

Цепенников М.В., Стром А.А., Повышев И.А., Сметанников О.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование механического поведения 3D композитов при квазистационарном разрушении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 2. – С. 143–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.10

Tsepennikov M.V., Strom A.A., Povyshev I.A., Smetannikov O.Yu. Theoretical-experimental study of mechanical behavior in 3D composites under quasi-steady damage. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 2. Pp. 143-158. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.10



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2016.2.10

УДК 539.422.5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ 3D-КОМПОЗИТОВ ПРИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ РАЗРУШЕНИИ

**М.В. Цепенников, А.А. Стром, И.А. Повышев, О.Ю. Сметанников**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 28 марта 2016 г.  
Принята: 10 мая 2016 г.  
Опубликована: 30 июня 2016 г.

#### Ключевые слова:

трехмерно-армированные композиционные материалы, эффективные свойства, разрушение, акустическая эмиссия, метод механики рассеянных повреждений

### АННОТАЦИЯ

В конструкции всех современных самолетов и авиационных двигателей применяются композиционные материалы. Разработка таких материалов является очень трудоёмким, длительным и дорогостоящим процессом ввиду необходимости проведения большого количества экспериментов. Также существуют определенные ограничения, делающие невозможным определение некоторых свойств опытным путем. Для сокращения времени и стоимости разработки таких материалов применяются различные численные методики, такие как построение виртуального прототипа, проведение ряда численных экспериментов и применение различных разновидностей метода рассеянных повреждений.

Метод механики рассеянных повреждений (МРП) – это популярный инструмент для моделирования развития повреждений в армированных композитах. Он основан на предположении, что материал с дефектами может быть заменён воображаемым материалом без дефектов, но с пониженным модулем упругости. Таким образом, наличие дефектов отражается только на упругих свойствах материала, и развитие повреждений регистрируется через потерю этих свойств. Для реализации одной из разновидностей данного метода на языке APDL был разработан макрос для пакета ANSYS.

Рассматривается методика получения идеализированного виртуального прототипа трехмерно-армированного композиционного материала по результатам томографии.

Представлена методика определения эффективных упругих свойств трехмерно-армированного композиционного материала путем проведения ряда численных экспериментов. Метод механики рассеянных повреждений применяется для нахождения параметров прочности.

Показаны графики зависимости акустической эмиссии и кривые деформирования образцов при испытании на растяжение и сдвиг. Результаты моделирования сравниваются с полученными экспериментальными данными.

© ПНИПУ

© Цепенников Максим Владимирович – аспирант, e-mail: neiron1987@rambler.ru  
Стром Алексей Александрович – аспирант, e-mail: strom@avid.ru  
Повышев Илья Алексеевич – аспирант, e-mail: povishev@avid.ru  
Сметанников Олег Юрьевич – доктор технических наук, доцент, e-mail: sou2009@mail.ru

Maxim V. Tsepennikov – Postgraduate Student, e-mail: neiron1987@rambler.ru  
Aleksey A. Strom – Postgraduate Student, e-mail: strom@avid.ru  
Ilya A. Povyshev – Postgraduate Student, e-mail: povishev@avid.ru  
Oleg Yu. Smetannikov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: sou2009@mail.ru

## THEORETICAL-EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOR IN 3D COMPOSITES UNDER QUASI-STEADY DAMAGE

M.V. Tsepennikov, A.A. Strom, I.A. Povyshev, O.Yu. Smetannikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 28 March 2016  
Accepted: 10 May 2016  
Published: 30 June 2016

#### Keywords:

3D-reinforced composite materials, effective properties, failure, acoustic emission, continuous damage mechanics

### ABSTRACT

Composite materials are used to manufacture all modern aircrafts and aircraft engines. The development of these materials is labour-intensive and expensive, as it is necessary to carry out extensive experimental studies of anisotropic material properties. There are also certain constraints which make it impossible to obtain some material properties via experiments. There are various numerical techniques to reduce development time and costs for such materials, e.g. construction of a virtual prototype, a series of numerical experiments and use of different varieties of continuous damage mechanics method (CDM).

Continuous damage mechanics method (CDM) is a popular tool for modelling damage development in reinforced composites. It is based on the assumption that any given volume of a damaged material can be equivalently changed by the undamaged volume of material with a decreased elastic modulus. Thus, material damage is only reflected by lowered elastic properties; and damage growth is reflected by a degree of material's elastic modulus reduction. APDL macros was developed for the application of a variant of this method in finite elements analysis problem.

The method of building an idealized virtual prototype of a 3D-reinforced composite material using tomography is considered in the paper. The method of determining effective elastic properties of a 3D-reinforced composite material by a series of numerical experiments is presented here. Continuous damage mechanics is used for obtaining materials' strength parameters.

Acoustic emission diagrams and stress-strain relations for material specimens in uniaxial tension and shear stress states are shown. Numerical modelling results are compared with the experimental data obtained.

© PNRPU

---

## Введение

Методы, основанные на МРП, получили широкое распространение для оценки влияния накопленных повреждений на кривые зависимости напряжение-деформация. Последнее исследование на эту тему включают работы Такеды и др. [1], Табией и Иванова [2], Сиды и др. [3]. Однако все эти исследования не в полной мере отвечают на вопросы, где в материале локализируются зоны повреждения и как они развиваются при нагрузке. Проблема развития повреждений (мониторинг распространения повреждения в материале) была отражена, в частности, в одной из последних работ Чжао и др. [4], где развитие повреждений в композите при растяжении исследуется с использованием конечно-элементного анализа. Применяются различные сочетания критериев прочности для волокна и матрицы и избирательный метод ухудшения прочности из работы Блэкеттера и др. [5]. Показано, что локализация первоначального повреждения, а также уровни нагрузки для начала разрушения и окончательного разрушения очень чувствительны к выбору критерия разрушения матрицы. Аналогичные вычисления были проведены Николетто и Ривой [6] для расчёта кривых зависимости деформации от напряжения и определения уровней напряжения, связанных с конкретными механизмами разрушения в ходе развития повреждений в тканях с саржевым переплетением при растяжении. У Такано и др. [7] предлагается метод трёхмерного многоуровневого моделирования развития повреждений в мезоструктурах композиционных материалов, армированных тканым и вязаным текстильным материалом, при растяжении. Авторы рассматривают растяжение до 1 % и при-

нимают критерий напряжения Хоффмана [8] и модель разрушения Мураками-Оно [9, 10]. Тан и Уиткомб [11] исследуют чувствительность поведения материала при разрушении к структуре ткани. Проводится анализ разрушения с использованием критерия максимального напряжения и усовершенствованной модели разрушения Блэкеттера. Обнаружено, что текстильные материалы с большой волнистостью показывают сложное поведение, которое зависит от выбора модели разрушения, а композиты с низкой волнистостью подобной чувствительностью не обладают. У Зако и др. [12] моделирование развития повреждений методом конечных элементов выполняется для плоских композитов, армированных тканым материалом, при растяжении в направлении волокна. Используя критерий максимального напряжения и модель разрушения Мураками-Оно, авторы показывают, что зона повреждений начинается с поперечного растрескивания в зонах перекрещивания жгутов волокон, а затем прогрессирует в утке, пока не соединится с соседними зонами повреждений в областях перекрещивания.

Модели, представленные в литературе, главным образом касаются композитов с взаимно перпендикулярным расположением волокон, которые нагружаются в направлении волокна. Это важно отметить, поскольку в таких моделях отсутствуют значительные сдвиговые деформации. В работах Ломова и др. [13, 14] авторы внедряли метод МРП для анализа развития повреждений в композитах с трёхосным плетением при растягивающей нагрузке, где хотя бы одно семейство волокон было ориентировано под углом  $45^\circ$  к направлению нагрузки.

К основным недостаткам численных методик, основанных на МРП, относится сильная чувствительность кривых деформации-напряжения к размеру сетки и увеличению нагрузки [15].

Текущая работа направлена на определение пределов прочности трехмерно-армированного полимерного углепластика с эпоксидным связующим, отработку методики построения, наиболее приближенной к реальной геометрии волокон, и сравнение полученных результатов с данными, полученными путем томографического и акустического анализа, для дальнейшего получения идеализированного виртуального прототипа. Виртуальный прототип является цифровым макетом, может относительно быстро генерироваться и содержит достаточную информацию, чтобы позволить идентифицировать и решить большую часть потенциальных проблем не прибегая к трудоемким этапам проектирования.

Для реализации одной из разновидностей метода МРП на языке APDL был разработан макрос. Макрос может использоваться как для однонаправленного, так и для тканого композиционного материала. Верификация метода выполнена ранее в работах [16, 17].

## 1. Получение идеализированного виртуального прототипа

В качестве объекта исследования выбран трехмерно-армированный композиционный материал из высокопрочного углеродного волокна и полимерной матрицы. Как уже отмечалось, не всегда имеется возможность определить свойства материала экспериментальным путем. В данном случае невозможно провести эксперимент на сдвиг в плоскости  $xz$  и  $yz$  из-за малой толщины материала, не позволяющей изготовить образцы необходимого размера. Сечение армирующего каркаса материала до пропитки связующим приведено на рис. 1. Армирующий каркас исследуемого материала до пропитки связующим представляет собой объемно извитую структуру с диагональным переплетением ортогональных волокон.



Рис. 1. Фотография преформы

Для определения эффективных свойств и пределов прочности композиционного материала выделен элемент периодичности, геометрия которого построена на основе томографии образцов (рис. 2). Геометрия элемента периодичности без матрицы строилась в программе TexGen, при этом вводилось допущение: площадь поперечного сечения идеализированного волокна равна средней поперечной площади соответствующих волокон, вычисленной по результатам томографии. Ввиду особенностей данного продукта в ходе его применения в ряде случаев геометрия генерируется с самопересечением нитей. С целью исключения самопересечений нитей решена контактная задача. Для этого в ANSYS WorkBench верс. 15 построена конечно-элементная модель, где на каждой грани волокна задается контактная поверхность. На противоположащих параллельных гранях элемента периодичности заданы уравнения связи в перемещениях (Coupled Sets в терминах ANSYS).

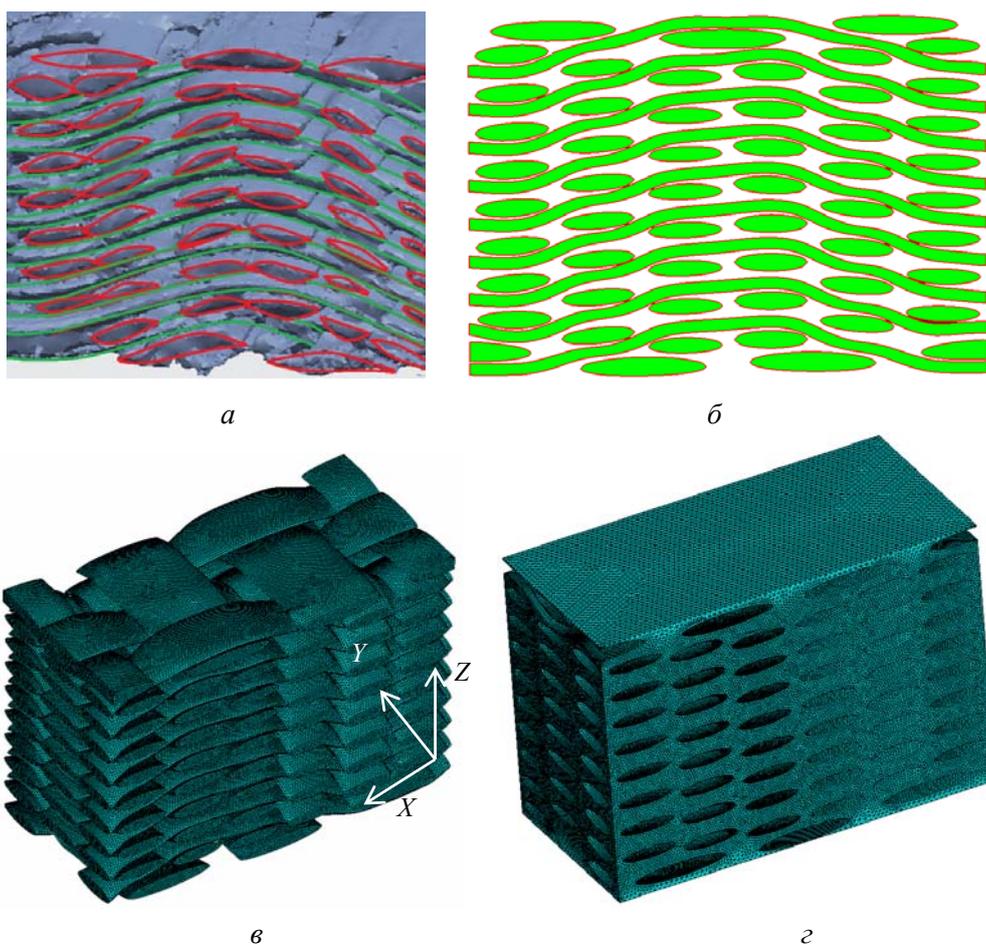


Рис. 2. Геометрия плетения образцов: *a* – по результатам томографии; *б* – идеализированный виртуальный прототип в плоскости сечения *xz*; *в* – конечно-элементная сетка на волокнах; *г* – на матрице

Далее к координатам узлов начальной конечно-элементной сетки добавляются приращения, полученные из решения контактной задачи. Обновленные координаты являются начальной конфигурацией, исключающей самопересечение нитей, для решения основной задачи. На базе начальных положений узлов внешних граней нитей в дальнейшем, в  $\mathcal{N}X$ , построены геометрические поверхности и объемы. Объемная доля связующего в композите составляет 48,9 %, а объемная доля связующего в полученной геометрии составляет 49,47 %. Конечно-элементная сетка с матрицей и волокнами имеет 32,5 млн степеней свободы (рис. 2, в).

Процедура численного определения эффективных упругих свойств основана на методике, апробированной и детально описанной в работе [18]. При этом свойства нити вычислялись с допущением, что она является однонаправленным композиционным материалом с объемным содержанием волокна 84% по эмпирической формуле Чамиса (Chamis) [19]. Общая математическая постановка задачи выглядит следующим образом:

уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho F_j = 0; \quad (1)$$

обобщенный закон Гука

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}; \quad (2)$$

геометрические соотношения с учетом малых деформаций

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (3)$$

где  $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, u_{ij}, C_{ijkl}$  – тензоры напряжений, деформаций, перемещений и упругих постоянных соответственно, а  $\rho F_j$  – объемные силы.

$$C_{ijkl}(\mathbf{x}) = \begin{cases} C_{ijkl}^a(\mathbf{x}), & x \in \Omega_a, \\ C_{ijkl}^m, & x \in \Omega_m, \end{cases}$$

где  $\Omega_a, \Omega_m$  – области, занятые армирующими нитями и связующим соответственно.

Пределы прочности определялись с помощью вышеописанного метода механики рассеянных повреждений. Для моделирования разрушения на языке APDL был разработан макрос, который на каждом шаге нагружения анализирует напряжения в элементах. Если в каком-то элементе напряжения по какому-либо из направлений превышают предел прочности, то соответствующий материал считается разрушенным и в нем понижается модуль упругости.

В рамках настоящей работы разрушение оценивалось по критерию максимальных напряжений:

$$\varepsilon = \max \left\{ \left( \frac{\sigma_{xt}}{\sigma_{xt}^f} \cup \frac{\sigma_{xc}}{\sigma_{xc}^f} \right), \left( \frac{\sigma_{yt}}{\sigma_{yt}^f} \cup \frac{\sigma_{yc}}{\sigma_{yc}^f} \right), \left( \frac{\sigma_{zt}}{\sigma_{zt}^f} \cup \frac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zc}^f} \right), \frac{|\sigma_{xy}|}{\sigma_{xy}^f}, \frac{|\sigma_{yz}|}{\sigma_{yz}^f}, \frac{|\sigma_{xz}|}{\sigma_{xz}^f} \right\}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – значение критерия максимальных напряжений, меняющееся от 0 до 1, 1 – соответствует разрушению;  $\sigma_{*t}$  – растягивающие напряжения в соответствующем направлении;  $\sigma_{*c}$  – сжимающие напряжения в соответствующем направлении;  $\sigma_{**}^f$  – предел прочности по напряжениям в соответствующих направлениях при растяжении или сжатии.

В разрушенных элементах упругие свойства понижаются в 100 и 10 раз для волокна и матрицы соответственно. Свойства материала понижаются мгновенно. Примененная модель деградации представлена в табл. 1.

Таблица 1

Модель деградации волокна

| Занижаемые свойства материала | Направление, по которому был превышен предел прочности |   |   |    |    |    |
|-------------------------------|--|---|---|----|----|----|
|                               | x  | y | z | xy | yz | xz |
| $E_x$                         |  |   |   |    |    |    |
| $E_y$                         |  |   |   |    |    |    |
| $E_z$                         |  |   |   |    |    |    |
| $\nu_{xy}$                    |  |   |   |    |    |    |
| $\nu_{yz}$                    |  |   |   |    |    |    |
| $\nu_{xz}$                    |  |   |   |    |    |    |
| $G_{xy}$                      |  |   |   |    |    |    |
| $G_{yz}$                      |  |   |   |    |    |    |
| $G_{xz}$                      |  |   |   |    |    |    |

На каждом шаге приращения граничных перемещений процесс деградации свойств в подвергнутых разрушению элементах производится единожды, новые свойства используются на следующем шаге нагружения.

## 2. Испытание на растяжение

Расчетный график зависимости силы реакции от перемещений траверсы с помощью метода МРП при растяжении в направлении основы представлен на рис. 3.

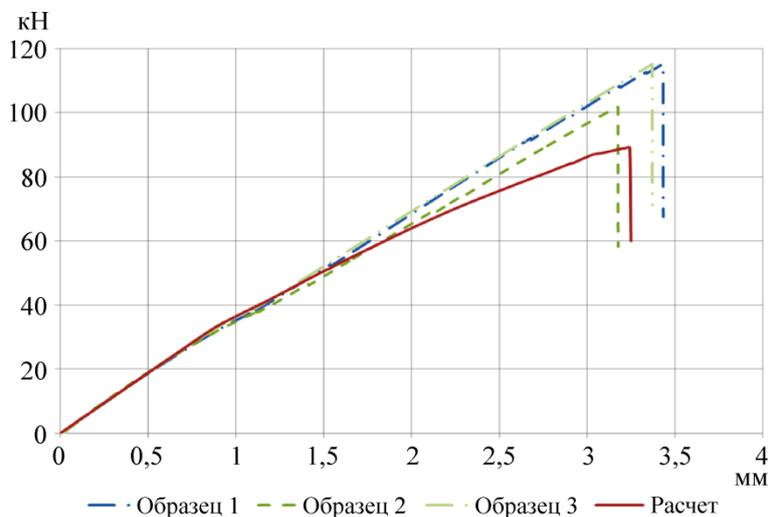


Рис. 3. Графики зависимости силы реакции от перемещений

При численном анализе на ячейке периодичности были заданы следующие граничные условия:

$$u_x \Big|_{x=h_x} = \Delta_x, \quad u_x \Big|_{x=0} = 0;$$

$$u_y(y, z) \Big|_{x=0} = u_y(y, z) \Big|_{x=h_x}, \quad u_z(y, z) \Big|_{x=0} = u_z(y, z) \Big|_{x=h_x};$$

$$\begin{aligned} u_y \Big|_{y=0} &= 0, \quad u_y \Big|_{y=h_y} = \text{const}; \\ u_x(x, z) \Big|_{y=0} &= u_x(x, z) \Big|_{y=h_y}, \quad u_z(x, z) \Big|_{y=0} = u_z(x, z) \Big|_{y=h_y}; \\ u_z(0, 0, 0) &= 0, \end{aligned}$$

где  $h_x, h_y, h_z$  – размеры представительного объема (см. рис. 2) по соответствующим направлениям. Начало разрушения наблюдается в матрице в направлении основы при перемещении 0,511 мм, что соответствует нагрузке в 19,24 кН. При перемещении 0,9 мм наблюдается критический рост повреждений в матрице, что приводит к изменению угла наклона кривой деформирования. Начало разрушения волокна происходит при перемещении 3 мм, что соответствует нагрузке в 86,7 кН. В дальнейшем из-за критического роста повреждений в волокне материал теряет свою несущую способность при перемещении 3,24 мм, что соответствует нагрузке в 89 кН. С момента образования первого повреждения до полной потери несущей способности материала нагрузка выросла в 4,63 раза. При проектировании конструкции предел прочности закладывается с коэффициентом 2, это означает, что даже при эксплуатационных нагрузках возможно критическое накопление повреждений, изменение свойств материала и его разрушение.

Для подтверждения полученного предела прочности и упругих свойств материала проведена серия испытаний образцов на растяжение в направлении основы в соответствии со стандартом ASTM D3039.

Испытания проводились с максимальным растягивающим усилием 200 кН и скоростью нагружения 2 мм/мин, при комнатной температуре. Испытывались стандартные образцы размером 250 × 25 мм со стеклопластиковыми концевыми накладками. Для регистрации значения локальной деформации образца его центральная область была препарирована тензорезисторами фольгового типа с базой измерений 5 × 3 мм, с двух сторон для компенсации изгиба. Для идентификации характера разрушения и определения морфологии накапливаемых повреждений в процессе испытаний образцов на растяжение проводилась запись событий акустической эмиссии.

Для проведения акустической эмиссии применялась система регистрации AMSY-6 фирмы Vallen. Система позволяет производить регистрацию и подсчет событий акустической эмиссии, измерение амплитуд и частот акустического сигнала, сопутствующего локальному разрушению в структуре материала, означающих зарождение или развитие дефекта.

Было использовано 4 датчика акустической эмиссии, расположенных парно вблизи накладок. Такое количество датчиков и их расположение позволяет производить локацию источников акустической эмиссии.

Испытания были выполнены согласно методике проведения эксперимента для исследования феномена разрушения в углепластике со сложной структурой, предложенной в [20].

Методика состоит из трех основных этапов: 1) проведение испытаний образцов до разрушения при квазистатической нагрузке с регистрацией сигналов акустической эмиссии; 2) определение характерных пороговых значений развития разрушения на основании данных акустической эмиссии; 3) исследование характера разрушения на этих этапах с помощью рентгеноскопии.

По результатам анализа графиков зависимости кумулятивной энергии акустической эмиссии, полученным из испытаний образцов до разрушения, выбраны пороговые значения начала зарождения дефектов  $\epsilon_0$ , границы перехода от низкоэнергетических событий

акустической эмиссии к высокоэнергетическим  $\epsilon_1$  и обширного накопления повреждений  $\epsilon_2$ . Характерный график зависимости перемещений от нагрузки с наложенным на него графиком акустической эмиссии в логарифмической шкале приведен на рис. 4.

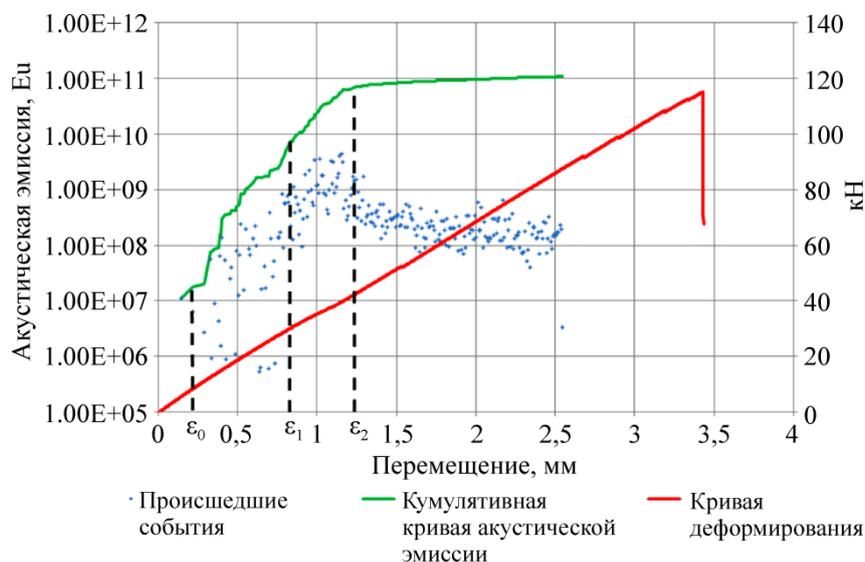


Рис. 4. График зависимости нагрузки, энергии отдельных событий акустической эмиссии и кумулятивной кривой акустической эмиссии от перемещений траверсы для образца в направлении основы

Чтобы определить характер разрушения, проведено томографическое исследование дефектов, возникших в образцах, испытанных на растяжение до пороговых значений  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ . Для более отчетливого проявления дефектов образцы перед проведением томографии погружались в проникающую жидкость. На рис. 5 представлена томография образца перед началом испытаний в плоскости сечения XZ.

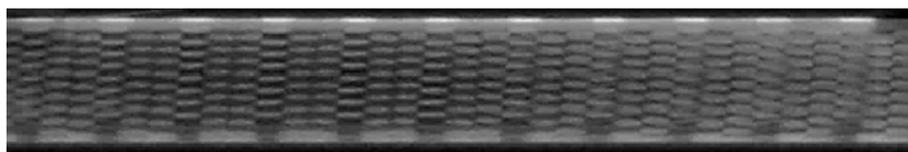


Рис. 5. Томография образца перед началом испытаний в плоскости сечения XZ

На рис. 6 представлена томография образца в плоскости сечения XZ, испытанного до порогового значения  $\epsilon_1$ , которое соответствовало нагрузке в 30 кН, перемещению 0,75 мм и значению акустической эмиссии  $7,0 \cdot 10^8$  Eu. Также приведен рис. 6, б с разрушенными элементами при соответствующей нагрузке в двух сечениях плоскости XZ. Как видно, трещины зарождаются между волокнами утка, а также в местах переплетения волокон утка и основы.

На рис. 7 представлена томография образца в плоскости сечения XZ, испытанного до порогового значения  $\epsilon_2$ , при нагрузке в 40 кН, перемещении 1,1 мм и соответствует значению акустической эмиссии  $9,0 \cdot 10^9$  Eu. Также приведен рис. 7, б с разрушенными элементами при соответствующей нагрузке в двух сечениях плоскости XZ. В дальнейшем трещины продолжают свой рост в направлении Z.

На рис. 8 представлена фотография образца в плоскости XY, испытанного до разрушения по первому этапу.

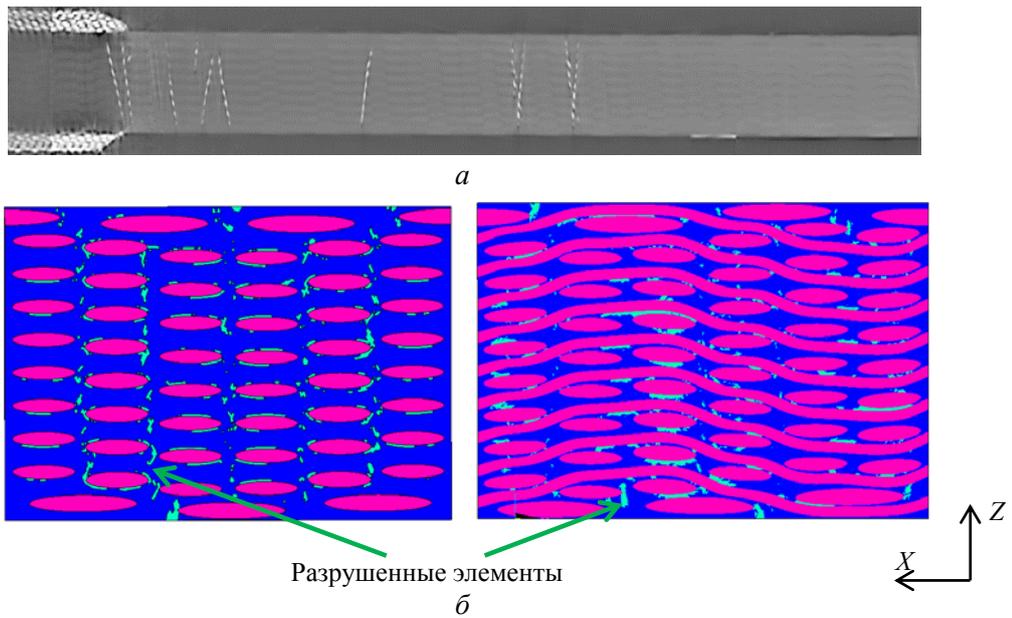


Рис. 6. Томография образца, испытанного до порогового значения  $\varepsilon_1$ , в плоскости сечения  $XZ$ : *a* – эксперимент; *б* – расчет

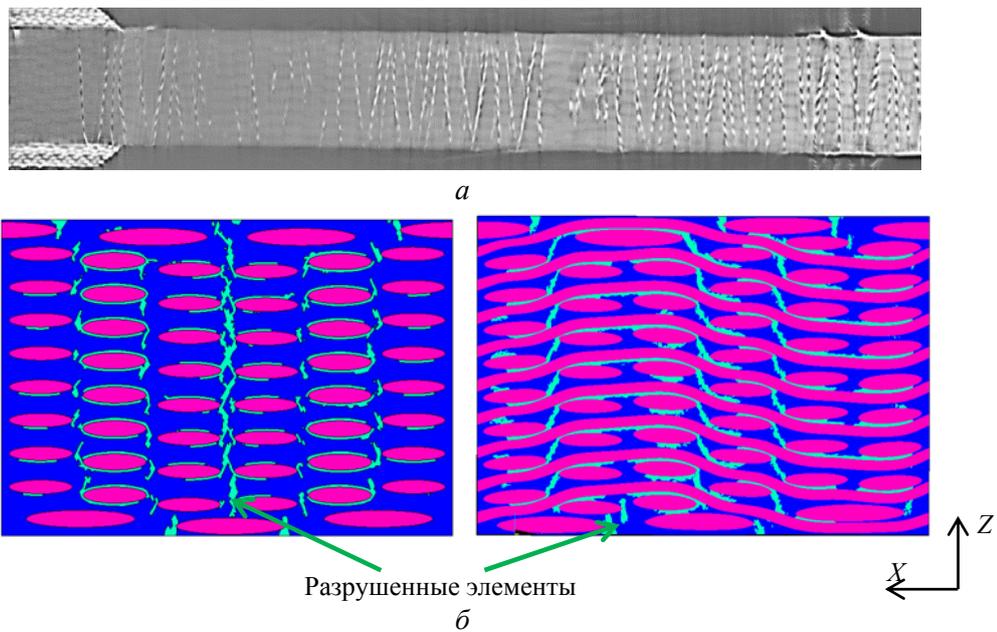


Рис. 7. Томография образца, испытанного до порогового значения  $\varepsilon_2$ , в плоскости сечения  $XZ$ : *a* – эксперимент; *б* – расчет

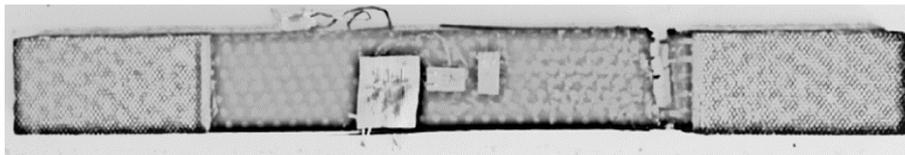


Рис. 8. Фотография образца в плоскости  $XY$  после разрушения

На снимках, полученных по результатам томографии, видны поперечные наклонные трещины, равномерно распределённые по всей длине образца. При этом в зоне накладок наблюдается незначительное увеличение плотности трещин, обусловленное геометрическим концентратором напряжений.

У образцов, испытанных до уровня энергии  $\epsilon_1$ , наблюдаются зарождение характерных поперечных трещин на границе между нитями основы и утка, диагональное направление которых обусловлено извитостью нитей утка. На образцах, испытанных до уровня энергии  $\epsilon_2$ , трещины объединяются в магистральные поперечные.

Плотность трещин в зависимости от нагрузки возрастает. Одной из особенностей испытанного материала является отсутствие продольных трещин, развивающихся в направлении прикладываемой нагрузки, что может являться следствием переплетения жгутов основы жгутами утка в направлении, перпендикулярном плоскости образца.

Графики зависимости силы реакции от перемещений траверсы образцов и расчётный график были представлены на рис. 3. После проведения серии расчетов выяснилось, что большой вклад в общую жёсткость при проведении испытаний вносят технологические накладки на образце, вследствие чего жёсткость накладок была учтена в расчете. Для этого в расчетную модель был добавлен упругий элемент с рассчитанной жесткостью траверсы. Средняя разрушающая нагрузка по испытаниям трех образцов составила 111 кН. Расчетная разрушающая нагрузка ниже экспериментальной на 18,9 % и составляет 89 кН. Перемещения при разрушающей нагрузке составили 3,24 мм, что на 2,56 % ниже, чем средние перемещения из эксперимента (3,325 мм).

Сопоставление результатов акустической эмиссии с расчетом представлено на графике зависимости количества разрушенных элементов от перемещений (рис. 8). Черным маркером обозначено количество разрушенных элементов за один шаг нагружения, а красным сумма всех повреждений за все предыдущие шаги нагружения. Такая зависимость должна быть схожа по характеру с кумулятивной кривой, полученной акустической эмиссией.

Из представленных на рис. 3 и 9 графиков видно, что после начала разрушения матрицы начинается бурный рост повреждений, вследствие чего кривая деформации меняет свой наклон, но в дальнейшем рост повреждений замедляется. В расчете, в отличие от эксперимента, рост повреждений после растрескивания матрицы не спадает, а, немного понизившись, продолжается вплоть до начала разрушения волокон.

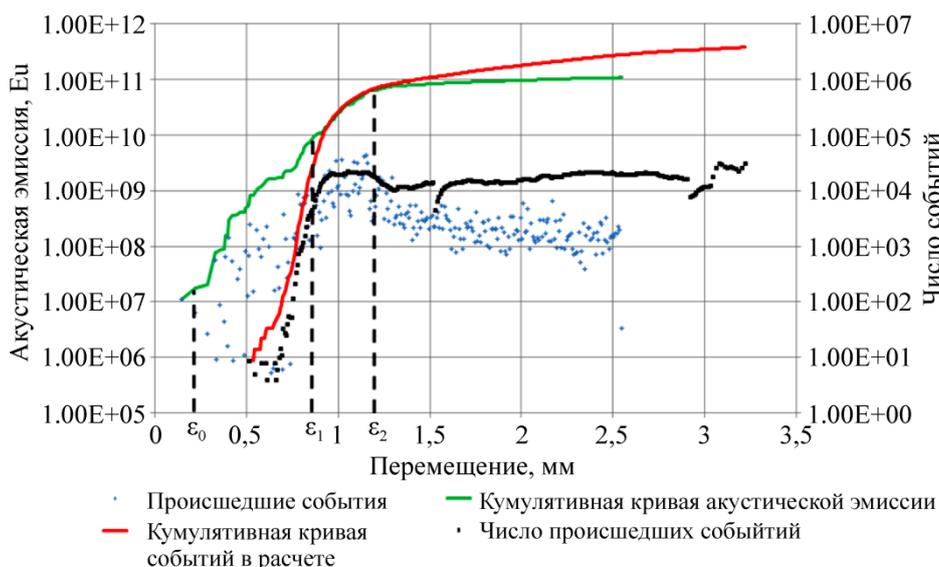


Рис. 9. График зависимости количества разрушенных элементов от перемещений

### 3. Испытание на сдвиг

Также проведена серия испытаний образцов на сдвиг в плоскости  $XU$  в соответствии со стандартом ASTM D5379. Испытания проводились с использованием оптически измерительного комплекса Vic-3D. Фото образца с нанесенным покрытием для испытаний с Vic-3D и схематичным расположением тензодатчиков показано на рис. 10. Тензодатчики расположены под углом 90 градусов относительно друг друга и под углом 45 градусов относительно оси  $x$ .

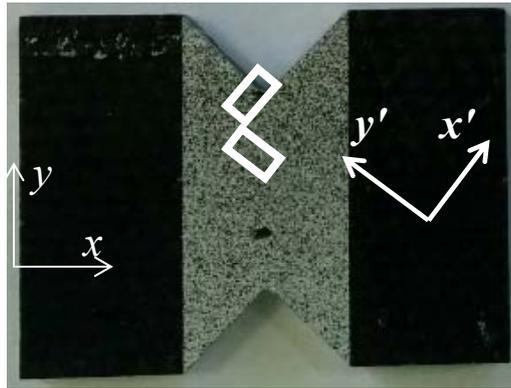


Рис. 10. Фото образца с нанесенным покрытием

Поле сдвиговых деформаций из расчета образца с полученными упругими эффективными свойствами, а также картина распределения сдвиговых деформаций, полученная с помощью Vic-3D, представлены на рис. 11. Как видно из рисунка, в центре образца образуется полоса равномерных сдвиговых деформаций.

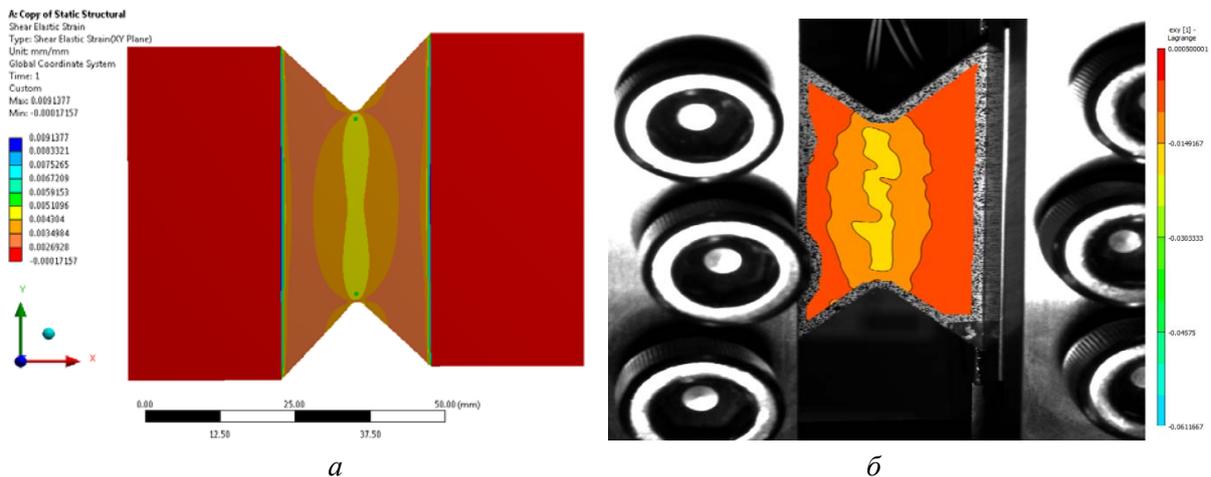


Рис. 11. Поле деформаций, полученное в расчете и с помощью Vic-3D:  
*a* – расчет; *б* – эксперимент

После окончания испытаний на сдвиг из образца был вырезан участок с размерами  $20 \times 10$  мм. Участок вырезан из зоны, в которой образовывались равномерные сдвиговые напряжения, после чего была выполнена его томография. Томография образца в плоскости сечения  $YZ$  представлена на рис. 12.

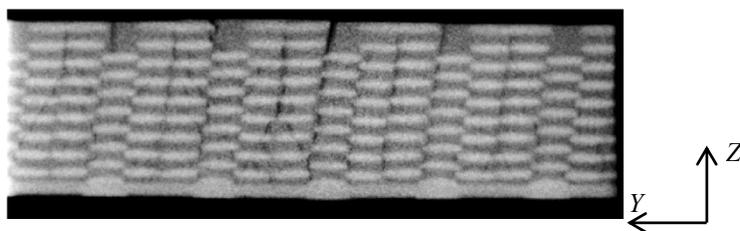


Рис. 12. Томография в плоскости сечения YZ

На томографии видны поперечные и наклонные трещины, проходящие по всей толщине образца. На рис. 13 показана картина распределения интенсивности напряжений по Мизесу в плоскости YZ, полученная из упругого расчета, а также картина с разрушенными элементами после потери несущей способности материала. Видно, что напряжения в матрице концентрируются между рядами волокон, направленных по основе. Вследствие этого данные концентраторы приводят к поперечному растрескиванию матрицы, что подтверждается проведённой томографией.

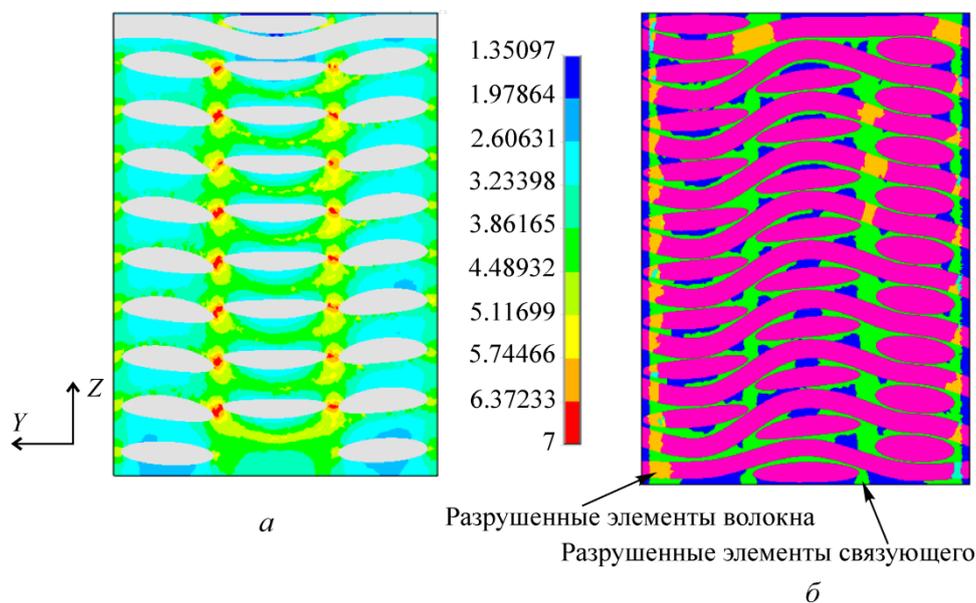


Рис. 13. Напряжения по Мизесу в матрице в плоскости сечения YZ (а), картина разрушенных элементов в сечении YZ (б)

Анализ полей перемещений, полученных с помощью Vic-3D и графика зависимости силы реакции от перемещений траверсы, показал, что оснастка, применяемая в эксперименте, имеет относительно малую жёсткость.

В соответствии со стандартом ASTM D5379 была построена зависимость напряжений от деформаций. Напряжения вычислялись по формуле

$$\tau = P / S,$$

где  $P$  – сила реакции;  $S$  – площадь поперечного сечения. Деформация вычислялась как сумма деформаций двух тензодатчиков. Тензодатчики, приклеенные к поверхности образца, отклеились при определенном уровне деформации. Поэтому кривую деформации удалось построить не до полного разрушения образца. На рис. 14 показаны расчетные и экспериментальные кривые зависимости напряжений от деформаций. Усредненные по четы-

рем образцам предельные напряжения показаны горизонтальной линией. При построении расчетной кривой брались усредненные сдвиговые напряжения  $\sigma_{xy}$  по всему объему элемента периодичности и усредненные деформации  $\epsilon_{xx}$ , взятые с поверхности образца, перпендикулярной оси  $z$  в системе координат,  $x'Oy'$ , повернутой на 45 градусов вокруг оси  $z$  (см. рис. 10). Максимальные сдвиговые напряжения в эксперименте составляют  $9,28 \text{ кгс/мм}^2$ , максимальные сдвиговые напряжения из расчёта составляют  $9,18 \text{ кгс/мм}^2$ . Различие в напряжениях составляет 1 %. Данные расхождения следует считать удовлетворительными. Упругие участки кривых деформирования полностью совпадают, что подтверждает правильность рассчитанных упругих свойств. Выявлено значительное влияние оснастки на получаемые кривые зависимости силы реакции от перемещений. Данное влияние учтено при расчете.

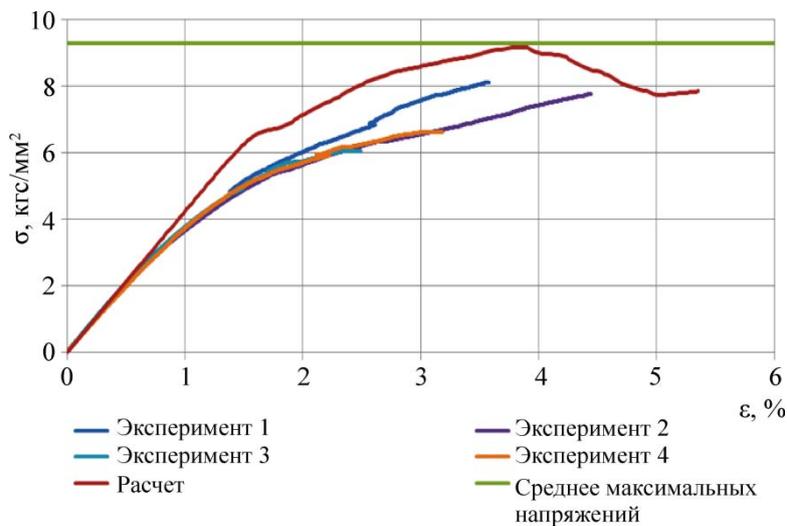


Рис. 14. Зависимость напряжений от деформаций

Для эксперимента на сдвиг задавались следующие кинематические граничные условия, реализующие чистый сдвиг:

$$\begin{aligned}
 u_x \Big|_{x=0} &= u_x \Big|_{x=h_x} = u_x \Big|_{y=0} = u_x \Big|_{y=h_y} = \epsilon_{xy} \cdot y; \\
 u_y \Big|_{x=0} &= u_y \Big|_{x=h_x} = u_y \Big|_{y=0} = u_y \Big|_{y=h_y} = \epsilon_{xy} \cdot x; \\
 u_z \Big|_{x=0} &= 0; \quad u_z \Big|_{x=h_x} = \text{const.}
 \end{aligned}$$

В дальнейшем, для более точного моделирования процесса разрушения необходимо различать разрушение ортотропного и изотропного материала, для ортотропного применять более сложные критерии прочности, а для изотропного материала – иную модель деградации. Также необходимо ставить в зависимость коэффициенты деградации материала от объема разрушаемого элемента, так как вклад в общую жёсткость модели у элементов различен, и чем больше элемент, тем меньше должен быть коэффициент деградации материала для него.

## **Выводы**

Проведены численные эксперименты с представительным объемом идеализированного виртуального прототипа трехмерно-армированного композиционного материала и определены недостающие эффективные упругие свойства и пределы прочности. Проведена серия испытаний образцов на растяжения по основе в соответствии со стандартом ASTM D3039, выполнена акустическая эмиссия и томография образцов на различных стадиях нагружения. Проведена серия испытаний образцов на сдвиг (в соответствии со стандартом ASTM D5379) с использованием оптического измерительного комплекса Vic-3D. Выполнена томография образца после испытания. Полученные данные сопоставлены с кривыми деформирования, томографией и акустической эмиссией. Расхождение между предельной расчетной нагрузкой и экспериментальной в случае растяжения по основе составило 18,9 %. При этом перемещения при разрушающей нагрузке составили 3,24 мм, что на 2,56 % ниже, чем средние перемещения из эксперимента (3,325 мм). В случае сдвига расхождение между предельными расчетными и экспериментальными сдвиговыми напряжениями составило 1 %.

## **Библиографический список**

1. Deformation and progressive failure behavior of woven-fabric-reinforced glass/epoxy composite laminates under tensile loading at cryogenic temperatures / T. Takeda, S. Takano, Y. Shindo, F. Narita // *Compos Sci Technol.* – 2005. – Vol. 65. – P. 1691–1702.
2. Tabiei A., Ivanov I. Materially and geometrically non-linear woven composite micro-mechanical model with failure for finite element simulations // *Int. J. NonLinear Mech.* – 2004. – Vol. 39. – P. 175–188.
3. A micromechanics model for 3D elasticity and failure of woven-fibre composite materials / D. Scida, Z. Aboura, M.L. Benzeggagh, E. Bocherens // *Compos. Sci. Technol.* – 1999. – Vol. 59. – P. 505–17.
4. Zhao LG, Warriar NA, Long AC. Finite element modelling of damage propagation in non-crimp fabric reinforced composites // *Compos. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 66. – P. 36–50.
5. Blacketter D.M., Walrath D.E., Hansen A.C. Modeling damage in a plain weave fabric-reinforced composite material // *J. Compos. Technol. Res.* – 1993. – Vol. 15. – P. 136–142.
6. Nicoletto G, Riva E. Failure mechanisms in twill-weave laminates: FEM predictions vs. experiments // *Composites: Part A.* – 2004. – Vol. 35. – P. 787–795.
7. Hierarchical modelling of textile composite materials and structures by the homogenization method / N. Takano, Y. Uetsuji, Y. Kashiwagi, M. Zako // *Modell. Simulat. Mater. Sci. Eng.* – 1999. – Vol. 7. – P. 207–231.
8. Hoffman O. The brittle strength of orthotropic material // *J. Comp. Mater.* – 1967. – Vol. 1 (2). – P. 200–206.
9. Murakami S, Ohno N. A continuum theory of creep and creep damage. *Creep in struct.* – Springer-Verlag, 1981. – P. 422–443.
10. Murakami S. Mechanical modeling of material damage // *J. Appl. Mech.* – 1988. – Vol. 55. – P. 280.
11. Tang X, Whitcomb J. Progressive failure behaviours of 2D woven composites // *J. Comp. Mater.* – 2003. – Vol. 37 (14). – P. 1239–1259.
12. Zako M., Uetsuji Y., Kurashiki T. Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials // *Comp. Sci Technol.* – 2003. – Vol. 63 (3–4). – P. 507–516.
13. Damage initiation and development in triaxial braid and fine structure of damage / D. Ivanov, S.V. Lomov, I. Verpoest, F. Baudry, H. Xie // *Proceedings of 12th European conf. on composite materials.* – France, Biarritz, 2006, Aug. 29–Sept. 1, CD-edition [N160].

14. Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I. Meso-FE modelling of 3-axial braided composites // Proceedings of 8th international conference on textile composites. – Nottingham, 2006, October. – P. 16–18.
15. Zhao LG, Warriar NA, Long AC. Finite element modelling of damage propagation in non-crimp fabric reinforced composites // *Compos. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 66. – P. 36–50.
16. Цепенников М.В., Повышев И.А., Сметанников О.Ю. Численная модель разрушения конструкций из тканых композиционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная математика и механика. – 2012. – № 10. – С. 225.
17. Цепенников М.В., Сметанников О.Ю., Повышев И.А. Идентификация параметров численной методики расчета разрушения конструкций из композиционных материалов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 2. – С. 46–53.
18. Цепенников М.В., Сметанников О.Ю., Повышев И.А. Численная модель разрушения конструкций из тканых перфорированных композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – № 3. – С. 389–402.
19. Chamis CC. Mechanics of composite materials: past, present, and future // *J. Compos. Technol. Res. ASTM.* – 1989. – Vol. 11. – P. 3–14.
20. Исследование механизмов разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии / А.И. Шилова, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов, Ю.Б. Лямин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 4. – С. 169–179.

## References

1. Takeda T., Takano S., Shindo Y., Narita F. Deformation and progressive failure behavior of woven-fabric-reinforced glass/epoxy composite laminates under tensile loading at cryogenic temperatures. *Compos Sci Technol.*, 2005, vol. 65, pp. 1691-1702.
2. Tabiei A, Ivanov I. Materially and geometrically non-linear woven composite micro-mechanical model with failure for finite element simulations. *Int. J. NonLinear Mech.*, 2004, vol. 39, pp. 175-188.
3. Scida D., Aboura Z., Benzeggagh M.L., Bocherens E. A micromechanics model for 3D elasticity and failure of woven-fibre composite materials. *Compos. Sci. Technol.*, 1999, vol. 59, pp. 505-517.
4. Zhao LG, Warriar NA, Long AC. Finite element modelling of damage propagation in non-crimp fabric reinforced composites. *Compos. Sci. Technol.*, 2006, vol. 66, pp. 36-50.
5. Blackketter D.M., Walrath D.E., Hansen A.C. Modeling damage in a plain weave fabric-reinforced composite material. *J. Compos. Technol. Res.*, 1993, vol. 15, pp. 136-42.
6. Nicoletto G., Riva E. Failure mechanisms in twill-weave laminates: FEM predictions vs. experiments. *Composites: Part A*, 2004, vol. 35, pp. 787-795.
7. Takano N., Uetsuji Y., Kashiwagi Y., Zako M. Hierarchical modelling of textile composite materials and structures by the homogenization method. *Modell. Simulat. Mater. Sci. Eng.*, 1999, vol. 7, pp. 207-231.
8. Hoffman O. The brittle strength of orthotropic material. *J. Comp. Mater.* 1967, vol. 1 (2), pp. 200-206.
9. Murakami S., Ohno N. A continuum theory of creep and creep damage. Creep in struct. Springer-Verlag, 1981, pp. 422–443.
10. Murakami S. Mechanical modeling of material damage. *J. Appl. Mech.*, 1988, vol. 55, pp. 280.
11. Tang X, Whitcomb J. Progressive failure behaviours of 2D woven composites. *J. Comp. Mater.*, 2003, vol. 37 (14), pp. 1239-1259.
12. Zako M., Uetsuji Y., Kurashiki T. Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials. *Comp. Sci. Technol.*, 2003, vol. 63 (3-4), pp. 507-516.
13. Ivanov D., Lomov S.V., Verpoest I., Baudry F., Xie H. Damage initiation and development in triaxial braid and fine structure of damage. *Proceedings of 12th European conf. on composite materials*, Biarritz, France, Aug. 29–Sept. 1, 2006, CD-edition [N160].

14. Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I. Meso-FE modelling of 3-axial braided composites. *In: Proceedings of 8th international conference on textile composites*, Nottingham, 2006, October 16-18.

15. Zhao L.G., Warrier N.A., Long A.C. Finite element modelling of damage propagation in non-crimp fabric reinforced composites. *Compos. Sci. Technol.*, 2006, vol. 66, pp. 36-50.

16. Tsepennikov M.V., Povyshev I.A., Smetannikov O.Ju. Chislennaia model' razrusheniia konstruktsii iz tkanykh kompozitsionnykh materialov [Woven composite structures numerical failure model]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia matematika i mekhanika*, 2012, no. 10, pp. 225.

17. Tsepennikov M.V., Smetannikov O.Ju., Povyshev I.A. Identifikatsiia parametrov chislennoi metodiki rascheta razrusheniia konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [Parameters identification of composite materials numerical failure analysis method]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii*, 2015, no. 2, pp. 46-53.

18. Tsepennikov M.V., Povyshev I.A., Smetannikov O.Ju. Chislennaia model' razrusheniia konstruktsii iz tkanykh perforirovannykh kompozitsionnykh materialov [Perforated woven composite structures numerical failure model]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsii*, 2014, no. 3, pp. 389-402

19. Chamis CC. Mechanics of composite materials: past, present, and future. *J. Compos. Technol. Res. ASTM*, 1989, vol. 11, pp. 3-14.

20. Shilova A.I., Vil'deman V.Je., Lobanov D.S., Ljamin Ju.B., Carbon composite materials failure modes research by mechanical testing with specimen acoustic emission data registration. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2013, no. 4, pp. 169-179.