

УДК: 539.3

Моделирование процессов деформирования в структуре гибких тканых композитов

Д. А. Кожанов

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65

E-mail: pbk996@mail.ru

Получено 24.09.2019, после доработки — 27.09.2019.

Принято к публикации 03.02.2020.

Гибкие тканые композиты относят к классу высокотехнологичных инновационных материалов. Благодаря совмещению различных компонентов наполнителя и элементов армирования такие материалы применяют в строительстве, оборонной промышленности, судо- и авиастроении и др. В отечественной литературе уделено недостаточное внимание к тканым композитам, изменяющим свою геометрическую структуру армирующего слоя в процессе деформирования. В настоящей работе приводится анализ предложенного ранее комплексного подхода к моделированию поведения гибких тканых композитов при статическом одноосном растяжении для дальнейшего обобщения подхода на двухосное растяжение. Работа нацелена на качественное и количественное описание механических деформационных процессов, протекающих в структуре исследуемых материалов при растяжении, к которым относится распрямления нитей армирующего слоя и увеличение величины взаимного надавливания накрест лежащих нитей армирования. В начале процесса деформирования распрямление нитей и увеличение взаимного надавливания нитей наиболее интенсивны. С увеличением уровня нагрузки изменение указанных параметров замедляется. Например, изгиб нитей армирования переходит в центральное растяжение, а величина нагрузки от взаимного надавливания более не увеличивается (стремится к константе). Для моделирования описанных процессов вводятся основные геометрические и механические параметры материала, влияющие на процесс формоизменения, приводятся необходимая терминология и описание характеристик. В связи с высокой геометрической нелинейностью все процессы описаны в приращениях, так как на начальных значениях нагрузки происходит значительное формоизменение армирующего слоя. Для количественного и качественного описания механических деформационных процессов, протекающих в армирующем слое, выведены аналитические зависимости, позволяющие определить приращение угла распрямления нитей армирования и нагрузки, вызванной взаимным надавливанием накрест лежащих нитей на каждом шаге приращения нагрузки. Для апробации выведенных зависимостей приведен пример их применения для гибких тканых композиционных материалов марок VP4126, VP6131 и VP6545. Результаты моделирования подтвердили предположения о процессах выпрямления нитей и замедления увеличения взаимного надавливания нитей. Приведенные в данной работе результаты и зависимости имеют непосредственное отношение к дальнейшему обобщению предложенных ранее аналитических моделей для двухосного растяжения, так как растяжение в двух направлениях существенно уменьшит выпрямление нитей и увеличит величину взаимного надавливания при аналогичных нагрузках.

Ключевые слова: гибкий тканый композиционный материал, модель материала, необратимые деформации, формоизменение, геометрическая нелинейность, армирование, выпрямление нитей

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-08-00828).

© 2020 Дмитрий Александрович Кожанов

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.
Чтобы получить текст лицензии, посетите веб-сайт <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>
или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

UDC 539.3

Modeling of deformation processes in structure of flexible woven composites

D. A. Kozhanov

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
65 Ilyinskaya st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: pbk996@mail.ru

*Received 24.09.2019, after completion — 27.09.2019.
Accepted for publication 03.02.2020.*

Flexible woven composites are classified as high-tech innovative materials. Due to the combination of various components of the filler and reinforcement elements, such materials are used in construction, in the defense industry, in shipbuilding and aircraft construction, etc. In the domestic literature, insufficient attention is paid to woven composites that change their geometric structure of the reinforcing layer during deformation. This paper presents an analysis of the previously proposed complex approach to modeling the behavior of flexible woven composites under static uniaxial tension for further generalization of the approach to biaxial tension. The work is aimed at qualitative and quantitative description of mechanical deformation processes occurring in the structure of the studied materials under tension, which include straightening the strands of the reinforcing layer and increasing the value of mutual pressure of the cross-lying reinforcement strands. At the beginning of the deformation process, the straightening of the threads and the increase in mutual pressure of the threads are most intense. With the increase in the level of load, the change of these parameters slows down. For example, the bending of the reinforcement strands goes into the Central tension, and the value of the load from the mutual pressure is no longer increased (tends to constant). To simulate the described processes, the basic geometrical and mechanical parameters of the material affecting the process of forming are introduced, the necessary terminology and description of the characteristics are given. Due to the high geometric nonlinearity of the all processes described in the increments, as in the initial load values there is a significant deformation of the reinforcing layer. For the quantitative and qualitative description of mechanical deformation processes occurring in the reinforcing layer, analytical dependences are derived to determine the increment of the angle of straightening of reinforcement filaments and the load caused by the mutual pressure of the cross-lying filaments at each step of the load increment. For testing of obtained dependencies shows an example of their application for flexible woven composites brands VP4126, VP6131 and VP6545. The simulation results confirmed the assumptions about the processes of straightening the threads and slowing the increase in mutual pressure of the threads. The results and dependences presented in this paper are directly related to the further generalization of the previously proposed analytical models for biaxial tension, since stretching in two directions will significantly reduce the straightening of the threads and increase the amount of mutual pressure under similar loads.

Keywords: flexible woven composite material, material model, irreversible deformation, shaping, geometric nonlinearity, reinforcement, straightening of threads

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 547–557 (Russian).

The work was supported by the RFBR (project No. 19-08-00828).

1. Введение

Композиционные материалы (композитные материалы, композиты) в настоящее время нашли плотное применение во всех отраслях промышленности. Существует большое множество классов и типов таких материалов, которые различаются по типу армирующего и связующего материала, по степени наполнения армирующими элементами, по гибкости, жесткости, удельной плотности и др. [Кожанов, Любимов, 2017; Hasbin, 1972; Pastore, 1993]. Отдельным классом композитов являются тканые (тканевые) материалы, где основным компонентом, влияющим на деформационное поведение, является армирующая ткань. Основными факторами, определяющими поведение тканых композитов при деформировании, являются свойства армирующей ткани и связующего материала (при наличии), а также различные схемы переплетения нитей в армирующем слое материала [Bakar et al., 2013; Balea et al., 2014; Kiasat, Sangtabi, 2015]. Наиболее распространенной схемой переплетения армирующей ткани является полотняная [Горохов и др., 2016; Дедков и др., 2014]. Результаты проведенных [Кожанов, 2017] и представленных в литературе экспериментальных исследований процессов деформирования тканых композитов [Bakar et al., 2013; Balea et al., 2014] подтверждают вывод о существенном влиянии схемы переплетения армирующей ткани на поведение композита в целом.

Вопросам поведения гибких тканых композитов посвящено недостаточное число исследований, особенно это касается образования необратимых деформаций [Sapozhnikov et al., 2019; Madke, Chowdhury, 2019] и двухосного растяжения [Cai et al., 2017; Shi et al., 2018]. В работах [Дедков и др., 2014] разработана методика определения коэффициентов концентрации напряжений в армирующих слоях тканых композитов при двухосном равнокомпонентном растяжении. В работе [Gatouillat et al., 2013] с использованием метода конечных элементов описан процесс формоизменения внутренней геометрической структуры при двухосном статическом растяжении. Ряд исследований выполнен для «жестких» композитов на основе эпоксидной смолы или для «сухих» тканых материалов, не имеющих в своем составе связующего клея, при воздействии динамических нагрузок.

Разработка моделей, позволяющих описать поведение гибких тканых композитов при статическом растяжении вплоть до разрушения, учитывающих основные конструктивные, геометрические и механические особенности структуры композита, далека от завершения. Это обусловлено прежде всего сложностями моделирования и дискретизации внутренней структуры тканых композитов, особенностями деформирования нитей армирующей ткани.

Известные модели, описывающие поведение тканых композитов, применимы, как правило, к «жестким» композитам, в которых в качестве связующего выступают твердые полимеры [Munoz et al., 2014; Murugan et al., 2014], такие как эпоксидная смола, керамическое связующее, бетон и др. Для таких материалов можно пренебречь формоизменением внутренней структуры и выпрямлением нитей армирующей ткани, так как деформации, возникающие при нагружении, малы, а конфигурация переплетения армирующей ткани сохраняется в процессе деформирования.

Для гибких тканых композиционных материалов изменение внутренней геометрии в процессе деформирования оказывает существенное влияние на их механическое поведение [Кожанов, 2017]. Эта особенность связана с типом связующего материала и характером деформаций нитей армирующей ткани, которые в процессе деформирования могут распрямляться в своем продольном направлении и изменять жесткость [Кожанов, 2017].

С учетом принципов механики деформируемого твердого тела, сопротивления материалов и технической механики, а также методик и способов описания напряженно-деформированного состояния в материалах, имеющих вложенную геометрическую структуру [Лихачева, 2011; Modin et al., 2018; Chaouachi et al., 2014] в работах [Берендеев и др., 2015; Кожанов, Любимов, 2016; Кожанов, Любимов, 2017; Кожанов, 2017; Кожанов, Любимов, 2018] предложен комплексный подход, позволяющий определить поведение гибких тканых композитов с полотняным переплетением при статическом растяжении вдоль одного из направлений армирования. В качестве входных параметров модели выступают геометрические характеристики переплете-

ния элементарной периодической ячейки (ЭПЯ) армирующего слоя [Кожанов, Любимов, 2017] и механические характеристики материалов, из которых состоит композит.

Для развития предложенного подхода и его обобщения на двухосное растяжение [Дедков, Зайцев, 2013; Gatouillat et al., 2013] необходимо проанализировать основные закономерности процессов деформирования геометрической структуры исследуемого материала, полученные в [Кожанов, 2017], но не описанные ранее в литературе.

Для описания процесса растяжения гибких тканых композитов в [Кожанов, Любимов, 2017; Кожанов, 2017; Кожанов, Любимов, 2018; Chen, Aliabadi, 2019] используется ЭПЯ (рис. 1) с введенной линейной аппроксимацией [Gatouillat et al., 2013; Hallal et al., 2012; Edgren, Asp, 2005] нитей основы и утка (рис. 2, 3). В качестве геометрических параметров структуры армирующего слоя в [Кожанов, Любимов, 2017; Кожанов, 2017; Кожанов, Любимов, 2018] выбирались h_0 — высота поперечного сечения нитей основы и утка (рис. 1) армирующей ткани, l_o^1 и l_u^1 — расстояние между нитями основы и утка, θ и φ — углы подъема наклонных участков соответствующих нитей, l_o и l_u — ширина поперечного сечения нитей основы и утка.

При растяжении в продольном направлении нитей ЭПЯ в [Кожанов, Любимов, 2016] представляется в виде плоской рамы (рис. 1), состоящей из трех взаимосвязанных стержней прямоугольного поперечного сечения, находящихся под действием растягивающей силы F . Длины стержней l , l_1 и углы наклона θ и φ определяются геометрией внутренней структуры материала. Надавливание нити утка на нить основы заменялось действием распределенной нагрузки q . Для определения величины q приводится вид структурного элемента нитей утка после введенной линейной аппроксимации (рис. 2, 3).

При растяжении материала за счет выпрямления нитей переплетения в армирующей ткани происходит формоизменение внутренней структуры материала [Lee et al., 2013; Rossol et al., 2015]. Процесс формоизменения представляется в виде последовательности приращений внешней нагрузки. Этот процесс сопровождается изменениями деформации и геометрических характеристик рамы [Багмунтов, 2005; Каюмов и др., 2007]. В этом случае модель структуры материала формулируется в приращениях, что позволяет описать поведение материала вплоть до полного распрямления нитей армирования, ориентированных вдоль приложенной растягивающей силы [Gatouillat et al., 2013].

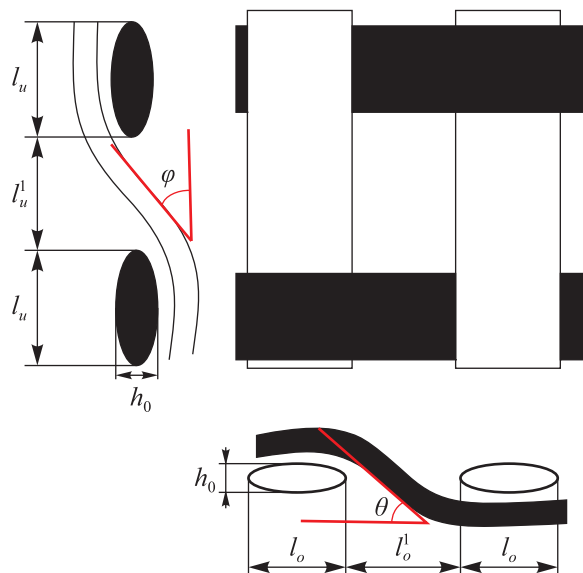


Рис. 1. Параметры геометрической структуры армирующего слоя композита: h_0 — высота поперечного сечения нитей основы и утка армирующей ткани, l_o^1 и l_u^1 — расстояние между нитями основы и утка, θ и φ — углы подъема наклонных участков соответствующих нитей, l_o и l_u — ширина поперечного сечения нитей основы и утка

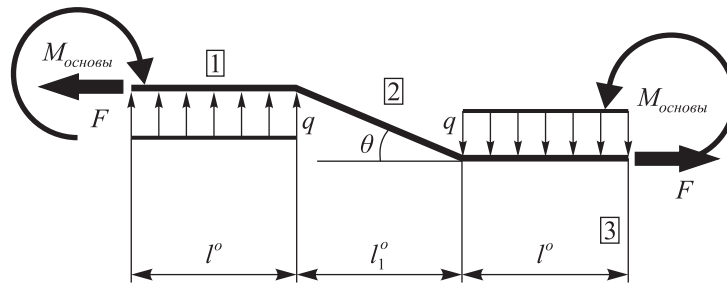


Рис. 2. Структурный элемент армирующих нитей основы в армирующем слое тканого композита: l_1^o — расстояние между нитями утка, θ — угол подъема наклонных участков соответствующих нитей, l_o — ширина поперечного сечения нитей утка, F — растягивающее усилие, $M_{основы}$ — изгибающий момент (граничное условие) периодического элемента вдоль нитей основы

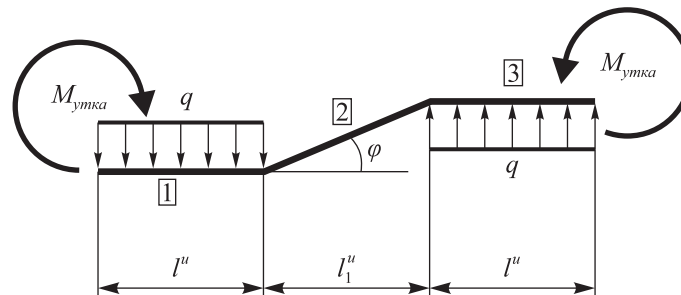


Рис. 3. Структурный элемент армирующих нитей утка в армирующем слое тканого композита: l_1^u — расстояние между нитями основы, φ — угол подъема наклонных участков соответствующих нитей, l_u — ширина поперечного сечения нитей основы, $M_{утка}$ — изгибающий момент (граничное условие) периодического элемента вдоль нитей утка

2. Закономерности процессов деформирования в структуре гибких тканых композитов

Из равенства вертикальных перемещений структурных элементов нитей основы и утка на первом участке и жесткости стержней на участках соприкосновения определяется значение приращения распределенной нагрузки Δq_i на каждом i -м шаге приращения нагрузки:

$$\Delta q_i = \frac{2\Delta F l_1^o B \operatorname{tg} \theta_i}{l^u D + 2l^o C},$$

где B, C, D — геометрические параметры, определяемые по формулам

$$B = 3(l^o)^2 + 3l^o l_1^o + \frac{4(l_1^o)^2}{\cos \theta_i},$$

$$C = 2.5(l^o)^3 + 5(l^o)^2 l_1^o + 3l^o (l_1^o)^2 + \frac{4(l_1^o)^3}{\cos \theta_i},$$

$$D = 6(l_1^u)^2 l^u + 10l_1^u (l^u)^2 + 5(l^u)^3 + 8 \frac{(l_1^u)^3}{\cos \theta_i}.$$

В процессе деформирования структурного элемента (рис. 2, 3) его участки работают в основном на растяжение и изгиб. Перемещения на участках рамы от изгибающих моментов вычисляются методом Мора–Верещагина. Работой поперечных сил пренебрегаем. Обозначим

через $E = E_r \nu_r + (1 - \nu_r) E_m$ модуль упругости гибкого тканого композита в области упругих деформаций, где E_r — модуль упругости материала волокон нитей армирования, E_m — модуль упругости связующего материала нитей армирования, ν_r — объемная доля содержания волокон армирования в нити. Обозначим через $J_n = \frac{bh_0^3}{12}$ момент инерции нитей основы или утка соответственно, где b — ширина поперечного сечения нити, h_0 — высота поперечного сечения нити. Тогда вертикальное смещение первого участка $\Delta_{y,i}^{\text{left}}(M)$ относительно третьего под действием внутренних изгибающих моментов M на каждом приращении внешней нагрузки определяется так:

$$\Delta_{y,i}^{\text{left}}(M) = \frac{1}{48EJ_n} (\Delta F l_1^o B \operatorname{tg} \theta_i - \Delta q l^o C).$$

Введем параметр

$$\Delta K_i = \Delta F l_1^o \operatorname{tg} \theta_i - \Delta q_i \left((l^o)^2 + l^o l_1^o \right),$$

характеризующий отношение внешней нагрузки с надавливанием накрест лежащих нитей друг на друга. Тогда горизонтальное удлинение структурного элемента от изгибающих моментов $\Delta_{x,i}^{\text{right}}(M)$ на каждом приращении внешней нагрузки от внутренних изгибающих моментов M имеет вид

$$\Delta_{x,i}^{\text{right}}(M) = \frac{l_1^o \operatorname{tg} \theta_i}{48EJ_n} \left(\Delta K_i (3l^o + 4l_1^o) + \Delta q (l^o)^2 (l^o + l_1^o) \right).$$

Для расчета изменения угла наклона второго участка θ необходимо определить перемещения на этом участке. Горизонтальное и вертикальное перемещения второго участка на каждом i -м приращении внешней нагрузки относительно первого и третьего участков от внутренних изгибающих моментов M имеют вид

$$\begin{aligned} \Delta_{x,i}^2(M) &= \frac{l_1^o \operatorname{tg} \theta_i}{12EJ_n} \left(\Delta K_i l_1^o + \Delta q_i (l^o)^2 l_1^o \right), \\ \Delta_{y,i}^2(M) &= \frac{1}{12EJ_n} \left(\Delta K_i (l_1^o)^2 + \Delta q_i (l^o)^2 l_1^o \right). \end{aligned}$$

Обозначим через $A_n = bh_0$ площадь поперечного сечения нити основы, аппроксимированной прямоугольником. Вычисляем приращение перемещения от внутренней продольной силы N на первом и третьем участках:

$$\Delta_x^1(N) = \frac{\Delta F l^o}{2EA_n} = \Delta_x^3(N).$$

Вычисляем приращения перемещения от внутренней продольной силы N на втором участке:

$$\Delta_x^2(N) = \frac{\Delta F \cos \theta + \Delta q_i l^o \sin \theta}{EA_n}.$$

В процессе деформирования гибкого тканого композита происходит формоизменение и выпрямление 2-го участка структурного элемента, что влечет за собой изменение угла наклона θ для 2-го участка структурного элемента.

Угол наклона 2-го участка θ на каждой итерации, с учетом перемещений, достигнутых на участках структурного элемента на предыдущей итерации, определяется по формуле

$$\theta_{i+1} = \arctg \left(\frac{l_1^o \operatorname{tg} \theta_i - \Delta_{y,i}^2(M, \theta_i)}{l_1^o + \Delta_{x,i}^{\text{right}}(M, \theta_i) - \Delta_{x,i}^2(M, \theta_i) + \Delta_x^2(N, \theta_i)} \right).$$

В связи с изменением угла наклона второго участка и изменением длин на участках рассматриваемой рамы происходит изменение распределенной нагрузки q в соответствии с приведенными выше формулами.

Разработанная аналитическая модель позволяет определить изменение приращения распределенной нагрузки, от взаимного надавливания нитей основы на нити утка, а также определить изменение угла наклона второго участка структурных элементов (рис. 2, 3).

3. Применение и вывод количественных результатов

Для применения модели, предложенной в [Кожанов, Любимов, 2016; Кожанов, 2017], используем геометрические характеристики армирующего слоя композитов, представленные в таблице 1.

Исследуемые гибкие тканые композиты были изготовлены из армирующей ткани на основе рубленных лавсановых волокон и полиуретанового связующего материала [Кожанов, 2017]. Механические характеристики материалов представлены в таблице 2, где E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона, σ_t — величина напряжения, при котором начинается образование необратимых деформаций, E_t — модуль упрочнения в области необратимых деформаций.

Так как второй участок структурного элемента стремится выпрямиться, величина приращения распределенной нагрузки q уменьшается на каждом последующем шаге.

Таблица 1

Параметр	Марка композита		
	VP6545	VP6131	VP4126
Угол наклона θ , °	12	15	7
Угол наклона φ , °	15	17	8
Длина d_1^o , мм	0.4	0.35	0.4
Длина d_1^u , мм	0.5	0.45	0.5
Ширина нити основы b_o , мм	0.7		
Ширина нити утка b_u , мм			
Высота нити основы h_o , мм	0.5	0.4	0.25
Высота нити утка h_u , мм	0.5	0.4	0.25
Объемная доля содержания армирующих волокон в нитях r	0.85	0.9	0.98

Таблица 2

Компоненты композита	Материал	Механические характеристики			
		E , МПа	ν	σ_t , МПа	E_t , МПа
Армирующие волокна нитей	полиэфирные рубленые волокна (лавсан)	$1.2 \cdot 10^3$	0.2	—	—
Связующий материал	поливинилхлорид и полиуретан	35	0.35	20	20

При полном распрямлении структурного элемента приращение нагрузки q будет равно нулю. В этом случае завершается учет процесса формоизменения, и рама превращается в прямой стержень.

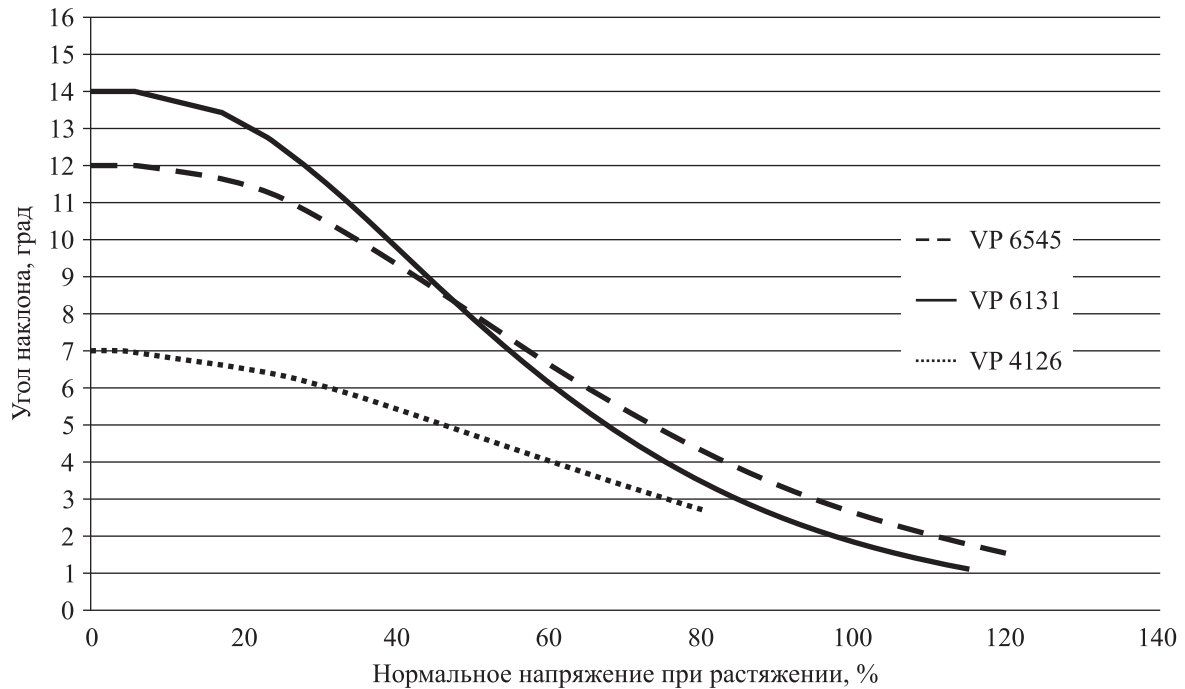


Рис. 4. Приращение распределенной нагрузки взаимного надавливания накрест лежащих нитей армирующего слоя тканого композита

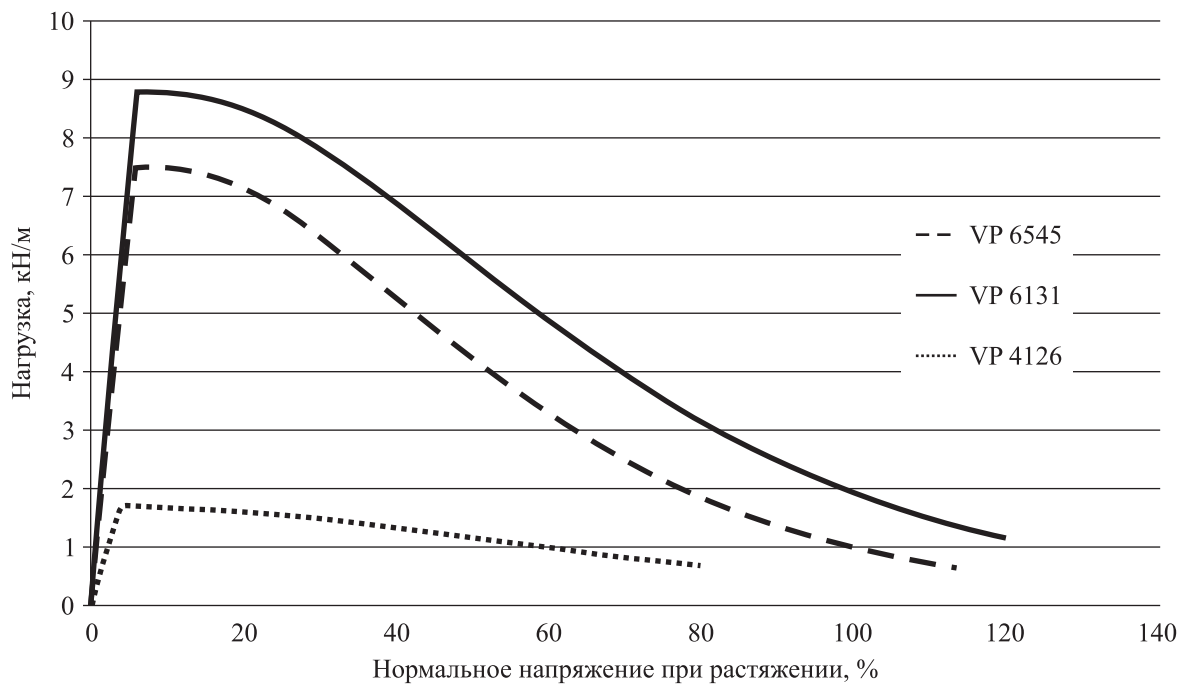


Рис. 5. Процесс выпрямления нитей плетения армирующего слоя тканого композита при растягивающей нагрузке

Анализируя полученные зависимости приращений распределенной нагрузки (рис. 4) и изменения угла наклона второго участка структурного элемента (рис. 5), можно сделать вывод о распрямлении нитей армирования в процессе растяжения вдоль направления их ориентации, а также об уменьшении приращения силы взаимного надавливания нитей основы и утка. Распрямление нитей в армирующей ткани переводит работу нитей из состояния изгиба в центральное растяжение, что объясняет увеличение модулей упрочнения на третьем участке диаграммы деформирования в работе [Кожанов, 2017]. В ненагруженном состоянии напряжение от взаимного надавливания отсутствует. В начале процесса растяжения приращение величины напряжения взаимного надавливания имеет максимальное значение, затем величина приращения уменьшается с увеличением нагрузки.

4. Заключение

Полученные закономерности и представленные формулы расчета изменения угла наклона и величины взаимного надавливания нитей позволяют определить интервалы изменения принципа работы армирующего слоя гибких тканых композитов от изгиба к центральному растяжению и, учитывая образование необратимых деформаций в подобном классе материалов, определить предварительное нагружение для исключения образования дальнейших необратимых деформаций, связанных с процессами изгиба в армирующих нитях.

Список литературы (References)

- Багмунтов В. П.* Особенности построения единой структурной модели упруго-пластического деформирования слоистых волоконных композитов при статическом и циклическом нагружении // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2005. — № 3 (12). — С. 90–96.
- Bagmuntov V. P.* Osobennosti postroeniya edinoi strukturnoi modeli uprugoplasticheskogo deformirovaniya sloistykh voloknovykh kompozitov pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhenii [Features of constructing a single structural model of elastic-plastic deformation of layered fiber composites under static and cyclic loading] // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Izvestiya VSTU]. — 2005. — № 3 (12). — P. 90–96 (in Russian).
- Берендеев Н. Н., Кожанов Д. А., Любимов А. К.* Структурная модель гибкого тканого композита // Проблемы прочности и пластичности. — 2015. — Т. 77. — С. 162–171.
- Berendeev N. N., Kozhanov D. A., Liubimov A. K.* Strukturnaia model' gibkogo tkanogo kompozita [Structural model of flexible woven composite] // Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of strength and plasticity]. — 2015. — Vol. 77. — P. 162–171 (in Russian).
- Горохов А. Н., Казаков Д. А., Кочетков А. В., Модин И. А., Романов В. И.* Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатию и растяжении // Проблемы прочности и пластичности. — 2016. — Т. 76, № 3. — С. 251–256.
- Gorokhov A. N., Kazakov D. A., Kochetkov A. V., Modin I. A., Romanov V. I.* Issledovanie deformatsionnykh svoystv paketov pletenykh metallicheskiikh setok pri kvazistaticheskom szhatii i rastyazhenii [Investigation of deformation properties of braided metal mesh packages under quasi-static compression and tension] // Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of strength and plasticity]. — 2016. — Vol. 76, No. 3. — P. 251–256 (in Russian).
- Дедков Д. В., Зайцев А. В.* Концентрация напряжений в слое тканого композита с локальными дефектами при двухосном однородном равнокомпонентном макродеформировании // Вестник Самарского государственного техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. — 2013. — № 4 (33). — С. 66–75.
- Dedkov D. V., Zaitsev A. V.* Kntsentratsiya napryazhenii v sloe tkanogo kompozita s lokal'nymi defektami pri dvukhosnom odnorodnom ravnokomponentnom makrodeformirovanii [The stress concentration in the layer of woven composite with local defects under biaxial uniform ravnoapostol macrodeformation] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhn. un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series]. — 2013. — No. 4 (33). — P. 66–75 (in Russian).

- Дедков Д. В., Зайцев А. В., Ташкинов А. А.* Эффективные упругие модули тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — Т. 16, № 4 (3). — С. 526–530.
Dedkov D. V., Zaitsev A. V., Tashkinov A. A. Effektivnyye uprugie moduli tkanogo kompozita polotnianogo pleteniia s lokal'nymi tekhnologicheskimi defektami [Effective elastic moduli of a composite woven in a plain weave with local technological defects] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Samara scientific center]. — 2014. — Vol. 16, No. 4 (3). — P. 526–530 (in Russian).
- Каюмов Р. А., Куприянов В. Н., Мухамедова И. З., Сулейманов А. М., Шакирова А. М.* Методика анализа процесса деформирования пленочно-тканевого композита с учетом геометрической и физической нелинейности // Матем. моделирование и краев. задачи: Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1. Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. — Самара, 2007. — С. 119–121.
Kayumov R. A., Kupriyanov V. N., Mukhamedova I. Z., Suleimanov A. M., Shakirova A. M. Metodika analiza protsesssa deformirovaniya plenочно-tkanevogo kompozita s uchetom geometricheskoi i fizicheskoi nelineinosti [Method of analysis of the deformation process of a film-fabric composite taking into account geometric and physical nonlinearity] // Matem. modelirovanie i kraev. zadachi: Trudy chetvertoi Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhduнародnym uchastiem. Ch. 1. Matematicheskie modeli mekhaniki, prochnosti i nadezhnosti elementov konstruksii [Mathematical modeling and boundary value problems: Proceedings of the fourth all-Russian scientific conference with international participation. Part 1. Mathematical models of mechanics, strength and reliability of structural elements]. — Samara, 2007. — P. 119–121 (in Russian).
- Кожанов Д. А., Любимов А. К.* Модель гибкого тканого композита, учитывающая формоизменение внутренней структуры материала // Проблемы прочности и пластичности. — 2016. — Т. 78, № 3. — С. 311–321.
Kozhanov D. A., Liubimov A. K. Model' gibkogo tkanogo kompozita, uchityvaiushchaia formoizmenenie vnutrennei struktury materiala [A model of an elastic woven composite accounting for the change of form of the internal structure of the material] // Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of strength and plasticity]. — 2016. — Vol. 78, No. 3. — P. 311–321 (in Russian).
- Кожанов Д. А., Любимов А. К.* Моделирование процессов деформирования гибких тканых композитов. Ч. 1. Структурные модели // Проблемы прочности и пластичности. — 2017. — Т. 79, № 2. — С. 156–168.
Kozhanov D. A., Liubimov A. K. Modelirovanie protsessov deformirovaniya gibkikh tkanykh kompozitov. Ch. 1. Strukturnye modeli [Modeling of deformation processes of flexible woven composites. Part 1. Structural model] // Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of strength and plasticity]. — 2017. — Vol. 79, No. 2. — P. 156–168 (in Russian).
- Кожанов Д. А.* Моделирование поведения гибких тканых композитов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — Национальный исследовательский ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2017. — 19 с.
Kozhanov D. A. Modelirovanie povedeniia gibkikh tkanykh kompozitov [Modelling of the behavior of flexible woven composites]: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk [The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of physico-mathematical sciences]. — Nacional'nyj issledovatel'skij NNGU im. N. I. Lobachevskogo [Nizhny Novgorod State University], 2017. — 19 p. (in Russian).
- Кожанов Д. А., Любимов А. К.* Моделирование гибких тканых композитов в системе ANSYS MECHANICAL APDL // Компьютерные исследования и моделирование. — 2018. — Т. 10, № 6. — С. 789–799.
Kozhanov D. A., Lyubimov A. K. Modelirovanie gibkikh tkanykh kompozitov v sisteme ANSYS MECHANICAL APDL [Modeling of flexible woven composites in ANSYS MECHANICAL APDL system] // Computer Research and Modeling. — 2018. — Vol. 10, No. 6. — P. 789–799 (in Russian).
- Лихачева С. Ю.* Численное моделирование процессов деформирования и разрушения сред с регулярной структурой // Вестник МГСУ. — 2011. — Т. 1, № 2. — С. 158–162.
Likhacheva S. Yu. Chislennoe modelirovanie protsessov deformirovaniia i razrusheniia sred s reguliarnoi strukturoi [Numerical modeling of processes of deformation and destruction of environments with a regular structure] // Vestnik MGSU [Vestnik MGSU], 2011. — Vol. 1, No. 2. — P. 158–162 (in Russian).
- Bakar I. A., Kramer O., Bordas S., Rabczuk T.* Optimization of elastic properties and weaving patterns of woven composites // Composite Structures. — 2013. — Vol. 100. — P. 575–591.

- Balea L., Dusserre G., Bernhart G.* Mechanical behavior of plain-knit reinforced injected composites: Effect of inlay yarns and fibre type // *Composites: Part B*. — 2014. — Vol. 56. — P. 20–29.
- Cai D., Tang J., Zhou G., Wang X., Li C., Silberschmidt V. V.* Failure analysis of plain woven glass/epoxy laminates: Comparison of off-axis and biaxial tension loadings // *Polymer Testing*. — 2017. — Vol. 60. — P. 307–320.
- Chaouachi F., Rahali Y., Ganghoffer J. F.* A micromechanical model of woven structures accounting yarn-yarn contact based on Hertz theory and energy minimization // *Composites. Part B*. — 2014. — Vol. 66. — P. 368–380.
- Chen Y. H., Aliabadi M. H.* Micromechanical modelling of the overall response of plain woven polymer matrix composites // *International Journal of Engineering Science*. — 2019. — Vol. 145. — Article 103163.
- Edgren F., Asp L. E.* Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites // *Composites: Part A*. — 2005. — Vol. 36. — P. 173–181.
- Gatouillat S., Bareggi A., Vidal-Salle E., Boisse P.* Meso modelling for composite preform shaping — Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network // *Composites. Part A*. — 2013. — Vol. 54. — P. 135–144.
- Hallal A., Younes R., Fardoun F., Nehme S.* Improved analytical model to predict the effective elastic properties of 2.5D interlock woven fabrics composite // *Composite Structures*. — 2012. — Vol. 94. — P. 3009–3028.
- Hasbin Z.* Theory of fiber reinforced materials: NASA Contractor Report 1974. — Washington, 1972. — 702 p.
- Kiasat M. S., Sangtabi M. R.* Effect of fiber bundle size and weave density on stiffness degradation and final failure of fabric laminates // *Composites Science and Technology*. — 2015. — Vol. 111. — P. 23–31.
- Lee M. G., Lee K. W., Hur H. K., Kang K. L.* Mechanical behavior of a wire-woven metal under compression // *Composite Structures*. — 2013. — Vol. 95. — P. 264–277.
- Madke R. R., Chowdhury R.* A multiscale continuum model for inelastic behavior of woven composite // *Composite Structures*. — 2019. — Vol. 226. — Article 111267.
- Modin I. A., Kochetkov A. V., Leontev N. V.* Deformation properties of metal woven mesh packets. Experiment and simulation (modeling) // *Scientific articles collection of the 36th International Scientific Conference of Eurasian Scientific Association (Moscow, February 2017)*. — 2018. — No. 2-1 (36). — P. 13–17.
- Munoz R., Martinez V., Sket F., Gonzalez C., LLorca J.* Mechanical behavior and failure micromechanisms of hybrid 3D woven composites in tension // *Composites: Part A*. — 2014. — Vol. 59. — P. 93–104.
- Murugan R., Ramesh R., Padmanabhan K.* Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates // *Procedia Engineering*. — 2014. — Vol. 97. — P. 459–468.
- Pastore C. M.* Illustrated Glossary of Textile Terms for Composites: NASA Contractor Report 191539. — North Carolina, 1993. — 34 p.
- Rossol M. N., Rajan V. P., Zok F. W.* Effect of weave architecture on mechanical response of 2D ceramic composites // *Composites. Part A*. — 2015. — Vol. 74. — P. 141–152.
- Sapozhnikov S. B., Kheruvimov A. V., Khoruzhiy A. S.* Control of composite nonlinear deformation by local curvature of yarns // *Bulletin of the South Ural State University*. — Ser. Mathematics. Mechanics. Physics. — 2019. — Vol. 11, No. 1. — P. 43–49.
- Shi T., Chen W., Gao C., Hu J., Zhao B., Wang P., Wang M.* Biaxial strength determination of woven fabric composite for airship structural envelope based on novel specimens // *Composite Structures*. — 2018. — Vol. 184. — P. 1126–1136.

