz F., Pourahmadi E.** A 3D RVE model with periodic boundary conditions to estimate mechanical properties of composites // *Structur. Engng Mech.* 2019. V. 72, N 6. P. 713–722.
18. **Kang C., Liu Z., Shirinzadeh B., et al.** Parametric optimization for multi-layered filament-wound cylinder based on hybrid method of GA-PSO coupled with local sensitivity analysis // *Composite Structures*. 2021. V. 267. 113861.
19. **Colombo C., Vergani L.** Optimization of filament winding parameters for the design of a composite pipe // *Composites. Pt B. Engng.* 2018. V. 148. P. 207–216.
20. **Gohari S., Sharifi S., Burvill C., et al.** Localized failure analysis of internally pressurized laminated ellipsoidal woven GFRP composite domes: Analytical, numerical, and experimental studies // *Arch. Civil Mech. Engng.* 2019. V. 19, N 4. P. 1235–1250.
21. **Rafiee R., Amini A.** Modeling and experimental evaluation of functional failure pressures in glass fiber reinforced polyester pipes // *Comput. Materials Sci.* 2015. V. 96. P. 579–588.
22. **Polilov A. N., Vlasov D. D., Sklemina O. Y., et al.** Evaluation of the strength of a composite cylinder for compressed gas // *J. Machinery Manufacture Reliab.* 2022. V. 51, N 1. P. 46–54.
23. **Polilov A. N., Sklemina O. Y., Tatus' N. A.** Design method of reinforcement structure with symmetric pairs of layers by the example of composite gas tank // *Mech. Composite Materials*. 2022. V. 57, N 6. P. 769–784.
24. **Polilov A. N., Vlasov D. D., Sklemina O. Y., et al.** Strength criteria of obliquely wound composite tubes under biaxial tension // *Strength Materials*. 2022. V. 53, N 5. P. 765–774.
25. **Taheri-Behrooz F., Pourahmadi E.** Mutual effect of Coriolis acceleration and temperature gradient on the stress and strain field of a glass/epoxy composite-pipe // *Appl. Math. Model.* 2018. V. 59. P. 164–182.
26. **Azizian M., Almeida J. H. S. (Jr).** Stochastic, probabilistic and reliability analyses of internally-pressurised filament wound composite tubes using artificial neural network metamodells // *Materials Today Comm.* 2022. V. 31. 103627.
27. **Alekhin V. V.** Design of a laminated anisotropic curvilinear beam of minimal weight // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1997. V. 38, N 1. P. 116–122.
28. **Wang Z., Almeida J. H. S. (Jr), St-Pierre L., et al.** Reliability-based buckling optimization with an accelerated Kriging metamodel for filament-wound variable angle tow composite cylinders // *Composite Structures*. 2020. V. 254. 112821.
29. **Paknahad A., Fathi A., Goudarzi A. M., et al.** Optimum head design of filament wound composite pressure vessels using a hybrid model of FE analysis and inertia weight PSO algorithm // *Intern. J. Material Form.* 2016. V. 9, N 1. P. 49–57.
30. **Golshan A., Gohari S., Ayob A.** Multi-objective optimisation of electrical discharge machining of metal matrix composite Al/SiC using non-dominated sorting genetic algorithm // *Intern. J. Mechatron. Manufactur. Systems*. 2012. V. 5, N 5/6. P. 385–398.

31. **Lapczyk I., Hurtado J. A.** Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials // Composites. Pt A. Appl. Sci. Manufactur. 2007. V. 38, N 11. P. 2333–2341.
32. **Zhu H., Guo Z. X., Zhu M., et al.** A progressive FE failure model for laminates under biaxial loading // Mech. Composite Materials. 2020. V. 56. P. 207–214.
33. **Kornev V. M., Demeshkin A. G.** Necessary and sufficient fracture criteria for a composite with a brittle matrix. Pt 2. High-strength reinforcement // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2003. V. 44, N 3. P. 425–431.
34. **Wild P. M., Vickers G. W.** Analysis of filament-wound cylindrical shells under combined centrifugal, pressure and axial loading // Composites. Pt A. Appl. Sci. Manufactur. 1997. V. 28, N 1. P. 47–55.
35. **Xing J., Geng P., Yang T.** Stress and deformation of multiple winding angle hybrid filament-wound thick cylinder under axial loading and internal and external pressure // Composite Structures. 2015. V. 131. P. 868–877.
36. **Shen G.** Mechanics of composite materials / G. Shen, G. Hu, B. Liu. Beijing: Tsinghua Univ. Press, 2013.
37. **White S. R., Kim Y. K.** Process-induced residual stress analysis of AS4/3501-6 composite material // Mech. Composite Materials Structures. 1998. V. 5, N 2. P. 153–186.
38. **Tsai S. W., Wu E. M.** A general theory of strength for anisotropic materials // J. Composite Materials. 1971. V. 5, N 1. P. 58–80.
39. **Liu K. S., Tsai S. W.** A progressive quadratic failure criterion for a laminate // Composites Sci. Technol. 1998. V. 58, N 7. P. 1023–1032.
40. **Chamis C. C.** Simplified composite micromechanics equations for strength, fracture toughness, impact resistance and environmental effects. Cleveland: Lewis Res. Center, 1984.
41. **Liu C., Shi Y.** Design optimization for filament wound cylindrical composite internal pressure vessels considering process-induced residual stresses // Composite Structures. 2020. V. 235. 111755.
42. **Long W., Cai S., Jiao J., et al.** An efficient and robust grey wolf optimizer algorithm for large-scale numerical optimization // Soft Comput. 2020. V. 24, N 2. P. 997–1026.
43. **Ramakrishnan T., Sankaragomathi B.** A professional estimate on the computed tomography brain tumor images using SVM-SMO for classification and MRG-GWO for segmentation // Pattern Recognit. Lett. 2017. V. 94. P. 163–171.
44. **Deuschle H. M.** 3D failure analysis of UD fibre reinforced composites: Puck's theory within FEA. Stuttgart: Inst. of Statics and Dynamics of Aerospace Structures: Univ. Stuttgart, 2010. P. 135–136.

*Поступила в редакцию 3/IV 2023 г.,
после доработки — 23/VIII 2023 г.
Принята к публикации 1/IX 2023 г.*