

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТРУКТУР НА ИХ КОЭФФИЦИЕНТЫ АРМИРОВАНИЯ

Физико-механические характеристики углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) зависят от пространственного расположения армирующих волокон и коэффициентов армирования. Коэффициенты армирования материала используются для оценки преимуществ и недостатков пространственно-армированных структур (ПАС) УУКМ [1]. Предельные коэффициенты армирования для некоторых ПАС были получены в работе [1], однако важно знать и их диапазон варьирования, имеющий взаимосвязь с технологической реализацией изготовления каркасов. В работе [2] получены данные изменения степени наполнения волокном плетеного слоя от технологических параметров плетения. На основании компьютерного моделирования в работе [3] определена объемная доля волокна в каркасе и основные геометрические показатели пор, влияющие на процесс насыщения ПАС углеродом матрицы.

Целью данной работы является определение влияния технологических параметров изготовления пространственных структур на коэффициенты их армирования волокном в направлениях укладки и в произвольной плоскости.

Коэффициенты армирования ПАС со спиральным расположением волокон

Для определения коэффициентов армирования в каждой из исследуемых ПАС выделены повторяющиеся элементы, развертки которых представлены на рис. 1. На рис. 1 обозначено направление армирования z – осевое, r – радиальное, t – тангенциальное, размеры разверток по соответствующим осям – Z , R , T и угол расположения армирующих волокон к оси z – α . Площадь, занимаемая жгутом, зависит от применяемого волокна и количества его сложений. Форма жгутов в ПАС зависит от ограничивающих факторов, размеры сечения обозначены как a и b . Площадь сечения жгутов определим по формуле

$$S_{ж} = \frac{T_x \cdot n \cdot 10^{-3}}{\varphi_{в\rho}}, \text{ мм}^2, \quad (1)$$

где T_x – линейная плотность исходного жгута, текс;

n – количество сложений исходного жгута;

ρ – плотность жгута, гр/см³;

$\varphi_{в}$ – степень наполнения жгута волокном.

Соотношение параметров сечения зависит от шага укладки волокна и его натяжения. Степень наполнения жгута волокном зависит

от вида жгута и условий изготовления ПАС и может быть принято $\varphi_e = 0,907...0,785$.

Для армирования используют стержни диаметром d , коэффициент армирования их волокном определим из отношения площади, занимаемой волокном, к общей площади сечения стержня как

$$\varphi_{cm} = \frac{4T_x \cdot n \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot d^2 \rho} \quad (2)$$

При выполнении расчетов сделано допущение, что форма жгутов в сечении, перпендикулярном армирующим волокнам, при намотке – прямоугольник, а при плетении – эллипс. Расположение волокон в сечениях представлено на рис. 1.

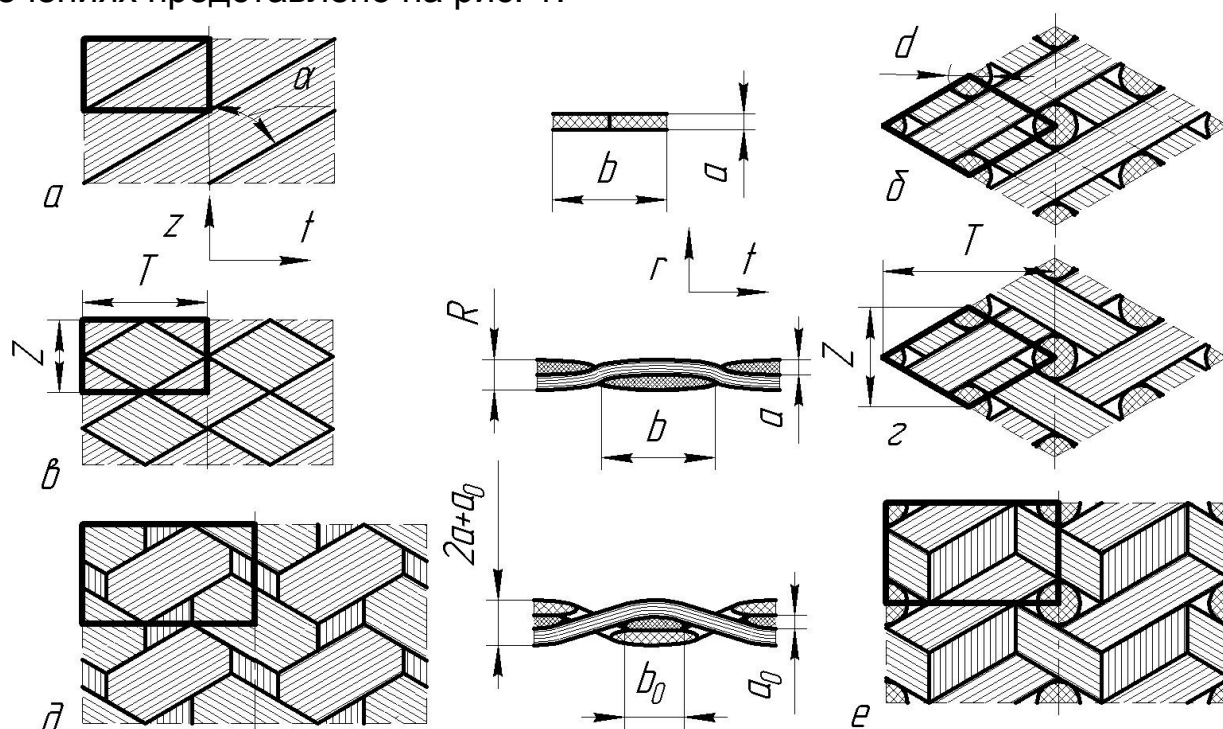


Рисунок 1 – Повторяющиеся элементы структур со спиральным расположением волокон

Наиболее простой схемой армирования является намотка (рис. 1, а), параметры представительного элемента и коэффициенты армирования зависят только от угла армирования и могут быть определены по зависимостям

$$\begin{aligned} Z &= b / \sin \alpha; & T &= b / \cos \alpha; & R &= a; \\ \varphi_z &= \varphi_e \cos \alpha; & \varphi_t &= \varphi_e \sin \alpha; & \varphi_r &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_z , φ_t , φ_r – коэффициенты армирования соответственно в осевом, тангенциальном и радиальном направлениях.

При намотке на оправку с радиально закрепленными стержнями получим повторяющийся элемент в виде ромба, представленный на рис. 1, б, на основании анализа которого получим зависимости:

$$\begin{aligned} Z &= b + d / \sin \alpha; & T &= b + d / \cos \alpha; & R &= a; \\ \varphi_z &= \varphi_{\text{в}} \frac{b}{b+d} \cos \alpha; & \varphi_t &= \varphi_{\text{в}} \frac{b}{b+d} \sin \alpha; & \varphi_r &= \varphi_{\text{см}} \frac{\pi d^2 \sin 2\alpha}{4(b+d)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты армирования при плетении проанализируем на прямоугольном повторяющемся элементе (рис. 1, в). Рассмотрим 2D-плетение:

$$\begin{aligned} Z &= b / \sin \alpha; & T &= b / \cos \alpha; & R &= 2a; \\ \varphi_z &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi}{4} \cos \alpha; & \varphi_t &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi}{4} \sin \alpha; & \varphi_r &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi a}{b} \sin \alpha \cos \alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

При пропуске осевой арматуры между переплетениями жгутов получим 3D-плетение (рис. 1, г), параметры которого:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{b}{\sin \alpha} + \frac{b_0}{\operatorname{tg} \alpha}; & T &= \frac{b}{\cos \alpha} + b_0; & R &= 2a + a_0; \\ \varphi_z &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi(a_0 b_0 + ab \cos \alpha)}{2(a_0 + 2a)T}; & \varphi_t &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi ab \sin \alpha}{2(a_0 + 2a)Z}; & \varphi_r &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi ab}{Z^2 \operatorname{tg} \alpha}, \end{aligned} \quad (6)$$

где a_0, b_0 – параметры сечения осевых жгутов.

Для плетения с радиальными стержнями получим аналогичные зависимости: для 2D-плетения со стержнями (рис. 1, д):

$$\begin{aligned} Z &= (b+d) / \sin \alpha; & T &= (b+d) / \cos \alpha; & R &= 2a; \\ \varphi_z &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi b}{4(b+d)} \cos \alpha; & \varphi_t &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi b}{4(b+d)} \sin \alpha; \\ \varphi_r &= \varphi_{\text{см}} \frac{\pi \sin 2\alpha}{4(b+d)^2} (\varphi_{\text{см}} d^2 + 2\varphi_{\text{в}} ab); \end{aligned} \quad (7)$$

для 3D-плетения со стержнями (рис. 1, е):

$$\begin{aligned} Z &= T / \operatorname{tg} \alpha; & T &= b_0 + \frac{c}{\cos \alpha}; & R &= 2a + a_0; \\ \varphi_z &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi(a_0 b_0 + 2ab \cos \alpha)}{4(2a + a_0)T}; & \varphi_t &= \varphi_{\text{в}} \frac{\pi ab \sin \alpha}{2(2a + a_0)Z}; \\ \varphi_r &= \frac{\pi \operatorname{tg} \alpha}{4T^2} (\varphi_{\text{см}} d^2 + 4\varphi_{\text{в}} ab), \end{aligned} \quad (8)$$

где c – большее из b_0 и d .

Результаты расчетов по формулам (3) - (8) представлены на рис. 2, верхние индексы соответствуют обозначению разверток повторяющихся элементов на рис. 1.

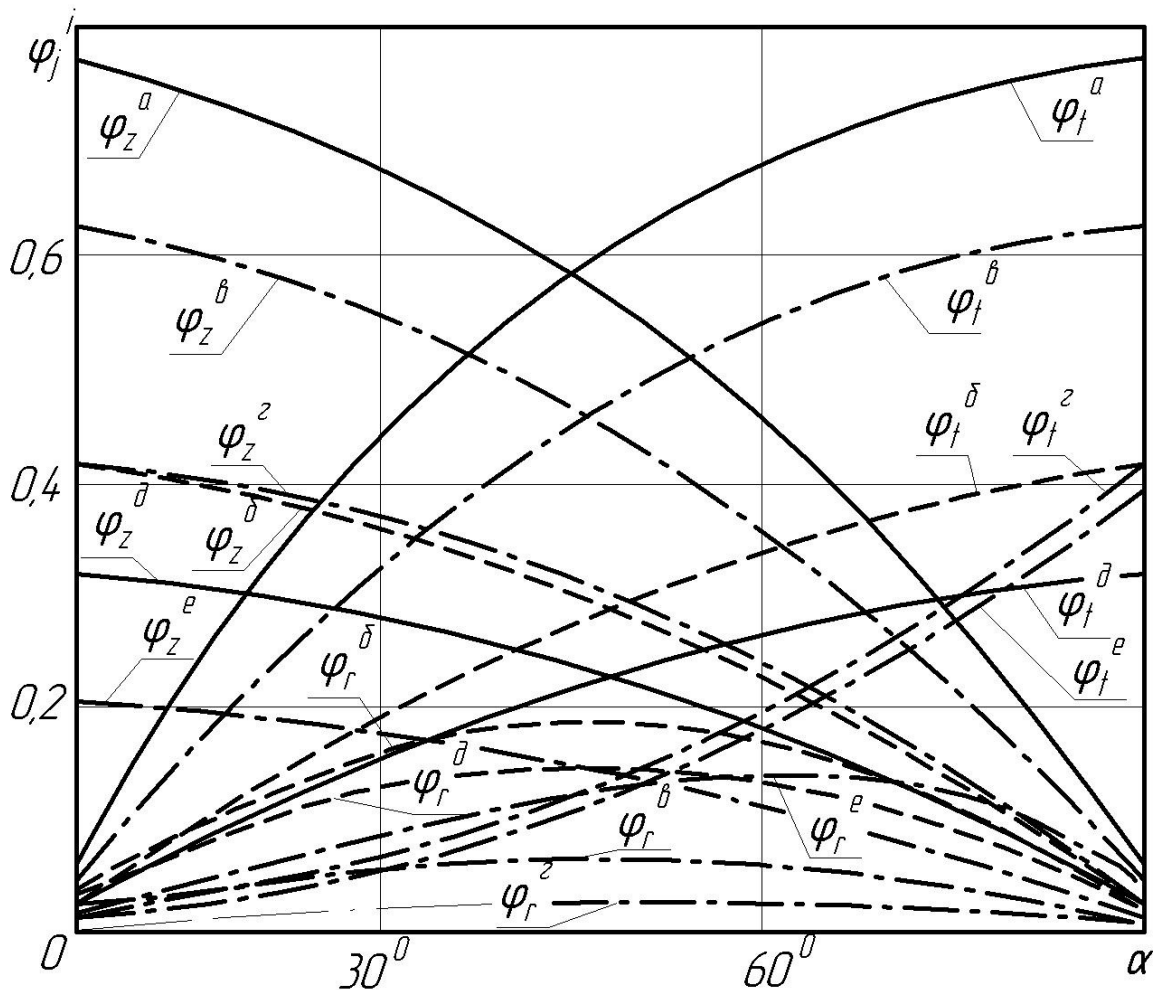


Рисунок 2 – Коэффициенты армирования в осевом z, радиальном r и тангенциальном t направлениях от угла укладки жгутов α

Коэффициенты армирования стержневых ПАС

Для изготовления АК используются стержни круглого сечения. Диаметры вертикальных (d_z) и горизонтальных (d) стержней полагали различными. Рассматривались структуры с плотной упаковкой, т.е. шаг расстановки стержней равен сумме диаметров соответствующих стержней.

Для расчета параметров ПАС 3D, 4D, 4D-л и 5D-л были выделены повторяющиеся элементы, представленные на рис. 3, а - г, соответственно.

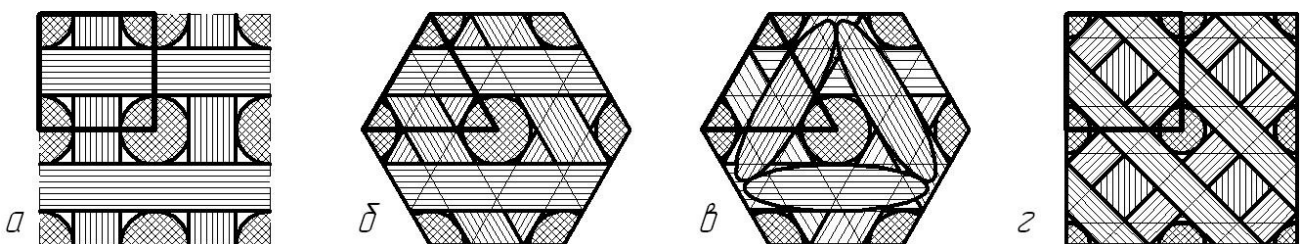


Рисунок 3 – Повторяющиеся элементы стержневых ПАС

Анализируя ПАС 3D, на основании выделенного повторяющегося элемента в виде прямоугольника определим его параметры:

$$Z = 2d; \quad X = Y = d + d_z; \quad (9)$$

$$\varphi_z = \varphi_{cm} \frac{\pi d^2}{4(d + d_z)^2}; \quad \varphi_x = \varphi_y = \varphi_{cm} \frac{\pi d^2}{4(d + d_z)^2},$$

где Z, X, Y – размеры выделенного элемента в направлении осей x, y, z ;
 $\varphi_z, \varphi_x, \varphi_y$ – коэффициенты армирования по направлениям x, y, z .

Для определения коэффициентов армирования ПАС в произвольной плоскости получена зависимость

$$\varphi = \varphi_z \cos \theta + \varphi_x (\sin \xi + \cos \xi) \sin \theta, \quad (10)$$

где θ, ξ – соответственно углы между осями z, x и рассматриваемой плоскостью.

Аналогичные зависимости для ПАС 4D-л с повторяющимся элементом в виде равностороннего треугольника:

$$Z = 3d; \quad X = Y = d + d_z; \quad (11)$$

$$\varphi_z = \varphi_{cm} \frac{\pi d^2 \sqrt{3}}{8(d + d_z)^2}; \quad \varphi_x = \varphi_{cm} \frac{\pi d}{6(d + d_z)}; \quad \varphi_y = \varphi_{cm} \frac{\pi d \cos 30^\circ}{6(d + d_z)};$$

$$\varphi = \varphi_z \cos \theta + \pi d \varphi_{cm} \frac{\cos \xi + |\cos(\xi + 60^\circ)| + |\sin(\xi + 30^\circ)|}{12(d + d_z)} \sin \theta.$$

Структура 4D не имеет параллельных плоскостей армирования, все стержни расположены под углом $70,5^\circ$ друг к другу:

$$Z = 3d; \quad X = Y = d + d_z; \quad (12)$$

$$\varphi_z = \varphi_{cm} \frac{\pi \sqrt{3}}{8(d + d_z)^2} (d^2 + 2d^2 \cos 70,5^\circ); \quad \varphi_x = \varphi_{cm} \frac{\pi d \sin 70,5^\circ}{8(d + d_z)};$$

$$\varphi = \varphi_z \cos \theta + \pi d \varphi_{cm} \frac{\cos \xi + |\cos(\xi + 60^\circ)| + |\sin(\xi + 30^\circ)|}{12(d + d_z)} \sin(\theta + 70,5^\circ).$$

Повторяющимся элементом структуры 5D-л является квадрат, при этом в горизонтальной плоскости используются стержни основного d и дополнительного d_∂ диаметров:

$$Z = 2d + 2d_\partial; \quad X = Y = d + d_z; \quad d_\partial = 0,5(d - d_z); \quad (13)$$

$$\varphi_z = \varphi_{cm} \frac{\pi d^2}{4(d + d_z)^2}; \quad \varphi_x = \varphi_{cm} \frac{\pi (d^2 + 2d_\partial \cos 45^\circ)}{8(d + d_z)(d + d_\partial)};$$

$$\varphi = \varphi_z \cos \theta + \pi \varphi_{cm} \frac{d^2 (\cos \xi + \sin \xi) + d_\partial (|\cos(\xi + 45^\circ)| + |\sin(\xi + 45^\circ)|)}{8(d + d_z)(d + d_\partial)} \sin \theta.$$

По полученным зависимостям (9) - (13) определены коэффициенты армирования ПАС при повороте плоскости сечения на углы θ и ξ , результаты представлены на рис. 4.

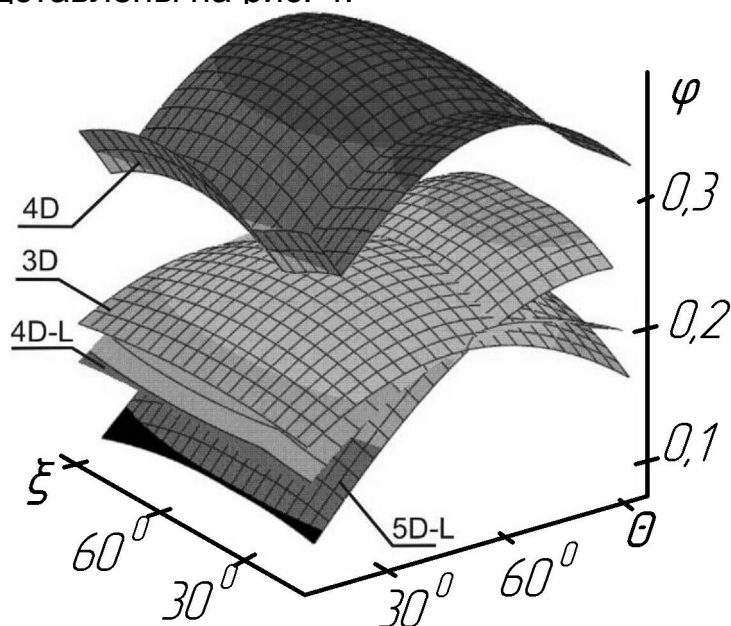


Рисунок 4 – Изменение коэффициентов армирования при повороте плоскости сечения

Графики на рис. 4 наглядно подтверждают, что наибольшие коэффициенты армирования у ПАС 4D, близкие параметры, но с различной зависимостью от угла поворота секущей плоскости, имеют ПАС 3D и 4D-л, а у ПАС 5D-л значительно изменяются коэффициенты армирования при повороте секущей плоскости.

Список использованных источников

1. Крегерс А.Ф. Предельные значения коэффициентов армирования волокнистых композитов с пространственной структурой / А.Ф. Крегерс, Ю.Г. Зилауц // Механика композиционных материалов. – № 5. 1984. – С. 784-790.

2. Чесноков А.В. Исследование влияния технологических параметров плетения на структуру поверхностного слоя / А.В. Чесноков // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»: – Вып. 3 (50). – Х., 2008. – С. 37-40.

3. Чесноков А.В. Определение рациональной схемы армирования углерод-углеродного композиционного материала по основным критериям / А.В. Чесноков, В.В. Чесноков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»: – Вып. 1 (48). – Х., 2007. – С. 80-85.

Поступила в редакцию 23.06.09.

*Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский
УкрНИИТМ, г. Днепропетровск*