

УДК 539.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГИБКИХ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ. ЧАСТЬ 1. СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ

© 2017 г.

Кожанов Д.А., Любимов А.К.

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

*pbk996@mail.ru*

*Поступила в редакцию 14.04.2017*

Осуществлен аналитический обзор исследований по моделированию процессов деформирования гибких тканых композитов, на основе которого сделан вывод о том, что известные модели, описывающие поведение тканых композитов, применимы в основном к «жестким» композитам на основе эпоксидной смолы, бетона, керамики. Предложен подход к разработке структурных моделей поведения гибких тканых композитов, основанный на моделировании процессов деформирования элементов внутренней структуры материала. С использованием предложенного подхода разработаны три структурные модели: ламинатная, элементарной периодической ячейки и рамной аналогии. Основная идея ламинатной модели заключается в дискретизации внутренней структуры армирующей ткани и создании слоистого эквивалента исходного материала. Модель элементарной периодической ячейки основана на детальном описании внутренней структуры материала. В модели рамной аналогии нити армирующей ткани представляются в виде плоских рам, учитывается изменение геометрической структуры и взаимодействие накрест лежащих нитей. Определены области адекватного применения предложенных моделей.

*Ключевые слова:* гибкий тканый композиционный материал, периодический элемент, формоизменение, необратимые деформации, структурная модель, метод конечных элементов.

### **Введение**

В связи с растущей сферой применения композиционных материалов задача моделирования поведения композитов под действием внешней нагрузки становится все более актуальной. Существуют различные виды классификации композитов: по типу армирующего материала и связующего, по степени наполнения армирующими элементами, по гибкости, жесткости, удельной плотности и др. [1–5]. Важным классом композиционных материалов являются гибкие тканые (тканевые) композиты. В таких материалах в качестве связующей матрицы используют мягкие гибкие полимерные материалы [6–8], а в качестве армирования – различные армирующие ткани [1, 9]. Композиты подобного вида легко поддаются формоизменению, но при этом имеют высокую прочность на растяжение [10–12].

Основными факторами, определяющими поведение тканых композитов при деформировании, являются свойства армирующей ткани и связующего, а также способ армирования, то есть различные схемы переплетения нитей в армирующем слое материала [12–14]. Наиболее распространенной схемой переплетения нитей в армирующей ткани является полотняная схема переплетения [10, 15, 16], однако встречаются композитные ткани с более сложным алгоритмом укладки нитей в переплетении или ткани с многоуровневым переплетением [7]. Результаты проведенных [10] и представленных в литературе экспериментальных исследований процессов деформирования тканых композитов [12, 13, 16] подтверждают вывод о существенном влиянии различных схем переплетения армирующей ткани и материалов на поведение композита в целом.

подавляющее большинство теоретических и экспериментальных исследований тканых композитов, авторами которых являются Р.А. Каюмов, А.Р. Мангушева, Н.Н. Берендеев, I. Verpoest, С.М. Pastore, Z. Hasbin, B. Stier, J.-W. Simon, S. Reese и др. [4–6, 10, 11], посвящено исследованию одноосного растяжения материала. Предложены различные подходы, позволяющие определить отдельные механические характеристики исследуемых материалов при одноосном растяжении; проведены экспериментальные исследования на одноосное растяжение «жестких» и гибких тканых композитов.

Вопросам поведения гибких тканых композитов в случае двухосного статического растяжения посвящено незначительное число исследований. В статье Д.В. Дедкова, А.В. Зайцева и А.А. Ташкинова [16] представлена разработанная авторами методика определения коэффициентов концентрации напряжений в армирующих слоях тканых композитов при двухосном равнокомпонентном растяжении. В публикации S. Gatouillat, A. Vareggi, E. Vidal-Salle, P. Boisse [17] с использованием метода конечных элементов описан процесс формоизменения внутренней геометрической структуры при двухосном статическом растяжении.

Разработка моделей, позволяющих описать поведение гибких тканых композитов при статическом растяжении вплоть до разрушения, учитывающих основные конструктивные, геометрические и механические особенности структуры композита [18], 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 [19–21], 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 [20], а конфигурация переплетения армирующей ткани сохраняется в процессе деформирования [19].

Для гибких тканых композиционных материалов изменение внутренней геометрии в процессе деформирования оказывает существенное влияние на их механическое поведение [22]. Эта особенность связана с типом связующего материала и характером деформаций нитей армирующей ткани, которые в процессе деформирования могут распрямляться в продольном направлении и изменять жесткость [22].

Важным фактором, определяющим поведение гибкого композита, является возможность возникновения повреждений в материале [23–25]. Описание разруше-

ния волокон и нарушения адгезии между волокном армирующих нитей и связующим материалом требует детализации структуры нитей армирования и подробного анализа напряженно-деформированного состояния структурных элементов переплетения ткани на мезоуровне [25].

Анализируя известные результаты исследований гибких тканых композитов, можно сделать вывод о недостаточном внимании, уделенном образованию необратимых деформаций. Появление необратимых деформаций связано с наличием таких факторов, как вязкоупругое поведение материала, развитие повреждений, вызываемых нарушением адгезии между волокнами нитей и их связующим, разрушение армирующих волокон и образование пластических деформаций [10, 12, 15, 18, 23–25].

Одним из основных при исследовании поведения гибких тканых композитов является класс задач о кратковременных нагрузках и деформациях, происходящих за конечный непродолжительный период времени. В этом случае для описания необратимых деформаций можно воспользоваться теорией течения с линейным кинематическим упрочнением. Возможность такого описания необратимых деформаций подтверждается результатами работ Р.А. Каюмова, А.Р. Мангушевой, полученными при исследовании задач кратковременной прочности подобных материалов [26]; В. Stier, J.-W. Simon, S. Reese [27]; O. Cousigne, D. Moncayo, D. Coutellier, P. Camanho, H. Naceur, S. Hampel [28] и других авторов.

## 1. Моделирование гибких тканых композитов

Предлагается подход, описывающий механическое поведение гибких тканых композитов, основанный на структурном описании их внутренней геометрии, для чего исследуется процесс деформирования армирующего слоя и связующего материала композита, производится учет формоизменения внутренней геометрической структуры материала, моделируются необратимые деформации армирующего слоя.

Армирующий слой гибких тканых композитов относят к классу периодических структур [1–5], вследствие чего необходимо определить основные геометрические параметры переплетения армирующей ткани, влияющие на механическое поведение всего композита. В рамках предложенного подхода композиция ткани из армирующих волокон и связующего материала представляется как однонаправленный композит [1], модель поведения которого содержит полное или частичное описание геометрической структуры материалов и описание процессов, протекающих в компонентах композита. Определяющее влияние на механическое поведение гибких тканых композитов оказывают: геометрическая структура армирующего слоя; свойства материалов, из которых создан композит; формоизменение внутренней структуры материала при деформировании; наличие необратимых деформаций.

Армирующий слой состоит из армирующей ткани. Основной схемой переплетения нитей в армирующих тканях является полотняное переплетение. При рассмотрении внутренней структуры полотняного переплетения выделяются периодически повторяющиеся фрагменты, геометрические параметры которых меняются в зависимости от используемых толщин нитей переплетения и расстояний между ними. К основным параметрам полотняного переплетения относятся ширина  $b_0$  и высота  $h_0$  поперечного сечения нитей основы, ширина  $b_u$  и высота  $h_u$  поперечного сечения нитей утка, расстояния между нитями основы и нитями утка  $d_1^o$  и  $d_1^u$ , углы подъема  $\theta$  и  $\varphi$  наклонных участков соответствующих нитей (рис. 1).

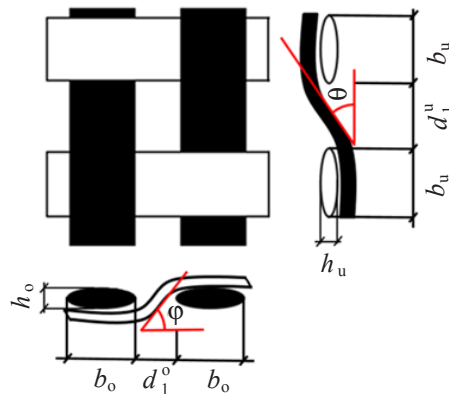


Рис. 1. Геометрические характеристики полотняного переплетения

Эти параметры позволяют однозначно определить геометрическую форму и структуру соответствующего полотняного переплетения.

Отличительной особенностью гибких тканых композитов является возможность их формоизменения вследствие использования гибких полимерных связующих материалов в композите и упругих гибких полиэфирных нитей на основе полиэтилен-терафлата, лавсана, нейлоновых нитей и др. В процессе деформирования нити переплетения армирующей ткани в гибких тканых композитах, в отличие от «жестких» тканых композитов, распрямляются в структуре армирующего слоя. При этом происходит формоизменение внутренней геометрической структуры композита, которое необходимо учитывать в процессе моделирования поведения материала. При распрямлении нитей переплетения возникают достаточно большие деформации, определяемые углами поворота нитей в армирующем слое, происходит изменение жесткости нитей переплетения армирующей ткани, связанное с переходом нитей из состояния изгиба в центральное растяжение.

Рассмотрим три структурные дискретно-непрерывные модели [29], разработанные на основе предложенного подхода и описывающие поведение исследуемых материалов при одноосном растяжении, учитывающие описанные выше факторы.

## 2. Ламинатная модель

Предлагается модификация известных вариантов моделирования «жестких» композитов для их применения к исследованию гибких тканых композитов. С использованием предложенного подхода рассмотрим формирование ламинатной модели [1, 19, 24, 30].

При малых величинах деформаций гибких тканых композитов не обязательно разрабатывать модель, полностью описывающую внутреннюю геометрическую структуру материала. Развитие положений известных ламинатных моделей [1, 19, 24] позволяет создать эффективную модель поведения гибких тканых композитов [30], не требующую при своей реализации значительных вычислительных ресурсов.

Основной идеей ламинатных моделей является дискретизация исходного композита и деструктуризация внутренней геометрии. Периодически расположенные фрагменты композита с одинаковыми свойствами ортотропии заменяются сплошными слоями материала с теми же свойствами ортотропии, что и у исходных фраг-

ментов. В пределах каждого слоя материал представляется как однонаправленный волокнистый композит [1], состоящий из связующего материала и армирующих волокон с заданным направлением. Таким образом вводятся несколько слоев, в которых армирующие волокна направлены вдоль заданной ориентации.

В ламинатной модели [30] было учтено образование необратимых деформаций и внутренних повреждений, связанных с нарушением адгезии армирующих волокон и связующего, при помощи концепции «размазанных» трещин [28]. При этом трещина не вводится явным образом, а при появлении повреждения изменяется жесткость материала. Для учета текущей геометрии структуры материала гибких тканых композитов используется модель деформирования в приращениях. В случае армирующей ткани в виде полотняного переплетения нитей с помощью подхода, развитого в работах [31, 32], нити переплетения, имеющие форму, близкую к синусоидальной кривой, с высокой долей точности аппроксимируются набором прямолинейных элементов. Каждый из введенных прямолинейных элементов периодически повторяется в структуре материала, что позволяет их объединить в соответствующий слой материала, имеющий те же свойства ортотропии, что и у исходных повторяющихся фрагментов.

Рассматривается модель, имеющая четыре слоя (рис. 2), в которых армирующие волокна направлены вдоль нити основы с углом наклона  $\theta = 0$  (слой 1), под углом  $\theta$  к нити основы (слой 2), вдоль нити утка с углом наклона  $\varphi = 0$  (слой 3) и под углом  $\varphi$  к нити утка (слой 4). Ориентация армирующих элементов в слоях определяется в соответствии с ориентацией нити в армирующей ткани.

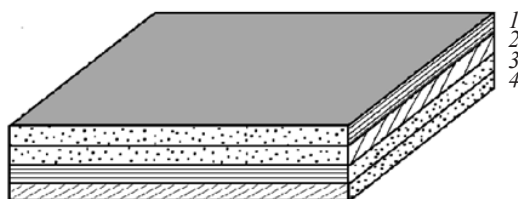


Рис. 2. Дискретизация исходной структуры и переход к ламинатной модели

Реализация предложенной модели может осуществляться в системах с помощью конечных элементов, учитывающих армирующие элементы внутри материала. В настоящем исследовании была использована система ANSYS Mechanical APDL. В качестве конечных элементов приняты элементы solid65, которые позволяют учесть наличие элементов армирования с заданной ориентацией внутри моделируемого тела и объемной долей содержания армирующих волокон с возможностью учета зарождения и влияния «размазанных трещин» внутри связующего материала армирующих нитей.

Модель применима только при малых значениях деформаций для описания поведения элементов конструкций, не подверженных значительному формоизменению в процессе деформирования. В случаях когда требуется описание поведения гибких тканых композитов вплоть до разрушения, необходима модель, учитывающая поведение материала при больших значениях деформаций. Такие модели можно реализовать при помощи полного описания переплетения армирующей ткани [33–36].

### 3. Трехмерная модель периодического элемента

При моделировании поведения материалов, имеющих периодическую внутреннюю геометрическую структуру, возможно использовать модели, основанные на полном геометрическом описании их периодического элемента. В случае моделирования тканых композитов такой периодический элемент принято называть элементарной периодической ячейкой (ЭПЯ). Моделирование поведения материалов через описание одной представительной ЭПЯ начало активно развиваться с появлением вычислительных комплексов с высоким уровнем мощности вычислительных ресурсов. Большинство моделей тканых композитов, основанных на полном описании внутренней геометрической структуры, как и в случае ламинатных моделей, применимы лишь к «жестким» композитам [25, 27, 31, 32].

При модификации модели ЭПЯ применительно к гибким тканым композитам, аналогично ламинатной модели учитывается наличие необратимых деформаций, описываемых теорией течения с линейным кинематическим упрочнением, зарождение и влияние внутренних повреждений связующего материала, связанных с нарушением адгезии армирующих волокон и связующего, при помощи концепции «размазанных» трещин. Для учета формоизменения материала используется модель деформирования в приращениях. В случае применения полотняного переплетения армирующих нитей в армирующей ткани в качестве элементарной периодической ячейки предлагается использовать набор двух пар ортогональных нитей (см. рис. 1). Добавляя к армирующему слою связующий материал и применяя аппроксимацию геометрической формы переплетения армирующей ткани, предложенную при разработке ламинатной модели, получаем ЭПЯ (рис. 3), которая позволяет с достаточной степенью точности описать поведение исследуемых материалов.

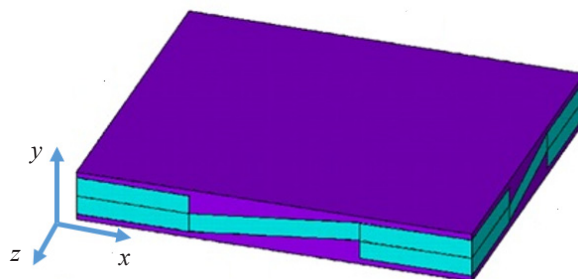


Рис. 3. Элементарная периодическая ячейка гибкого тканого композита

Нити армирования (основы и утка) являются однонаправленным композитом [1], состоящим из связующего нитей и армирующих волокон (жгутов). Для корректного моделирования армирующей ткани армирование нитей вводится индивидуально для каждого линейного участка и совпадает с ориентацией направления нити. При реализации этой модели в системе ANSYS Mechanical APDL связующий материал ЭПЯ гибкого тканого композита моделируется элементом solid185, а нити армирования – конечным элементом solid65 для учета зарождения и влияния «размазанных трещин» внутри связующего армирующих нитей.

В связи с необходимостью учета текущей геометрии на каждом приращении внешней нагрузки численная реализация модели требует значительных вычисли-



тельных ресурсов [37]. Одна ЭПЯ должна состоять минимум из 50000 конечных элементов, состоящих, в свою очередь, не менее чем из 4 узлов. Расчет ЭПЯ в приращениях приводит к необходимости проведения операций по определению параметров напряженно-деформированного состояния на каждом приращении. Учитывая, что формоизменение внутренней геометрии в материале происходит весьма интенсивно, задаваемое число приращений внешней нагрузки должно быть достаточным для детального описания поведения материала вплоть до разрушения.

#### 4. Модель рамной аналогии

Наиболее оптимальным, с точки зрения минимизации объема вычислительных ресурсов, является применение моделей деформирования тканых композитов, основанных на описании процессов деформирования нитей переплетения армирующей ткани, учете свойств материалов и указанных выше особенностей деформирования гибких тканых композитов [35, 36].

Была разработана модель [36], которая адекватно описывает поведение исследуемого материала с полотняным переплетением армирующей ткани вплоть до его полного разрушения при одноосном растяжении вдоль из одного направлений армирования. Модель позволяет получить полную диаграмму деформирования, которая описывает механическое поведение материала вплоть до разрушения, учитывает наличие необратимых деформаций и определяет механические характеристики материала.

При моделировании процесса растяжения гибких тканых композитов вдоль одного из направлений нитей (основы или утка) применяется аппроксимация геометрии нитей переплетения, описанная при разработке ламинатной модели. Как и в модели ЭПЯ, в качестве представительного фрагмента материала, для которого разрабатывается модель, выступает набор из четырех нитей (см. рис. 3).

Нить основы представляется в виде плоской рамы (рис. 4), состоящей из трех стержней прямоугольного поперечного сечения, находящейся под действием растягивающей силы  $F$ . Длины стержней  $l^o$ ,  $l_1^o$  и угол наклона  $\theta$  определяются геометрией внутренней структуры материала нитей основы.

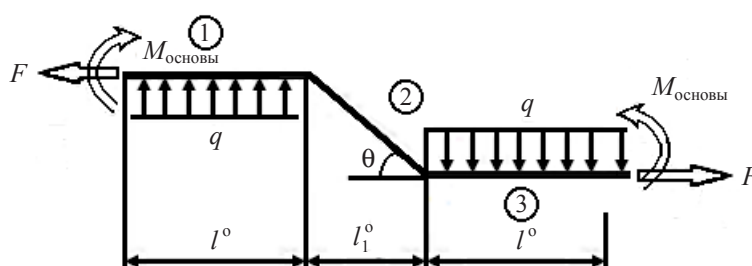


Рис. 4. Структурный элемент армирующих нитей основы ЭПЯ

Влияние нити утка на нить основы заменяется действием равномерно распределенной нагрузки  $q$ . Для определения величины  $q$  необходимо задать вид структурного элемента нитей утка (рис. 5), которые соприкасаются с нитью основы на первом и третьем участке структурного элемента.

При растяжении материала за счет выпрямления нитей переплетения в армирующей ткани происходит формоизменение внутренней структуры материала. Про-

цесс формоизменения определяется последовательностью приращений внешней нагрузки и сопровождается на каждом шаге изменениями упругой и необратимой деформаций и геометрических характеристик рамы. В этом случае модель деформирования материала формулируется в приращениях, что позволяет описать поведение материала вплоть до полного распрямления нитей армирования, ориентированных вдоль направления приложенной растягивающей силы. Из равенства вертикальных перемещений структурных элементов нитей основы и утка на первом участке и жесткости стержней на участках соприкосновения определяется значение распределенной нагрузки  $q$  на каждом  $i$ -м шаге приращения нагрузки [36]:

$$\Delta q_i = \frac{2\Delta F l_1^0 B \operatorname{tg} \theta_i}{l^u D + 2l^0 C},$$

где  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – геометрические параметры, определяемые по формулам:

$$B = 3(l^0)^2 + 3l^0 l_1^0 + \frac{4(l_1^0)^2}{\cos \theta_i},$$

$$C = 2,5(l^0)^3 + 5(l^0)^2 l_1^0 + 3l^0 (l_1^0)^2 + \frac{4(l_1^0)^3}{\cos \theta_i},$$

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

Учитывая текущую геометрию структурного элемента на каждом приращении внешней растягивающей нагрузки, можно описать поведение исследуемых материалов вплоть до разрушения.

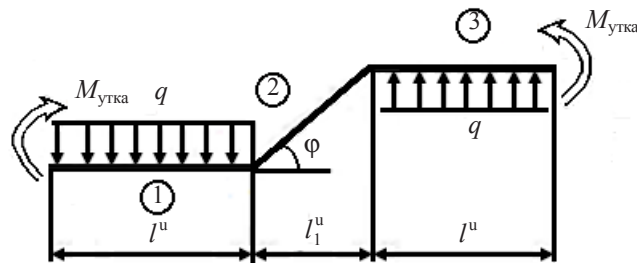


Рис. 5. Структурный элемент армирующих нитей утка ЭПЯ

Моделирование поведения геометрически сложных элементов конструкции, выполненных из гибких тканых композитов, выполняется с использованием алгоритма, в котором учитывается изменение радиуса кривизны наклонных участков структурных элементов [35] в процессе нагружения.

### Заключение

При разработке моделей, адекватно описывающих поведение гибких тканых композитов, необходимо учитывать внутреннюю геометрию армирующего слоя и свойства материалов, из которых состоит композит, особенности деформирования нитей армирующей ткани, которые за счет гибкого связующего могут изменять форму в процессе деформирования, повреждаться при нарушении адгезии между волокнами армирования и связующим материалом. Необратимые деформации гибких



тканых композитов описываются с помощью учета формоизменения армирующих нитей, концепции «размазанных» трещин и модели пластических деформаций. В случае когда армирующая ткань имеет форму полотняного переплетения, можно использовать модель рамной аналогии. Предложенный подход позволяет охватить достаточно широкий класс задач моделирования поведения гибких тканых композитов при кратковременном статическом растяжении.

#### Список литературы

1. *Композиционные материалы*: Справочник. Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
2. *Справочник по композиционным материалам*: В 2 кн. Пер. с англ. под ред. Б. Геллера. Кн. 1. Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. 447 с.
3. *Справочник по композиционным материалам*: В 2 кн. Пер. с англ. под ред. Б. Геллера. Кн. 2. Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. 581 с.
4. Hashin Z. *Theory of Fiber Reinforced Materials*: NASA Contractor Report CR-1974. Washington. 1972. 702 p.
5. Pastore C.M. *Illustrated Glossary of Textile Terms for Composites*: NASA Contractor Report 191539. North Carolina. 1993. 34 p.
6. Каюмов Р.А., Страхов Д.Е. Прогнозирование деформации во времени полимерных материалов с памятью формы при различной температуре. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011. № 2 (16). С. 195–199.
7. Михайлин Ю.А. *Специальные полимерные композиционные материалы*. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 700 с.
8. *Энциклопедия полимеров*. Под ред. В.А. Кабанова и др. Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1974. 1032 с.
9. Dow N.F., Ramnath V., Rosen B.W. *Analysis of Woven Fabrics for Reinforced Composite Materials*. NASA CR-178275. 1987. 243 p.
10. 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.
11. Swolfs Y., Crauwels L., Gorbatikh L., Verpoest I. The influence of weave architecture on the mechanical properties of self-reinforced polypropylene. *Composites: Part A*. 2013. Vol. 53. P. 129–136.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Горохов А.Н., Казаков Д.А., Кочетков А.В., Модин И.А., Романов В.И. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатии и растяжении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Т. 76. №3. С. 251–256.
16. Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А. Эффективные упругие модули тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014. Т. 16. №4 (3). С. 526–530.
17. Gatouillat S., Bareggi A., Vidal-Salle E., Boisse P. Meso modeling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network. *Composites: Part A*. 2013. Vol. 54. P. 135–144.
18. Boufaïda Z., Farge L., Andre S., Meshaka Y. Influence of the fiber/matrix strength on the mechanical properties of a glass fiber/thermoplastic-matrix plain weave fabric composite. *Composites: Part A*. 2015. Vol. 75. P. 28–38.

19. Кучер Н.К., Земцов М.П., Заразовский М.Н. Деформирование слоистых эпоксидных композитов, армированных высокопрочными волокнами. *Проблемы прочности*. 2006. №1. С. 41–57.
20. 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. 93–04.
21. 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.
22. 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. *Математическое моделирование и краевые задачи*. Ч. 1. 2007. С. 119–121.
23. Lu Z., Zhou Y., Yang Z., Liu Q. Multi-scale finite element analysis of 2.5D woven fabric composites under on-axis and off-axis tension. *Computational Materials Science*. 2013. Vol. 79. P. 485–494.
24. Reddy J.N., Robbins D.H.Jr. Computational modeling of damage and failures in composite laminates. *Encyclopedia of Computational Mechanics. Part 2: Solid and Structures. Chapter 13*. 2004. P. 431–460.
25. Borkowski L., Chattopadhyay A. Multiscale model of woven ceramic matrix composites considering manufacturing induced damage. *Composite Structures*. 2015. Vol. 126. P. 62–71.
26. Мангушева А.Р. Оценка кратковременной и длительной прочности пленочно-тканевого композиционного материала: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казанский (Приволжский) федеральный университет. Казань, 2012.
27. Stier B., Simon J.-W., Reese S. Comparing experimental to numerical meso-scale approach for woven fiber reinforced plastics. *Composite Structures*. 2015. Vol. 122. P. 553–560.
28. Cousigne O., Moncayo D., Coutellier D., Camanho P., Naceur H., Hampel S. Development of a new nonlinear numerical material model for woven composite materials accounting for permanent deformation and damage. *Composite Structures*. 2013. Vol. 106. P. 601–614.
29. Мышкис А.Д. *Элементы теории математических моделей*. Изд. 3-е, исправ. М.: КомКнига, 2007. 192 с.
30. 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.
31. Edgren F., Asp L.E. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites. *Composites: Part A*. 2005. Vol. 36. P. 173–181.
32. 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.
33. Кожанов Д.А. Особенности конечно-элементного моделирования вида структурного элемента гибких тканых композитов. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2016. №1 (237). С. 7–15.
34. Любимов А.К., Кожанов Д.А. Моделирование вида структурного элемента гибких тканых композитов при статическом растяжении с применением метода конечных элементов в ANSYS. *Компьютерные моделирования и исследования*. 2016. Т. 8. №1. С. 113–212.
35. Кожанов Д.А. Структурная модель гибких тканых, предварительно поврежденных композитов в условиях одноосного растяжения. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2014. Вып. 4 (206). С. 107–114.
36. 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.
37. 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. Т. 76. №1. С. 39–45.

## References

1. *Kompozitsionnye materialy*. Spravochnik. Pod red. V.V. Vasilyeva, Yu.M. Tarnopolskogo [*Composite Materials*. Handbook. Eds. V.V. Vasiliev, Yu.M. Tarnopolskii]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1990. 512 p. (In Russian).
2. *Spravochnik po kompozitsionnym materialam*: V 2 kn. Per. s angl. pod red. B. Gellera. Kn. 1. Pod red. Dzh. Lyubina [*Handbook on Composite Materials*. Two books. Translated from English. Ed. B. Geller. Book 1. Ed. G. Lyubin]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1988. 447 p. (In Russian).
3. *Spravochnik po kompozitsionnym materialam*: V 2 kn. Per. s angl. pod red. B. Gellera. Kn. 2. Pod red. Dzh. Lyubina [*Handbook on Composite Materials*. Two books. Translated from English. Ed. B. Geller. Book 2. Ed. G. Lyubin]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1988. 581 p. (In Russian).
4. Hashin Z. *Theory of Fiber Reinforced Materials*: NASA Contractor Report CR-1974. Washington. 1972. 702 p.
5. Pastore C.M. *Illustrated Glossary of Textile Terms for Composites*: NASA Contractor Report 191539. North Carolina. 1993. 34 p.
6. Kayumov R.A., Strahov D.E. Prognozirovaniye deformatsii vo vremeni polimernykh materialov s pamyatyu formy pri razlichnoy temperature [Prediction of deformation in the time of polymer materials at different temperatures]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [*News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*]. 2011. No 2 (16). P. 195–199 (In Russian).
7. Mikhailin Yu.A. *Spetsialnye polimernye kompozitsionnye materialy* [*Special polymer composite materials*]. Saint-Petersburg. Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ. 2009. 700 p. (In Russian).
8. *Entsiklopediya polimerov*. Pod red. V.A. Kabanova i dr. T. 2. [*Encyclopedia of Polimers*]. Ed. V.A. Kabanov et al. Vol. 2. Moscow. Sovetskaia entsiklopedia Publ. 1974. 1032 p. (In Russian).
9. Dow N.F., Ramnath V., Rosen B.W. *Analysis of Woven Fabrics for Reinforced Composite Materials*. NASA CR-178275. 1987. 243 p.
10. Berendeyev N.N., Ljubimov A.K., Shabarov V.V., Derbenev S.G., Karataev V.N. Eksperimentalnoe issledovanie deformatsionnykh svoystv tkanykh kompozitov [Experimental investigation of woven composite deformation properties]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2006. Iss. 68. P. 213–220 (In Russian).
11. Swolfs Y., Crauwels L., Gorbatikh L., Verpoest I. The influence of weave architecture on the mechanical properties of self-reinforced polypropylene. *Composites: Part A*. 2013. Vol. 53. P. 129–136.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Gorokhov A.N., Kazakov D.A., Kochetkov A.V., Modin I.A., Romanov V.I. Issledovanie deformatsionnykh svoystv paketov pletenykh metallicheskikh setok pri kvazistaticheskom szhatii i rastyazhenii [Investigating deformational properties of packages of woven metallic grids loaded in quasistatic compression and tension]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2014. Vol. 76. No 3. P. 251–256 (In Russian).
16. Dedkov D.V., Zaitsev A.V., Tashkinov A.A. Effektivnye uprugie moduli tkanogo kompozita polotnyanogo pleteniya s lokalnymi tekhnologicheskimi defektami [Effective elastic modules of woven linen weaving composite with local technological defects]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [*Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*]. 2014. Vol. 16. No 4(3). P. 526–530 (In Russian).
17. Gatouillat S., Bareggi A., Vidal-Salle E., Boisse P. Meso modeling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network. *Composites: Part A*. 2013. Vol. 54. P. 135–144.
18. Boufaïda Z., Farge L., Andre S., Meshaka Y. Influence of the fiber/matrix strength on the

mechanical properties of a glass fiber/thermoplastic-matrix plain weave fabric composite. *Composites: Part A*. 2015. Vol. 75. P. 28–38.

19. Kucher N. K., Zemtsov M. P., Zarazovskii M.N. Deformirovanie sloistyykh epoksidnykh kompozitov, armirovannykh vysokoprochnymi voloknami [Deformation of laminated epoxy composites reinforced with high-strength fibers]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 2006. No 1. P. 27–38 (In Russian).

20. 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.

21. 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.

22. Kayumov R.A., Kupriyanov V.N., Mukhamedova I.Z., Suleymanov A.M., Shakirova A.M. Metodika analiza protsessa deformirovaniya plenochno-tkanevogo kompozita s uchedom geometricheskoy i fizicheskoy nelineynosti [A technique for analyzing the process of deformation of a film-fabric composite with allowance for geometric and physical nonlinearity]. *Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi [Mathematical Modeling and Boundary-value Problems]*. Iss. 1. 2007. P. 119–121 (In Russian).

23. Lu Z., Zhou Y., Yang Z., Liu Q. Multi-scale finite element analysis of 2.5D woven fabric composites under on-axis and off-axis tension. *Computational Materials Science*. 2013. Vol. 79. P. 485–494.

24. Reddy J.N., Robbins D.H.Jr. Computational modeling of damage and failures in composite laminates. *Encyclopedia of Computational Mechanics. Part 2: Solid and Structures. Chapter 13*. 2004. P. 431–460.

25. Borkowski L., Chattopadhyay A. Multiscale model of woven ceramic matrix composites considering manufacturing induced damage. *Composite Structures*. 2015. Vol. 126. P. 62–71.

26. Mangusheva A.R. *Otsenka kratkovremennoy i dlitelnoy prochnosti plenochno-tkanevogo kompozitsionnogo materiala. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk [Evaluation of short-term and long-term strength of film-fabric composite material. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences]*. Kazan Federal University. 2012. 20 p. (In Russian).

27. Stier B., Simon J.-W., Reese S. Comparing experimental to numerical meso-scale approach for woven fiber reinforced plastics. *Composite Structures*. 2015. Vol. 122. P. 553–560.

28. Cousigne O., Moncayo D., Coutellier D., Camanho P., Naceur H., Hampel S. Development of a new nonlinear numerical material model for woven composite materials accounting for permanent deformation and damage. *Composite Structures*. 2013. Vol. 106. P. 601–614.

29. Myshkis A.D. *Elementy teorii matematicheskikh modeley [Elements of the theory of mathematical models]*. Edition 3<sup>rd</sup>, corrected. Moscow. KomKniga Publ. 2007. 192 p. (In Russian).

30. Berendelev N.N., Kozhanov D.A., Lyubimov A.K. Strukturnaya model gibkogo tkanogo kompozita [Structural model of flexible woven composite]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2015. Vol. 77. No 2. P. 162–171 (In Russian).

31. Edgren F., Asp L.E. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites. *Composites: Part A*. 2005. Vol. 36. P. 173–181.

32. 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.

33. Kozhanov D.A. Osobennosti konechno-elementnogo modelirovaniya vida strukturnogo elementa gibkikh tkanykh kompozitov [The features of finite element modeling of a structural element of flexible woven composites]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Fizik-matematicheskie nauki [St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics]*. 2016. No 1 (237). P. 7–15 (In Russian).

34. Lyubimov A.K., Kozhanov D.A. Modelirovanie vida strukturnogo elementa gibkikh tkanykh kompozitov pri staticheskom rastyazhenii s primeneniem metoda konechnykh elementov v ANSYS [Modeling the structural element of flexible woven composites under static tension using the method

of finite element in ANSYS]. *Kompyuternye modelirovaniya i issledovaniya* [Computer Research and Modeling]. 2016. Vol. 8. No 1. P. 113–212 (In Russian).

35. Kozhanov D.A. Strukturnaya model gibkikh tkanykh, predvaritelno povrezhdennykh kompozitov v usloviyakh odnoosnogo rastyazheniya [A structural model for flexible woven and pre-damaged composites under conditions of uniaxial tension]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* [St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics]. 2014. Iss. 4 (206). P. 107–114 (In Russian).

36. Kozhanov D.A., Lyubimov A.K. Model gibkogo tkanogo kompozita, uchityvayushchaya formoizmeneniye vnutrenney 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).

37. Mossakovskiy P.A., Antonov F.K., Belyakova T.A., Kostyreva L.A., Bragov A.M., Balandin V.V. Eksperimentalnoe issledovanie i konechno-elementnyy analiz tkanykh kompozitov v usloviyakh udarnogo nagruzheniya [The experimental investigation and FE-analysis of woven composites under impact loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2014. Vol. 76. No 1. P. 39–45 (In Russian).

## MODELING DEFORMATION PROCESSES IN FLEXIBLE WOVEN COMPOSITES. PART 1. STRUCTURAL MODELS

**Kozhanov D.A., Lyubimov A.K.**

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

Research papers on modeling deformation processes in flexible woven composites have been analytically reviewed; it has been concluded that the available models describing the behavior of woven composites are mostly applicable to 'rigid' composites based on epoxy, concrete or ceramics. Most models do not account for irreversible deformations and change of form of the internal structure of the material taking place in the process of deformation. The main attention in the theoretical and experimental studies on woven composites under static external loading is given to analyzing uniaxial tension. The available models of flexible woven composites determine only individual mechanical characteristics of the material, such as initial elasticity modulus, strength, etc., without accounting for straightening of the filaments in the process of tension. An approach to developing structural models of the behavior of flexible woven composites is presented, which is based on modeling deformation processes of the internal material structure. Using the present approach, three structural models have been developed: a laminate model, a model of elementary periodic cell and a model of frame analogy. The main idea of the laminate model is in discretizing the internal structure of the reinforcing tissue and constructing a laminated equivalent of the initial material. The model of elementary periodical cell is based on a detailed description of the internal structure of the material. In the frame analogy model, filaments of the reinforcing tissue are represented as plane frames, thus accounting for the changes of the geometrical structure and the interaction with cross-interwoven filaments. The scope of the adequate application of the introduced models is determined.

*Keywords:* flexible woven composite material, periodic element, change of form, irreversible deformations, structural model, finite element method.