



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

DOI: 10.5862/JPM.237.1

УДК: 539.3

Д.А. Кожанов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИДА СТРУКТУРНОГО ЭЛЕМЕНТА ГИБКИХ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ

На примере структурного элемента гибких тканых композитов представлены особенности конечно-элементного моделирования как самого объекта, так и его поведения при одноосном растяжении. При моделировании структурного элемента рассматривались основные составляющие материала: армирующая ткань и его матрица. Армирующая ткань представляет собой полотняное переплетение нитей. Эти нити считались упругим материалом. Матрица рассматриваемого материала была представлена мягким полимером с возможностью возникновения в нем необратимых деформаций. При моделировании поведения композита под действием нагрузок учтена возможность возникновения повреждений в его структуре. Построены поля напряжений, деформаций и показаны зоны внутренних повреждений материала при одноосном деформировании. Выявлены опасные зоны переплетения.

ГИБКИЙ ТКАНЫЙ КОМПОЗИТ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ, НЕЛИНЕЙНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ.

Введение

Основные модели, используемые для описания структуры тканых материалов, применимы лишь к «жесткому» композиту, когда в качестве наполнителя выступают твердые полимеры, например эпоксидная смола после воздействия отвердителя [1 – 6]. Для таких материалов допустимо пренебречь геометрической нелинейностью [5, 6], так как деформации, возникающие при нагружении, невелики. Большое распространение получили модели, созданные в Лёвенском католическом университете (Бельгия) научно-исследовательской группой CMG (Composite Materials Group) [7 – 11]. Данная группа авторов провела полноценные исследования поведения тканых композитов, начиная от экспериментальной составляющей, до разработки собственного программного обеспечения WiseTex [10], которое позволяет моделиро-

вать поведение рассматриваемых материалов на основе метода конечных элементов и визуально определять наиболее опасные области армирующей ткани.

Геометрическая нелинейность оказывает существенное влияние на механические характеристики гибких тканых (тканевых) композиционных материалов [12, 13]. Она связана с типом наполнителя композита и особенностью деформирования нитей армирующей ткани, которые распрямляются в процессе деформирования, изменяют жесткость [14], переходят из состояния изгиба в центральное растяжение и вычлняются из матрицы, что приводит к повреждениям и нарушению адгезии между волокнами и матрицей в структуре материала.

Для построения модели структурного периодического элемента (далее ЭПЯ – элементарная периодическая ячейка) возникает необходимость точного описания

внутренних параметров состояния [15]. Из анализа геометрических характеристик рассматриваемого полотняного переплетения следует, что длина нитей основы и утка по отношению к толщине нити отличается не более чем на один порядок; отсюда можно заключить, что необходим учет изгибающих моментов в нитях [15 – 17]. Кроме того, наличие изгиба вызывает возникновение в нитях ткани областей сжатия, а это требует использования кинематического упрочнения (вместо изотропного) для описания возможного упругопластического деформирования, так как в рассматриваемом случае нить ткани считается композиционным материалом, состоящим из упругих волокон и упругопластической матрицы.

В данной статье на примере конечно-элементного моделирования поведения ЭПЯ образца гибких тканых композитов при наложении нагрузки, показаны основные особенности построения модели деформирования периодических элементов гибких тканых композитов и визуально определе-

ны наиболее опасные области полотняного переплетения. Получены поля напряжений и деформаций, а также области максимального скопления внутренних повреждений материала, возникающих из-за нарушения адгезии в структуре материала.

Периодический элемент и особенности построения структурной модели

Периодические структуры позволяют описывать поведение всего материала через типовые периодические элементы внутренней структуры. Рассматриваемое полотняное переплетение (рис. 1), имеет регулярную периодическую структуру, в которой можно выделить элементарный периодический элемент-ячейку (ЭПЯ). Принято считать, что для рассматриваемых материалов указанная ячейка содержит нить основы, нить утка и архитектуру переплетения нитей; на рис. 1 принятый вид ячейки выделен прямоугольником.

Без ограничения общности, с учетом особенности вида переплетения будем счи-

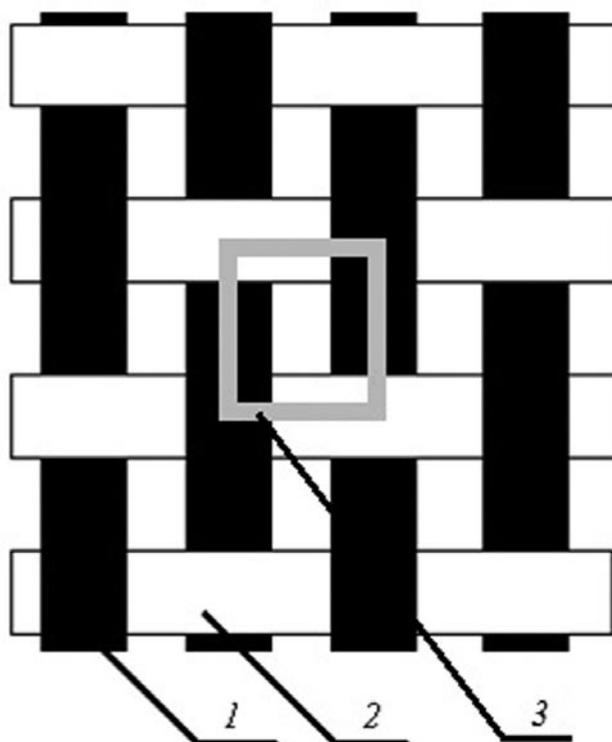


Рис.1. Схема полотняного переплетения (вид сверху):
1 – нить основы; 2 – нить утка; 3 – элементарный периодический элемент (ЭПЯ)

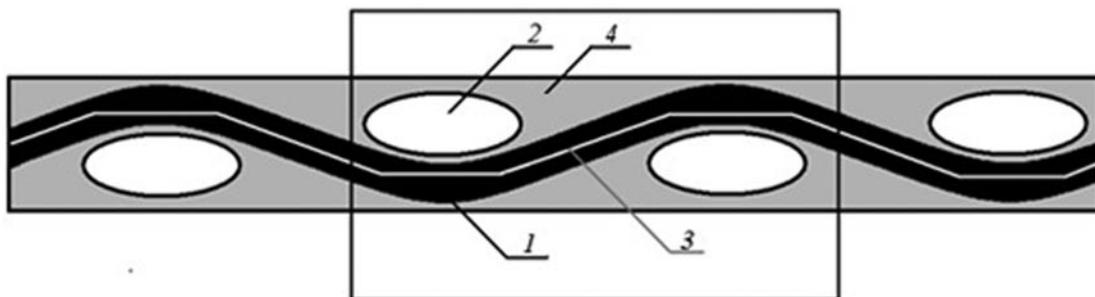


Рис. 2. Продольное сечение вдоль нити основы:
 1, 2 – нити основы и утка соответственно; 3 – линейная аппроксимация синусоидальной формы нити основы, 4 – матрица (заполнитель) гибкого тканого композита

тать, что закон изменения формы переплетения нитей сохраняется по всей области ткани. Рассмотрим вид структуры ЭПЯ вдоль направления нитей основы. В продольном сечении ЭПЯ (рис. 2) армирующая нить переплетения имеет форму, близкую к синусоидальной кривой, которую для упрощения моделирования структуры можно аппроксимировать набором прямолинейных участков (аналогично способу, использованному в работах [1, 14]).

Эллипсоидное поперечное сечение нитей аппроксимируем формой прямоугольника [12]. Результатом выделения струк-

турного элемента и упрощения геометрии переплетения является ЭПЯ, представленная на рис. 3, которая и будет описывать поведение всего материала в целом.

ЭПЯ гибкого тканого композиционного материала состоит из нитей армирования и заполнителя. Нити армирования (основы и утка) являются однонаправленным композитом, состоящим из матрицы нитей (заполнителя нитей) и армирующих волокон (жгутов). Для корректного моделирования армирующей ткани армирование нитей вводится индивидуально для каждого линейного участка и совпадает с ориента-

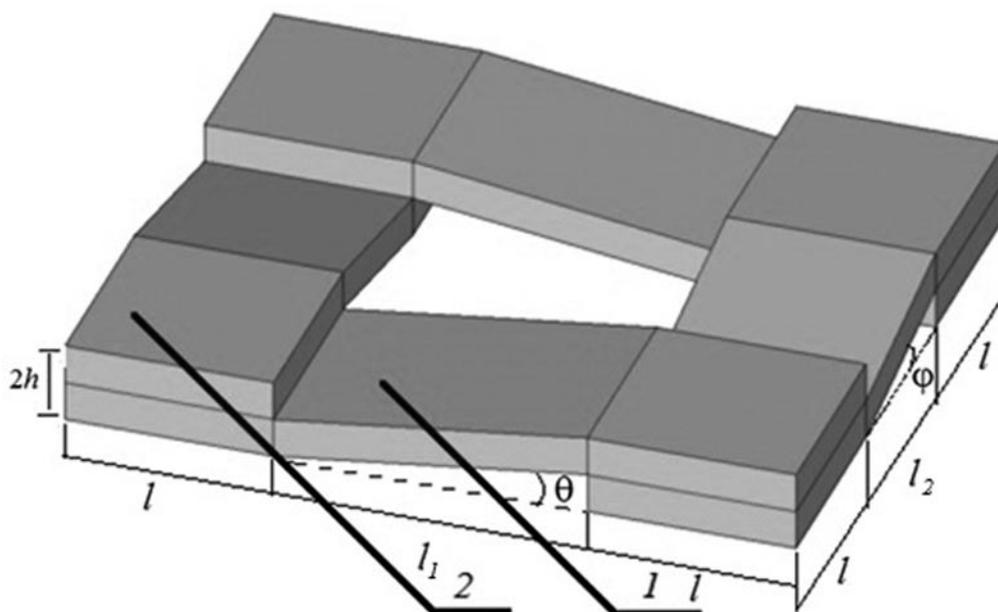


Рис. 3. Геометрия ЭПЯ армирующих нитей гибкого тканого композита:
 1, 2 – нити основы и утка соответственно; l – длина горизонтального участка нити в ЭПЯ; l_1, l_2 – значения длины наклонных участков нити основы и нити утка соответственно

цией направления нити. С учетом природы армирующих нитей (трощеные жгуты), предполагается, что материал элементов армирования (волокон нити) – упругий, с постоянным содержанием объемной доли волокон армирования.

На основе проведенных экспериментов [16] вводится предположение об упруго-пластическом поведении заполнителя нитей и заполнителя всей ЭПЯ композита. Для описания упругопластического поведения удобно применить теорию течения с линейным кинематическим упрочнением. Тогда это поведение выражается при одноосном растяжении вдоль нити основы следующей связью между напряжениями и деформациями:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_i \\ \sigma_i + E_t(\varepsilon - \varepsilon_i), & \varepsilon > \varepsilon_i \end{cases},$$

где σ, ε – текущие напряжение и деформация; E – модуль упругости; E_t – модуль упрочнения при упругопластическом деформировании; σ_i – предел текучести; $\varepsilon_i = \sigma_i/E$ – деформации, соответствующие пределу текучести.

В процессе деформирования гибких тканых композиционных материалов, в связи с нарушением адгезии между волокнами армирования и связующим, возможно вычленение волокон в нитях армирования и возникновение повреждений в матрице нитей. Эти процессы можно описать «размазанными трещинами» [18 – 21]. Такое описание основывается на изменении матрицы жесткости материала при появлении раз-

рыва. Трещина явным образом не вводится. Появление разрывов возможно только в матрице композита, а волокна армирования не разрушаются. Для учета возможных внутренних повреждений вводится следующий критерий разрушения матрицы композита и возникновения «размазанной трещины» в узле интегрирования [19]:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0,$$

где $F = F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ – функция главных напряжений; f_c – предел прочности материала; S – поверхность отказа, которая определяется из механических характеристик наполнителя.

Расчет ЭПЯ гибкого тканого композита целесообразно описать в приращениях в связи с геометрической нелинейностью задачи и возможным изменением жесткости материала в процессе деформирования, связанным с появлением «размазанных трещин».

Граничные условия

Для моделирования одноосного растяжения ЭПЯ гибкого тканого композита, полей напряжений и деформаций, вдоль нитей основы на границе A запрещается перемещение в направлении растяжения $u_x|_A = 0$, на границе B задается перемещение $u_x|_B = u^*$, на границах C и D задается условие симметрии.

Поставленная задача решается методом конечных элементов (рис. 4). Матрица (заполнитель) ЭПЯ гибкого тканого компо-

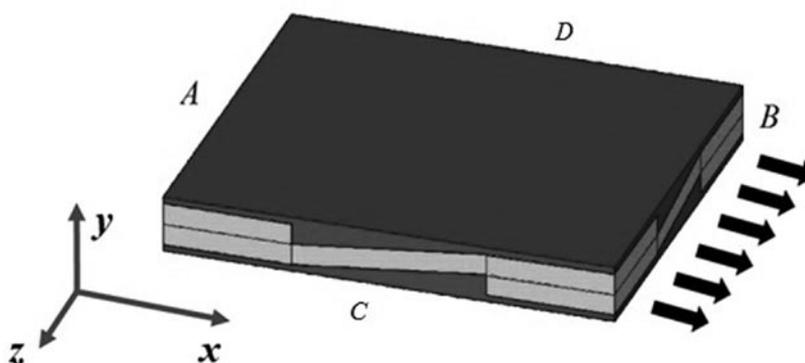


Рис. 4. ЭПЯ гибкого тканого композита при одноосном растяжении (направление растяжения показано стрелками); A, B, C, D – границы объекта

Таблица

Механические характеристики используемых материалов

Тип материала	E , МПа	ν	σ_r , МПа	E_r , МПа
Армирующие волокна нитей основы и утка ЭПЯ	$1,5 \cdot 10^3$	0,20	—	—
Матрица (заполнитель) нитей основы и утка	40	0,35	20	20
Матрица ЭПЯ гибкого тканого композита	30	0,30	18	16

Обозначения: E – начальный модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, σ_r – предел текучести, E_r – модуль упрочнения при упругопластическом деформировании.

зита моделируется основными 8-узловыми конечными элементами solid-185. Этот элемент позволяет моделировать твердотельные объекты в программном комплексе ANSYS и учитывать возможные большие деформации [19]. Нити армирования мо-

делируются 8-узловыми конечными элементами solid-65. Указанные элементы позволяют учесть наличие элементов армирования с заданной ориентацией внутри моделируемого тела и с заданной объемной долей содержания армирующих волокон.

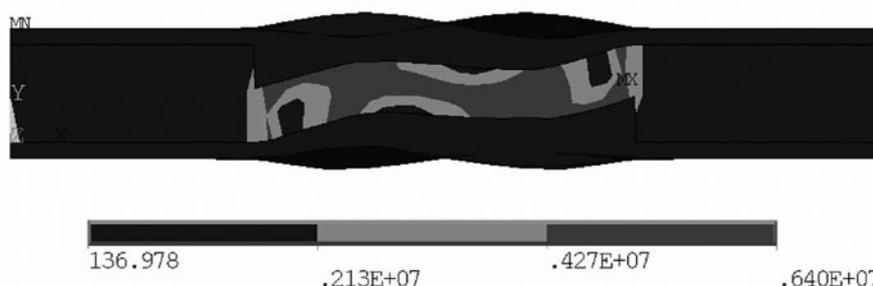


Рис. 5. Поле распределения эквивалентных напряжений (Па) по Мизесу для гибкого тканого композита при одноосном растяжении (фронтальный вид)

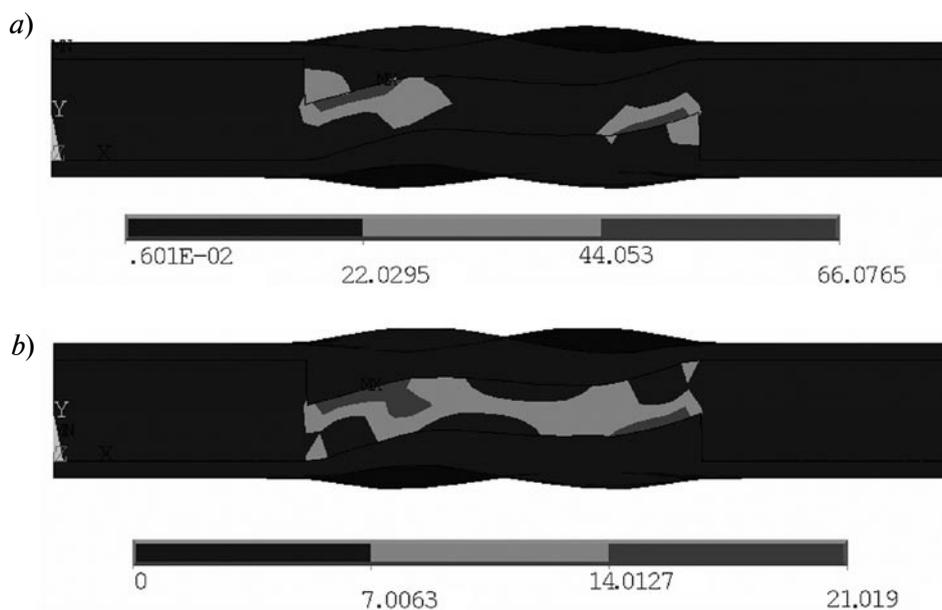


Рис. 6. Поля распределений упругих (а) и пластических (б) деформаций для гибкого тканого композита при одноосном растяжении (фронтальный вид)

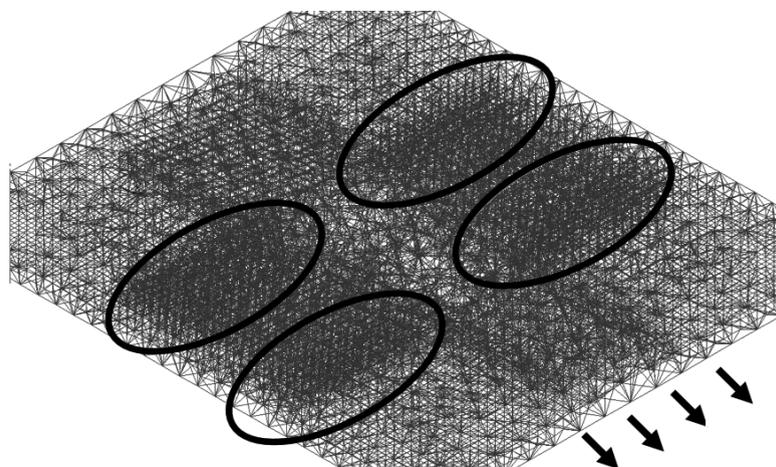


Рис. 7. Результат моделирования внутренних повреждений способом «размазанных трещин» в объекте (эллипсами показаны области максимального скопления повреждений)

Кроме того, есть возможность учета зарождения и влияния «размазанных трещин» на механические свойства материала внутри матрицы армирующих нитей.

Механические характеристики материалов, используемых при моделировании, представлены в таблице.

Полученные поля напряжений и деформаций (рис. 5, 6) позволяют найти наиболее опасные зоны в областях переплетения нитей ткани. Именно эти зоны определяют прочностные способности материала и конструкций, создаваемых на его основе.

На рис. 7 представлены результаты моделирования объекта, подвергнутого одноосному растяжению, методом «размазанных трещин».

Анализ результатов, представленных на рис. 6 и 7, приводит к заключению, что наиболее опасными областями полотняного переплетения являются зоны наклонных участков армирующих нитей. Это подтверждает необходимость учета изгибающих моментов и детального описания архитектуры переплетения армирующей ткани. Даже для материалов, не имеющих предварительных локальных повреждений (пропуск или обрыв нитей армирования, искривление нитей ткани), напряжения на наклонных участках переплетения (см. рис. 5) в 4 – 5 раз превышают напряжения в материале в целом.

Упругие и упругопластические деформации в первую очередь развиваются также на наклонных участках нитей.

Согласно результатам, приведенным на рис. 7, наибольшее количество размазанных трещин возникает в зонах максимальных напряжений и деформаций, что еще раз подтверждает опасность перегрузки наклонных участков нитей.

Заключение

В работе представлен пример и особенности построения модели поведения элементарной периодической ячейки гибкого тканого композита как структурного элемента, описывающего процесс деформирования образцов гибких тканых композитов. Приведены поля напряжений и деформаций представительного объема исследуемого материала, показаны области максимального скопления «размазанных трещин».

Основным выводом данного исследования является необходимость детального учета напряженно-деформированного состояния наклонных участков нитей переплетения армирующей ткани при построении моделей деформирования представленных материалов. Анализ сходимости численного решения показал устойчивость решения к входным параметрам модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Naik R.A.** Analysis of woven and braided fabric reinforced composites. NASA CR-194930. 1994. 46 p.
- [2] **Zhu Q., Shrotriya P., Sottos N.R., et al.** Three-dimensional viscoelastic simulation of woven composite substrates for multilayer circuit boards // *Composites Science and Technology*. 2003. Vol. 63. Pp. 1971–1983.
- [3] **Shrotriya P., Sottos N.R.** Viscoelastic response of woven composite substrates // *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65. Pp. 621–634.
- [4] **Man X., Swan C.C.** The mathematical modeling framework for analysis of functional clothing // *J. Eng. Fibers and Fabrics*. 2007. Vol. 2. No. 3. Pp. 10–27.
- [5] **Дедков Д.В., Зайцев А.В.** Концентрация напряжений в слое тканого композита с локальными дефектами при двухосном однородном равнокомпонентном макродеформировании // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физико-математические науки*. 2013. Вып. 4 (33). С. 66–75.
- [6] **Кравченко О.Д., Вильдеман В.Э.** Модели неупругого деформирования перекрестно армированных слоистых композитов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 1997. № 5. С. 49–55.
- [7] **Lomov S.V., Gusakov A.V., Huysmans G., et al.** Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. *Composite Science and Technology*. 2000. Vol. 60. Pp. 2083–2095.
- [8] **Lomov S.V., Parnas R.S., Bandyopadhyay-Ghosh S., et al.** Experimental and theoretical characterisation of the geometry of flat two- and three-axial braids // *Textile Research J.* 2002. Vol. 72. No. 1. Pp. 706–712.
- [9] **Lomov S.V., Thanh Truong Chi, Verpoest I., et al.** Mathematical modelling of internal geometry and deformability of woven preforms // *Int. J. of Forming Processes*. 2003. Vol. 6. Pp. 413–442.
- [10] **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. Pp. 2563–2574.
- [11] **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. Pp. 1–13.
- [12] **Багмутов В.П.** Особенности построения единой структурной модели упруго-пластического деформирования слоистых волоконных композитов при статическом и циклическом нагружении // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2005. № 3. С. 90–96.
- [13] **Мангушева А.Р.** Оценка кратковременной и длительной прочности пленочно-тканевого композиционного материала. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2012.
- [14] **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.
- [15] **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.
- [16] **Берендеев Н.Н., Любимов А.К., Шабаров В.В. и др.** Экспериментальное исследование деформационных свойств тканых композитов // *Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб.* Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. Вып. 68. С. 213–220.
- [17] **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.
- [18] **Ingraffea A.R.** Computational fracture mechanics // *Encyclopedia of Computational Mechanics*. Vol. 2. Solids and Structures. John Wiley & Sons, Ltd. Pp. 375–402.
- [19] ANSYS release 14.5. Documentation for ANSYS [Электронный ресурс на диске]: ANSYS Inc. 2013.
- [20] **Кожанов Д.А.** Структурная модель гибких тканых, предварительно поврежденных композитов в условиях одноосного растяжения // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Физико-математические науки*. 2014. № 4 (206). С. 107–114.
- [21] **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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КОЖАНОВ Дмитрий Александрович — аспирант кафедры теоретической, компьютерной и экспериментальной механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Российская Федерация
pbk996@mail.ru

Kozhanov D.A. THE FEATURES OF FINITE ELEMENT MODELING OF A STRUCTURAL ELEMENT OF FLEXIBLE WOVEN COMPOSITES.

The features of finite element modeling of both an element itself and its behavior under uniaxial tension have been demonstrated with a structural element of flexible woven composites. The main material partials such as reinforcing fabric and material's matrix were examined in modeling. The reinforcing fabric is a plain weave. These threads were taken as an elastic material. The matrix of the material was considered as a soft polymer with the possible occurrence of irreversible elastic-plastic deformations. Moreover, the possible occurrence of damages in the structure of the material under high loads was taken into account in modeling. The fields of stresses and strains were built; the zones of material internal damages under uniaxial tension were demonstrated. The risk zones of weave were revealed.

FLEXIBLE WOVEN COMPOSITE, FINITE ELEMENT METHOD, STRESS-STRAIN FIELD, DAMAGE.

REFERENCES

- [1] **R.A. Naik**, Analysis of woven and braided fabric reinforced composites, NASA CR-194930, 1994.
- [2] **Q. Zhu, P. Shrotriya, N.R. Sottos, P.H. Geubelle**, Three-dimensional viscoelastic simulation of woven composite substrates for multilayer circuit boards, *Composites Science and Technology*. 63 (2003) 1971–1983.
- [3] **P. Shrotriya, N.R. Sottos**. Viscoelastic response of woven composite substrates, *Composites Science and Technology*, 65 (2005) 621–634.
- [4] **X. Man, C.C. Swan**, The mathematical modeling framework for analysis of functional clothing, *J. Eng. Fibers and Fabrics*. 2(3) (2007) 10–27.
- [5] **D.V. Dedkov, A.V. Zaytsev**, Kонтсentratsiya napryazheniy v sloye tkanogo kompozita s lokalnymi defektami pri dvukhosnom odnorodnom ravnokomponentnom makrodeformirovani [The stress concentration in the woven composite layer with local defects under biaxial uniform deformation], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya fiziko-matematicheskiye nauki*. 4(33) (2013) 66–75.
- [6] **O.D. Kravchenko, V.E. Vildeman**, Modeli neuprugogo deformatsionnogo perekrestno armirovannykh sloistykh kompozitov [Models of inelastic deformation of cross-ply layered composites], *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. No. 5 (1997) 49–55.
- [7] **S.V. Lomov, A.V. Gusakov, G. Huysmans, et al.**, Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites, *Composites Science and Technology*. 60 (2000) 2083–2095.
- [8] **S.V. Lomov, R.S. Parnas, S. Bandyopadhyay-Ghosh, et al.**, Experimental and theoretical characterization of the geometry of flat two- and three-axial braids, *Textile Research J.* 72(1) (2002) 706–712.
- [9] **S.V. Lomov, Thanh Truong Chi, I. Verpoest, et al.**, Mathematical modeling of internal geometry and deformability of woven performs, *Int. J. of Forming Processes*. 6 (3-4) (2003) 413–442.
- [10] **I. Verpoest, S.V. Lomov**, Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis, *Composites Science and Technology*. 65(15-16) (2005) 2563–2574.
- [11] **S.V. Lomov, T. Mikolanda, M. Kosek, I. Verpoest**, Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality implementation, *Journal of the Textile Institute*. 98(1) (2007) 1–13.
- [12] **V.P. Bagmutov**, Osobennosti postroyeniya yedinoj strukturnoy modeli uprugoplasticheskogo deformatsionnogo sloistykh voloknovykh kompozitov pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhenii [Construction features of the universal structural model for elastic-plastic deformation of layered-fiber composites under static and cyclic loading], *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. No. 3 (2005) 90–96.
- [13] **A.R. Mangusheva**, Otsenka kratkovremennoy i dlitelnoy prochnosti plenochno-tkanevogo kompozitsionnogo materiala [An estimation of the short-time and the long-time strength of the

film-woven composite material], Thesis Ph. D., Kazanskiy (Privolzhskiy) Federalnyy universitet, Kazan, 2012.

[14] **N.N. Berendeyev**, Opisaniye povedeniya tkanogo kompozita pri staticheskom nagruzhenii s ispolzovaniyem strukturnoy modeli [Behaviour description of the woven composite under static loading using the structural model] // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. No. (4) (2013) 173–179.

[15] **S.G. Stepanov**, Matematicheskaya model ravnovesiya osnovnoy niti v zone formirovaniya odnosloynoy tkani [Mathematical model of the beam thread balance in the zone of single-texture fabric forming], Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti. No. 1 (2006) 47–51.

[16] **N.N. Berendeyev, A.K. Ljubimov, V.V. Shabarov, et al.**, Eksperimentalnoye issledovaniye deformatsionnykh svoystv tkanykh kompozitov [Experimental investigation of deformation properties of woven composites], Problemy prochnosti i plastichnosti. Mezhvuz. sb. N. Novgorod: Izd-vo

NNGU, 2006. Iss. 68. Pp. 213–220.

[17] **A.P. Grechukhin, V.Yu. Seliverstov**, Issledovaniye formy niti v tkani polotnyanogo perepleteniya [Investigation of the thread form in the plain braiding fabric], Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti. No. 5 (2013) 41–44.

[18] **A.R. Ingraffea**, Computational fracture mechanics, Ed. Erwin Stein, Encyclopedia of Computational Mechanics. Vol. 2: Solids and Structures: John Wiley & Sons, Ltd., Pp. 375–402.

[19] ANSYS release 14.5. Documentation for ANSYS. ANSYS Inc., 2013 (CD).

[20] **D.A. Kozhanov**, Structural model for flexible woven and pre-damaged composites under conditions of uniaxial tension, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. No. 4 (206) (2014) 107–114.

[21] **N.N. Berendeyev, D.A. Kozhanov, A.K. Lyubimov**, Strukturnaya model gibkogo tkanogo kompozita [Structure model of the flexible woven composite], Problemy prochnosti i plastichnosti. 77(2) (2015) 162–171.

THE AUTHOR

KOZHANOV Dmitry A.

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

23, Gagarina Ave., Nizhi Novgorod, Russian Federation.

pbk996@mail.ru