

Реализация моделей определения структурных параметров композитов на основе плетеных рукавов в элементах конструкции

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Государственное предприятие «АНТОНОВ»*

Описана реализация предложенных моделей для определения структурных параметров композита, армированного плетеным рукавом. Доказана зависимость объемного содержания армирующего материала в композите от угла расположения жгутов в плетеном рукаве. Обоснована целесообразность применения плетеных рукавов для конструкций, которые имеют криволинейную или коническую поверхность.

Ключевые слова: композит, плетеный рукав, структурный параметр, объемное содержание.

Всем типам армирующих материалов (АМ) присуща совокупность технологических и конструктивных признаков. В особенности это касается такого многофункционального материала, как плетеная арматура или плетеные рукава. В зависимости от направления анализа или области применения один и тот же материал может обладать различными признаками или их совокупностью. На основе проведенного анализа существующих классификаций [1-3] можно сделать вывод, что ни одна из них не ставит задачи определения наиболее оптимальной области применения того или иного АМ в конструкциях авиационной техники. Разработанная классификация (рис. 1) показывает, к каким типам конструктивных элементов применимы плетеные рукава для максимальной реализации их свойств в конструкциях из композитов.



Рис. 1. Классификация типов армирующих наполнителей

Из схемы видно, что для применения плетеной арматуры на основе стеклянных волокон наиболее целесообразными являются конструктивные элементы закрытого сечения – трубчатого заполнителя трехслойных конструкций, элементов трубопроводов, различных окантовок.

Изготовление силовых конструкций из плетеной арматуры на основе углеродных волокон обуславливается в первую очередь физико-механическими преимуществами этого материала. Высокие удельные характеристики позволяют изготавливать высоконагруженные конструкции, такие, как нервюры, шпангоуты, пояса лонжеронов и др.

Использование органических нитей при изготовлении плетеных премиксов не получило широкого распространения как стеклянные и углеродные материалы. Применение тканей на основе органических нитей, прежде всего, оправдано в наружных слоях конструкций для поглощения энергии удара или при необходимости обеспечить высокую жесткость детали или ее поверхности.

Таким образом, при выборе плетеной арматуры для конкретной конструкции АКТ следует учитывать ряд конструктивно-технологических параметров плетеных рукавов и выбирать только те признаки, которые необходимы при проектировании конструкции с учетом условий ее эксплуатации и экономической целесообразности для конкретного агрегата.

Для доказательства адекватности методики определения структурных параметров плетеной арматуры в элементах конструкций следует изготовить натурные образцы, тип которых определяли на основе изложенных выше принципов классификации.

В качестве натуральных образцов были выбраны внутренний набор клиновидного трубчатого заполнителя интегральной крышки сопла и элемент шпангоута фюзеляжа. Методика изготовления элементов конструкций описана в работе [4]. Полученные образцы показаны на рис. 2.

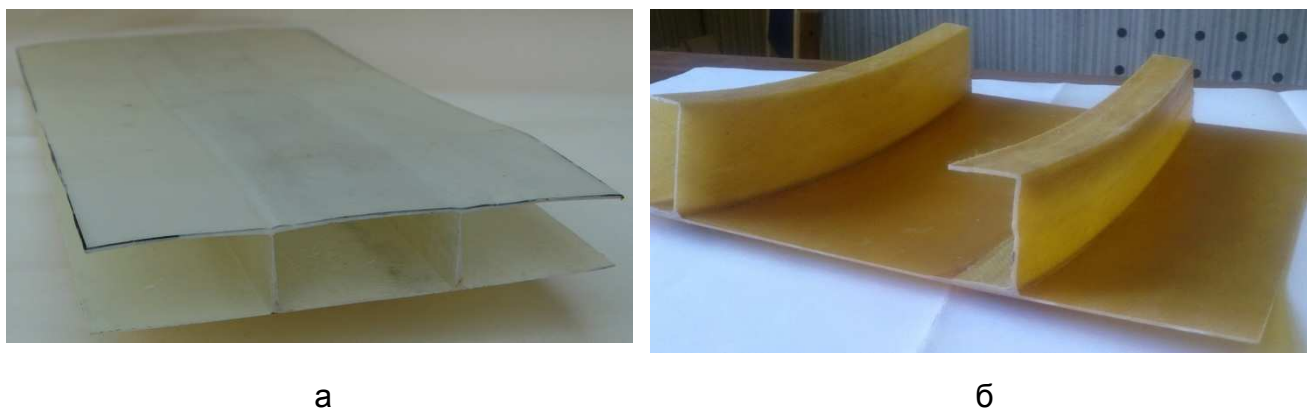


Рис. 2. Элементы конструкций, изготовленные с применением плетеных рукавов:

а – клиновидный трубчатый заполнитель; б – элемент шпангоута

На примере клиновидного трубчатого заполнителя (КТЗ) исследована зависимость объемного содержания от угла расположения жгутов в рукаве, а методика определения структурных параметров композита при укладке рукава на конические поверхности – на примере элемента шпангоута фюзеляжа.

1. Определение объемного содержания наполнителя в КТЗ

Для определения структурного параметра КТЗ – объемного содержания θ воспользуемся моделью, описывающей зависимость объемного содержания от угла расположения нитей (жгутов, ровингов) в плетеной арматуре [5]. Формула для определения объемного содержания армирующего наполнителя в композите будет иметь вид

$$\theta = \frac{2\rho_p}{\delta\rho_a t \sin 2\varphi}, \quad (1)$$

где ρ_a – плотность материала волокон, кг/м³;

ρ_p – линейная плотность рукава, текс;

δ – толщина стенки рукава;

t – длина стороны ячейки ромбов, образующих рукав, мм;

φ – угол расположения нитей (жгутов) в рукаве.

Таким образом, зная плотность материала волокна, линейную плотность нитей, составляющих рукав, толщину стенки рукава и требуемый угол армирования, из экспериментальных измерений можно рассчитать теоретическое значение объемного содержания наполнителя в структуре КТЗ и сравнить с экспериментальными значениями.

С учетом того, что объемное содержание волокон зависит от деформированного состояния плетеного рукава, т.е. при $\pi/4$ имеется теоретический минимум θ , проведено измерение угла армирования в трех зонах клиновидной оправки, в которых наблюдается различный угол расположения жгутов рукава, и соответственно разное объемное содержание наполнителя (рис. 3, а, б, в). По результатам эксперимента получены следующие углы укладки:

- зона I – угол $\varphi_1=28^\circ$;

- зона II – угол $\varphi_2=36^\circ$;

- зона III – угол $\varphi_3=40^\circ$.

По формуле (1) рассчитано объемное содержание наполнителя в пластике для полученных углов расположения нитей (жгутов):

$\theta_1 = 0,886$ в зоне I; $\theta_2 = 0,662$ в зоне II; $\theta_3 = 0,559$ в зоне III.

Для определения экспериментальных значений θ в зонах I, II, III образцы выжигали в печи до полного выгорания связующего и затем взвешивались.

По результатам экспериментальных и теоретических данных объемного содержания наполнителя в КТЗ построен график зависимости объемного содержания от угла армирования (расположения жгутов в рукаве). Полученные результаты объемного содержания приведены в табл. 1, график показан на рис. 4.

Анализ результатов подтверждает хорошую сходимость результатов, рассчитанных теоретическим путем по разработанной методике, и экспериментальных данных, полученных в реальной конструкции, а также гипотезу о том, что наблюдается уменьшение значения объемного содержания наполнителя θ при приближении угла φ к значению $\pi/4$, в котором прогнозируется теоретический минимум θ .

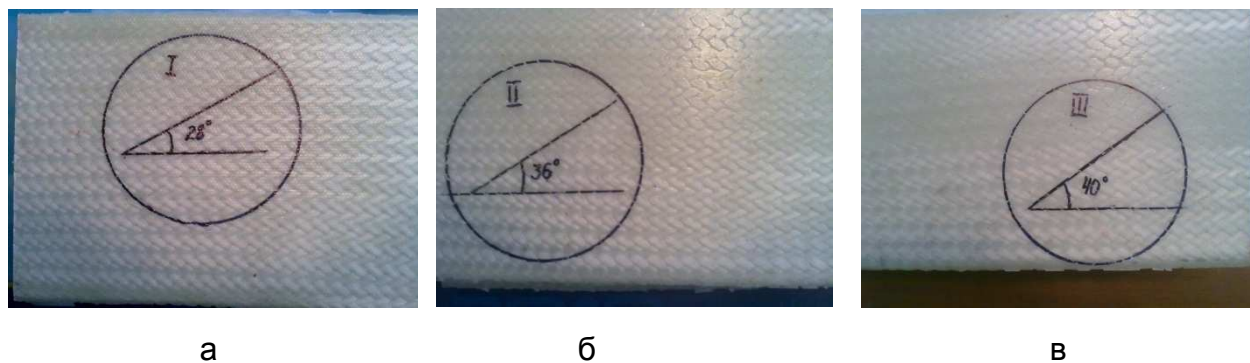


Рис. 3. Углы укладки жгутов в трех зонах клиновидной оправки

Таблица 1

Экспериментальные и теоретические
данных объемного содержания наполнителя в КТЗ

Параметры	Зона клиновидной оправки		
	I	II	III
Угол расположения жгутов φ , град.	28°	36°	40°
θ теоретическое, %	0,844	0,735	0,71
θ экспериментальное, %	0,865	0,778	0,781

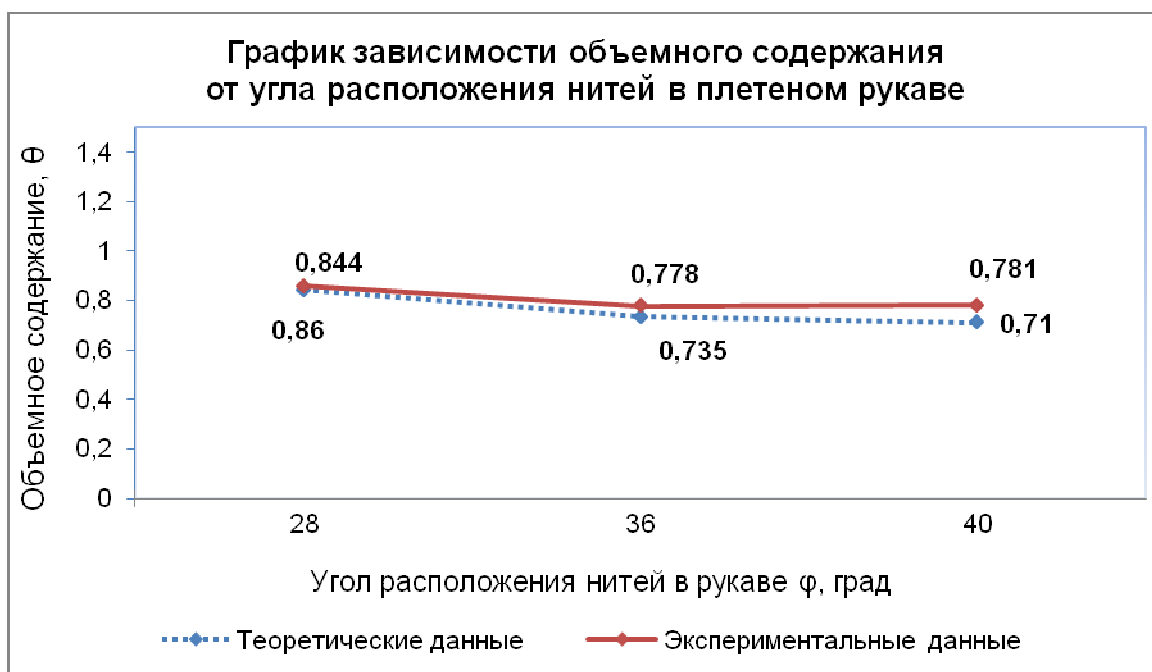


Рис. 4. График зависимости объемного содержания θ от угла расположения нитей в плетеном рукаве

2. Определение структурных параметров композита при укладке рукава на коническую поверхность на примере элемента шпангоута фюзеляжа

Известно, что при укладке армирующих материалов (тканей, лент) на криволинейные и конические поверхности возникает ряд проблем, связанных с раскромом материала и его последующей выкладкой без складок и нахлестов [6]. Применение плетеных рукавов позволяет решить эту проблему, однако для этого необходимо понимать, каким образом нити (жгуты) плетеного рукава располагаются на конической поверхности по высоте конуса. Для этого рассмотрена задача апробации предложенной в работе [5] модели на примере элемента шпангоута, полки и стенка у которого рассматривают как развертка у усеченного конуса.

Исследуем задачу определения структурных параметров КМ при укладке рукава на коническую поверхность по нормали к образующей (рис. 5, 6). В этом случае контур любого сечения конуса образуется одинаковым количеством диагоналей (рис. 6, б, где изображена развертка конуса). Пусть в сечении r_1 (рис. 6, а) угол армирования равен ϕ_1 (рис. 7).

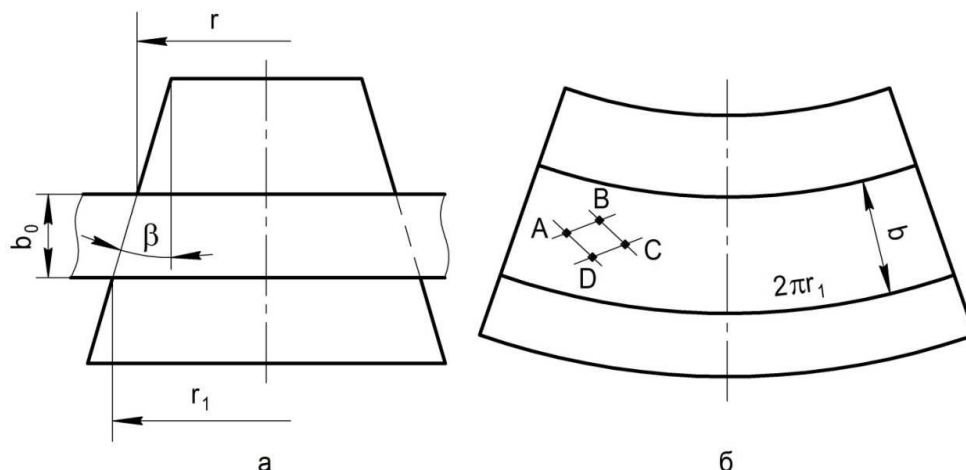


Рис. 5. К определению структурных параметров КМ при укладке плетеного рукава на коническую поверхность

Углы армирования в произвольном сечении ϕ_j (см. рис. 6) вычисляют по формуле

$$\phi_j = \phi_1 - \alpha(j-1), \quad (2)$$

где
$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{t \sin \phi_1 \sin \beta}{r_1 - t \cos \phi_1 \sin \beta}. \quad (3)$$

Так как количество диагоналей представляет собой достаточно большое число для реальных конструкций, то можно принять, что $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$. Тогда

$$\alpha = \frac{t \sin \phi_1 \sin \beta}{r_1 - t \cos \phi_1 \sin \beta}. \quad (4)$$

Зная угол армирования ϕ_j , по формуле (1) вычисляют объемное содержание волокон, которое оказывается переменным по длине. Если $\phi_1 \leq \pi/4$, то θ увеличивается к вершине конуса, а если $\phi_1 \geq \pi/4$, то вначале объемное содержание

уменьшается (до достижения углом φ_j значения $\pi/4$), а затем увеличивается.

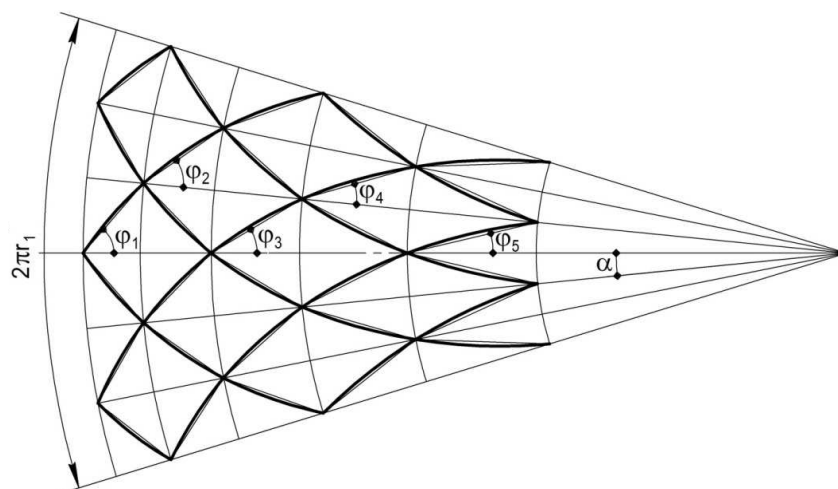


Рис. 6. Схема расположения жгутов на развертке конической поверхности

Таким образом, получив базовые геометрические размеры с натурального образца шпангоута, например $r_1 = 20,7$, $\varphi_1 = 50^\circ$, $\beta = 13^\circ$, и используя формулу (2) для расчета значений углов в 20 сечениях конусной поверхности, можно видеть, что при приближении жгутов к вершине конуса значения углов уменьшаются, а объемное содержание наполнителя увеличивается. Эти результаты позволяют сделать два важных вывода: хотя структурные параметры композита, армированного плетеным рукавом, являются переменными по длине, они строго прогнозируемы и постоянны по контуру в отличие от вариантов армирования отрезками ткани или ленты. Это позволяет обосновать целесообразность использования плетеных рукавов для армирования сложных поверхностей. Кроме того, зная угол φ_j в любой точке поверхности детали, можно рассчитать значение объемного содержания и оценить равномерность распределения плетеного рукава на конической поверхности. Результаты расчетов приведены в табл. 2 при $\alpha=0,026$.

Таблица 2
Теоретические значения углов в 20 сечениях плетеного рукава, уложенного на конусную поверхность

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
φ_j	50	48,53	47,07	45,61	44,15	42,69	41,23	39,76	38,30	36,84
j	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
φ_j	35,38	33,92	32,46	31	29,53	28,07	26,61	25,15	23,69	22,23

Для подтверждения теоретических расчетов в трех зонах стенки шпангоута и на двух полках инструментальным транспортиром проведено измерение углов расположения жгутов рукава (рис. 7). Полученные результаты изображены в виде графика совместно с данными, полученными по разработанной методике (рис. 8).

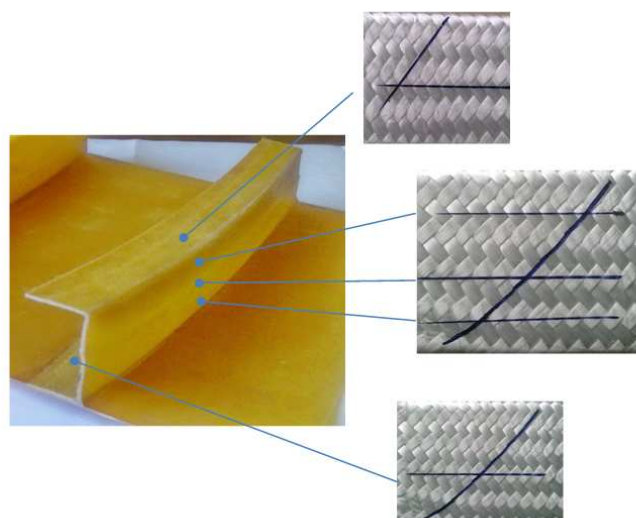


Рис. 7. Зоны измерения расположения жгутов плетеного рукава на натурном образце шпангоута

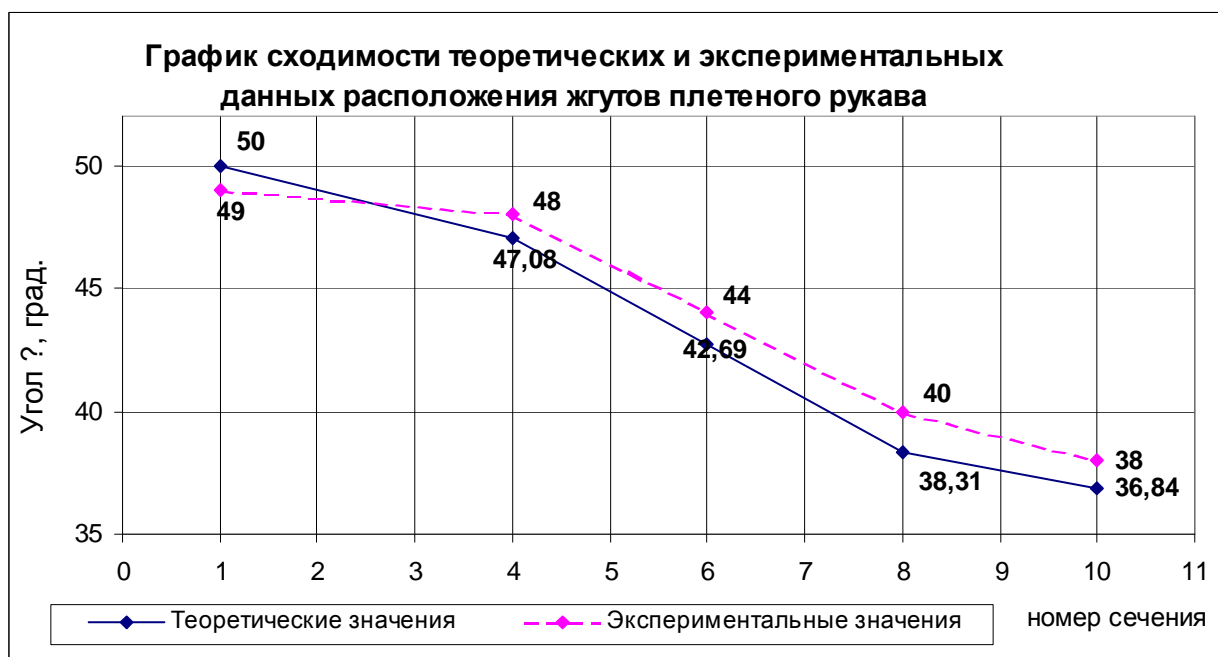


Рис. 8. График сходимости теоретических и экспериментальных данных расположения жгутов плетеного рукава

Таким образом, в результате проведенной работы можно сделать вывод о работоспособности предложенной методики зависимости объемного содержания наполнителя в композите, армированном плетеным рукавом, от угла расположения жгутов в рукаве, что подтверждено экспериментально на примере КТЗ. С учетом проведенного анализа сравнения полученных результатов на примере элемента шпангоута (погрешность между экспериментальными и теоретическими данными составила менее 5%) обоснована целесообразность применения плетеных рукавов для изготовления деталей, имеющих сложную поверхность двойной кривизны.

Список литературы

1. Композиционные материалы [Текст] /под ред. Л. Браутмана, Р. Крока: в 8 т. – М.:Мир, 1978. – Т. 8: Анализ и проектирование конструкций. – 264 с.
2. Петропольский, В.С. Разработка рациональных конструктивно – технологических решений формообразующей оснастки для изготовления деталей из композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02. – Х., 1998. – 160 с.
3. Забашта, В.Ф. Классификация элементов конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.Ф. Забашта // Авиационная промышленность. – 1977. – №4. – С. 9-17.
4. Андреев, А.В. Технология получения элементов конструкций из полимерных композиционных материалов с применением плетеной арматуры [Текст] / А.В. Андреев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1(69). – Х., 2012. – С. 36-39.
5. Андреев А.В. Методика определения структурных параметров композитов, армированных плетеными рукавами / А.В. Андреев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 47. – Х., 2010. – с. 99 – 104.
6. Андреев, А.В. Проблемы использования плетеных рукавов в качестве арматуры полимерных композитов [Текст] / А.В. Андреев // Всеукраїнська науково-техн. конф. «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2010»: тези доп. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2010. – Т. 1 – 176 с.

Рецензент: Док. техн. н., проф. В.Е. Гадайчук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.
Поступила в редакцию 04.03.13

Реалізація моделей визначення структурних параметрів композитів на основі плетених рукавів в елементах конструкцій

Описано реалізацію запропонованих моделей для визначення структурних параметрів композита, армованого плетеним рукавом. Доведено залежність об'ємного вмісту армуючого матеріалу в композиті від кута розташування джгутів у плетеному рукаві. Обґрунтовано доцільність використання плетених рукавів для конструкцій, які мають криволінійну чи конічну поверхню.

Ключові слова: композит, плетений рукав, структурний параметр, об'ємний вміст.

Realization models for determination structural parameters of composites on the basis of the braided sleeves in the elements of composite parts

Showed realization of the offered models for determination of structural parameters of composites, reinforced the braided sleeves. Prove dependence of by volume maintenance of reinforcing material in a composite from the corner of location of braids in the braided sleeve. Sustain expedience of application of the braided sleeves for constructions, which have a curvilinear or conical surface.

Keywords: composite, braided sleeve, structural parameter, volume maintenance.