

Чесноков А.В.

АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРКИ СТЕРЖНЕВЫХ АРМИРУЮЩИХ СТРУКТУР 4D ДЛЯ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наведено аналіз двох способів складання стержневих просторових армуючих структур (ПАС) для вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів теплозахисного призначення. Виявлено особливості складання ПАС 4D щодо ПАС 3D і 4D-л, які отримали промислове застосування. Визначено умови взаємодії стержнів при складанні і силові параметри їхньої взаємодії. Запропоновано конструкцію установки складання ПАС 4D для розглянутих способів і технологічні параметри складання. Визначено вплив кроку розташування стержнів на зміну об'ємної частці волокна в ПАС для основних схем армування. Рис. 4. Джерел 5.

Ключові слова: вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, просторова армуюча структура, 4D армування.

Наиболее перспективным видом армирования углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) теплозащитного назначения является многонаправленное, пространственное армирование, когда армирующие волокна располагаются в трех, четырех и более направлениях. Широко применяются материалы на основе 3D и 4D-л пространственных армирующих структур (ПАС), собранных из предварительно изготовленных стержней. Процесс изготовления указанных структур хорошо изучен и подробно изложен в работе [1]. ПАС 3D имеет закрытую пористость, поэтому достигнуть высокой степени насыщения углеродом матрицы невозможно. ПАС 4D-л имеет три направления армирования в параллельных плоскостях, что существенно снижает анизотропию свойств материала. Наиболее перспективным является материал на основе ПАС 4D, в котором армирующие волокна расположены по четырем диагоналям куба. Промышленное применение ПАС 4D сдерживается сложностью и неизученностью процесса сборки. Предпосылками для освоения серийного производства ПАС 4D является повышение качества применяемых стержней [1] и универсальность разработанной оснастки [2] для изготовления ПАС 4D-л.

Целью работы является определение технологических закономерностей сборки ПАС 4D для разработки методики расчета параметров оборудованию автоматизированной сборки.

Известно две принципиально отличающиеся схемы сборки [3] ПАС 4D. При первой схеме (с1) (рис. 1, а) стержни одной группы устанавливаются в направляющую плиту в вертикальном направлении. Стержни трех других направлений размещаются между стержнями вертикального направления параллельными слоями. При второй схеме (с2) (рис. 1, б) направление сборки (ось ПАС) находится под углом $54,7^{\circ}$ ко всем группам стержней. Процесс сборки может выполняться непрерывно. Стержни устанавливаются послойно с четырех сторон.

ПАС 4D(с1) имеет высоту, равную длине стержней первой группы, с не полностью заполненной областью стержнями с нижней и верхней сторона на величину h_1 . Аналогично незаполненную область имеют и ПАС 4D(с2) на величину h_2 . Величины h_1 и h_2 , учитывая диаметр каркаса D , определяются как:

$$h_1 = D \operatorname{ctg} 70,5^{\circ}; \quad h_2 = D \operatorname{ctg} 54,7^{\circ}.$$

Рассмотрим процесс взаимодействия стержней при сборке ПАС 4D. При сборке по первой и второй схеме устанавливаемый стержень вводится в просвет между рядами стержней других направлений и взаимодействует с ними. При наличии натяга в сопряжении стержней он компенсируется лишь за счет деформации сечения стержней, так как изгиб оси стержня ограничен стержнями других направлений. Стержни размещаются с шагом t (рис. 2) и соответствуют заданной плотности ПАС. Для сборки ПАС 4D применяются стержни равного диаметра d .

Характер взаимодействия стержней зависит от соотношения диаметров сопрягаемых стержней и шага их размещения, измеренного перпендикулярно подаваемому стержню, и может быть определено зависимостью:

$$\Delta_D = d - 0,5t.$$

При $\Delta_D < 0$ стержни сопрягаются с зазором, а при $\Delta_D > 0$ – с натягом. Сопряжение с зазором осуществляется без силового взаимодействия стержней, а с натягом приводит к деформации стержней на величину Δ_D и возникновению силового взаимодействия P_i . Величину контактной деформации стержней Δ_D определим, сделав следующие допущения:

- материалы соприкасающихся тел однородны и изотропны;
- деформации тел упругие, подчиняющиеся закону Гука;
- площадки контакта весьма малы по сравнению с общими поверхностями соприкасающихся тел, силы взаимодействия нормальны к поверхности контакта тел;
- силами трения по площадке контакта пренебрегают.

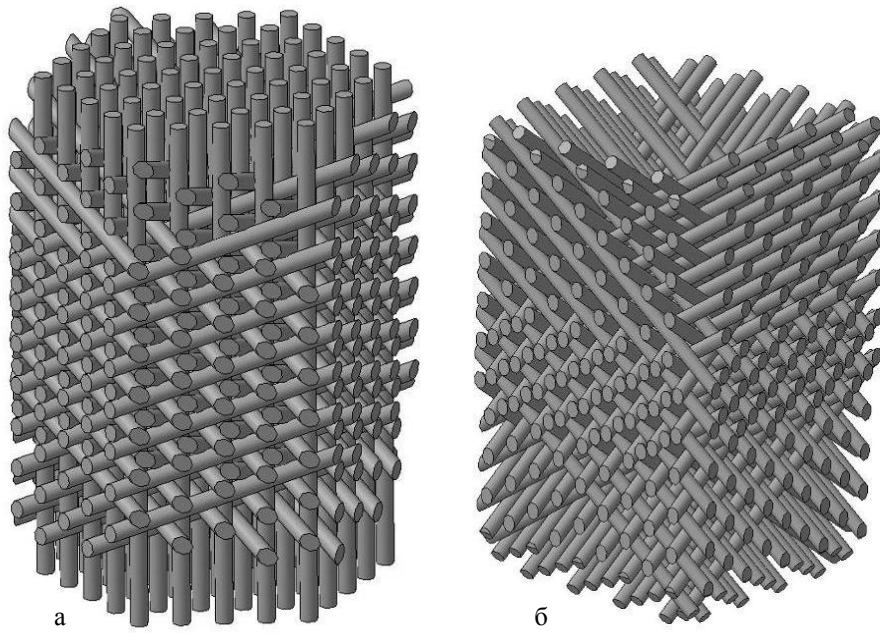


Рис. 1. ПАС 4D

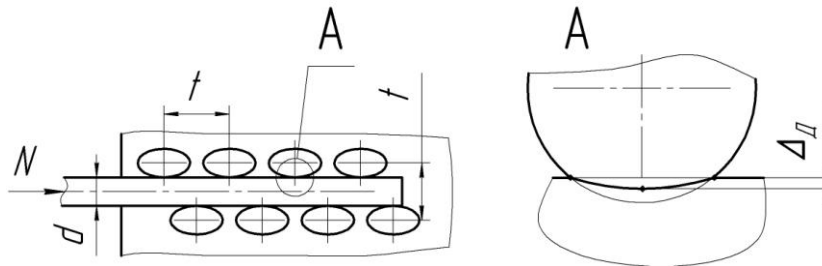


Рис. 2. Схема внедрения стержня в ПАС

Сближение стержней в результате контактных деформаций составит Δ_D , форма поверхности контакта эллипс с диагоналями a и b . Давление стержней друг на друга представляет собой эллипсоид с максимальным давлением в середине $p_0 = \frac{3 P_i}{2 ab}$, т.е. превышает среднее в 1,5 раза. Воспользуемся формулой для определения деформации, полученной в работе [4]:

$$\Delta_D = n_\delta \frac{1}{2} \sqrt{\frac{9}{4} \eta^2 \sum k P_i^2},$$

где $\eta = \frac{2(1-\mu^2)}{E}$ – при касании тел из одинакового материала;

n_δ – коэффициент, зависящий от соотношения диагоналей эллипса a, b ; при рассматриваемом контакте $n_\delta=1$;

$\sum k$ – сумма кривизны соприкасающихся поверхностей.

Применительно к рассматриваемым условиям сила сопротивления движению стержня в месте контакта равна:

$$N_i = \frac{2E\Delta_D^{2/3}f}{3(1-\mu^2)},$$

где f – коэффициент трения стержень по стержню.

Сила сопротивления движению стержня прямо пропорциональна глубине внедрения и параметрам сопряжения стержней. Учитывая вероятностный характер параметров сопряжения, зависящий от диаметра и эллипсности стержней в конкретном сопряжении, на рис. 3 представим идеализированные условия взаимодействия, в которых показано, как будет изменяться усилие внедрения стержня N в ПАС от глубины l его проникновения в каркас для различных условий сопряжения стержней. В качестве исходных данных использованы наиболее распространенные параметры сборки $d=1,22\dots1,225$ мм, $t=2,44$, $E_{в пр}=1,2 \cdot 10^3$ МПа, $\mu=0,3$, $f=0,7$.

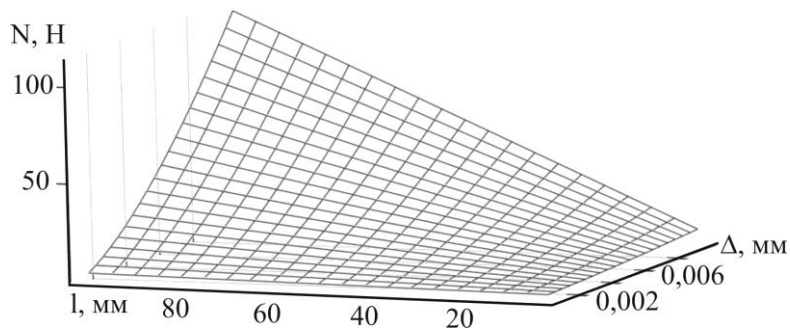


Рис. 3. Изменение силы сопротивления движению стержня

Полученные значения усилий сопротивления движению стержня (рис.3) показывают недопустимость применения плотности каркаса, вызываемой натягом в сопряжении стержней.

Кинематическая схема установки автоматизированной сборки ПАС 4D может принципиально не отличаться от аналогичной для сборки ПАС 4D-л [2]. Для возможности укладки слоев под углом к оси ПАС стол сборочной установки должен иметь наклон к плоскости перемещения подающего устройства $19,5^{\circ}$ и $35,3^{\circ}$ соответственно для ПАС 4D(c1) и ПАС 4D(c2).

Сложное взаимное положение стержней в ПАС 4D не дает возможности опрессовки слоев и в начальный период сборки требует наличия боковых направляющих, обеспечивающих заданное положение стержней в ПАС.

Основные модули программного обеспечения управления установкой могут быть использованы с внесением корректив в расчетные зависимости.

Определим шаг смещения подающего устройства при сборке ПАС 4D(c1) (рис. 1, а). Система координат установки находится на оси каркаса [1]. Расположение отверстий в плите задается таким образом, чтобы ось центрального стержня совпадала с осью ПАС. Для укладки i -го стержня шаг смещения подающего устройства определяется из геометрических построений:

$$y_i = (0,5n_i - i \pm 0,5) \cdot 2t$$

$$x_i = \sqrt{0,25(D+b)^2 - y_i^2},$$

где n_i – количество стержней в слое;

b – ширина направляющей подающего устройства;

+ для четных слоев, - для нечетных слоев.

Длина стержня изменяется от ячейки к ячейке. Длина i -го стержня определится из зависимости:

$$l_i = \frac{2x_i}{\cos 19,5^{\circ}}.$$

При сборке ПАС 4D(c2) квадратного сечения (рис. 1, б) перемещения по оси x выполняют лишь для подвода и отвода подающего устройства. Начало системы координат располагается в середине, между стержнями. По оси y перемещения определяются аналогично ПАС 4D(c1) со смещением на половину шага:

$$y_i = (0,5n_i - i \pm 0,5) \cdot 2t + 0,5t.$$

Длина подаваемого стержня постоянна и равна $l = \frac{2x}{\cos 35,3^{\circ}}$.

По окончании укладки слоя стержней ПАС поворачивается на угол 90° для укладки следующего слоя стержней и корректируется высота подачи стержня. Процесс повторяется до набора необходимой высоты каркаса.

Определим зависимость наполнения объема каркаса углеродным волокном в зависимости от ПАС и шага укладки стержней. Шаг укладки стержней является важным технологическим параметром, как было сказано, существенно влияющий на усилия сборки и соответственно на стабильность процесса сборки ПАС. В свою очередь, наполнение каркаса углеродным волокном определяет эксплуатационные свойства УУКМ, с повышением которого улучшаются характеристики УУКМ. Объемную долю, занимаемую волокном в ПАС, можно определить по методике, изложенной в [5] по зависимости:

$$\Theta = k_1 k_2 k_3,$$

где k_1 – коэффициент заполнения объема ПАС волокном при использовании стержней оптимального сечения, зависящий от ПАС;

k_2 – коэффициент заполнения объема ПАС волокном, зависящий от отклонения сечения стержня от оптимального, учитывает переход от оптимального сечения к круглому сечению стержня;

$$k_3 - \text{коэффициент наполнения стержня волокном } k_3 = \frac{4T_x \cdot n \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot d^2 \rho_B},$$

где T_x - линейная плотность жгута, вес 1 км жгута; ρ_B - плотность волокна; d - приведенный диаметр стержня, принятый равным половине шага установки стержней.

На рис. 4 показано изменение объемной доли волокна Θ в ПАС в зависимости от шага укладки стержней из волокна УКН-5000 в три сложения - $T_x=390$ гр/км, $\rho_B=1,7 \cdot 10^{-3}$ гр/мм³, $d=1.2 \dots 1,4$ мм.

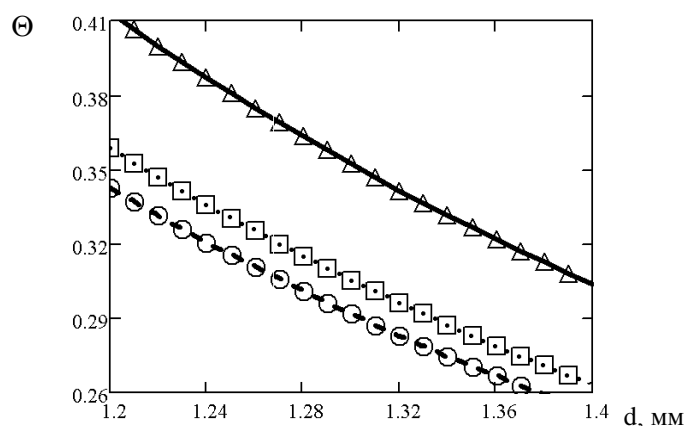


Рис. 4. Изменение объемной доли волокна в ПАС в зависимости от шага укладки стержней
 Δ – ПАС 4D; \square – ПАС 3D; \circ – ПАС 4D-л

Выводы. ПАС 4D является наиболее перспективной для УУКМ, ее серийное производство возможно автоматизированными методами сборки. Для стабильного выполнения сборки недопустимо применение стержней, вызывающих натяг в сопряжении, так как это приводит к повышению усилий подачи стержня. Конструкция установки сборки и технологические параметры, а также отход материала зависят от применяемой схемы сборки, которая должна быть определена на основании требований к УУКМ.

Литература

1. Чесноков А. В. Основы технологической подготовки производства деталей из углерод-углеродных композиционных материалов с прямолинейными волокнами : моногр. / А. В. Чесноков. – Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2010. – 249 с.
2. Чесноков А.В. Модульный принцип проектирования оснастки для изготовления пространственных армирующих каркасов / А.В. Чесноков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(72). – Х., 2012. – С.
3. Композиционные материалы: справ. / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. ; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
4. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев и др. – Т. 2. – М.: Машгиз, 1958. – 975 с.
5. 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-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2007. – Вып. 1 (48). – С. 80–85.

Приведен анализ двух способов сборки стержневой пространственной армирующей структуры (ПАС) для углерод-углеродных композиционных материалов теплозащитного назначения. Выявлены особенности сборки ПАС 4D относительно ПАС 3D и 4D-л, получивших промышленное применение. Определены условия взаимодействия стержней при сборке и силовые параметры их взаимодействия. Предложена конструкция установки сборки ПАС 4D для рассматриваемых способов и технологические параметры сборки. Определено влияние шага расположения стержней на изменение объемной доли волокна в ПАС для основных схем армирования. Рис. 4. Ист. 5.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, пространственная армирующая структура, 4D армирование.

The analysis of two methods of assembling of the cored spatial reinforcing structure (SRS) is resulted for carbon-carbon composite of the heatcover setting. The features of assembling are exposed 4D SRS 3D and 4D-л, gettings industrial application relatively. The terms of co-operation of bars at assembling and power parameters of their co-operation are certain. The construction of setting of assembling is offered 4D SRS for the probed methods and technological parameters of assembling. Influence of step of location of bars is certain on the change of by volume stake of fibre in SRS for the basic charts of re-enforcement.

Keywords: carbon-carbon composite, spatial reinforcing structure, 4D re-enforcement.

Чесноков А.В. - докт.техн.наук, профессор кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга, ВНУ им. В.Даля

Рецензент: Витренко В.А. докт.техн.наук, профессор ВНУ им. В.Даля.