

УДК 629.735

А.П. ДУЛЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ТРУБЧАТОГО СТЕРЖНЯ

Рассмотрен вопрос проектирования структуры КМ стенки стержня по условиям прочности, общей и местной устойчивости. В качестве критерия проектирования принят критерий минимума массы. Изучена зависимость несущей способности стержня от структуры материала КМ и от радиуса.

композиционный материал, потери устойчивости – общая и местная, критерий проектирования, оптимизация

Широкое применение стержней из композиционных материалов (КМ) в конструкциях крыла, оперения и других агрегатах летательных аппаратов (ЛА) обусловлено их высокой массовой отдачей, особенно при низкой и средней интенсивности нагрузок, а также при наличии пространства для размещения стержневых систем.

Характерными видами исчерпания несущей способности трубчатых стержней являются разрушение КМ, общая и местная потеря устойчивости, проявляющаяся в двух формах – осесимметричной и неосесимметричной.

Объектом исследования являются многослойные трубчатые стержни, изготавливаемые методами пултрузии, намотки или выкладки, содержащие продольные, окружные, спиральные слои композиционного материала (КМ) или их комбинации (рис. 1). Для решения задачи применяются методы теории тонкостенных оболочек с учетом метрических характеристик слоев, планирования эксперимента и методов вычислительной математики. Теория ортотропных слоистых цилиндрических оболочек разработана В.В. Васильевым [1], методике проектирования стержней из КМ посвящена работа Я.С. Карпова [2], но в них не обсуждаются вопросы проектирования структуры КМ стенки стержня по условиям прочности, общей и местной устойчивости.

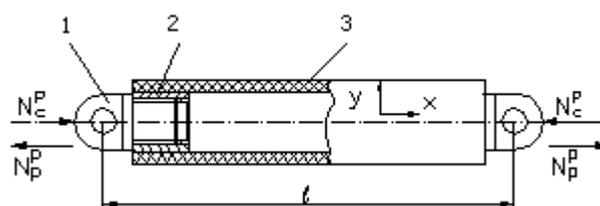


Рис. 1. Конструкция типичного стержня:
1 – наконечник; 2 – переходник;
3 – композитный стержень

Целью изложенного в статье исследования является разработка методики оптимизации структуры КМ трубчатого стержня из условия его минимальной массы при удовлетворении комплекса ограничений по прочности и устойчивости.

В качестве целевой функции принято

$$M = \rho l f \rightarrow \min, \quad (1)$$

где f , l – площадь поперечного сечения и длина стержня; ρ – плотность материала.

На конструктивные параметры стенки стержня накладываются ограничения по прочности и устойчивости.

Пренебрегая величинами второго порядка малости, условие прочности записывается в виде:

$$2 \pi R \delta F_{xc} \geq N_c^p, \quad (2)$$

где F_{xc} – предел прочности КМ на сжатие;

R – средний радиус стенки стержня.

Согласно [1] ограничение по общей устойчивости трубчатого стержня можно представить так:

$$\frac{\kappa D \pi^2}{1^2 \left(1 + \frac{\kappa D \pi^2}{1^2 K_x}\right)} \geq N_c^p, \quad (3)$$

где $K_x = \pi R \delta G_{xy}$ – сдвиговая жесткость;

$D = \pi R^3 \delta E_x$ – изгибная жесткость;

κ – коэффициент опирания;

E_x – модуль упругости КМ в продольном направлении (рис. 1).

Различают две формы местной потери устойчивости оболочек – осесимметричную и неосесимметричную, для недопущения которых справедливы следующие зависимости [1]:

$$2\pi\delta^2 \sqrt{\frac{E_x E_y}{3(1 - \mu_{xy}\mu_{yx})}} \geq N_c^p; \quad (4)$$

$$\min_{(m,n)} \left\{ \frac{\pi R \delta^3}{\lambda_m^2 6} \left[\bar{E}_x \lambda_m^4 + 2(\bar{E}_x \mu_{yx} + 2G_{xy}) \lambda_m^2 \lambda_n^2 + \bar{E}_y \lambda_n^4 \right] + \frac{2\pi\delta\lambda_m^2}{R \left[\frac{\lambda_m^4}{E_y} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\mu_{xy}}{E_x} \right) \lambda_m^2 \lambda_n^2 + \frac{\lambda_n^4}{E_x} \right]} \right\} \geq N_c^p, \quad (5)$$

где $\lambda_m = \frac{\pi m}{l}$, $\lambda_n = \frac{\pi n}{R}$ – параметры волнообразования;

E_y, G_{xy} – модули упругости КМ;

μ_{xy}, μ_{yx} – коэффициенты Пуассона;

$$\bar{E}_x = \frac{E_x}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}}; \quad \bar{E}_y = \frac{E_y}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}}. \quad (6)$$

Физико-механические характеристики КМ (модули упругости, предел прочности, коэффициенты Пуассона) определяются через свойства монослоя и структуру пакета по методике [3].

Как видно из выражений (2) – (5), несущая способность стержня зависит от структуры материала достаточно сложным образом, поэтому представляет практический интерес исследование влияния типа структуры КМ на параметры стенки стержня.

В статье [4] теоретически показано, что для обеспечения прочности и устойчивости рациональную структуру КМ следует искать среди следующих: $[0^\circ]$, $[90^\circ]$, $[0^\circ, 90^\circ]$, $[\pm\phi]$, $[\pm\phi_1, \pm\phi_2]$, $[0^\circ, \pm\phi]$, $[90^\circ, \pm\phi]$, $[0^\circ, 90^\circ, \pm\phi]$. Принимая во внимание типовые технологические процессы изготовления стержней (намотка, пултрузия, намотка + пултрузия, намотка $[\pm\phi]$ + намотка $[90^\circ]$), ниже приведены результаты сравнительного анализа влияния структурных параметров КМ на различные виды несущей способности (прочность, общая устойчивость стержня, местная осесимметричная и неосесимметричная устойчивость стенки).

Для стержней, изготовленных намоткой $[\pm\phi]$ (рис. 2), существует оптимальный угол армирования ϕ_{opt} , определяемый равной несущей способностью по общей и местной неосесимметричной устойчивости. На рис. 2 по оси ординат отложены относительные значения N_i/N_c^p , где N_i – значение функций ограничений, $N_c^p = 200$ кН – расчетное сжимающее усилие. Физико-механические свойства исследуемых КМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства КМ

№	ρ , кг/м ³	E_1 , ГПа	E_2 , ГПа	G_{12} , ГПа	F_{1c} , МПа	F_{2c} , МПа	μ_{12}	δ_0 , мм
1	1400	150	8	4	1200	100	0,3	0,12
2	2000	45	10	5	1000	40	0,3	0,15
3	1320	80	5,5	2	900	200	0,31	0,12

Анализ влияния типа материала на критическую силу общей потери устойчивости стержня (рис. 3) свидетельствует о том, что для некоторых КМ максимум имеет место не для однонаправленных структур. Это связано с влиянием сдвиговой жесткости стенки (см. неравенство (3)).

Рассмотрим варианты структуры КМ, когда часть слоев $[\pm\phi]$ заменяются на продольные $[0^\circ]$ или окружные $[90^\circ]$ и исследуем характер изменения функций ограничений.

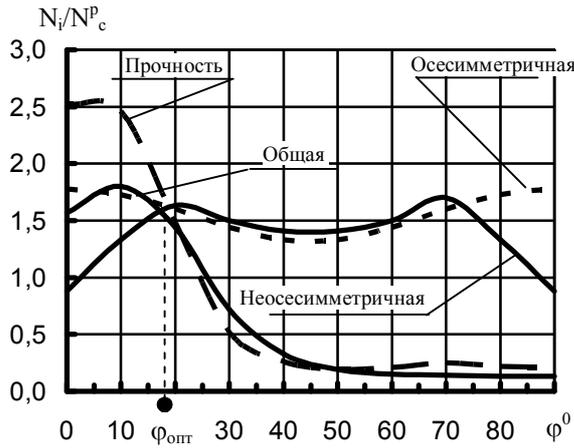


Рис. 2. Изменение функций комплекса ограничений в зависимости от структуры укладки (материал № 1, $n = 14$, $R = 40$ мм, $l = 1000$ мм)

Введем коэффициент Ψ , отражающий долю слоев $[0^\circ]$ или $[90^\circ]$ в общую толщину пакета.

$$\Psi = n/n_{\Sigma} 100\% \quad (7)$$

На рис. 4 – 7 представлены графики соответствующих зависимостей, из которых следует, что:

- наибольшей прочностью в интервале $0 \dots 16^\circ$ обладает структура $[\pm\phi, 0^\circ]$ (рис. 4), что вполне естественно;

- в интервале $0 \dots 10^\circ$ (см. рис. 5) по общей устойчивости предпочтительней структура $[\pm\phi]$, а в интервале $10 \dots 90^\circ$ – структура $[0^\circ, \pm\phi]$. Максимальные значения критической силы общей потери устойчивости для структуры $[\pm\phi]$ и $[0^\circ, \pm\phi]$ примерно равны, но оптимальные значения углов армирования отличаются (рис. 5);

- по местной осесимметричной устойчивости стенки стержня максимальные значения критической силы обеспечивают структуры КМ $[90^\circ, \pm\phi]$ и $[0^\circ, \pm\phi]$ (рис. 6). Аналогичный результат имеет место и для местной неосесимметричной формы потери устойчивости (рис. 7).

На рис. 8 для исследуемых структур КМ показаны графики, построенные по наименьшим значениям функций ограничений (оггибающая снизу), по которым можно определить оптимальные значения

углов спиральной намотки, а также тип структуры, обеспечивающий наибольшую несущую способность.

Для стержня, изготовленного спирально-окружной намоткой, исследовано влияние доли слоев $[90^\circ]$ на несущую способность по всем возможным формам ее исчерпания (оггибающая снизу) (рис. 9). Оптимальные результаты обеспечивает структура $[90^\circ_2, \pm\phi_{18}]$ при значениях ϕ приблизительно 16° .

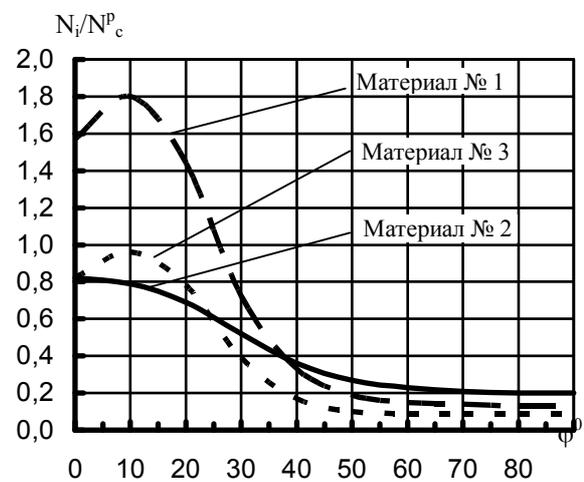


Рис. 3. Зависимость критической силы общей устойчивости от структуры КМ для исследуемых материалов ($n = 14$, $R = 40$ мм, $l = 1000$ мм)

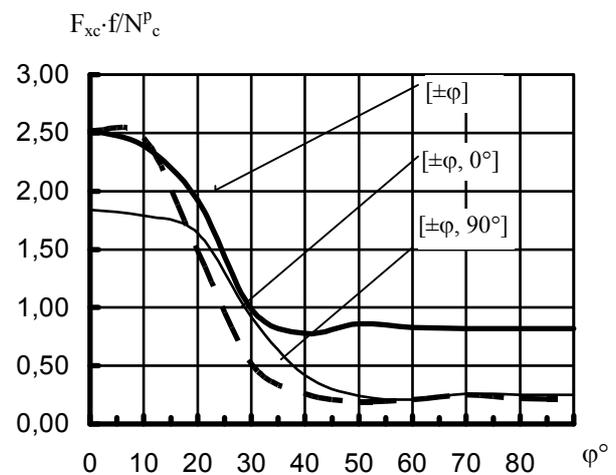


Рис. 4. Зависимость прочности КМ от структуры укладки (материал №1, $n_{\Sigma} = 14$, $\Psi = 30\%$, $R = 40$ мм, $l = 1000$ мм)

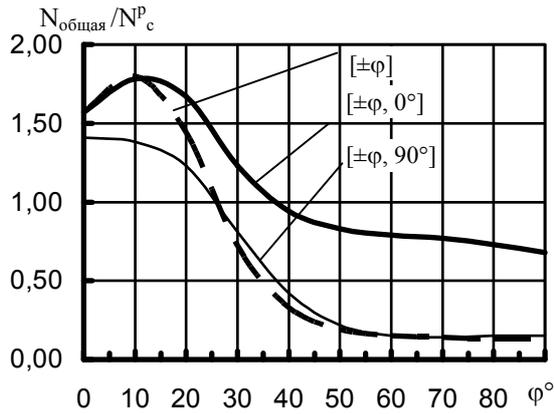


Рис. 5. Зависимость критической силы общей устойчивости от структуры КМ (материал № 1, $n_{\Sigma} = 14$, $\Psi = 30\%$, $R = 40$ мм, $l = 1000$ мм)

$$N_{M. осесим} / N^P_c$$

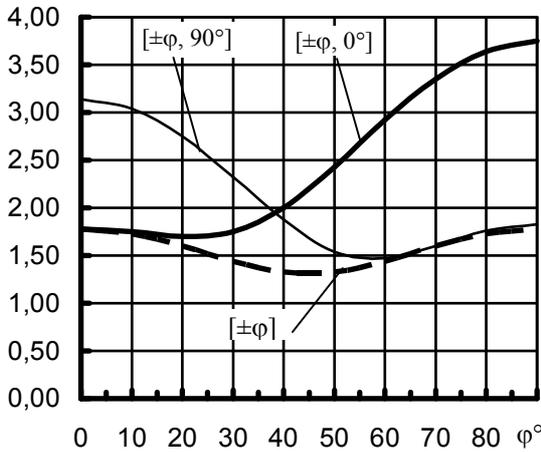


Рис. 6. Зависимость критической силы местной осесимметричной устойчивости от структуры КМ (материал № 1, $n_{\Sigma} = 14$, $\Psi = 30\%$, $R = 40$ мм, $l = 1000$ мм)

$$N_{M. неосесим} / N^P_c$$

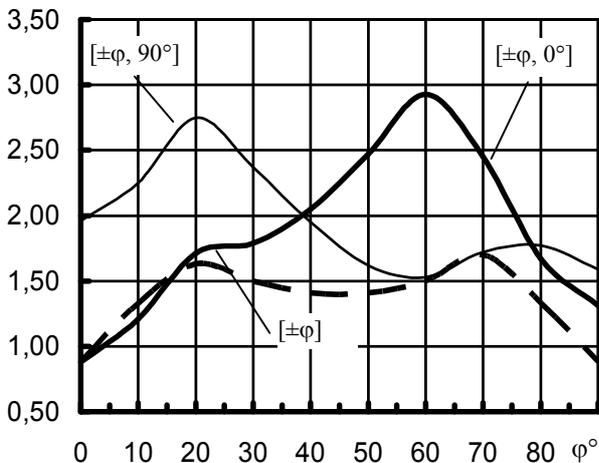


Рис. 7. Зависимость критической силы местной неосесимметричной устойчивости от структуры КМ (материал № 1, $n_{\Sigma} = 14$, $\Psi = 30\%$, $R = 40$ мм, $l = 1000$ мм)

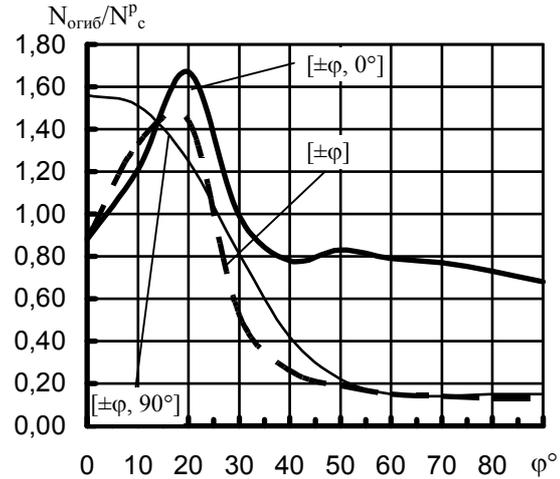


Рис. 8. Зависимость огибающей граничных функций от структуры КМ (материал № 1, $n_{\Sigma} = 14$, $\Psi = 30\%$, $R = 40$ мм, $l = 1000$ мм)

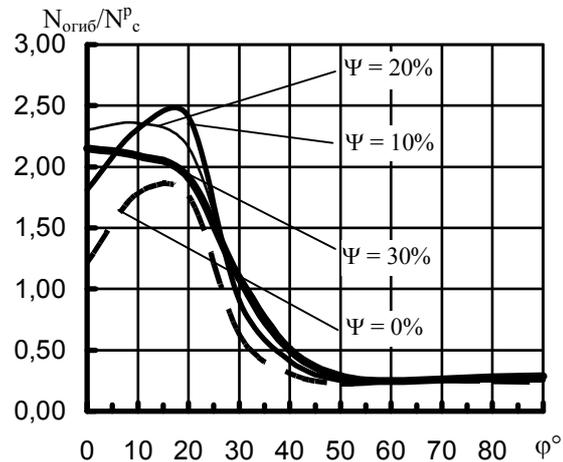


Рис. 9. Зависимость огибающей граничных функций от структуры КМ и Ψ (материал № 1, $n_{\Sigma} = 20$, $\lambda = 20$, структура $[\pm\phi, 90^\circ]$)

Значение радиуса стенки стержня существенно сказывается на критических усилиях потери устойчивости.

На рис. 10 показаны графики зависимости несущей способности от радиуса при постоянной площади поперечного сечения, из анализа которого следует, что для рассматриваемого случая оптимальная величина радиуса равна ~ 19 мм и определяется равенством критических усилий общей и местной неосесимметричной форм потери устойчивости.

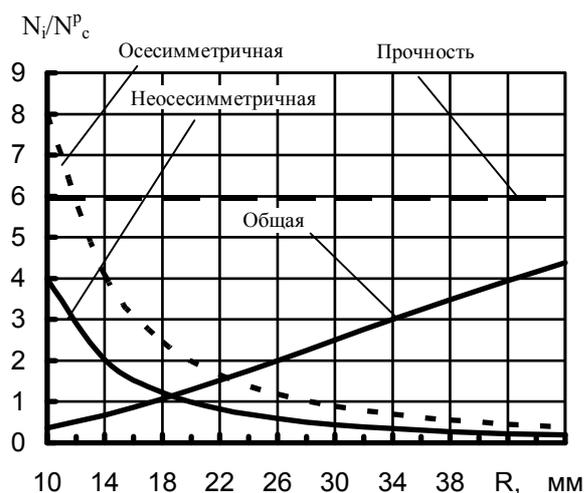


Рис. 10. Изменение функций комплекса ограничений в зависимости от радиуса при постоянной площади поперечного сечения (материал № 1, $\varphi = 0^\circ$, $f = 50 \text{ мм}^2$, $l = 1000 \text{ мм}$)

Заключение

Таким образом, проведенные численные исследования и их анализ свидетельствуют о том, что, во-первых, параметры структуры КМ (угол армирования и соотношение количества слоев 0° и $\pm\varphi$ или 90° и $\pm\varphi$) оказывают существенное влияние на несущую способность сжатого трубчатого стержня, во-вторых, необходимо учитывать сдвиговую жесткость стенки стержня и местные формы потери устойчивости, в-третьих, оптимальные значения угла армирования всегда определяются точкой пересечения графиков по крайней мере двух форм исчерпания несущей способности и, в-четвертых, при постоянной массе заменой спи-

ральных слоев на продольные или окружные можно повысить работоспособность стержня.

Дальнейшие исследования направлены на формулировку и обоснование практических рекомендаций по выбору типа структуры КМ в зависимости от геометрии стержня, действующих нагрузок и технологических ограничений.

Литература

1. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
2. Карпов Я.С. Проектирование и конструирование стержней из композиционных материалов: Учебн. пособие. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 1996. – 121 с.
3. Карпов Я.С. Механика композиционных материалов: Учебн. пособие. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2001. – 122 с.
4. Карпов Я.С., Гагауз П.М., Гагауз Ф.М. Оптимальное проектирование структуры композиционного материала панелей обшивки летательного аппарата // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. научн. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – Вып. 16. – С. 40 – 44.

Поступила в редакцию 12.05.2004

Рецензент: д-р. техн. наук, доц. А.В. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.