

УДК 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ГИБКИХ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ.
ЧАСТЬ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И АПРОБАЦИЯ МОДЕЛЕЙ***

© 2018 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 23.06.2017

Представлены методика и результаты экспериментов на статическое растяжение вдоль направления армирования гибких тканых композитов на основе лавсановой армирующей ткани с полотняной схемой переплетения и полиуретанового связующего. В экспериментальных исследованиях использовались три марки композита, различающиеся геометрическими параметрами структуры армирующей ткани и объемным содержанием армирующих волокон в нитях ткани. Определены механические характеристики материалов, из которых состоит композит. Проведены экспериментальные исследования влияния предварительного локального повреждения материалов на их дальнейшее механическое поведение. Предварительное повреждение наносилось при помощи ударника с заданной массой. Для учета статистического разброса испытания проводились сериями. По результатам исследований показано, что предварительное локальное повреждение, не приводящее к сквозному пробитию, незначительно влияет на механическое поведение исследуемых гибких тканых композитов. Выполнена апробация предложенных структурных моделей, описывающих поведение гибких тканых композитов при статическом одноосном растяжении вдоль одного из направлений армирования.

Ключевые слова: гибкий тканый композиционный материал, эксперимент, одноосное растяжение, повреждение.

Введение

В статьях [1–6] предложен подход, на основе которого разработаны структурные модели поведения гибких тканых композитов при одноосном растяжении: ламинатная модель, модель элементарной периодической ячейки (ЭПЯ), модель рамной аналогии. Для обоснования достоверности моделей предложена методика и выполнен комплекс экспериментальных исследований на одноосное растяжение образцов из гибких тканых композитов с различной геометрией переплетения армирующего слоя (рис. 1), а также образцов с локальным повреждением.

* Выполнено при частичном финансировании РФФИ (грант № 16-08-01124).

В качестве геометрических параметров структуры армирующего слоя выбирались высоты поперечного сечения нитей основы h_o и утка h_y армирующей ткани, расстояние между нитями основы d_1^o и утка d_1^y , углы подъема θ и φ наклонных участков соответствующих нитей, ширина поперечного сечения нитей основы b_o и утка b_y (см. рис. 1).

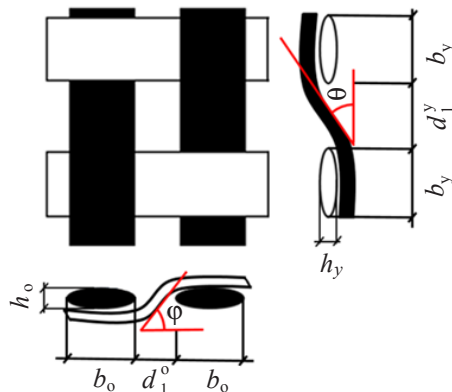


Рис. 1. Параметры внутренней структуры

В процессе эксплуатации объектов, выполненных из тканых композитов, последние могут получать локальное повреждение, вызываемое низкоскоростным ударом твердого тела. С целью изучения влияния такого воздействия на поведение композита разработана методика нанесения предварительного локального повреждения и выполнены экспериментальные исследования на статическое растяжение предварительно поврежденного материала [2]. Для подтверждения выдвинутого в [1–6] предположения об образовании остаточных деформаций проведены экспериментальные исследования разгрузки изучаемых материалов.

1. Методика экспериментальных исследований

В качестве основной характеристики механического поведения образцов гибких тканых композитов выбрана диаграмма деформирования материала, определяющая связь между напряжениями и деформациями. Существующие методики проведения экспериментальных исследований на растяжение, представленные в ГОСТах для технических тканей с покрытием [7, 8], не регламентируют процесс проведения экспериментов по построению диаграммы деформирования для гибких тканых композитов. Для подобных материалов описана только методика определения разрывной растягивающей нагрузки, удлинения при разрыве [7], сопротивления раздиру [8], адгезионных свойств покрытия и ткани и ряда других характеристик. В предлагаемой методике для построения условной диаграммы деформирования гибких тканых композитов определялись значения растягивающей нагрузки и удлинение образца, которые затем пересчитывались в величины нормального напряжения и продольной деформации.

1.1. Образцы для проведения испытаний. В соответствии с поставленными задачами, структурой исследуемых материалов и имеющимися рекомендациями [9–14] для проведения испытаний выкраивались образцы со следующими геометрическими характеристиками: длина рабочей части образца $l_{\text{образца}} = 2,2$ см, ширина $b_{\text{образца}} = 1,6$ см, длина области утолщения для захвата образца $l_{\text{образца}}^* = 1,6$ см

(рис. 2). Образцы материала по ширине имели 15 нитей, направленных вдоль основы (направление растяжения), и 20 нитей утка. Образцы выкраивались таким образом, чтобы направление нитей основы совпадало с продольной осью образца.

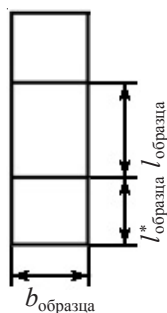


Рис. 2. Образец для испытаний

1.2. Оборудование и алгоритм проведения испытаний. Эксперименты на статическое одноосное растяжение вдоль направления нитей основы выполнялись на установке Amsler HC10 (рис. 3). Скорость нагружения составляла 0,3 мм/с, что позволило исключить влияние инерционных процессов в структуре материала на результаты экспериментов.

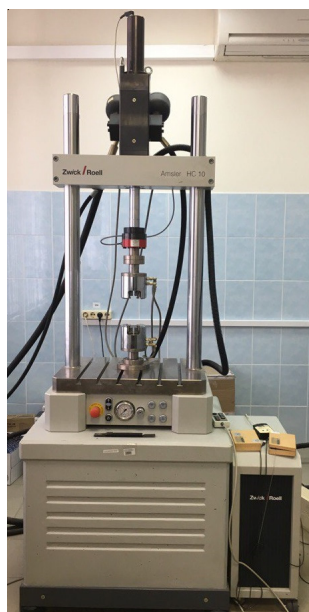


Рис. 3. Установка Amsler HC10

Нанесение локального повреждения реализовывалось на установке Devenport FDB/230 (рис. 4). Лист материала закреплялся в захватах установки, а затем с помощью падающего ударника со сферическим наконечником наносилось единичное повреждение. Масса ударника в эксперименте подбиралась таким образом, чтобы можно было получить образцы с тремя уровнями повреждений. Третий уровень повреждения соответствует массе ударника, обеспечивающей сквозное пробитие образца [15] при падении ударника с высоты, равной одному метру; второй уровень соответ-

вует 70%, а первый уровень – 30% от массы ударника, обеспечивающей пробитие.

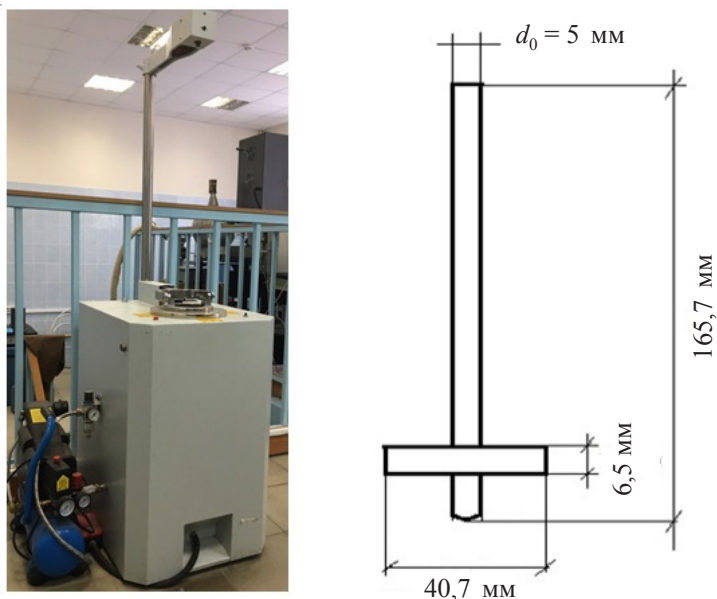


Рис. 4. Установка Devenport FDB/230 (слева) и используемый ударник (справа)

Из поврежденного материала изготавливались образцы, аналогичные образцам из неповрежденного материала, представленным на рис. 2, таким образом, чтобы единичное повреждение от ударного воздействия находилось в центре образца.

В результате нанесения повреждения в материале возникали остаточные деформации (рис. 5).



Рис. 5. Продольное сечение образца материала при повреждении 2-го уровня

1.3. Обработка результатов экспериментальных исследований. Полученные в ходе экспериментальных исследований диаграммы растяжения в осях сила (кН) – перемещение (мм) усреднялись и пересчитывались в условные диаграммы деформирования в соответствии с известными методиками определения условных диаграмм деформирования. Для учета статистического разброса экспериментальных данных испытания проводились сериями в соответствии с требованиями ГОСТ [7].

2. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования выполнялись для гибких тканых композитов марок VP6545, VP6131, VP4126. Значения геометрических параметров внутренней структуры переплетения армирующей ткани материалов, участвующих в экспериментах, представлены в таблице 1.

Исследуемые гибкие тканые композиты были изготовлены из лавсановой армирующей ткани и полиуретанового связующего материала.

Таблица 1

Параметр	Марка композита		
	VP6545	VP6131	VP4126
Угол наклона θ , град.	12	15	7
Угол наклона φ , град.	15	17	8
Длина d_1^o , мм	0,4	0,35	0,4
Длина d_1^y , мм	0,5	0,45	0,5
Ширина нити основы b_o , мм	0,7		
Ширина нити утка b_y , мм			
Высота нити основы h_o , мм	0,5	0,4	0,25
Высота нити утка h_y , мм			
Объемная доля содержания армирующих волокон в нитях r	0,85	0,9	0,98

2.1. Исследования на статическое растяжение. Для определения механических характеристик материалов, из которых состоит композит, в соответствии с предложенной методикой проведения экспериментальных исследований выполнены эксперименты на статическое растяжение лавсановых волокон в нитях армирования и гибкого полиуретана, используемого в качестве связующего материала (клея, соединяющего армирующую ткань и виниловые пленки ПВХ). При осреднении диаграмм деформирования определялись среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации, величина которого для каждой серии испытаний составила не более 7%, что говорит о малом разбросе данных в проведенных экспериментальных исследованиях. На рис. 6, 7 приведены осредненные диаграммы деформирования волокон нитей и связующего материала.

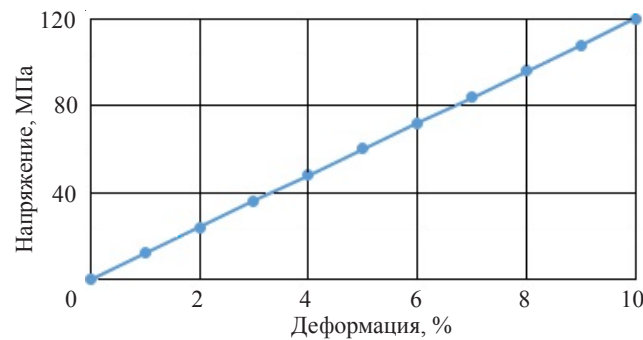


Рис. 6. Осредненная диаграмма деформирования лавсановых волокон

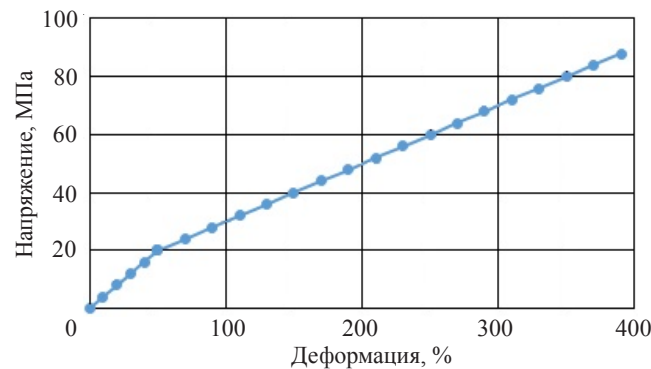


Рис. 7. Осредненная диаграмма деформирования полиуретана

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований и с учетом результатов работ [9–14] определены механические характеристики компонентов материала, составляющих композит (таблица 2).

Таблица 2

Компоненты материала	Материал	Механические характеристики			
		E , МПа	ν	σ_t , МПа	E_t , МПа
Армирующие волокна нитей	Полиэфирные рубленые волокна (лавсан)	$1,2 \cdot 10^3$	0,2	–	–
Связующий материал	Поливинилхлорид и полиуретан	35	0,35	20	20

В таблице 2 приняты следующие обозначения: E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; σ_t – значение напряжения, при котором остаточная деформация после снятия нагрузки составляла 0,2%; E_t – модуль упрочнения при напряжениях $\sigma \geq \sigma_t$.

На рис. 8 представлены осредненные диаграммы деформирования образцов гибких тканых композитов, полученные из диаграмм одноосного растяжения вдоль нитей основы в соответствии с предложенной методикой проведения экспериментов.

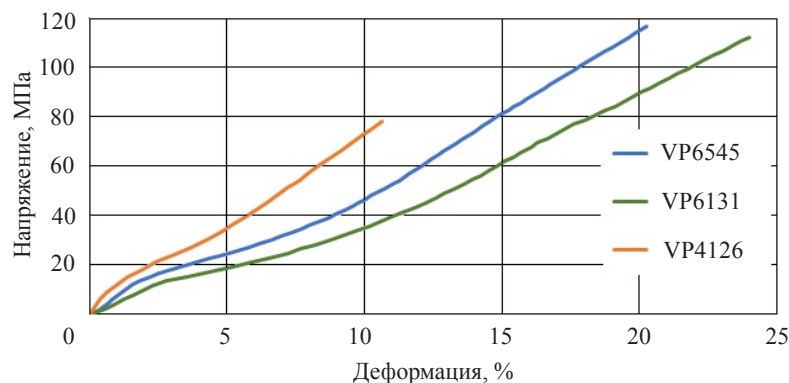


Рис. 8. Диаграмма деформирования для материалов VP6545, VP6131, VP4126

Материалы, из которых изготовлены образцы композитов марок VP6545, VP6131, VP4126, имели одинаковые механические характеристики (см. табл. 2). Отличие между образцами композитов заключалось только в значениях геометрических параметров армирующего слоя (см. табл. 1). Полученные диаграммы деформирования (см. рис. 8) имеют одинаковый качественный характер, но существенно различаются по количественным характеристикам, таким, как модуль упругости и максимальные деформации, что позволяет сделать вывод о том, что геометрия армирующего слоя исследуемых материалов вносит значимый вклад в механическое поведение композита при растяжении.

2.2. Влияние локального повреждения материала. На рис. 9–11 приведены полученные осредненные диаграммы деформирования образцов с единичным повреждением. Нанесение единичного повреждения и обработка результатов экспериментальных исследований проводились в соответствии с вышеизложенной методикой.

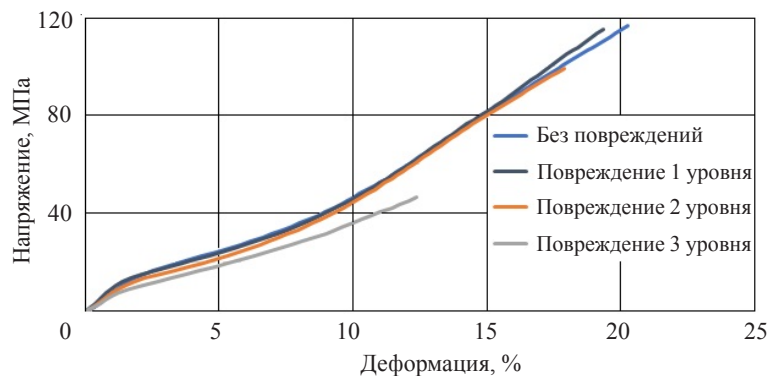


Рис. 9. Диаграмма деформирования образцов из материала VP6545

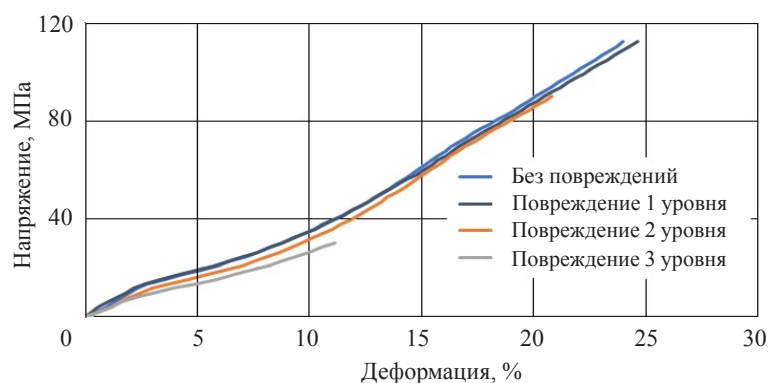


Рис. 10. Диаграмма деформирования образцов из материала VP6131

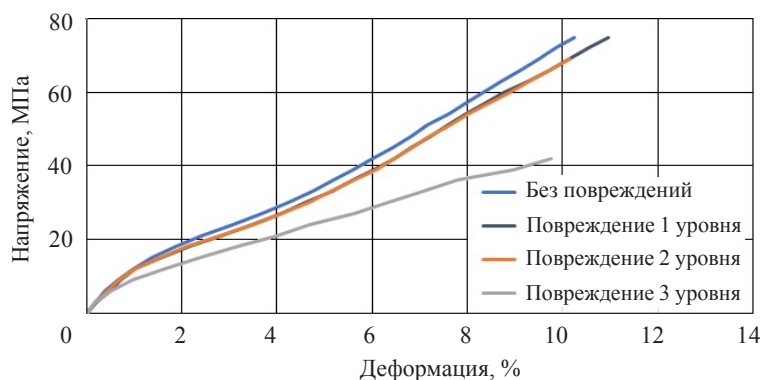


Рис. 11. Диаграмма деформирования образцов из материала VP4126

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что с увеличением уровня повреждения жесткость материала уменьшается. Относительное изменение жесткости для образцов материала, не имеющих сквозного пробития (первый и второй уровни повреждения), незначительно и составляет не более 10% по отношению к жесткости неповрежденных образцов материала. Значительное снижение жесткости наблюдается только для образцов с третьим уровнем повреждения, что обуславливается наличием сквозного отверстия в центре образца и уменьшением рабочей зоны материала в области повреждения при растяжении [16–19].

3. Апробация моделей поведения

Оценка достоверности предложенных моделей [1–6] гибкого тканого композита (ламинатная модель, модель ЭПЯ, модель рамной аналогии) осуществлялась путем сравнения диаграмм деформирования, полученных с использованием предложенных моделей, с результатами натурных экспериментов. Апробация моделей проводилась для трех видов гибких тканых композитов с полотняным переплетением нитей армирующей ткани (см. табл. 1), имеющих различную укладку нитей, толщину и соотношение волокон армирования к материалу связующего.

Для апробации ламинатной модели формулировалась модельная задача, соответствующая натурному эксперименту на одноосное растяжение образцов. На границе А имеет место жесткая заделка, на границе D запрещаются перемещения нижней грани вдоль вертикальной оси Oy , горизонтальной оси Oz и задаются перемещения вдоль продольной оси Ox (вдоль нитей основы): $u_x|_{x=l} = u^*$. Границы В и С свободны от нагрузок (рис. 12).

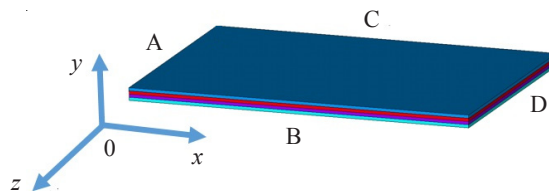


Рис. 12. Модельная задача апробации ламинатной модели

Анализ натурных и модельных диаграмм деформирования показал хорошее качественное и количественное согласование величин напряжений до значений деформаций, равных 4,5%, что составляет 40% от величины деформаций, соответствующих разрушению образца (рис. 13).

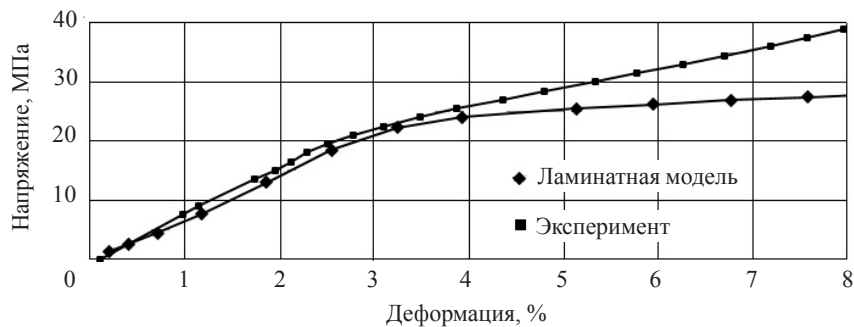


Рис. 13. Апробация ламинатной модели для гибкого тканого композита VP6545

Отклонение значений диаграммы деформирования, полученной с использованием ламинатной модели, при значениях деформаций, не выше указанных, составило не более 10%. Следовательно, разработанная в рамках проведенного исследования [6] ламинатная модель позволяет адекватно описать поведение исследуемых материалов при малых значениях деформации.

Выполнена апробация модели ЭПЯ (рис. 14), основанной на полном геометрическом описании внутренней структуры армирующего слоя исследуемого материала [6]. Граничные условия аналогичны используемым в ламинатной модели.

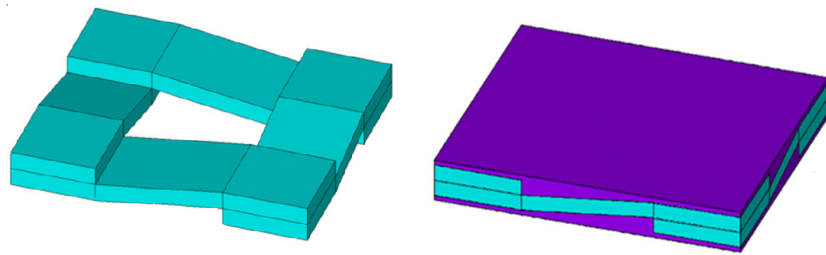


Рис. 14. Модель ЭПЯ композита со связующим

Анализ результатов показал хорошее качественное и количественное согласование значений диаграммы деформирования до значений предельных деформаций, соответствующих разрушению образца (рис. 15). На рисунке обозначено: 1 – эксперимент, 2 – модель ЭПЯ.

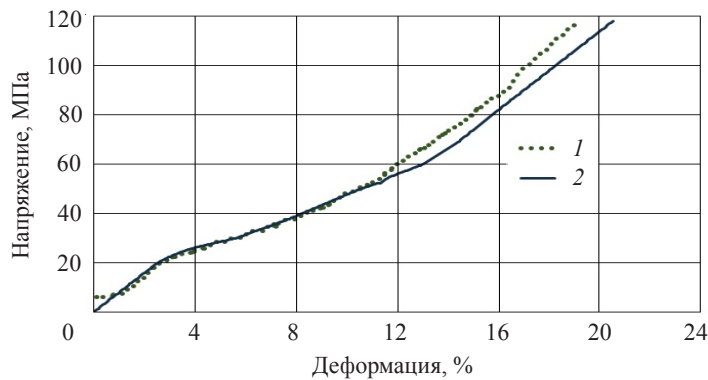


Рис. 15. Апробация модели ЭПЯ для гибкого тканого композита VP6545

Модель ЭПЯ позволяет описать поведение исследуемых материалов при растяжении вдоль направления армирования вплоть до разрушения [20, 21]. Погрешность модели не превышает 10%.

Результаты апробации модели рамной аналогии [1, 5, 6] показали хорошее качественное и количественное согласование полученных результатов до величин предельных деформаций, соответствующих разрушению образца.

На рис. 16 показаны диаграммы деформирования образцов гибкого тканого композита VP6545, полученные с использованием модели рамной аналогии, и результаты экспериментов.

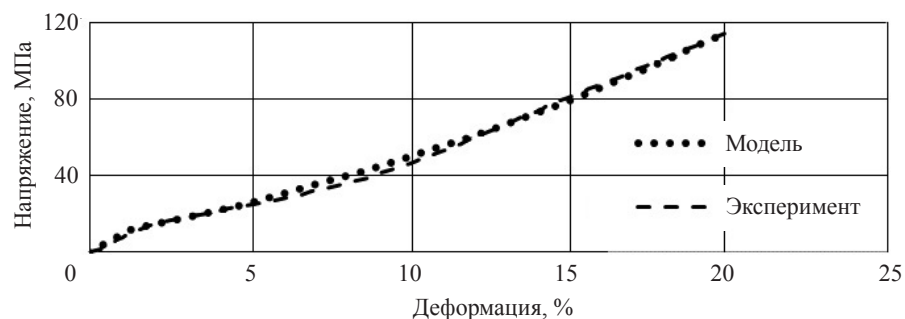


Рис. 16. Апробация модели рамной аналогии для гибкого тканого композита VP6545

Максимальное отклонение результатов моделирования от эксперимента для всех марок композита (см. табл. 1) составило не более 8%.

Модель рамной аналогии позволяет описать поведение исследуемых материалов при растяжении вдоль направления армирования вплоть до разрушения.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования механического поведения гибких тканых композитов при статическом растяжении вдоль направлений армирования. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования для определения влияния предварительного повреждения материала на его механическое поведение при статическом растяжении. Показано, что предварительное повреждение, не приводящее к сквозному пробитию, незначительно влияет на механическое поведение исследуемых гибких тканых композитов. Проведена апробация предложенных структурных моделей. Результаты апробации подтверждают достоверность моделей в областях адекватной их применимости.

Список литературы

1. Кожанов Д.А. Структурная модель гибких тканых, предварительно поврежденных композитов в условиях одноосного растяжения. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2014. Т. 4 (206). С. 107–114.
2. Берендеев Н.Н., Кожанов Д.А., Любимов А.К. Структурная модель гибкого тканого композита. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77. №1. С. 162–171.
3. Кожанов Д.А. Особенности конечно-элементного моделирования вида структурного элемента гибких тканых композитов. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2016. Т. 1 (237). С. 7–15.
4. Любимов А.К., Кожанов Д.А. Моделирование вида структурного элемента гибких тканых композитов при статическом растяжении с применением метода конечных элементов в ANSYS. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2016. Т. 8 (1). С. 113–212.
5. Кожанов Д.А., Любимов А.К. Модель гибкого тканого композита, учитывающая изменение внутренней структуры материала. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №3. С. 311–321.
6. Кожанов Д.А., Любимов А.К. Моделирование процессов деформирования гибких тканых композитов. Часть 1. Структурные модели. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №2. С. 156–168.
7. ГОСТ 30303-95. *Ткани с резиновым или пластмассовым покрытием. Определение разрывной нагрузки и удлинения при разрыве*. М.: Издательство стандартов, 1997. 11 с.
8. ГОСТ 30304-95. *Ткани с резиновым или пластмассовым покрытием. Определение сопротивления раздиру*. М.: Издательство стандартов, 1997. 11 с.
9. 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.
10. *Композиционные материалы: Справочник*. Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
11. Петухов Б.В. *Полиэфирные волокна*. М.: Химия, 1976. 272 с.
12. *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.
13. *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.
14. *Энциклопедия полимеров*. Под ред. В.А. Кабанова и др. Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1974. 1032 с.
15. Behera B.K., Dash B.P. Mechanical behavior of 3D woven composites. *Materials & Design*. 2015. Vol. 67. P. 261–271.

16. Romelt P., Cunningham P.R. A multi-scale finite element approach for modeling damage progression in woven composite structure. *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. P. 977–986.
17. Parsons E.M., King M.J., Socrate S. Modeling yarn slip in woven fabric at the continuum level: Simulations of ballistic impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solid*. 2013. Vol. 61. P. 265–292.
18. Nilakantan G., Keefe M., Wetzel E.D., Bogetti T.A., Gillespie J.W. Jr. Effect of statistical yarn tensile strength on the probabilistic impact response of woven fabrics. *Composites Science and Technology*. 2012. Vol. 72. P. 320–329.
19. Yang Yang, Fei Xu, Xiangyang Gao, Gangwei Liu. Impact resistance of 2D plain-woven C/SiC composites at high temperature. *Materials and Design*. 2016. Vol. 90. P. 635–641.
20. 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
21. Bednarczyk B.A., Stier B., Simon J.-W., Reese S., Pineda E.J. Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites. *Composite Structures*. 2015. Vol. 121. P. 258–270.

References

1. 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-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki [St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics]*. 2014. Vol. 4 (206). P. 107–114 (In Russian).
2. Berendeev 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).
3. 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. Fiziko-matematicheskie nauki [St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics]*. 2016. Vol. 1 (237). P. 7–15 (In Russian).
4. 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 issledovaniya i modelirovanie [Computer Research and Modeling]*. 2016. Vol. 8. No 1. P. 113–212 (In Russian).
5. 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).
6. Kozhanov D.A., Lyubimov A.K. Modelirovanie protsessov deformirovaniya gibkikh tkanykh kompozitov. Chast 1. Strukturnye modeli [Modeling deformation processes in flexible woven composites. Part 1. Structural models]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. Vol. 79. No 2. P. 156–168 (In Russian).
7. GOST 30303-95. *Tkani s rezinovym ili plastmassovym pokrytiem. Opredelenie razryvnoy nagruzki i udlineniya pri razryve [Fabrics Coated with Rubber or Plastics. Determination of Breaking Strength and Elongation at Break]*. Moscow. Standart Publ. 1997. 11 p. (In Russian).
8. GOST 30304-95. *Tkani s rezinovym ili plastmassovym pokrytiem. Opredelenie soprotivleniya razdiru [Fabrics Coated with Rubber or Plastics. Determination of Tear Resistanse]*. Moscow. Standart Publ. 1997. 11 p. (In Russian).
9. 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).
10. *Kompozitsionnye materialy. Spravochnik. [Composite Materials. Handbook]*. Eds. V.V. Vasiliev, Yu.M. Tarnopolskii. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1990. 512 p. (In Russian).

11. Petukhov B.V. *Poliefirnye volokna [Polyester Fiber]*. Moscow. Khimiya Publ. 1976. 272 c.
12. *Spravochnik po kompozitsionnym materialam [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).
13. *Spravochnik po kompozitsionnym materialam [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).
14. *Entsiklopediya polimerov [Encyclopedia of Polimers]*. Eds. V.A. Kabanov et al. Vol. 2. Moscow. Sovetskaya entsiklopedia Publ. 1974. 1032 p. (In Russian).
15. Behera B.K., Dash B.P. Mechanical behavior of 3D woven composites. *Materials & Design*. 2015. Vol. 67. P. 261–271.
16. Romelt P., Cunningham P.R. A multi-scale finite element approach for modeling damage progression in woven composite structure. *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. P. 977–986.
17. Parsons E.M., King M.J., Socrate S. Modeling yarn slip in woven fabric at the continuum level: Simulations of ballistic impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solid*. 2013. Vol. 61. P. 265–292.
18. Nilakantan G., Keefe M., Wetzel E.D., Bogetti T.A., Gillespie J.W. Jr. Effect of statistical yarn tensile strength on the probalistic impact response of woven fabrics. *Composites Science and Technology*. 2012. Vol. 72. P. 320–329.
19. Yang Yang, Fei Xu, Xiangyang Gao, Gangwei Liu. Impact resistance of 2D plain-woven C/SiC composites at high temperature. *Materials and Design*. 2016. Vol. 90. P. 635–641.
20. 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
21. Bednarczyk B.A., Stier B., Simon J.-W., Reese S., Pineda E.J. Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites. *Composite Structures*. 2015. Vol. 121. P. 258–270.

**MODELING DEFORMATION PROCESSES IN FLEXIBLE WOVEN COMPOSITES.
PART 2. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND APPROBATION
OF THE MODELS**

Kozhanov D.A., Lyubimov A.K.

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

The paper presents a methodology and experimental results for flexible plainly-woven composites based on lavsan reinforcing cloth and a polyurethane binding material, tested in static tension in the direction of reinforcement. Three composite types, differing in the geometrical parameters of the reinforcing cloth structure and volume content of the reinforcing fibers in the cloth threads, were used in the experimental investigations. Mechanical characteristics of the materials constituting the composite have been determined. The effect of preliminary local damage in the materials on their subsequent mechanical behavior has been experimentally studied. Preliminary damage was effected with a striker of an assigned mass. To allow for statistical scatter, tests were conducted in series. Based on the results of the studies, it is shown that preliminary local damage not resulting in perforation only insignificantly affects the mechanical behavior of the studied flexible woven composites. Approbation of the introduced structural models describing the behavior of flexible woven composites under static uniaxial tension along one of the reinforcement directions have been done.

Keywords: flexible woven composite material, experiment, uniaxial tension, damage.