

УДК 539.319:678.027.94

А.В. ЧЕСНОКОВ

*Восточнoукраинский национальный университет им. В. Даля, Украина*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТЕРЖНЕЙ ПРИ СБОРКЕ АРМИРУЮЩИХ КАРКАСОВ

*Обоснована необходимость снижения длительности производственного цикла изготовления углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ). Снижение себестоимости изготовления УУКМ возможно за счет автоматизации наиболее трудоемких процессов сборки армирующих каркасов (АК). Проникновение стержня в АК проходит с сопротивлением вталкиванию из-за натяга в сопряжении, который компенсируется за счет деформации вертикальных стержней и контактных деформаций. Получены зависимости описывающие процессы деформации стержня. Из условия равенства усилий в области контакта определена зависимость, позволяющая определить усилие взаимодействия стержней. С помощью математического моделирования определено влияние высоты расположения направляющей плиты и величины натяга на усилие взаимодействия, а так же соотношение видов деформации. Сопоставление результатов определения усилия для способа подачи слоя стержней и одиночного стержня в АК, показал не приемлемость применения первого по причине увеличения усилия взаимодействия стержней в тысячи раз.*

**Ключевые слова:** *стержневой армирующий каркас, взаимодействие стержней, контактные деформации, углепластиковый стержень, изгиб стержня.*

### Состояние проблемы

Одним из путей улучшения эксплуатационных характеристик и снижения себестоимости изделий является повышение эффективности технологических процессов их изготовления за счет рациональной интенсификации, автоматизации и применения энергосберегающих технологий.

Создание конструкций современных летательных аппаратов, используемых в условиях высоких температур и повышенных термомеханических нагрузок, обусловило необходимость создания ряда новых материалов. Важное место среди них занимают углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), которые нашли широкое применение в высоконагруженных теплозащитных конструкциях [1]. Рациональное применение таких материалов позволяет существенно расширить ресурсы работоспособности конструкций, повысить их эффективность и экономичность [2].

Широкое внедрение УУКМ сдерживается длительностью производственного цикла их изготовления и высокой стоимостью. Технологические процессы создания углеродной матрицы хорошо изучены и автоматизированы. Снижение стоимости материала и длительности его изготовления планируется за счет сокращения отходов углеродного волокна на стадии подготовки материалов к переработке и изготовлении армирующих каркасов (АК), автоматизация указанных процессов позволит сократить сроки и трудоемкость изготовления материала.

Наиболее трудоемким является процесс сборки стержневых АК, длительность которого при сборке вручную достигает десятков часов. При автоматизированной сборке АК наиболее важным параметром стабильности процесса является отсутствие повреждений и поломок стержней в процессе сборки. Так как поломка горизонтального стержня приводит к остановке сборки для перезаправки и поднастройки оборудования, а поломка вертикального стержня может привести к выбраковке всего каркаса.

Стержни, поступающие на автоматизированную сборку, должны проходить входной контроль и иметь характеристики, удовлетворяющие требованиям сборки, как по прочности, так и по геометрическим параметрам (изогнутость оси, максимальный диаметр). Это позволит снизить вероятность поломки стержня при сборке и обеспечить стабильность силовых характеристик техпроцесса сборки.

Процессы сборки АК не имеют аналогов в производстве других деталей и материалов. В работе [3] с рядом допущений рассмотрен механизм нагружения стержней, но вопрос их взаимодействия не рассматривался. В работе [4] приведены результаты экспериментальных исследований усилий сборки АК, но не получена модель взаимодействия стержней, для раскрытия этой проблемы требуются дополнительные исследования.

Целью исследований являлось получение модели взаимодействия стержней и определение влияния параметров АК и диаметров стержней на усилия, возникающие при сборке.

### Условия взаимодействия стержней

Рассмотрим процесс взаимодействия стержней при сборке АК. На рис. 1 представлен вариант осуществления процесса сборки, вертикальные стержни установлены в отверстия сборочной плиты с шагом  $t$ , расположения отверстий соответствует собираемой структуре и заданной плотности каркаса. На расстоянии  $H_B$  находится направляющая плита с аналогичным расположением отверстий, удерживающая стержни от наклона и используемая для опрессовки слоя после укладки. Стержни горизонтального направления армирования подаются в просвет между рядами вертикальных стержней на высоте  $H_B/2$ . Для получения зависимостей взаимодействия между стержнями обозначим диаметры стержней  $d_B$  – вертикального и  $d_\Gamma$  – горизонтального стержней.

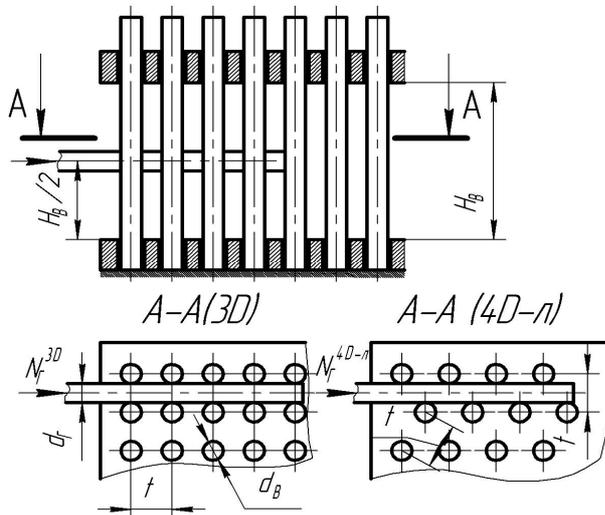


Рис. 1. Схема сборки АК и сопряжения стержней

Характер взаимодействия стержней зависит от соотношения диаметров сопрягаемых стержней и шага расположения вертикальных стержней, измеренного перпендикулярно подаваемому стержню, и может быть определен зависимостью:

$$\Delta = \frac{(d_B + d_\Gamma) - t}{2}. \quad (1)$$

При  $\Delta < 0$  стержни сопрягаются с зазором, а при  $\Delta > 0$  – с натягом. Сопряжение с зазором осуществляется без силового взаимодействия стержней, а с натягом приводит к деформации стержней на величину  $\Delta$  и возникновению силового взаимодействия. Обозначим силу взаимодействия стержней  $P_1$ . При подаче одиночного стержня общая деформация  $\Delta$  складывается из прогиба горизонтального  $\Delta_\Gamma$  и вертикального  $\Delta_B$  стержня, а так же деформации  $\Delta_D$  сечения стержней (рис. 2):

$$\Delta = \Delta_\Gamma + \Delta_B + \Delta_D. \quad (2)$$

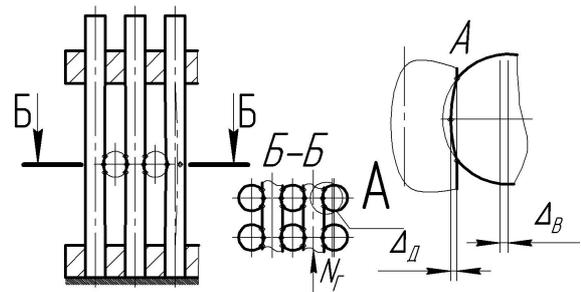


Рис. 2. Компенсация натяга в сопряжении за счет деформаций

Деформацией горизонтального стержня в АК структуры 4D-л можно пренебречь, так как длина пролета между опорами (вертикальными стержнями) намного меньше, чем у вертикальных стержней. В АК структуры 3D горизонтальный стержень контактирует одновременно с парой вертикальных стержней и его прогиба не происходит.

### Деформация вертикального стержня

Для определения прогиба вертикального стержня рассмотрим его как однонаправленный композиционный материал, существенной особенностью которого является малая сдвиговая жесткость, т.е. модуль упругости на растяжение вдоль волокон  $E$  и модуль сдвига  $G$  различаются на порядок [5]. Такое соотношение упругих констант делает необходимость учета сдвигов. Дополнительный прогиб вызывается поперечной силой при взаимном сдвиге смежных поперечных сечений относительно друг друга. В результате неравномерного распределения касательных напряжений поперечные сечения, прежде плоские, искривляются. Элементы поперечных сечений в центрах тяжести остаются вертикальными и скользят один по другому, в результате угол наклона касательной к изогнутой оси только от сдвига в каждом поперечном сечении равен относительному сдвигу в центре тяжести этого сечения.

Обозначив через  $\Delta_B^c$  прогиб вертикального стержня от сдвига, получим:

$$\Delta_B^c = \frac{3P_1 H_B}{4\pi d_B^2 G}. \quad (3)$$

Вертикальный стержень имеет опоры в направляющих плитах, так как длина направляющих больше диаметра, представим их как защемление и получим зависимость прогиба  $\Delta_B^п$ , вызванного только изгибающим моментом, как для балки с защемлениями по краям:

$$\Delta_B^п = \frac{5P_1 H_B^3}{6\pi d_B^4 E}. \quad (4)$$

Сложим составляющие прогиба (3) и (4), после преобразований получим:

$$\Delta_B = \frac{5P_1 H_B^3}{6\pi d_B^4 E} \left( 1 + \frac{9d_B^2 E}{2H_B^2 G} \right). \quad (5)$$

### Контактные деформации стержней

Определим величину контактной деформации стержней  $\Delta_D$ , 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.

Сближение тел в результате контактных деформаций составит  $\Delta_D$ , форма поверхности контакта для произвольного случая при  $d_B \neq d_\Gamma$  – эллипс с диагоналями  $a$  и  $b$ . Давление стержней друг на друга представляет собой эллипсоид с максимальным давлением в середине  $p_0 = \frac{3 P_1}{2 ab}$ , т.е. превышает среднее в 1,5 раза. Воспользуемся формулой для определения деформации полученной в работе [6]:

$$\Delta_D = n_\delta \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 \sum k P_1^2}, \quad (6)$$

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

$n_\delta$  – коэффициент, зависящий от соотношения диагоналей эллипса  $a, b$ ;

$\sum k$  – сумма величин кривизны соприкасающихся поверхностей.

Для определения табличного значения коэффициента  $n_\delta$  определим величину:

$$\Omega = \sqrt{\frac{(k_{11} - k_{12})^2 + (k_{21} - k_{22})^2}{k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22}}} + \sqrt{\frac{2(k_{11} - k_{12})(k_{21} - k_{22}) \cos 2\omega}{k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22}}}, \quad (7)$$

где  $k_{11}, k_{12}, k_{21}$  и  $k_{22}$  – соответственно главные кривизны соприкасающихся тел в месте контакта;

$\omega$  – угол между плоскостями кривизны  $k_{11}, k_{21}$ .

Для рассматриваемого контакта вертикального и горизонтального стержня с учетом, что

$k_{12} = k_{22} = 0$ , а  $k_{11}$  и  $k_{21}$  взаимно перпендикулярны, получим:

$$\Omega = \frac{d_B - d_\Gamma}{d_B + d_\Gamma}. \quad (8)$$

При  $d_B = d_\Gamma$   $n_\delta = 1$ .

Подставив в формулу (6) значения параметров и проведя ряд преобразований, получим:

$$\Delta_D = n_\delta \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{36(1-\mu^2)^2 (d_B + d_\Gamma)}{E^2 d_B d_\Gamma} P_1^2}. \quad (9)$$

### Определение силы взаимодействия стержней

Для определения силы взаимодействия стержней обозначим

$$k_1 = \frac{nd}{2} \sqrt[3]{\frac{36(1-\mu^2)^2 (d+d)}{E^2 dd}}; \quad (10)$$

$$k_2 = \frac{5H_B^3}{6\pi d^4 E} \left( 1 + \frac{9d^2 E}{2H_B G} \right).$$

В (2) подставим (5) и (9), с учетом обозначений (10) и решим полученное уравнение относительно  $P_1$ , из полученных решений только одно является действительным, которое и будем использовать для дальнейших расчетов:

$$P_1 = \frac{\frac{K_1^6}{9K_2^6} - \frac{2\Delta K_1^3}{3K_2^4}}{\sqrt[3]{\frac{\Delta^4 K_1^6}{4K_2^{10}} - \frac{\Delta^3 K_1^9}{27K_2^{12}} - \frac{K_1^9}{27K_2^9} + \frac{\Delta K_1^6}{3K_2^7} - \frac{\Delta^2 K_1^3}{2K_2^5}}} + \sqrt[3]{\frac{\Delta^4 K_1^6}{4K_2^{10}} - \frac{\Delta^3 K_1^9}{27K_2^{12}} - \frac{K_1^9}{27K_2^9} + \frac{\Delta K_1^6}{3K_2^7} - \frac{\Delta^2 K_1^3}{2K_2^5}} - \frac{k_1^3 - 3\Delta k_2^2}{3k_2^3}. \quad (11)$$

Для оценки влияния параметров технологического процесса натяга  $\Delta$  и высоты расположения направляющей плиты  $H_B$  на усилие взаимодействия стержней  $P_1$  произведем математическое моделирование.

В качестве исходных данных будем использовать наиболее распространенный типоразмер АК с параметрами:

$$d_B = d_\Gamma = 1,22 \dots 1,24 \text{ мм}, t = 2,44,$$

$$E = 5 \times 10^4 \text{ Па}, \mu = 0,3,$$

$$G = E/130, H_B = 5 \dots 30 \text{ мм}.$$

Результаты представлены в виде графика на рис. 3.

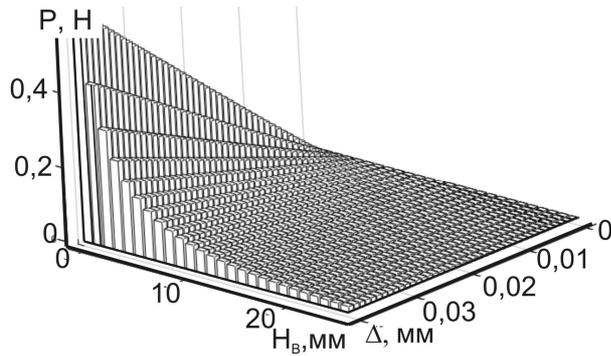


Рис. 3. Зависимость усилия взаимодействия стержней  $P_1$  от натяга  $\Delta$  и высоты  $H_B$

Для оценки распределения деформаций между изгибом  $\Delta_B$  и смятием  $\Delta_D$  построим их графическое сопоставление с использованием выше перечисленных параметров, результаты представим в виде графика рис. 4.

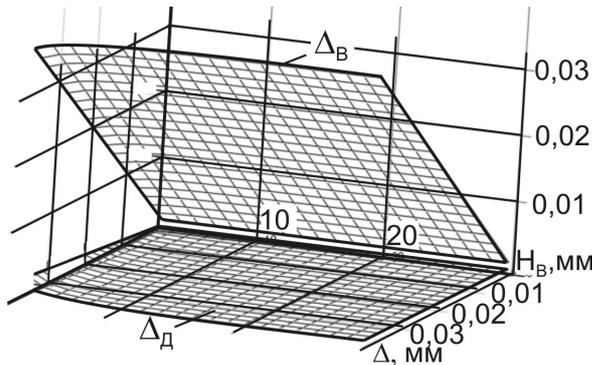


Рис. 4. Распределение деформаций между изгибом  $\Delta_B$  и смятием  $\Delta_D$  от натяга  $\Delta$  и высоты  $H_B$

Анализ графических результатов показывает, что при высоте гребенки свыше 10 мм натяг компенсируется за счет прогиба вертикального стержня и контактных деформаций практически не происходит даже при больших значениях натяга.

При одновременной подаче слоя горизонтальных стержней вертикальные стержни не имеют возможности деформироваться, так как этому препятствуют соседние горизонтальные стержни, при этом натяг компенсируется только смятием стержня  $\Delta = \Delta_D$ . Силу взаимодействия стержней получим из (9):

$$P_1^{\text{слой}} = \frac{E}{3(1-\mu^2)} \sqrt{\frac{\Delta^3 n_\delta^3 d_B d_\Gamma}{d_B + d_\Gamma}}. \quad (12)$$

Для сравнения усилий вталкивания при подаче единичного стержня и слоя с расчета на одно взаимодействие построим график соотношения этих усилий (рис. 5).

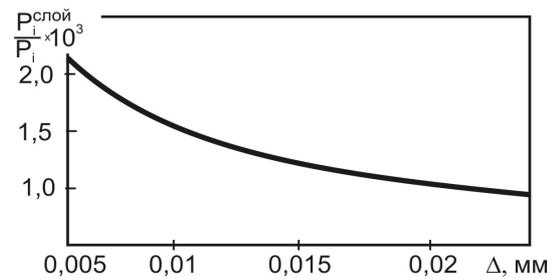


Рис. 5. Соотношение усилий вталкивания при подаче единичного стержня и слоя

Анализируя график можно сделать заключение о недопустимости применения подачи стержней слоем при наличии натяга в сопряжении стержней, так как сила увеличивается в тысячи раз.

Полученные результаты объясняют причину чрезвычайно высоких усилий при сборке АК, по принципу подачи слоя, приведенные в работе [7]. При таких усилиях взаимодействия стержней происходит их повреждение и остановка процесса сборки.

В реальных условиях статистика изменения диаметров стержней, поступающих на сборку, подчиняется закону нормального распределения. Значение диаметра стержня можно представить как:

$$d = Me(d_i), \quad (13)$$

где  $Me(d_i)$  – медиана распределения диаметров стержней.

Но расчеты взаимодействия стержней рекомендуется проводить для среднестатистического размера стержня, рассчитанного для диапазона размеров, дающих натяг в сопряжении. В требованиях к стержням, поступающим на автоматизированную сборку АК, необходимо лимитировать максимальный диаметр для стабилизации усилий при сборке.

## Выводы

Получена модель взаимодействия стержней при сборке АК, на основании которой выявлены основные факторы, влияющие на характер взаимодействия стержней. Определены зависимости для расчета изгиба и деформации стержня в области контакта для компенсации натяга в сопряжении, в зависимости от собираемой структуры и способа укладки слоев горизонтальных стержней. Получены формулы для определения силы взаимодействия стержней в области контакта для способа подачи стержней слоем и одиночным стержнем. Сравнение расчетов по полученным зависимостям демонстрирует увеличение усилия взаимодействия в тысячи раз, что подтверждает экспериментально полученные рекомендации о предпочтительности сборки АК подачей одиночного стержня.

## Литература

1. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций / Ю.В. Соколкин, А.М. Вотинов, А.А. Ташкинов и др.; под общ. ред. А.М. Вотинова. – М.: Наука: изд. фирма "Физ.-мат. лит.", 1996. – 240 с.
2. Потапов А.М. Исследование окислительной стойкости УУКМ при воздействии высокотемпературного газового потока / А.М. Потапов, Ю.В. Штефан, В.Ф. Назаренко, Е.А. Личман // Композиционные материалы в промышленности: материалы Двадцать шестой международной конференции, 29 мая-2 июня 2006 г., Ялта – Киев: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2007. – С. 178-180.
3. Чесноков В.В. Анализ работы углепластиковых стержней при сборке многонаправленных текстур / В.В. Чесноков, А.В. Чесноков // Вопросы атомной науки и техники: сб. науч. труд. – X., 1999. – №4. – С. 84-90.
4. Чесноков А.В. Силовой анализ укладки слоев горизонтальных стержней при сборке армирующих каркасов / А.В. Чесноков // Проектування та виробництво конструкцій літальних апаратів: збірн. наук. праць. – X., 2008. – Вип. 2 (53). – С. 82-86.
5. Малмейстер А.К. Сопротивление жестких полимерных материалов / А.К. Малмейстер, В.П. Тамуж, Г.А. Тетерс. – Рига: Зинатне, 1972. – 500 с.
6. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев и др. – Т. 2. – М.: Машигиз, 1958. – 975 с.
7. Чесноков А.В. Повышение производительности сборки армирующих каркасов для углерод-углеродного композиционного материала / А.В. Чесноков, В.В. Чесноков // Вісн. Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2007. – №7(113) Ч. 1. – С. 169-173.

Поступила в редакцію 23.02.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. начертательной геометрии и компьютерной графики И.В. Малков, Восточноукраинский национальный университет им. В.Даля, Луганск.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ СТЕРЖНІВ ПРИ АРМУЮЧИХ КАРКАСІВ

*О.В. Чесноков*

Обґрунтовано необхідність зниження тривалості виробничого циклу виготовлення ВВКМ. Зниження собівартості виготовлення ВВКМ можливо за рахунок автоматизації найбільш трудомістких процесів збирання армуючих каркасів (АК). Проникнення стержня в АК проходить з опором вштовхування у зв'язку з натягом у спряженні, який компенсується за рахунок деформації вертикальних стержнів і контактних деформацій. Одержані залежності процесу деформації стержня. З умови рівності зусиль в області контакту визначена залежність, що дозволяє визначити зусилля взаємодії стержнів. За допомогою математичного моделювання визначений вплив висоти розташування направляючої плити і величини натягу на зусилля взаємодії, а також розподіл видів деформації залежно від вказаних чинників. Зіставлення результатів визначення зусилля для способу подачі шару стержнів і одиночного стержня в АК, показав не прийнятність застосування першої внаслідок збільшення зусилля взаємодії в тисячі разів.

**Ключові слова:** стержневий армуючий каркас, взаємодія стержнів, контактні деформації, углепластиковий стержень, вигін стержня.

## DESIGN OF PROCESS OF CO-OPERATION OF BARS AT ASSEMBLING OF PREFORM

*A.V. Chesnokov*

The necessity of decline of duration of production cycle of making of CCC is fabrication. A decline of prime price of making of CCC is possibly due to automation of the most labour intensive processes of assembling of preform. Penetration of bar in preform with resistance pushing from preload in an interface, which is compensated due to deformation of vertical bars and contact deformations. Dependences are got describing processes of deformation of bar. From the condition of equality of efforts in area of contact, allowing to define effort of co-operation of bars, is certain. By a mathematical design influence of height of location of flag and size of preload is certain on effort of co-operation, and similarly distributing of types of deformation depending on the indicated factors. Comparison of results of determination of effort for the method of serve of layer of bars and single bar in preform, show not acceptability of application of the first by reason of increase of effort co-operation in thousands of one times.

**Key words:** cored reinforcing framework, co-operation of bars, contact deformations, carbon plastic bar, bend of bar.

**Чесноков Алексей Викторович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Луганск, Украина, e-mail: chesnokov@snu.edu.ua.