

УДК 539.3

## СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ГИБКОГО ТКАНОГО КОМПОЗИТА

© 2015 г. Берендеев Н.Н., Кожанов Д.А., Любимов А.К.

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

*ljubimov@mm.unn.ru*

*Поступила в редакцию 24.04.2015*

Предложена модель гибкого тканого композита, в которой структура материала представляется в виде эквивалентного слоистого материала. В модели предполагается возможность пластического деформирования матрицы композита, а также возможность накопления повреждений в ней. С использованием предложенной модели рассмотрены вопросы об исследовании влияния локальных повреждений материала от предварительного низкоскоростного ударного воздействия на диаграмму деформирования, получаемую при последующем растяжении. Выполненные натурные и численные эксперименты показали хорошее качественное и количественное совпадение их результатов до значений деформаций, составляющих 40% от величины деформации, соответствующей разрушению. Сравнение проводилось как в случае отсутствия предварительного ударного повреждения, так и при его наличии.

*Ключевые слова:* гибкий тканый композиционный материал, диаграмма деформирования, накопление повреждений, предварительное повреждение, метод конечных элементов, низкоскоростной удар, эксперимент.

### **Введение**

Большинство известных моделей, описывающих поведение тканых композитов, основывается на описании периодически повторяющихся элементов структуры материала. Эти модели позволяют учитывать геометрическую нелинейность рассматриваемых материалов, связанную с возникновением больших деформаций (углов поворота в структуре материала), и особенности их структуры, но применимы, как правило, только при упругом деформировании [1]. Ряд моделей строится на положениях континуальной механики [2, 3]. Известны модели, основывающиеся на ламинатных теориях [4, 5], на представлении материала элементарными периодическими ячейками [6, 7]. Отметим, что модель, предложенная в работе [6], применима только к жестким тканым композитам, для которых характерна геометрическая линейность материала.

В связи с возрастающими требованиями к эксплуатационной безопасности конструкций, выполненных с использованием тканых композитов, актуальной становится задача создания моделей гибких тканых композитов, позволяющих учитывать геометрическую нелинейность, возможность упругопластического деформи-

рования и влияние локальных повреждений вследствие низкоскоростного ударного воздействия на механические характеристики материала.

В настоящей статье предлагается модель структуры гибкого тканого композита в виде слоистого материала, позволяющая учесть вышеперечисленные эффекты. Достоверность предложенной модели обосновывается результатами выполненных натурных и численных экспериментов.

## 1. Модель гибкого тканого композита

В структуре гибкого тканого композита с полотняным плетением (рис. 1) существуют два направления армирования – вдоль нити основы и вдоль нити утка. Для моделирования структуры такого материала используем подход, развитый в работах [6, 7]. Заменяем армирующую нить, имеющую форму, близкую к синусоидальной кривой, набором прямолинейных элементов различной ориентации по отношению к продольной плоскости материала. Каждый из введенных прямолинейных элементов периодически повторяется в структуре материала. Предложенная аппроксимация представлена на рис. 1, где введены следующие обозначения [8, 9] для вводимых прямолинейных элементов: 1 – вдоль направления нити основы, 2 – под углом  $\theta$  от направления нити основы, 3 – вдоль направления нити утка, 4 – под углом  $\varphi$  от направления нити утка.

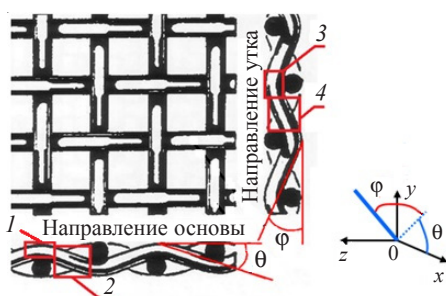


Рис. 1

Идентичные по ориентации армирования прямолинейные элементы имеют одинаковые механические характеристики. Заменяем периодически расположенные фрагменты композита с одинаковыми свойствами ортотропии сплошными слоями материала с теми же свойствами ортотропии, что и у выделенных фрагментов. В пределах каждого слоя материал представляется как однонаправленный волокнистый композит, состоящий из матрицы (заполнителя) и армирующих волокон с заданным направлением. Таким образом, вводятся четыре слоя, в которых армирующие волокна направлены вдоль нити основы, под углом  $\theta$  к нити основы, вдоль нити утка и под углом  $\varphi$  к нити утка (см. рис.1). Ориентация армирующих элементов в слоях определяется в соответствии с рис. 1, где ось  $Ox$  направлена вдоль нити основы полотняного плетения, а плоскость, образуемая осями  $Oz$  и  $Oy$ , – плоскость поперечного сечения материала вдоль нитей утка.

С учетом введенных предпосылок гибкий тканый композит с полотняным плетением представляется в виде некоторого материала, состоящего из четырех слоев, каждый из которых в своих главных осях ортотропии будет трансверсально изотропным материалом. Введенные слои «жестко склеены» между собой и деформируются совместно.

Для учета возникающих в процессе деформирования повреждений внутри слоев материала используется концепция «размазанной» трещины [10]. Основные предположения в этом случае следующие: трещина не вводится явным образом, но наличие разрыва влияет на свойства материала, а именно на матрицу жесткости.

Вводится предположение, что появление разрывов возможно только в матрице композита, а волокна армирования не разрушаются.

Для каждого слоя матрицу жесткости однонаправленного волокнистого композита будем представлять как сумму матриц жесткостей наполнителя и армирования [11, 12]:

$$\mathbf{C} = \left( 1 - \sum_{i=1}^{N_R} V_i^R \right) \mathbf{C}^c + \sum_{i=1}^{N_R} V_i^R \mathbf{C}_i^R. \quad (1)$$

Здесь  $N_R$  – число армирующих материалов,  $V_i^R$  – объемная доля армирующих элементов (волокон),  $\mathbf{C}^c$  – матрица жесткости наполнителя,  $\mathbf{C}_i^R$  – матрица жесткости  $i$ -го армирующего материала волокон.

Матрица жесткости  $\mathbf{C}^c$  наполнителя имеет вид:

$$\mathbf{C}^c = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Обозначим через  $(x_i^R, y_i^R, z_i^R)$  координаты  $i$ -го армирующего элемента в системе координат конечного элемента  $(X, Y, Z)$ . Учитывая ориентацию армирующих элементов в системе координат слоя материала (см. рис. 1) и упругое линейное поведение материала армирования со значением модуля упругости  $E_i^R$ , получим:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x^R \\ \sigma_y^R \\ \sigma_z^R \\ \sigma_{xy}^R \\ \sigma_{yz}^R \\ \sigma_{xz}^R \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_i^R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^R \\ \varepsilon_y^R \\ \varepsilon_z^R \\ \varepsilon_{xy}^R \\ \varepsilon_{yz}^R \\ \varepsilon_{xz}^R \end{pmatrix} = \mathbf{C}_i^R \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x^R \\ \varepsilon_y^R \\ \varepsilon_z^R \\ \varepsilon_{xy}^R \\ \varepsilon_{yz}^R \\ \varepsilon_{xz}^R \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos\theta_i \cos\varphi_i \\ \sin\theta_i \cos\varphi_i \\ \sin\theta_i \end{Bmatrix} x_i^R. \quad (4)$$

При разрушении материала в плоскости, перпендикулярной оси  $Ox$ , из соотношений (1)–(4) следует, что матрица жесткости всего материала примет вид:

$$\mathbf{C}_c^{ck} = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{R_t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $R_t = \operatorname{tg} \beta$  – касательный модуль упругости с учетом релаксации нормальных напряжений,  $0 < \beta_t < 1$  – коэффициент пересчета касательной прочности,  $E = \operatorname{tg} \alpha$  – модуль упругости материала.

Данные величины определяются путем оценки влияния появления «разрыва» материала в соответствии со схемой, показанной на рис. 2, на котором обозначено:  $\epsilon_{ck}$  – деформации всего композиционного материала,  $f_t$  – предел прочности при одноосном растяжении,  $T_c$  – множитель учета релаксации нормальных напряжений [12].

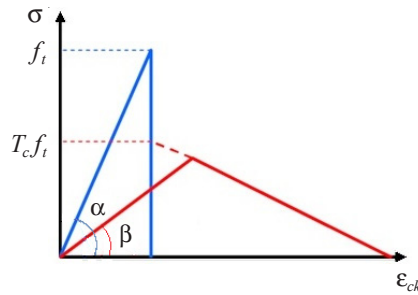


Рис. 2

При разрушении материала в двух плоскостях (в плоскости, перпендикулярной оси  $Ox$ , и в плоскости, перпендикулярной оси  $Oy$ ) матрица жесткости всего материала примет вид:

$$\mathbf{C}_c^{ck} = E \begin{bmatrix} \frac{R_t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Вводится следующий критерий разрушения матрицы композита [11]:

$$F/f_c - S \geq 0, \quad (7)$$

где  $F = F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  – функция главных напряжений,  $S = S(f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2, \sigma_h^a)$  – поверхность отказа,  $f_t$  – предел прочности при одноосном растяжении,  $f_c$  – предел прочности при одноосном сжатии,  $f_{cb}$  – предел прочности при двухосном сжатии,  $f_1$  – предел прочности при двухосном сжатии при наложении гидростатического давления,  $f_2$  – предел прочности при одноосном сжатии при наложении гидростатического давления,  $\sigma_h^a$  – гидростатическое давление.

Анализ результатов выполненных экспериментов [13–15] позволяет сделать вывод о том, что модуль упругости гибкого тканого композита значительно уменьшается при появлении необратимых деформаций. С учетом данного эффекта вводится предположение о том, что каждый из четырех введенных слоев может рассматриваться как композиционный материал, в матрице которого возможно возникновение необратимых деформаций. При этом деформирование волокон армирования считается упругим [6]. В дальнейшем для описания необратимых деформаций в наполнителе (матрице) будем использовать теорию течения с кинематическим упрочнением [16].

## 2. Достоверность модели

Оценка достоверности [17] предложенной модели гибкого тканого композита с полотняным плетением армирующих нитей осуществлялась путем сравнения численной модели с экспериментальными данными. С этой целью был проведен анализ результатов выполненных численных и натуральных экспериментов для неповрежденных образцов материала и образцов с предварительным низкоскоростным ударным повреждением. В качестве основной характеристики для сравнения выбиралась диаграмма деформирования материала, определяющая связь между напряжениями и деформациями.

**2.1. Экспериментальные исследования.** Для определения механических свойств и диаграммы деформирования гибких тканых композитов проводился натуральный эксперимент с использованием образцов материала, имеющих следующие геометрические характеристики: длина рабочей части  $l_0 = 0,022$  м, ширина  $b_0 = 0,016$  м, длина захватов  $l_1 = 0,016$  м, толщина  $h = 0,005$  м. Образцы вырезались из материала таким образом, чтобы направление основы совпадало с продольной осью образца (рис. 3). Эксперимент на статическое растяжение выполнялся с использованием установки Amsler HC10 с погрешностью измерения силы, равной 0,5% от измеряемой величины. Установка позволяет получить диаграмму деформирования в осях сила – перемещение, которая пересчитывалась в диаграмму деформирования с учетом соотношения между внутренними силами и геометрическими характеристиками образцов. Скорость деформирования составляла 0,3 мм/с.

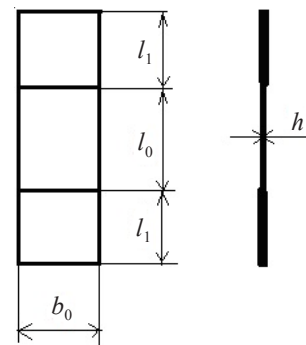


Рис. 3

Экспериментальные исследования включали в себя изучение влияния предварительного локального повреждения композита на диаграмму деформирования. Нанесение предварительного повреждения выполнялось с использованием установки Devenport FDB/230. С помощью падающего ударника заданной формы и массы наносилось единичное повреждение. Ударник имел наконечник в виде полусферы.

Ударники, используемые в эксперименте, имели массу 550 и 730 г. В результате падения ударника с высоты, равной 1 м, в листе материала возникали остаточные деформации, причем ударник массой 730 г пробивал в исследуемом материале сквозное отверстие. Поэтому в дальнейшем в экспериментах использовался ударник массой 550 г.

Из поврежденного материала изготавливались образцы, аналогичные образцам из неповрежденного материала (см. рис. 3). Образцы вырезались таким образом, чтобы единичное повреждение от ударного воздействия находилось в центре образца.

**2.2. Моделирование диаграммы деформирования материала без повреждения.** Для моделирования диаграммы деформирования предложенного четырехслойного материала при одноосном растяжении в численном эксперименте решается задача о растяжении прямоугольной тонкой полоски, выполненной из указанного материала, в условиях жесткого нагружения. На границе *A* области задается жесткая заделка (рис. 4), то есть  $u_{x,y,z}|_{x=0} = 0$ , а на противоположной границе *D* запрещаются перемещения нижней грани вдоль вертикальной оси *Oy*:  $u_y|_{x=l} = 0$ , вдоль оси *Oz*:  $u_z|_{x=l} = 0$ , и задаются перемещения вдоль нитей основы (продольной оси *Ox*):  $u_x|_{x=l} = u^*$ . Границы *B* и *C* свободны.

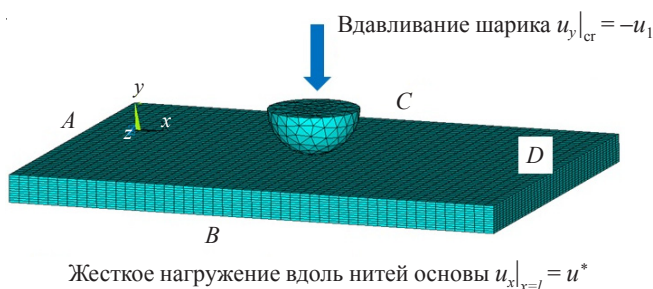


Рис. 4

Определение напряженно-деформированного состояния выполняется с использованием предложенной слоистой модели поведения тканого композита. Механические характеристики армированных слоев определяются соотношениями (1)–(6). Механические характеристики материалов, составляющих композит, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тип материала	Материал	$E$ , МПа	$\nu$	$\sigma_t$ , МПа	$E_t$ , МПа
Армирующие волокна нитей	Полиэфирное волокно	$15 \cdot 10^3$	0,2	–	–
Матрица (заполнитель) композита	Полиуретан	40	0,35	20	20

Объемная доля армирующих элементов – 80%. Ориентация армирующих элементов в слоях приведена в таблице 2.

Численный эксперимент проводился с использованием метода конечных элементов (система ANSYS). Каждый из четырех слоев моделируется 8-узловым конечным элементом SOLID65 [11], который позволяет учесть наличие внутри моделируемого тела элементов армирования, задаваемых их ориентацией относительно глобальной системы координат, объемной долей содержания арматуры по отноше-

нию ко всему объему материала и механическими характеристиками материала элементов армирования. В элементе SOLID65 реализована концепция «размазанной трещины».

Таблица 2

Номер слоя	Угол $\varphi$ , град	Угол $\theta$ , град
1	0	10
2	90	30
3	90	0
4	0	0

Ввиду того, что в процессе деформирования происходит изменение жесткости материала, деформирование гибких тканых композитов необходимо описывать в приращениях. Полные деформации, скорректированные с учетом появления и влияния трещин («размазанных трещин»), на каждой итерации нагружения вычисляются следующим образом [11]:

$$\{\varepsilon_n\} = \{\varepsilon_{n-1}^{el}\} + \{\Delta\varepsilon_n\} - \{\varepsilon_n^{pl}\},$$

где  $\{\varepsilon_{n-1}^{el}\}$  – вектор упругих деформаций на предыдущей итерации приращения;  $\{\Delta\varepsilon_n\}$  – вектор приращений полных деформаций, вычисленных на текущей итерации;  $\{\varepsilon_n^{pl}\}$  – вектор приращений пластической деформации, вычисленных на текущей итерации.

**2.3. Моделирование диаграммы деформирования материала с предварительным повреждением.** Для численного моделирования единичного повреждения решается задача о внедрении стального шарика в полосу слоистого материала, причем диаметр шарика много меньше размеров полосы (см. рис. 4). На границе области, занимаемой материалом (границы  $A, B, C, D$ ), задается жесткая заделка. Для шарика задается перемещение по вертикальной оси как абсолютно жесткого тела  $u_y|_{cr} = -u_1$ .

Затем проводится удаление шарика при сохранении граничных условий. В результате в полоске возникают остаточные напряжения и деформации, которые определяют предварительное повреждение. На рис. 5 показаны остаточные эквивалентные напряжения по четвертой теории прочности в продольном сечении образца (вдоль оси  $Ox$ ).

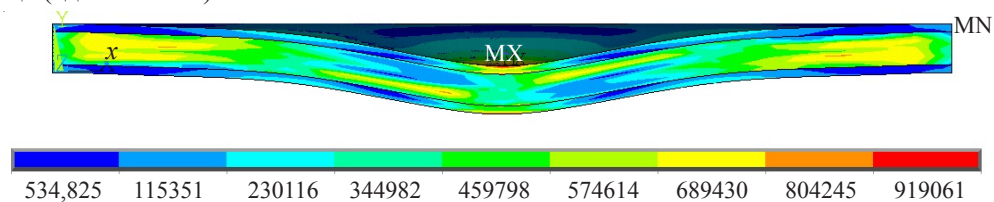


Рис. 5

Получение диаграммы деформирования слоистого материала при одноосном растяжении с предварительным повреждением выполнялось с использованием подхода, изложенного выше для материала без повреждения. Результаты численных и натурных экспериментов для обоих случаев приведены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показывает, что предложенная модель позволяет удовлетворительно описать поведение гибкого тканого композиционного материала при деформации до 8%, что составляет около 40% от величины деформации, соответствующей разрушению рассматриваемого материала. Максимальная

ошибка не превышает 15%. В области упругих деформаций (до 4,5%) максимальная ошибка не более 4%. Применение модели теории течения с кинематическим упрочнением и учет влияния накопления повреждений позволили удовлетворительно описать изменение модуля упругости при появлении необратимых деформаций и открыли возможность для дальнейшего использования полученной модели для расчета ресурса конструкций, выполненных из гибких тканых композиционных материалов.

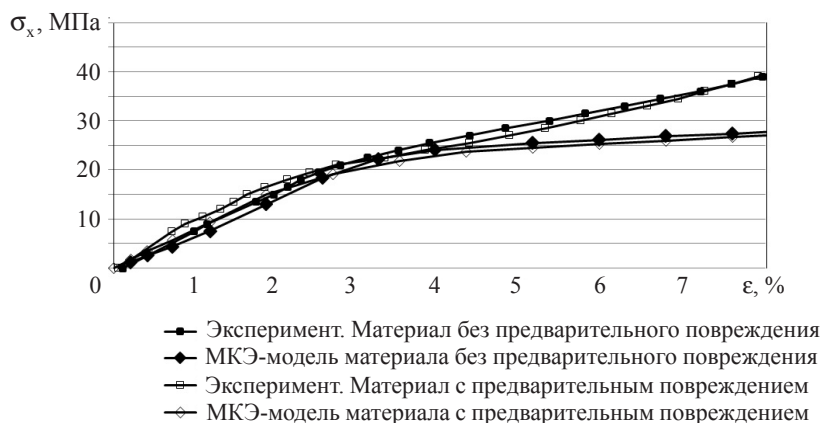


Рис. 6

Сравнение диаграмм деформирования материала без повреждения и с предварительным повреждением, полученных в численном эксперименте, позволяет сделать вывод о том, что наличие единичного повреждения незначительно влияет на вид диаграммы (см. рис. 6). Вместе с тем отмечается, что предварительное повреждение приводит к изменению начального участка диаграммы деформирования, некоторому уменьшению текущего модуля упругости, что также подтверждается результатами исследований, приведенных в работах [7, 13, 14].

### Заключение

С использованием идей ламинатного подхода, применяемых при описании поведения композитов с тканым армированием, была предложена новая структурная модель для гибкого тканого композита. Развивая существующие ламинатные модели, предложенная модель дает возможность учета пластического деформирования матрицы, возникновения и развития повреждений в материале матрицы. Проведенная оценка достоверности модели путем сравнения экспериментальной и модельной диаграмм деформирования в условиях одноосного растяжения показала, что предложенная модель удовлетворительно качественно и количественно описывает известные экспериментальные данные. Предложенная модель расширяет возможности известной модели с элементарными периодическими ячейками, позволяя применять ее для описания поведения гибких композитов.

Достоверность модели в указанных интервалах деформаций позволяет применять ее при проведении расчетов по определению напряженно-деформированного состояния конструкций, выполненных с использованием гибких тканых композитов.



#### Список литературы

1. Haas R. *The stretching of the fabric and the shape of the envelope*. NACA TR-16, 1917.
2. Man X., Swan C.C. *A mathematical modeling framework for analysis of functional clothing* // J. Eng. Fiber and Fabrics. 2007. V. 2, No 3. P. 10–27.
3. Wu Z., Au C.K., Yuen M. *Mechanical properties of fabric materials for draping simulation* // Int. J. Clothing Sc. Tech. 2003. V. 15, No 1. P. 56–68.
4. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Mechanics and analysis of composite materials*. Oxford: Elsevier, 2001. 412 p.
5. Hinton M.J., Kaddourb A.S., Soden P.D. *A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence* // Composite Science and Technology. 2002. No 62. P. 1725–1797.
6. Edgren F., Asp L.E. *Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites* // Composites: Part A. 2005. V. 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. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2013. № 4 (1). С. 173–179.
8. Pastore C.M. *Illustrated glossary of textile terms for composites*: NASA Contractor Report 191539. North Carolina, 1993. 34 p.
9. Zvi Hasbin. *Theory of fiber reinforced materials*: NASA Contractor Report 1974. Washington, 1972. 702 p.
10. Ingraffea A.R. *Computational fracture mechanics* / Erwin Stein. Encyclopedia of Computational Mechanics. V. 2. Solids and Structures. John Wiley & Sons, Ltd., 2007. P. 375–402.
11. *ANSYS release 14.0 Documentation for ANSYS* [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. – Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2012.
12. Karayaka M., Kurath P. *Deformation and failure behavior of woven composite laminates* // J. Eng. Mater. and Technol. 1994. V. 116. P. 222–232.
13. Жауров И.С., Берендеев Н.Н. *Влияние предварительного ударного повреждения на диаграмму деформирования тканых композитов* // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2011. № 4 (4). С. 1478–1479.
14. Кожанов Д.А. *Структурная модель гибких тканых, предварительно поврежденных композитов в условиях одноосного растяжения* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2014. №4(206). С. 107–114.
15. 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: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т, 2006. Вып. 68. С. 213–220.
16. Ишлинский А.Ю. *Общая теория пластичности с линейным упрочнением* // Украинский математический журнал. 1954. Т. 6, №3. С. 314–324.
17. Льюнг Л. *Идентификация систем. Теория для пользователя*: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 432 с.

#### References

1. Haas R. *The stretching of the fabric and the shape of the envelope*. NACA TR-16, 1917.
2. Man X., Swan C.C. *A mathematical modeling framework for analysis of functional clothing* // J. Eng. Fiber and Fabrics. 2007. V. 2, No 3. P. 10–27.
3. Wu Z., Au C.K., Yuen M. *Mechanical properties of fabric materials for draping simulation* // Int. J. Clothing Sc. Tech. 2003. V. 15, No 1. P. 56–68.
4. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Mechanics and analysis of composite materials*. Oxford: Elsevier, 2001. 412 p.
5. Hinton M.J., Kaddourb A.S., Soden P.D. *A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence* // Composite Science and Technology. 2002. No 62. P. 1725–1797.
6. Edgren F., Asp L.E. *Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites* // Composites: Part A. 2005. V. 36. P. 173–181.

7. Berendeev N.N. *Opisanie povedeniya tkanogo kompozita pri staticheskom nagruzhении s ispol'zovaniem strukturnoy modeli* // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2013. № 4 (1). S.173–179.
8. Pastore C.M. *Illustrated glossary of textile terms for composites*: NASA Contractor Report 191539. North Carolina, 1993. 34 p.
9. Zvi Hasbin. *Theory of fiber reinforced materials*: NASA Contractor Report 1974. Washington, 1972. 702 p.
10. Ingraffea A.R. *Computational fracture mechanics* / Erwin Stein. Encyclopedia of Computational Mechanics. V. 2. Solids and Structures. John Wiley & Sons, Ltd., 2007. P. 375–402.
11. *ANSYS release 14.0 Documentation for ANSYS [Elektronnyy resurs]*: ANSYS Inc. – Elektron. dan. i progr. – [Б. м.], 2012.
12. Karayaka M., Kurath P. *Deformation and failure behavior of woven composite laminates* // J. Eng. Mater. and Technol. 1994. V. 116. P. 222–232.
13. Lyubimov A.K., Shabarov V.V., Derbenev S.G., Karataev V.N. Zhaurov I.S., Berendeev N.N. *Vliyanie predvaritel'nogo udarnogo povrezhdeniya na diagrammu deformirovaniya tkanykh kompozitov* // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2011. № 4 (4). S. 1478–1479.
14. Kozhanov D.A. *Strukturnaya model' gibkikh tkanykh, predvaritel'no povrezhdennykh kompozitov v usloviyakh odnoosnogo rastyazheniya* // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. 2014. №4(206). S. 107–114.
15. Berendeev N.N., Lyubimov A.K., Shabarov V.V., Derbenev S.G., Karataev V.N. *Eksperimental'noe issledovanie deformatsionnykh svoystv tkanykh kompozitov* // Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhdvuz. sb. / Nizhegorod. un-t, 2006. Vyp. 68. S. 213–220.
16. Ishlinskiy A. Yu. *Obshchaya teoriya plastichnosti s lineynym uprochneniem* // Ukrainskiy matematicheskiy zhurnal. 1954. T. 6, №3. S. 314–324.
17. Lyung L. Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya: Per. s angl. / Pod red. Ya.Z. Tsypkina. M.: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1991. 432 s.

## STRUCTURAL MODEL OF FLEXIBLE WOVEN COMPOSITE

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

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

Proposed structural model of flexible woven composite, in which the material is described in the form of equivalent laminate. This model assumes the possibility of plastic deformation of the matrix of the composite, and the possibility of damage accumulation in it. Using the proposed model considers the issues about the study of the influence of low-speed pre-kick on the stress-strain diagram obtained by a subsequent stretching. Carried out field and numerical experiments showed good qualitative and quantitative agreement of the results to values of deformations constituting 40% of the value of strain corresponding to fracture. The comparison was done both in the absence of pre-impact damages, if any.

*Keywords*: flexible woven composite material, stress-strain diagram, the accumulation of damage, prior damage, finite element method, low speed kick, experiment.