

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ МНОГОМЕРНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПРЕФОРМ

Развитие техники требует создания материалов с заранее определенными свойствами. Наиболее актуальна эта проблема при разработке материалов, используемых в конструкциях летательных аппаратов. Одной из областей широкого и эффективного применения композиционных материалов (КМ) является использование их в элементах конструкций летательных аппаратов, испытывающих при эксплуатации высокие термомеханические нагрузки. Анализ температурных границ использования конструкционных КМ [1, 2], работающих в указанных условиях, является углерод-углеродный КМ (УУКМ) на основе пространственных преформ. Пространственное армирование резко повышает сопротивление этих материалов к воздействию нестационарных температурных напряжений и абляционную стойкость, а использование стержневых преформ с прямолинейным расположением волокнистого наполнителя делает уровень физико-механических свойств материала наиболее высоким. Варьирование пространственного расположения волокнистого наполнителя является эффективным инструментом в управлении анизотропии свойств УУКМ.

В настоящее время разработан ряд УУКМ, отличающихся друг от друга схемами армирования и методами их реализации, а также созданием углеродной матрицы. Наибольший интерес представляют материалы на основе преформ 3D-, 4D-, 4D-л структур (рис.1).

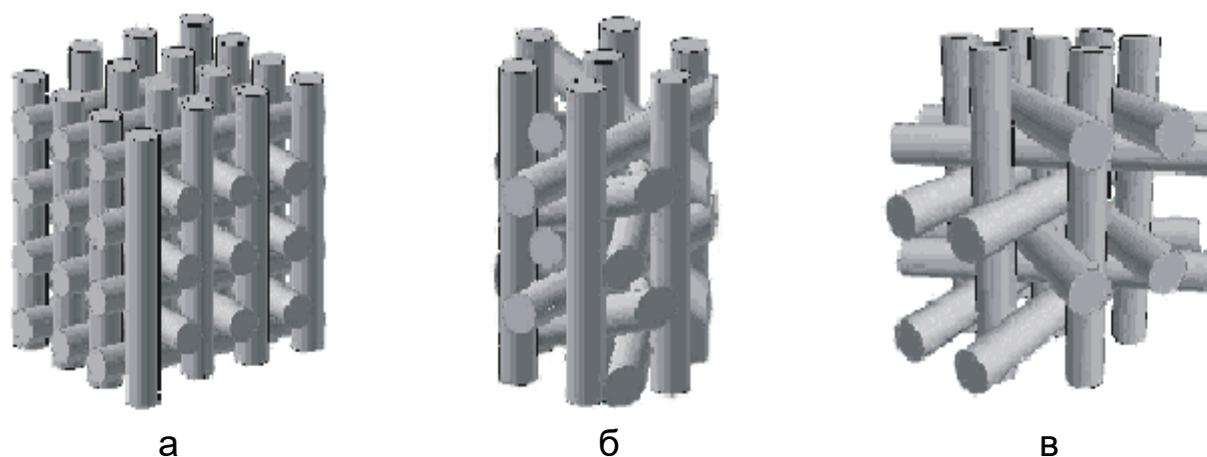


Рисунок 1 – Схемы армирования преформ:  
а – структура 3D; б – структура 4D; в – структура 4D-л

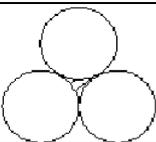
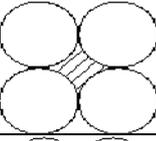
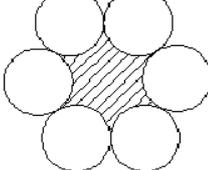
Свойства УУКМ зависят во многом и от параметров зернистости и наполнения материала волокном. Прогнозирование свойств преформ,

возможности их изготовления, трудоемкости и стабильности выполнения операций сборки преформ является актуальной задачей.

Для изготовления стержневых преформ серийно применяются стержни круглого сечения, получаемые методом пултрузии. В качестве связующего материала применяют поливиниловый спирт (ПВС). В зависимости от марки углеродного жгута (или количества сложений) традиционно применяются следующие типоразмеры стержней – 0,7 мм (УКН-5000 или два сложения UMATEX 3k); 0,9 мм (два сложения УКН-5000 или UMATEX 12k); 1,2 мм (три сложения УКН-5000). Диаметр применяемых стержней определяет зернистость получаемой структуры и трудоемкость изготовления преформы.

Проанализируем возможность повышения наполнения стержня волокном за счет снижения диаметра на примере стержней диаметром 0,7 мм из двух сложений UMATEX 3k. Линейная плотность жгута UMATEX 3k – 180 текс, объемная плотность – 1,77 г/см<sup>3</sup>, 3 тыс. филамент. Анализируя снимки сечения стержней на сканирующем электронном микроскопе [3] можно сделать заключение, что филаменты имеют близкую к круглой форму сечения, близкого диаметра. Если принять допущение, что филаменты круглые и равного диаметра, получим расчетный диаметр филаменты 6,57 мкм. В работе [4] приведен расчет пористости при различных схемах укладки филамент. Спрогнозируем минимальный диаметр стержня, если предположить, что в стержне именно по такой схеме располагаются филаменты, результат приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Минимальный диаметр стержня и пористость для различных схем укладки филамент

Наименование укладки	Схема укладки	Пористость, %	Диаметр стержня, мм
Тригональная		9,4	0,532
Квадрогональная		21,5	0,561
Гексагональная		39,6	0,6
«Серийный»		89,2	0,7

Анализируя приведенные в табл. 1 результаты, видим, что серийно изготавливаемый стержень имеет около 90% пористости, технологически достижимым представляется диаметр 0,6 мм.

Для определения линейной плотности стержня было взвешено 200 м стержня, полученная линейная плотность 392,25 текс. Соответственно содержание ПВС в стержне 32,25 текс. Зная плотность ПВС 1,19 гр/см<sup>3</sup> определим, что ПВС занимает 13,3 % от площади углеродных филамент. Результат подтверждает достижимость текущих параметров стержня по наполнению волокном при квадроугольном и гексагональном расположении филамент.

Для определения диаметра серийных стержней на пултрузионную установку устанавливался оптический микрометр LSten-7/50-485-14-2. Измерения проводились по трем потокам в трех плоскостях на каждом, по 1 часу с интервалом автоматической фиксации значений 1 с, значения по потокам отличаются не существенно. Полученное среднее значение диаметра стержня составило 0,7088 мм, минимальное 0,6453 мм, максимальное 0,7971 мм. Полученные результаты свидетельствуют о недостаточной стабильности процесса и широком разбросе значений вызванных возникновением эллипсности сечения стержня.

Учитывая сложность определения плотности преформ [5] прямым взвешиванием и измерением объема, предлагается метод прогнозирования. Для определения плотности каркаса, зависящей от схемы армирования, в каждой из предложенных структур выделим повторяющийся элемент. Расчетные схемы повторяющегося элемента преформы 3D- и 4D-л структур, представлены на рисунках 2 а, б соответственно, пунктиром.

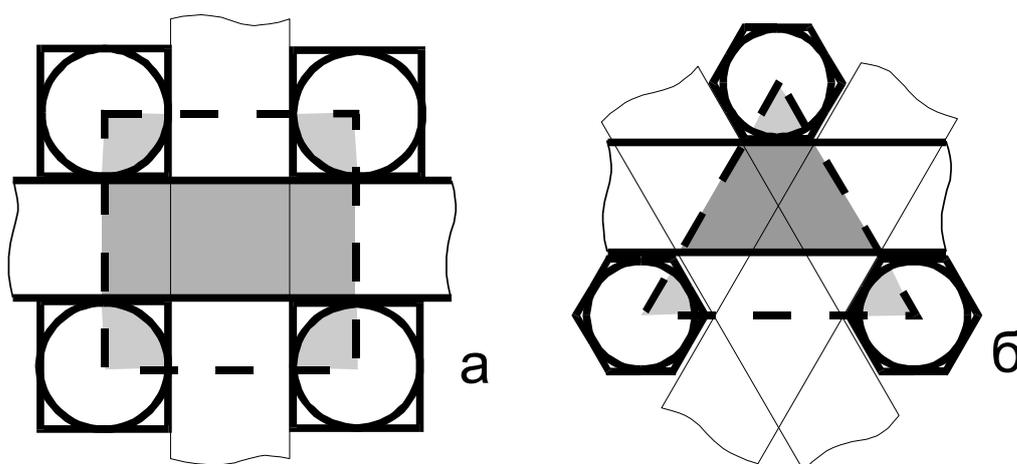


Рисунок 2 – Расчетные схемы повторяющегося элемента преформы  
 ■ - стержни вертикального направления, ■ - стержни горизонтального направления, □ - пустоты

Толщина  $h_c$  выделенного повторяющегося элемента во всех структурах равна шагу слоев. Шаг вертикальных стержней в направлении, перпендикулярном к подаче стержней обозначен  $h_z$ . Шаг вертикальных стержней  $h_z$  рекомендуется не менее среднего диаметра применяемых стержней и определяется расположением отверстий на направляющих плитах. Шаг слоев за счет повышения усилия опрессовки слоев может быть меньше диаметра применяемых стержней, так как он варьируется в небольших пределах, для расчетов примем  $h_z = 2h_c$

Плотность преформы определим как отношение веса стержней в выделенном объеме ко всему выделенному объему для каждой структуры. Дополнительно пересчитаем изменение выделенных ячеек, если перейти на применение стержней оптимальной формы, сохранив параметры наполнения стержня волокном и его линейную плотность. Результаты расчета плотности каркасов  $\rho$  и плотности каркасов без ПВС  $\rho'$  приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчета плотности каркасов  $\rho$  и плотности каркасов без ПВС  $\rho'$

$h_z$ , см	0,12	0,13	0,14	0,15
$h_c$ , см	0,06	0,065	0,07	0,075
4Д-л круглый стержень				
$\rho$ , гр/см <sup>3</sup>	0,944	0,804	0,693	0,604
$\rho'$ , гр/см <sup>3</sup>	0,866	0,738	0,636	0,554
3Д- круглый стержень				
$\rho$ , гр/см <sup>3</sup>	0,817	0,696	0,600	0,523
$\rho'$ , гр/см <sup>3</sup>	0,750	0,639	0,551	0,480
4Д-л оптимальный (вертикальные – шестигранник, горизонтальные - квадрат) стержень				
$\rho$ , гр/см <sup>3</sup>	1,215	1,036	0,893	0,778
$\rho'$ , гр/см <sup>3</sup>	1,116	0,951	0,820	0,714
3Д- квадратный стержень				
$\rho$ , гр/см <sup>3</sup>	1,040	0,887	0,764	0,666
$\rho'$ , гр/см <sup>3</sup>	0,955	0,814	0,702	0,611

### Выводы

Выделены основные виды преформ и для них определены параметры повторяющихся элементов. Обоснована возможность

технологического снижения диаметра изготавливаемых стержней. Предложена методика прогнозирования плотности преформ и определения плотности полученных преформ по параметрам направляющих плит для сборки и полученному шагу горизонтальных слоев. Показано, что применяемая плотность преформ в  $0,6 \text{ г/см}^3$  может быть вдвое увеличена при применении профильных стержней предельной плотности.

#### **Список использованных источников**

1. Fitzer E., Manocha L. Carbon Reinforcements and Carbon-Carbon Composites // Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998. - 342 p.
2. Тишина У.А., Теплофизические характеристики композиционных материалов типа углерод-углерод / У.А. Тишина, Г.И. Курневич, Н.П. Радимов // Прикладная химия. – 1990. – №7. – С. 1544-1550.
3. Разработка и исследование трехмерно-армированных углепластиков на основе стержневых структур наполнителя : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Гареев Артур Радикович. – Москва, 2015. - 22 с.
4. Tamayol, A., & Bahrami, M. (2009). Analytical determination of viscous permeability of fibrous porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer, 52(9-10), 2407-2414.
5. Ряшенцев М.С. Определение кажущейся и истинной плотностей углерод-углеродных композиционных материалов и конструкционных графитов // М.С. Ряшенцев, С.А. Колесников. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т.82, №7. – С. 43-44.

*Поступила в редакцию 16.01.2018.*

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