

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ АРМИРУЮЩИХ КАРКАСОВ

Углерод–углеродные композиционные материалы (УУКМ), с армирующим каркасом (АК) полученным сборкой из предварительно изготовленных стержней, обладают наиболее высокими и стабильными эксплуатационными характеристиками, что обусловило их эффективное применение для изготовления термонагруженных деталей летательных аппаратов.

Сборка стержневых АК вручную – тяжелый монотонный труд с вредным воздействием углеродной пыли, относящейся в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 к 3 классу опасности. Поэтому комплексная автоматизация процесса сборки АК позволяет сократить трудоемкость выполнения операции и снизить вредное воздействие на операторов [1].

Автором разработаны принципы автоматизированной сборки АК структур 3D и 4D-л (3 и 4 направления армирования), определены требования к оборудованию [2], проведены теоретические и экспериментальные исследования операций сборки [3]. Основное влияние на устойчивость процесса сборки АК оказывает запас прочности стержней [4]. Не допускается поломка стержня в процессе сборки. Усилие нагружения стержней зависит от силового их взаимодействия при сборке и габаритов собираемого АК.

Имеющиеся данные об изменении прочности стержней [5], в зависимости от технологических параметров их изготовления, являются недостаточными и не позволяют в полной мере оценить устойчивость сборки определенного типоразмера АК. Наибольшая вероятность поломки стержня – от потери устойчивости при осевом сжатии. Имеющиеся экспериментальные данные прочности стержней при осевом сжатии без учета их диаметра не позволяют оценить пригодность их для сборки АК, так как увеличение диаметра стержня повышает несущую его способность при осевом сжатии в четвертой степени, но, в свою очередь, увеличение диаметра приводит к повышению усилий взаимодействия стержней в АК.

Целью данной работы является определение эффективных параметров стержней, отражающих устойчивость сборки АК, через определение взаимосвязи нагружения стержней в процессе сборки и их геометрических характеристик.

Технологические усилия воспринимаемые стержнем при сборке АК

При сборке каркасов стержни испытывают технологические усилия. При введении горизонтального стержня, он испытывает осевое сжатие от сил сопротивления движению, а стержни вертикального направления

воспринимают изгибающую нагрузку от вводимого стержня и осевое сжатие при опрессовке уложенного слоя горизонтальных стержней.

На горизонтальный стержень, в области единичного контакта с вертикальным стержнем, действует сила, препятствующая его продвижению:

$$N_i = P_i f, \quad (1)$$

где P_i – сила взаимодействия стержней в области контакта, определяется по методике изложенной в работе [4];

f – коэффициент трения стержень по стержню.

При рассмотрении зависимости (1) как функции от глубины проникновения (l) горизонтального стержня в каркас (рис.1), получим

$$\text{для 3D структуры} - N_F^{3D}(l) = \frac{2lfP_i}{t}; \quad (2)$$

$$\text{для 4D-л структуры} - N_F^{4D-л}(l) = \frac{\sqrt{3}lfP_i}{t}, \quad (3)$$

где t – шаг вертикальных стержней.

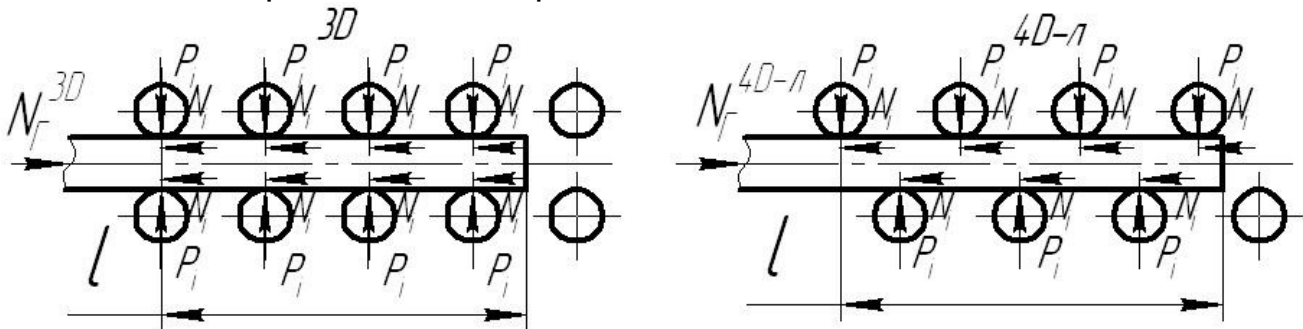


Рисунок 1 – Образование усилий препятствующих продвижению стержня

Возможна поломка стержня как по причине потери устойчивости, так и от микро выпучивания волокон.

Схему нагружения стержня при внедрении в каркас можно представить как распределенную нагрузку от действия сил сопротивления по длине внедрения в АК. В результате критическую длину внедрения, при которой происходит потеря устойчивости стержня для структуры 3D, представим в виде:

$$l_{кр}^{3D} = 3 \sqrt{\frac{3\pi^2 EJ_{min} t}{8fP_i}}, \quad (3)$$

где E , J_{min} – модуль упругости стержня и момент инерции его сечения.

При степенях наполнения однонаправленного композиционного стержня арматурой $\varphi_c \geq 20\%$ и сдвиговом характере разрушения (как показано в работе [6]) в материале при нагружении имеет место несимметричное микровыпучивание волокон. При длине стержня значительно больше диаметра волокна, для расчетов примем условие прочности сжатых в осевом направлении стержней диаметром d :

$$\frac{4N_{\Gamma}}{\pi d^2} \leq \sigma_B. \quad (4)$$

Условия нагружения вертикального стержня.

Рассмотрим условия нагружения вертикального стержня при опрессовке слоя горизонтальных стержней. На рис. 2 представлена расчетная схема: стержень сжимается осевой силой, нижний край заземлен, а верхняя опора препятствует повороту сечения стержня.

Проанализируем при каких нагрузках происходит потеря устойчивости вертикального стержня с учетом действия изгибающих моментов и поперечной силы. Худшим вариантом является случай, когда горизонтальные стержни находятся у гребенки в момент начала опрессовки. Критическая сила для приведенной схемы, с учетом кривизны от сдвига, и условий взаимодействия стержней [4] определяется:

$$N_{кр} = \frac{\pi^3 E d^4}{16 H^2 \left(1 + \frac{E \pi^3 d^2}{3 G H^2} \right)}, \quad (5)$$

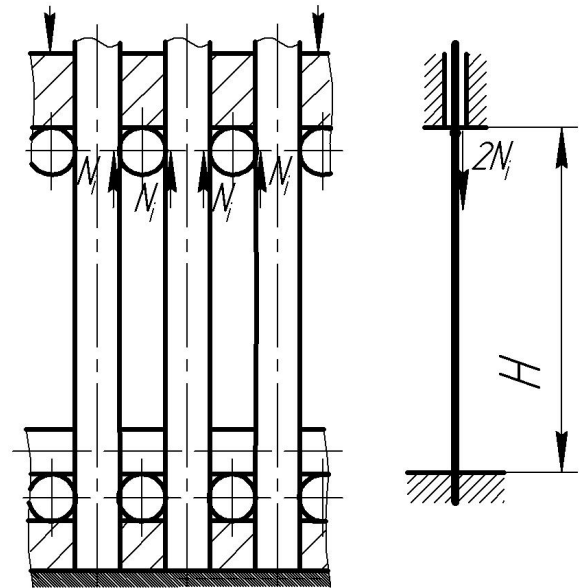


Рисунок 2 – Расчетная схема

где G – модуль сдвига стержня;

H – высота расположения направляющей плиты.

Из условия устойчивости вертикальных стержней выразим максимальную величину, на которой может располагаться верхняя направляющая:

$$H \leq \frac{d}{24 G N_B} \sqrt{6 \pi^3 E G N_B (3 G d^2 - 32 N_B)}. \quad (6)$$

Вертикальные стержни испытывают нагрузку и при подаче горизонтальных стержней. Худшим вариантом является нагружение вертикального стержня посередине расстояния H , силой N_i – при подаче одиночного стержня и $2N_i^{слоя}$ – при подаче слоя стержней. Анализируя зависимость соотношения усилий взаимодействия стержней при подаче единичного стержня и слоя [4], отличающихся в тысячу раз, можно сделать заключение, что поломка вертикального стержня возможна только при подаче слоя стержней.

По приведенным зависимостям рассчитывают максимальные нагрузки воспринимаемые стержнем при сборке АК заданной структуры и типоразмера, с учетом вероятного натяга в сопряжении стержней.

Определение прочностных и геометрических параметров стержней

Устойчивое выполнение операций сборки АК возможно только при использовании стержней, отвечающих геометрическим и прочностным требованиям для собираемого АК.

Прочностные характеристики стержня зависят от его диаметра. Чтобы не было ложного повышения прочностных характеристик за счет увеличения диаметра стержня, используем понятие эффективных характеристик стержня. Эффективными характеристиками стержня является модуль Юнга $E_{ПР}^{\text{Э}}$ и предел прочности $\sigma_B^{\text{Э}}$. Определение указанных характеристик предлагается проводить на расслоение по схеме приведенной на рис.3а, а устойчивость по схеме приведенной на рис.3б, которые соответствуют технологическим нагрузкам на стержень при сборке. При испытании на устойчивость определяют силу $P_{уст}$. При испытании на расслоение определяют силу P_p . Расчет эффективных прочностных характеристик производят по зависимостям, полученным из (4) и (5):

$$\sigma_B^{\text{Э}} = \frac{4P_p}{\pi d_{max}^2}, \quad (7)$$

$$E_{ПР}^{\text{Э}} = \frac{4P_{уст} (16H^2 \mu^2 + \pi^2 k_1 k_2 d_{max}^2)}{\pi^3 d_{max}^4}. \quad (8)$$

где d_{max} – максимальный диаметр стержня;

μ – коэффициент приведения длины стержня $\mu=0,5$;

$k_1 = E/G$ – среднее расчетное значение $k_1=130$;

k_2 – безразмерный коэффициент (зависящий от формы сечения) для круглого сечения $k_2=4,2$ [7].

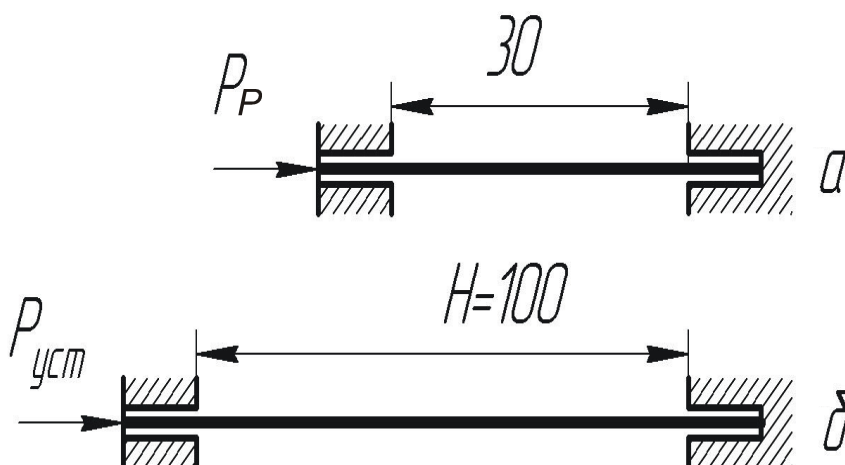


Рисунок 3 – Схема испытаний стержня на смятие торца и устойчивость

Определение эффективных характеристик стержней на основании экспериментальных данных

При изготовлении опытной партии стержней на установке [8] по технологическому процессу [9] проводился выборочный контроль прочностных и геометрических характеристик стержней. На основании выборки в количестве 100 стержней длиной 160 мм, определяли максимальный диаметр и прочность по схемам (рис.3). Результаты измерений обрабатывались методами математической статистики. Расчет эффективных прочностных характеристик выполнен по зависимостям (7), (8), результаты представлены в таблице 1.

Определен коэффициент запаса прочности стержней по соотношению экспериментально полученной прочности стержня и прогнозируемого максимального сопротивления движению стержня при сборке АК структуры 4D-л большего типоразмера – $\varnothing 530$ мм с отверстием $\varnothing 240$ мм (по данным работ [3, 4]). Минимальный коэффициент запаса прочности составил 3, что свидетельствует о пригодности полученных стержней автоматизированной сборке.

Таблица 1 – Результаты обработки экспериментальных данных

Диаметр стержня		Модуль Юнга		Предел прочности	
d	P(d)	$E_{ПР}^{\text{Э}}$	$P(E_{ПР}^{\text{Э}})$	$\sigma_B^{\text{Э}}$	$P(\sigma_B^{\text{Э}})$
1,16÷1,17	3	56,9÷65,7	8	56,7÷61,2	2
1,17÷1,18	21	65,7÷74,5	22	61,2÷65,7	19
1,18÷1,19	32	74,5÷83,4	18	65,7÷70,3	23
1,19÷1,20	29	83,4÷92,2	23	70,3÷74,8	39
1,20÷1,21	12	92,2÷101	23	74,8÷79,3	11
1,21÷1,22	3	101÷109,8	4	79,3÷83,8	3
		109,8÷118,6	2	83,8÷88,3	3
\bar{x}	S_x	\bar{x}	S_x	\bar{x}	S_x
1,1934	0,0115	83,4	12,895	70,8	5,581

Выводы

Определены зависимости, отражающие нагрузки воспринимаемые стержнями вертикального и горизонтального направлений армирования при сборке, с учетом их силового взаимодействия.

Обосновано применение эффективных прочностных характеристик стержней для оценки их коэффициента запаса прочности при сборке, который отражает устойчивость выполнения процесса.

На основании выборки стержней определены их прочностные и геометрические характеристики, оценен коэффициент запаса прочности при сборке большего типоразмера АК. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения разработанного

техпроцесса изготовления стержней и оборудования [8, 9] для автоматизированной сборки АК.

Список использованных источников

1. 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. – №7(113) Ч. 1. – Луганськ, 2007. – С. 169-173.
2. Чесноков А.В. К вопросу автоматизации сборки стержневых армирующих каркасов / А.В. Чесноков // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – № 6 (124) Ч. 2. – Луганськ, 2008. – С. 126-130.
3. Чесноков А.В. Силовой анализ укладки слоев горизонтальных стержней при сборке армирующих каркасов / А.В. Чесноков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (53). – Х., 2008. – С. 82-86.
4. Чесноков А.В. Моделирование процесса взаимодействия стержней при сборке армирующих каркасов / А.В. Чесноков // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: НАКУ «КХАІ». – 2009. – Вип. 2 (55). – С. 27-31.
5. Чесноков О.В. Технологія виробництва каркасів вуглець-вуглецевих термонавантажених елементів конструкцій літальних апаратів: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.07.04 / Чесноков Олексій Вікторович; Державний аэрокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», – Харків, 2000. – 19 с.
6. Грещук Л.Б. Разрушение армированного круглыми волокнами композита от потери устойчивости волокон / Л.Б. Грещук // Ракетная техника и космонавтика. – 1975. – №10. – С. 67–75.
7. Малмейстер А.К. Соппротивление жестких полимерных материалов / А.К. Малмейстер, В.П. Тамуж, Г.А. Тетерс. – Рига: Зинатне, 1972. – 500 с.
8. Пристрій для формування наповнених профільних виробів: Патент на корисну модель. 46426 Україна. МПК В29С 55/00 / Чесноков О.В. (UA) – № u200905561 Заявл. 01.06.2009; Опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24, – 2 с.
9. Спосіб виготовлення вуглепластикових стержнів: Патент на корисну модель. 41482. Україна. МПК В29С 55/00 / Чесноков О.В. (UA) – № u 2008 14400; Заявл. 15.12.08; Опубл. 25.05.09, Бюл. №10, – 4 с.

Поступила в редакцию 22.02.2010 г.

*Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр.
В.Ф. Забашта, ОАО «Украинский НИИ
авиационной технологии», г. Киев*