

УДК 539.3

МОДЕЛЬ ГИБКОГО ТКАНОГО КОМПОЗИТА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА

© 2016 г.

Кожанов Д.А., Любимов А.К.

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

pbk996@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2016

Предложена структурная модель гибкого тканого композита, основанная на моделировании механизма деформирования периодических элементов переплетения армирующей композиционной ткани. За периодический элемент принимается повторяющийся фрагмент композита, содержащий переплетение нитей, состоящих из упругих трощеных жгутов и упругопластического наполнителя. Учтено выпрямление нитей переплетения и взаимодействие продольных и поперечных нитей при деформировании композита. Выполненные натурные и численные эксперименты с использованием предложенной модели показали хорошее качественное и количественное совпадение результатов до значений деформаций, составляющих 75% от предельной величины, соответствующей разрушению материала.

Ключевые слова: гибкий тканый композиционный материал, периодический элемент, диаграмма деформирования, формоизменение, эксперимент.

Введение

Широкое использование тканых композитов при проектировании и создании конструкций предопределяет необходимость прогнозирования поведения и механических свойств подобных материалов. Исследованиям поведения тканых композитов, разработке математических моделей посвящены работы ряда авторов [1–8]. Исследования выполнены в основном для «жестких» негибких композитов с армирующей тканью, состоящей из углеродных или стеклянных волокон без наполнителя (матрицы) композита.

Поведение гибких тканых композитов существенно отличается от поведения «жестких» негибких композитов с армирующей тканью и требует разработки соответствующих моделей поведения. В настоящее время единой модели для гибких тканых композитов в литературе не представлено. Известные модели [9, 10] позволяют получить некоторые прочностные характеристики, такие как модуль упрочнения при малых деформациях, предел прочности, максимальные деформации и др., описать поведение материала до уровня деформаций, составляющих до 40% от деформаций, соответствующих разрушению [11], построить диаграмму деформиро-

вания в виде кусочно-линейной кривой [7, 12]. Недостаточно изучено также влияние геометрической нелинейности и формоизменения структуры гибких композитов при больших деформациях. Прежде всего это связано со сложностью создания моделей для трехмерных неоднородных структур, учитывающих изменение внутренней геометрии материала в процессе деформирования. Поэтому разработка математических моделей деформирования гибких тканых материалов с учетом влияния указанных факторов становится актуальной.

Перспективным направлением являются микромеханические модели с выделением периодических элементов переплетения, позволяющие описать поведение материала с различной структурой используемого переплетения [6–8], получить прочностные и эксплуатационные характеристики материала.

В статье предлагается структурная модель гибкого тканого композита, базирующаяся на описании деформаций периодического элемента переплетения как в упругой, так и в упругопластической области. Предложенная модель учитывает формоизменение внутренней структуры материала, геометрическую нелинейность, связанную с большими деформациями, и особенности поведения материалов, из которых создан композит.

1. Модель деформирования

В структуре гибких тканых композитов с полотняным переплетением нитей армирующей ткани имеются два направления армирования: направление вдоль нити утка и вдоль нити основы [13]. Полотняное переплетение представляет собой регулярно-периодическую структуру, состоящую из элементарных периодических ячеек (ЭПЯ). Для рассматриваемого типа переплетения ЭПЯ [11, 14–16] выбирается в виде прямоугольного фрагмента, изображенного на рис. 1, где 1 – нить основы; 2 – нить утка; 3 – ЭПЯ.

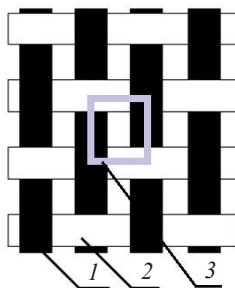


Рис. 1. Схема полотняного переплетения с выделенной ЭПЯ (вид сверху)

Продольное сечение тканого композита вдоль нити основы показано на рис. 2, где обозначено: 1 – нить основы, 2 – нить утка, 3 – линейная аппроксимация формы нити основы, 4 – матрица (заполнитель) гибкого тканого композита, 5 – структурный элемент.

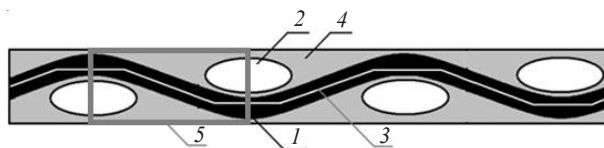


Рис. 2. Продольное сечение тканого композита вдоль нити основы

Нити основы и утка имеют форму, близкую к синусоидальной, и в дальнейшем при моделировании структуры ЭПЯ форма нити аппроксимируется набором прямолинейных участков [6, 7], а поперечное сечение нитей считается прямоугольным [7, 17] с размерами: b – ширина сечения, h – высота сечения.

Рассмотрим процесс деформирования ЭПЯ в условиях одноосного растяжения вдоль нитей основы. Влиянием касательных напряжений, вызываемых действием поперечных сил от надавливания нитей утка на нити основы, пренебрегаем ввиду их малости по сравнению с растягивающими напряжениями. Основную нагрузку при продольном растяжении испытывают нити, расположенные в направлении основы, а нити утка не позволяют плетению потерять заданную форму переплетения ткани. В дальнейшем полагаем, что на участках соприкосновения нити утка и основы «жестко» склеены друг с другом, то есть в этих областях они имеют одинаковые перемещения и деформации. Ввиду того, что величина модуля упругости нитей армирования композита на порядок больше, чем у заполнителя, пренебрегаем влиянием матрицы композита на его механические характеристики.

Для описания процесса деформирования ЭПЯ с учетом введенной аппроксимации нить основы представляется в виде плоской рамы (рис. 3), состоящей из трех стержней прямоугольного поперечного сечения и находящейся под действием растягивающей силы F . Длины l , l_1 , угол наклона α и толщина нити $h = l_1 \operatorname{tg} \alpha$ определяются геометрией внутренней структуры материала.

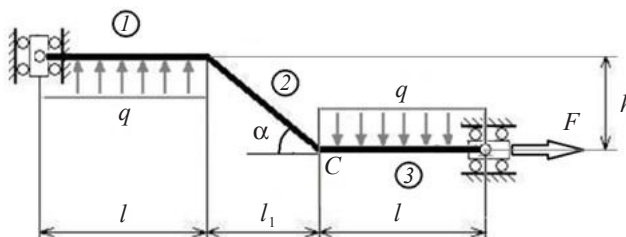


Рис. 3. Структурный элемент армирующих нитей гибкого тканого композита

Влияние нити утка на нить основы заменяется действием равномерно распределенной нагрузки q . Из условия равновесия рамы (сумма моментов всех сил вокруг точки опоры равна нулю) определяется величина нагрузки q :

$$q = \frac{Fl_1 \operatorname{tg} \alpha}{l^2 + ll_1}. \quad (1)$$

Удлинение нити основы в структурном элементе Δ_x при одноосном растяжении вдоль нитей основы равно перемещению правого торца рамы (см. рис. 3) от растягивающей силы F и складывается из удлинений первого, второго и третьего участков рамы.

Нити утка и основы соприкасаются между собой по всей длине первого и третьего участков. В этих областях (см. рис. 2) толщина композиционного материала вдвое больше толщины нити армирования, а жесткость стержней на растяжение на указанных участках равна:

$$EA = 2EA_n, \quad (2)$$

где A – площадь поперечного сечения структурного элемента, A_n – площадь поперечного сечения одной нити. Жесткость на изгиб первого и третьего участков рамы:

$$EJ = 8EJ_{\text{н}}, \quad (3)$$

где J – момент инерции поперечного сечения структурного элемента, $J_{\text{н}}$ – момент инерции поперечного сечения одной нити.

Перемещение правой опоры от действия растягивающей нагрузки определяется методом Мора – Верещагина [18]. Вертикальное смещение левой опоры относительно правой опоры от изгибающих моментов M [19, 20], необходимое для расчета изменения угла наклона второго участка рамы:

$$\Delta_y^C(M) = \frac{ql^2}{12EJ_{\text{н}}} \left(\frac{l_1^2}{\cos \alpha} + \frac{1}{4} \left(\frac{l}{4} + l_1 \right) \right). \quad (4)$$

Горизонтальное смещение правой опоры относительно левой опоры от изгибающих моментов

$$\Delta_x^C(M) = \frac{ql^2 l_1 \operatorname{tg} \alpha}{12EJ_{\text{н}}} \left(\frac{l_1}{\cos \alpha} + \frac{1}{4} \right), \quad (5)$$

а горизонтальное удлинение первого участка

$$\Delta_x^1(M) = \frac{ql^3 l_1 \operatorname{tg} \alpha}{48EJ_{\text{н}}}. \quad (6)$$

Горизонтальные удлинения стержней от действия растягивающей силы N на первом и третьем участках

$$\Delta_x^1(N) = \Delta_x^3(N) = \frac{Fl}{2EA_{\text{н}}}, \quad (7)$$

а на втором участке

$$\Delta_x^2(N) = \frac{F \cos \alpha + ql \sin \alpha}{EA_{\text{н}}}. \quad (8)$$

При растяжении материала за счет выпрямления нитей переплетения в армирующей ткани происходит формоизменение внутренней структуры материала, появление конечных деформаций армирующих нитей. Процесс формоизменения, сопровождающийся изменениями пластической деформации и геометрических характеристик рамы, определяется последовательностью приращений внешней нагрузки. В этом случае модель структуры материала формулируется в приращениях [7, 11], что позволяет описать поведение материала вплоть до полного распрямления нитей армирования, ориентированных вдоль приложенной растягивающей силы.

Формоизменение структурного элемента (рамы) определяется на каждом шаге приращения растягивающей силы. Угол наклона второго участка на последующем шаге находится с учетом величин геометрических характеристик структурного элемента (рамы), горизонтальных и вертикальных перемещений, достигнутых на предыдущем шаге:

$$\alpha_{i+1} = \operatorname{arctg} \left(\frac{l_1 \operatorname{tg} \alpha_i - \Delta_y^C(M_i, \alpha_i)}{l_1 + \Delta_x^C(M_i, \alpha_i) - \Delta_x^1(M_i) + \Delta_x^2(N_i, \alpha_i)} \right). \quad (9)$$

В связи с изменением угла наклона второго участка и растяжением всех участков структурного элемента происходит изменение величины распределенной на-

грузки q . На последующем шаге ее величина находится из соотношения (1) с учетом значения угла наклона (9) и удлинений на участках рамы (4)–(8), достигнутых на предыдущем шаге:

$$q_{i+1} = \frac{\Delta F(l_1 \operatorname{tg} \alpha_i - \Delta_y^C(M, \alpha_i))}{(l + \Delta_x^1(M, q_i, N, \alpha_i))^2 + (l + \Delta_x^1(M, q_i, N, \alpha_i))(l_1 + \Delta_x^C(M, \alpha_i) - \Delta_x^{1,2}(M, q_i, N, \alpha_i))}. \quad (10)$$

Так как второй участок структурного элемента стремится выпрямиться, то вертикальное смещение левой опоры относительно правой опоры Δ_y^C будет стремиться к значению толщины нити армирования h . При этом величина распределенной нагрузки q уменьшается на каждом последующем шаге. При полном распрямлении структурного элемента нагрузка q будет равна нулю. В этом случае завершается процесс формоизменения и рама превращается в прямолинейный стержень. Дальнейшее деформирование прямолинейной нити описывается центральным растяжением от продольных сил [18].

2. Моделирование поведения материала

Помимо описанного процесса формоизменения структуры гибких тканых композитов, необходимо моделирование поведения материалов – компонентов, из которых состоит композиционный материал.

Нити переплетения армирующей ткани композита являются также композиционным материалом, состоящим из двух компонентов: трощеный жгут и наполнитель (матрица). Результаты выполненных экспериментов [21] позволяют считать обоснованным предположение об упругом поведении трощеных жгутов и упруго-пластическом поведении матрицы. Пластические деформации возникают только в наклонном участке рамы (см. рис. 3), так как именно в этой области структурного элемента имеет место наименьшая жесткость нити.

Для нахождения удлинения рамы с учетом пластических деформаций воспользуемся теорией течения с линейным кинематическим упрочнением:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_t, \\ \sigma_t + E_t(\varepsilon - \varepsilon_t), & \varepsilon > \varepsilon_t, \end{cases} \quad (11)$$

где E – модуль упругости, E_t – модуль упрочнения на пластическом участке диаграммы деформирования, σ_t – предел текучести, $\varepsilon_t = \sigma_t/E$ – максимальные упругие деформации.

Запишем величину пластических деформаций ε_p с учетом (11):

$$\varepsilon_p = \frac{E - E_t}{E E_t} (\sigma - \sigma_t). \quad (12)$$

Определим энергию, затраченную на пластическое деформирование, для дальнейшей возможности применения теоремы Кастельяно [17]. Удельная внутренняя энергия деформаций, накопленная при деформировании материала, находится из соотношения

$$W = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma d\varepsilon = (\sigma^2 - \sigma_t^2) \frac{E - E_t}{2E E_t}. \quad (13)$$

Граница между зонами упругого и пластического деформирования η_0 в прямоугольном поперечном сечении стержня при изгибе определяется из соотношения:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2\varepsilon}{h} = \frac{\varepsilon_t}{\eta_0}, \quad (14)$$

где ρ – радиус кривизны, ε – полная деформация.

Полная деформация при пластическом деформировании определяется из (11):

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_t}{E_t} + \frac{\sigma_t}{E_t} = \frac{\sigma_t E_t + E(\sigma - \sigma_t)}{E E_t}. \quad (15)$$

Учитывая (15), из соотношения (14) получим

$$\eta_0 = \varepsilon_t \rho = \frac{\sigma_t E_t h}{2(\sigma_t E_t + E(\sigma - \sigma_t))}. \quad (16)$$

Приращение внутренней энергии в раме с учетом пластической деформации на i -м шаге приращения нагрузки вычисляется по формуле:

$$\Delta U_{\text{пласт}} = \int_0^{l_1/2} \int_0^b \int_{\eta_0} W dV = \frac{b l_1 h (E - E_t)}{4 E E_t} (\sigma_i^2 - \sigma_t^2) \left[1 - \frac{\sigma_t E_t}{\sigma_t E_t + E(\sigma_i - \sigma_t)} \right], \quad (17)$$

где σ_i – нормальные напряжения в раме от изгиба на i -м шаге.

Применяя теорему Кастельяно [17], находим приращение удлинения наклонного участка рамы (см. рис. 3), обусловленное приращением растягивающей силы F в направлении ее действия на i -м шаге:

$$\Delta_x^{\text{пласт}} = \frac{\partial \Delta U_{\text{пласт}}}{\partial F} = \frac{b l_1 h (E - E_t)}{2 E E_t} \times \left\{ 2\sigma_i \left(1 - \frac{\sigma_t E_t}{\sigma_t E_t + E(\sigma_i - \sigma_t)} \right) - (\sigma_i^2 - \sigma_t^2) \left[\frac{\sigma_t E_t E}{A(\sigma_t E_t + E(\sigma_i - \sigma_t))^2} \right] \right\}. \quad (18)$$

Горизонтальное перемещение правого торца структурного элемента относительно левой опоры при каждом приращении нагрузки складывается из перемещений от упругих и пластических деформаций. Таким образом, на i -м шаге приращения растягивающей силы F приращение удлинения структурного элемента (рамы) таково:

$$\Delta_i = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \Delta_x^i(N_i) + \Delta_x^C(M_i), & \sigma_i \leq \sigma_t, \\ \sum_{i=1}^3 \Delta_x^i(N_i) + \Delta_x^C(M_i) + \Delta_{x,i}^{\text{пласт}}, & \sigma_i > \sigma_t. \end{cases} \quad (19)$$

Полученные соотношения (19) определяют зависимость величины приращения горизонтальных перемещений структурного элемента (с учетом формоизменения геометрической структуры), вызванных изгибом [19, 20] и растяжением нити от приращения внешней силы F . Учитывая связь между приращением перемещений (19) и длиной структурного элемента $L = 2l + l_1$, а также между растягивающей силой F и характеристиками поперечного сечения нитей армирования (2), (3), получаем диаграмму деформирования в осях напряжение – деформация для всей ЭПЯ исследуемого материала.

3. Достоверность модели

Оценка достоверности предложенной модели гибкого тканого композита с плотным плетением армирующих нитей осуществлялась путем сравнения результатов численных экспериментов, полученных с использованием предложенной модели, с результатами натурных экспериментов. В качестве основной характеристики для сравнения использовалась диаграмма деформирования материала, определяющая связь между напряжениями и деформациями [16, 21].

3.1. Экспериментальные исследования. Для определения диаграммы деформирования и механических свойств гибких тканых композитов был выполнен натурный эксперимент в соответствии с методикой, предложенной в работах [11, 21].

Применялись образцы материала, имеющие следующие геометрические характеристики (рис. 4): длина рабочей части $l_0 = 22$ мм, ширина образца $b_0 = 16$ мм, $l^* = 16$ мм, толщина $h = 0,5$ мм, ширина нити в образце $b = 0,7$ мм, длина горизонтального участка структурного элемента $l = 0,3$ мм, длина наклонного участка структурного элемента $l_1 = 0,5$ мм (см. рис. 3). Образцы вырезались из материала таким образом, чтобы направление основы совпадало с продольной осью образца. Эксперимент на статическое одноосное растяжение выполнялся с использованием установки Amsler HC10 с погрешностью измерений, равной 0,5% от измеряемой величины. Полученная диаграмма растяжения в осях сила–перемещение пересчитывалась в диаграмму деформирования с учетом соотношения между внутренними силами и геометрическими характеристиками образцов. Скорость деформирования составляла 0,3 мм/с.

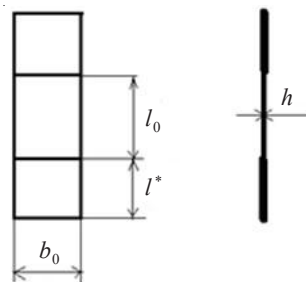


Рис. 4. Образец материала

Полученные в эксперименте характеристики материалов, составляющих нити ткани композита, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тип материала	Материал	E , МПа	ν	σ_t , МПа	E_t , МПа
Армирующие волокна нитей	Полиэфирное волокно (лавсан)	$1,2 \cdot 10^3$	0,2	–	–
Матрица (заполнитель) композита	Поливинилхлорид и полиуретан	35	0,35	20	20

3.2. Диаграммы деформирования. На рис. 5 представлены расчетная диаграмма деформирования, полученная с использованием предложенной модели, и усредненная экспериментальная диаграмма деформирования.

Анализ результатов показывает, что предложенная структурная модель позволяет хорошо описать поведение гибкого тканого композиционного материала при

величинах деформаций до 14%, что составляет около 75% от величины деформации, соответствующей разрушению материала. Максимальное расхождение между результатами натуральных и численных экспериментов, достигаемое на конце интервала, не превышает 7%. При деформациях, превышающих значения 14%, наблюдаются значительные расхождения.

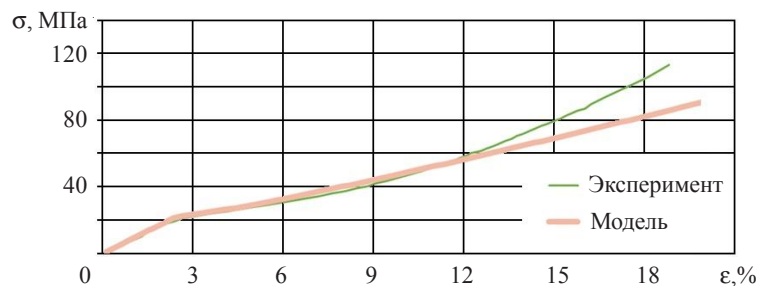


Рис. 5. Диаграмма деформирования

Выводы

С использованием идей структурного подхода, используемых при описании поведения композитов с тканым армированием, предложена структурная модель гибкого тканого композита, учитывающая нелинейность поведения материала, связанную с формоизменением структуры переплетения. Развивая существующие структурные модели [6, 7, 11, 15, 16], предложенная модель позволяет учесть пластическое деформирование матрицы, возникновение и развитие формоизменения структурного элемента. Проведенная оценка достоверности показала, что модель удовлетворительно качественно и количественно описывает известные экспериментальные данные [21] до 75% от величины деформации, соответствующей разрыву образца. За пределами указанных деформаций необходимо более точно описывать влияние взаимодействия накрест лежащих нитей в переплетении, например влияние жесткости поперечной нити (нити утка) на растяжение продольной нити (нити основы).

Список литературы

1. Lomov S.V., Gusakov A.V., Huysmans G., Prodromou A., Verpoest I. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. *Compos. Sc. and Tech.* 2000. Vol. 60. P. 2083–2095.
2. Lomov S.V., Parnas R.S., Bandyopadhyay Ghosh S., Verpoest I., Nakai A. Experimental and theoretical characterisation of the geometry of flat two- and three-axial braids. *Textile Research J.* 2002. Vol. 72. P. 706–712.
3. Lomov S.V., Truong Chi T., Verpoest I., Peeters T., Roose D., Boisse Ph., Gasser A. Mathematical modelling of internal geometry and deformability of woven preforms. *Int. J. of Forming Processes.* 2003. Vol. 6. P. 413–442.
4. Verpoest I., Lomov S.V. Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. *Composites Science and Technology.* 2005. Vol. 65. P. 2563–2574.
5. Lomov S.V., Mikolanda T., Kosek M., Verpoest I. Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality implementation. *Journal of the Textile Institute.* 2007. Vol. 98, No 1. P. 1–13.
6. Edgren F., Asp L.E. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites. *Composites: Part A.* 2005. Vol. 36. P. 173–181.

7. Берендеев Н.Н. Описание поведения тканого композита при статическом нагружении с использованием структурной модели. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2013. №4 (4). С. 173–179.
8. Моссаковский П.А., Баландин В.В., Беляев А.П., Белякова Т.А., Брагов А.М., Инохин А.В., Костырева Л.А. Исследование диссипативных факторов при пробивании многослойных тканых преград. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77, №4. С. 385–392.
9. Дедков Д.В., Ташкинов А.А. Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами при чистом формоизменении. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2013. Т. 6, №1. С. 103–109.
10. Дедков Д.В. *Математическая модель механического поведения тканых композитов с локальными технологическими дефектами*: Дис. ... канд. техн. наук. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь, 2015. 112 с.
11. Берендеев Н.Н., Кожанов Д.А., Любимов А.К. Структурная модель гибкого тканого композита. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77, №2. С. 162–171.
12. Мангушева А.Р. *Оценка кратковременной и длительной прочности пленочно-тканевого композиционного материала*: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казанский (Приволжский) федеральный университет. Казань, 2012. 108 с.
13. Моссаковский П.А., Антонов Ф.К., Белякова Т.А., Костырева Л.А., Брагов А.М., Баландин В.В. Экспериментальное исследование и конечно-элементный анализ тканых композитов в условиях ударного нагружения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Вып. 76. Ч. 1. С. 39–45.
14. Naik R.A. Analysis of woven and braided fabric reinforced composites. *NASA CR-194930*. 1994. 46 p.
15. Кожанов Д.А. Особенности конечно-элементного моделирования вида структурного элемента гибких тканых композитов. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Физико-математические науки*. 2016. Вып. 1 (237). С. 7–15.
16. Любимов А.К., Кожанов Д.А. Моделирование вида структурного элемента гибких тканых композитов при статическом растяжении с применением метода конечных элементов в ANSYS. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2016. Т. 8, №1. С. 113–120.
17. *Композиционные материалы: Справочник*. Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
18. Феодосьев В.И. *Сопrotивление материалов*. М.: Наука, 1967. 552 с.
19. Степанов С.Г. Математическая модель равновесия основной нити в зоне формирования однослойной ткани. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2006. №1. С. 47–51.
20. Гречухин А.П., Селиверстов В.Ю. Исследование формы нити в ткани полотняного переплетения. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2013. №5. С. 41–44.
21. Берендеев Н.Н., Любимов А.К., Шабаров В.В., Дербенев С.Г., Каратаев В.Н. Экспериментальное исследование деформационных свойств тканых композитов. *Проблемы прочности и пластичности*. 2006. Вып. 68. С. 213–220.

References

1. Lomov S.V., Gusakov A.V., Huysmans G., Prodromou A., Verpoest I. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. *Compos. Sc. and Tech.* 2000. Vol. 60. P. 2083–2095.
2. Lomov S.V., Parnas R.S., Bandyopadhyay Ghosh S., Verpoest I., Nakai A. Experimental and theoretical characterisation of the geometry of flat two- and three-axial braids. *Textile Research J.* 2002. Vol. 72. P. 706–712.
3. Lomov S.V., Truong Chi T., Verpoest I., Peeters T., Roose D., Boisse Ph., Gasser A. Mathematical modelling of internal geometry and deformability of woven preforms. *Int. J. of Forming Processes*. 2003. Vol. 6. P. 413–442.
4. Verpoest I., Lomov S.V. Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65. P. 2563–2574.

5. Lomov S.V., Mikolanda T., Kosek M., Verpoest I. Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality implementation. *Journal of the Textile Institute*. 2007. Vol. 98, No 1. P. 1–13.
6. Edgren F., Asp L.E. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites. *Composites: Part A*. 2005. Vol. 36. P. 173–181.
7. Berendeev N.N. Opisaniye povedeniya tkanogo kompozita pri staticheskom nagruzhenii s ispol'zovaniem strukturnoy modeli. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2013. №4 (4). S. 173–179.
8. Mossakovskiy P.A., Balandin V.V., Belyaev A.P., Belyakova T.A., Bragov A.M., Inyukhin A.V., Kostyreva L.A. Issledovaniye dissipativnykh faktorov pri probivaniii mnogosloynnykh tkanykh pregrad. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2015. T. 77, №4. S. 385–392.
9. Dedkov D.V., Tashkinov A.A. Koeffitsienty kontsentratsii napryazheniy v sloe tkanogo kompozita s lokal'nymi tekhnologicheskimi defektami pri chistom formoizmenenii. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2013. T. 6, №1. S. 103–109.
10. Dedkov D.V. *Matematicheskaya model' mekhanicheskogo povedeniya tkanykh kompozitov s lokal'nymi tekhnologicheskimi defektami*: Dis. ... kand. tekhn. nauk. Permskiy natsional'nyy issledovatel'skiy politekhnicheskiy universitet. Perm', 2015. 112 s.
11. Berendeev N.N., Kozhanov D.A., Lyubimov A.K. Strukturnaya model' gibkogo tkanogo kompozita. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2015. T. 77, №2. S. 162–171.
12. Mangusheva A.R. *Otsenka kratkovremennoy i dlitel'noy prochnosti plenochno-tkanevogo kompozitsionnogo materiala*: Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Kazanskiy (Privolzhskiy) federal'nyy universitet. Kazan', 2012. 108 s.
13. Mossakovskiy P.A., Antonov F.K., Belyakova T.A., Kostyreva L.A., Bragov A.M., Balandin V.V. Eksperimental'noe issledovaniye i konechno-elementnyy analiz tkanykh kompozitov v usloviyakh udarnogo nagruzheniya. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2014. Vyp. 76. Ch. 1. S. 39–45.
14. Naik R.A. Analysis of woven and braided fabric reinforced composites. *NASA CR-194930*. 1994. 46 p.
15. Kozhanov D.A. Osobennosti konechno-elementnogo modelirovaniya vida strukturnogo elementa gibkikh tkanykh kompozitov. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2016. Vyp. 1 (237). S. 7–15.
16. Lyubimov A.K., Kozhanov D.A. Modelirovaniye vida strukturnogo elementa gibkikh tkanykh kompozitov pri staticheskom rastyazhenii s primeneniem metoda konechnykh elementov v ANSYS. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye*. 2016. T. 8, №1. S. 113–120.
17. *Kompozitsionnye materialy: Spravochnik*. Pod red. V.V. Vasil'yeva, Yu.M. Tarnopol'skogo. M.: Mashinostroeniye, 1990. 512 s.
18. Feodos'yev V.I. *Soprotivleniye materialov*. M.: Nauka, 1967. 552 s.
19. Stepanov S.G. Matematicheskaya model' ravnovesiya osnovnoy niti v zone formirovaniya odnosloynnoy tkani. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2006. №1. S. 47–51.
20. Grechukhin A.P., Seliverstov V.Yu. Issledovaniye formy niti v tkani polotnyanogo perepletaniya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2013. №5. S. 41–44.
21. Berendeev N.N., Lyubimov A.K., Shabarov V.V., Derbenev S.G., Karataev V.N. Eksperimental'noe issledovaniye deformatsionnykh svoystv tkanykh kompozitov. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2006. Vyp. 68. S. 213–220.

**A MODEL OF AN ELASTIC WOVEN COMPOSITE ACCOUNTING
FOR THE CHANGE OF FORM OF THE INTERNAL STRUCTURE
OF THE MATERIAL**

Kozhanov D.A., Lyubimov A.K.

*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

A structural model of an elastic woven composite is presented, based on modeling the deformation mechanism of periodical elements forming the woven structure of the reinforcing composite tissue. The presented model takes into account the change of form of the internal material structure, geometric nonlinearity resulting from large deformations, and peculiarities of the behavior of the materials the composite is made up of. A periodic element is taken to be a repeating part of the composite including interwoven filaments made up of elastic twisted bundles and of elastoplastic filling. Straightening of the interwoven filaments is accounted for, as well as the interaction of the longitudinal and transversal filaments of the deforming composite. Full-scale and numerical experiments done using the present model demonstrated good qualitative and quantitative agreement of the results up to the deformation values of 75% of the maximum value corresponding to failure of the material.

Keywords: elastic woven composite material, periodic element, deformation diagram, change of form, experiment.