

УДК620.17: 621.785.784: 691.175
DOI 10.47367/0021-3497_2024_6_300

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ТРИАКСИАЛЬНОЙ ТКАНИ***

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF DIGITAL TWIN
OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON TRIAXIAL WOVEN FABRIC**

Н.В. ЕРЕМИН, С.А. ФЕСИК

N.V. EREMIN, S.A. FESIK

(Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева)

(Reshetnev Siberian State University of Science and Technology)

E-mail: kaizoku813@gmail.com

В работе представлена разработка и исследование цифрового двойника композиционного материала на основе триаксиальной ткани с использованием многомасштабного подхода в программном комплексе ANSYS. Композиционный материал состоит из углеродной триаксиальной ткани, пропитанной высокотемпературной эпоксидной смолой. Разработка цифрового двойника базируется на использовании многоуровневого подхода по принципу структура-свойство. Этот подход предполагает непрерывную связь на микро-, мезо- и макроуровнях, что способствует более точному прогнозированию поведения материала под воздействием внешних нагрузок. В работе представлена блок-схема многоуровневого подхода к созданию цифрового двойника композиционного материала. Разработаны параметрические цифровые микро- и мезомодели материала для оценки механического поведения и прогнозирования механических характеристик материала. Проведены виртуальные испытания углеродной нити под различными видами нагрузок и определены эффективные механические свойства материала. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния композиционного материала на основе триаксиальной ткани под воздействием растягивающих нагрузок. Сравнительный анализ между экспериментальными данными и виртуальными испытаниями указывает на качественное и количественное соответствие. Разработанный цифровой двойник композиционного мате-

*Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства "Приоритет-2030" СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

риала позволяет проводить виртуальные испытания материала, что значительно снижает время на разработку принципиально новых решений без привлечения трудоемких экспериментальных исследований при создании высокоэффективных и экономически выгодных изделий.

The article presents the development and study of a digital twin of a composite material based on triaxial woven fabric using a multiscale approach in the ANSYS software package. The composite material consists of carbon triaxial woven fabric impregnated with high-temperature epoxy resin. The development of the digital twin is based on the use of a multi-level approach based on the structure-property principle. This approach involves continuous communication at the micro, meso and macro levels, which facilitates more accurate prediction of the material's behavior under the influence of external loads. The article presents a flowchart of a multi-level approach to create a digital twin of a composite material. Parametric digital micro- and mesomodels of the material to assess the mechanical behavior and predict the mechanical characteristics of the material have been developed. Virtual tests of carbon yarn under various types of loads have been conducted and effective mechanical properties of the material have been determined. An analysis of the stress-strain state of a composite material based on triaxial woven fabric under tensile loads has been carried out. A comparative analysis between experimental data and virtual tests indicates qualitative and quantitative compliance. The developed digital twin of the composite material allows for virtual testing of the material, which significantly reduces the time required to develop fundamentally new solutions without the need for labor-intensive experimental research when creating highly efficient and cost-effective products.

Ключевые слова: триаксиальная ткань, композиционный материал, цифровой двойник, цифровые модели, многоуровневый подход, виртуальные испытания, валидация.

Keywords: triaxial woven fabric, composite material, digital twin, digital models, multilevel approach, virtual tests, validation.

Введение

Возможность создания конструкций минимального веса с высокими физико-механическими свойствами из композиционных материалов (КМ) обуславливает их широкое применение при изготовлении различных элементов машиностроительной, авиационной и космической техники. КМ на основе триаксиальных тканей (ТТ) обладают квазиизотропными механическими характеристиками, что объясняется отличительной архитектурной конфигурацией, образованной непрерывно переплетающимися полосами нитей, расположенных в главных направлениях 0 и $\pm 60^\circ$. При такой трехосной схеме армирования материал является сбалансированным и симметричным. Это

условие позволяет избежать нежелательных эффектов, связанных с несбалансированными нагрузками в плоскости при внешних воздействиях [1...4]. Таким образом, ТТ обладают хорошей прочностью при растяжении, ударных нагрузках, а также высокой гибкостью при отсутствии межслоевых проблем [5...7].

КМ на основе ТТ используются в качестве материала при изготовлении гибких аэрокосмических конструкций [8, 9], таких как отражатели космической антенны (рис. 1, а), разворачиваемые композитные стрелы (рис. 1, б), космические мачты, крылья беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и т. д.

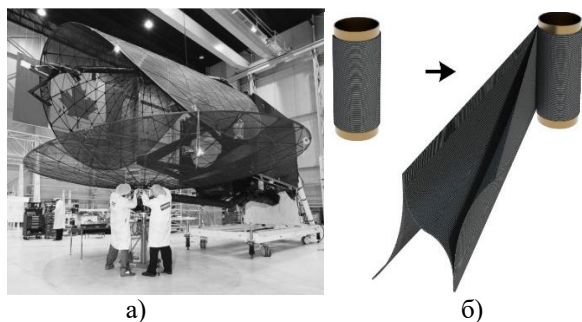


Рис. 1

В связи с переходом Российской Федерации к четвертой промышленной революции возникает потребность в разработке цифровых двойников (ЦД) различных материалов, изделий, процессов и т. д. Использование ЦД КМ позволяет получать большой объем данных об исследуемом или разрабатываемом материале для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик.

Авторами в работах [10, 11] утверждается, что композиционный материал (КМ) можно рассматривать как очень сложную многомасштабную физическую систему, а реакции на внешние воздействия могут быть соответствующим образом отражены в ЦД. В статье [11] описываются основополагающие концепции, необходимые для формирования ЦД материала. ЦД материала должен представлять эволюцию структуры, процесса и характеристик материала с течением времени как в отношении истории процесса, так и в условиях эксплуатации.

Исследованию характеристик КМ в процессе изготовления в автоклаве с использованием технологии ЦД посвящена работа [12]. Для этого были разработаны цифровые модели (ЦМ), позволяющие с доста-

точной точностью моделировать процесс отверждения КМ в автоклаве и определять поля распределения температуры и давления. Сравнение виртуальных полигонных и натуральных испытаний показало удовлетворительное соответствие. Исследователями в [13] разработан ЦД для моделирования выкладки слоев вязкоупругого КМ с последующим определением его эффективных физико-механических характеристик. Заблалом С. и др. [14] разработана методика объединения данных, получаемых из датчиков на платформу ЦД по определению запаса прочности изделия. Методика продемонстрирована на примере автоматизированной сухой выкладки КМ на основе углеродных волокон в процессе изготовления секции нижней обшивки крыла самолета.

Обзор существующих исследований подчеркивает важность разработки ЦД КМ. При этом наблюдается недостаточное количество исследований КМ на основе ТТ. В связи с этим целью настоящей работы являлась разработка и исследование ЦД КМ на основе ТТ под воздействием механических нагрузок с использованием многоуровневого подхода.

Объект исследования

Объектом исследования являлся КМ на основе ТТ и высокотемпературного связующего Т67. Для обеспечения высоких показателей жесткости и прочности ТТ используется отечественная углеродная волокнистая нить УМТ35-1К-ЕР (1000 волокон) (производство ЮМАТЕКС Росатом, РФ). Физико-механические свойства структурных материалов КМ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика	Волокнистая нить УМТ35-1К-ЕР	Эпоксидное связующее Т67
Плотность, г/см ³	1,8	1,138
Продольный модуль упругости E ₁ , ГПа	260	3,4
Поперечный модуль упругости E ₂ , ГПа	23	3,4
Коэффициент Пуассона ν ₁₂	0,2	0,35
Коэффициент Пуассона ν ₂₁	0,4	0,35
Модуль сдвига G ₁₂ , ГПа	9	1,4
Модуль сдвига G ₂₁ , ГПа	9	1,4
Предел прочности при растяжении X _t , ГПа	4,5	0,086
Предел прочности при сжатии X _c , ГПа	2,25	0,2
Относительное удлинение при разрыве ψ, %	1,5	3,7

При изготовлении ТТ образуется открытое стабильное гексагональное отверстие, где основа переплетена между собой под углами, а уток расположен перпендикулярно основе. На рис. 2 представлена схема элементарной ячейки ТТ.

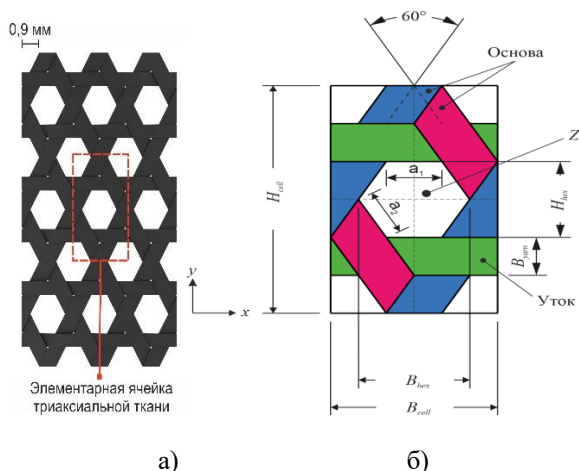


Рис. 2

Размер и форма отверстий в ТТ напрямую влияют на механические и эксплуатационные характеристики материала. Форма и размер гексагонального отверстия ТТ определяются углом между нитями основы и утка φ , а также шириной нити b . Длина сторон шестиугольника a_1 и a_2 может быть выражена через θ и b :

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2b}{\tan \varphi}, \\ a_2 &= \frac{b}{\sin 2\varphi}. \end{aligned} \quad (1)$$

Значения прямых линий a_1 и a_2 полностью совпадают, когда $\varphi = 60^\circ$, при этом форма отверстия представляет собой правильный шестиугольник, который не зависит от ширины нитей b . Площадь гексагонального отверстия Z в ТТ может быть выражена следующим уравнением:

$$Z = \frac{2b^2}{\sin \varphi} + \frac{b^2}{\sin 2\varphi}. \quad (2)$$

Площадь элементарной ячейки Z_a и полость η можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_a &= \left[\frac{2b}{\tan \varphi} + \frac{2b}{\sin \varphi} \right] \cdot [4a_2 \sin \varphi + 2b], \\ \eta &= \frac{2Z}{Z_a} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (3)$$

Гексагональные отверстия способствуют легкости материала и составляют около половины от объема материала. Данная особенность должна быть учтена при прогнозировании механического поведения материала под воздействием внешних нагрузок. Геометрические характеристики исследуемой элементарной ячейки ТТ: высота ячейки $H_{\text{cell}} = 4,87$ мм; ширина ячейки $B_{\text{cell}} = 4,87$ мм; угол армирования $\varphi = 45^\circ$; ширина нити $b_{\text{yarn}} = 0,9$ мм; толщина нити $t_{\text{yarn}} = 0,07$ мм.

Структура многоуровневого подхода к созданию цифрового двойника

Существующие ЦД [12...14] не решают в должной мере проблему сбора и хранения данных КМ, возникающих на различных масштабных уровнях деформирования. Успешное развитие и совершенствование ЦД за счет интеграции информации о материале на основных масштабных уровнях деформирования в комплексном виде может обеспечить целостную разработку и сопровождение материала с последующим улучшением его эксплуатационных характеристик. КМ на основе ТТ при воздействии внешних нагрузок демонстрируют классические характеристики иерархической структуры и включают в себя сложные многомасштабные процессы. Эксплуатационные характеристики материала контролируются широким спектром явлений, происходящих на различных масштабных уровнях деформирования. В связи с этим предложен многомасштабный подход к созданию ЦД КМ на основе ТТ (рис. 3). Этот подход предполагает непрерывную связь на микро-, мезо- и макроуровнях, что способствует более точному прогнозированию поведения материала под воздействием внешних нагрузок. В свою очередь, это позволит разработать и оптимизировать материал под конкретные технические задачи в различных условиях эксплуатации.

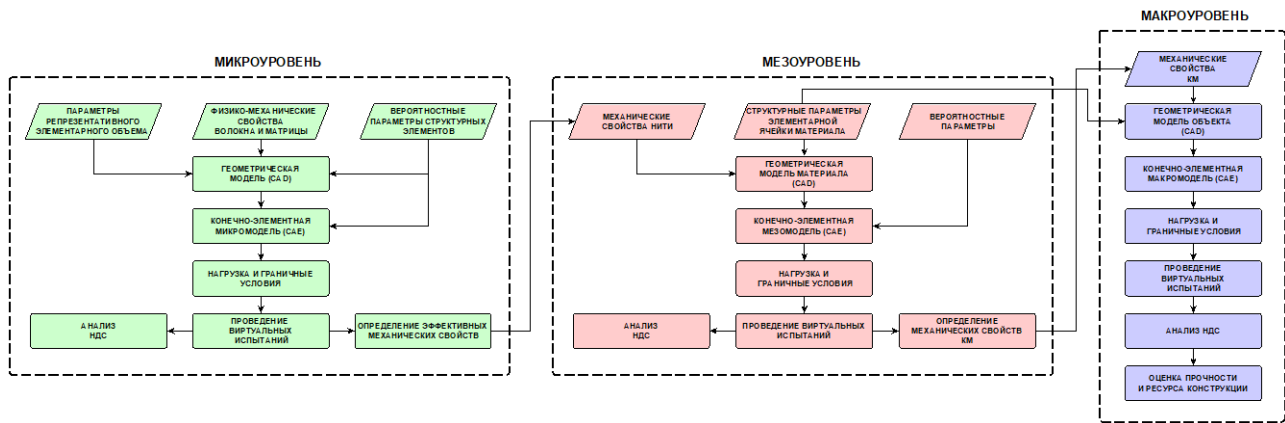


Рис. 3

Согласно блок-схеме (рис. 3) КМ на основе ТТ можно разделить на три основных масштабных уровня деформирования:

- Микроуровень, размерность $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ м. На данном масштабном уровне рассматривается пропитанная связующим нить, которая состоит из множества волокон. Проведение виртуальных испытаний материала позволит определить основные механические свойства при различных видах нагрузок. После проведения гомогенизации полученные данные могут быть перенесены с микроуровня на мезоуровень.

- Мезоуровень, $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ м. На данном масштабном уровне рассматривается элементарная ячейка КМ на основе ТТ с учетом всех геометрических особенностей. Проводятся виртуальные испытания для определения зависимости напряжений от деформации КМ при воздействии различного уровня нагрузки с целью получения качественных и количественных характеристик, оптимизации материала под конкретные условия эксплуатации конструкции.

- Макроуровень, $\sim 1 \cdot 10^1$ м. На данном масштабном уровне рассматривается конструкция, изготовленная из КМ на основе ТТ. Макромасштабный анализ позволяет оценить прочность, ресурс и надежность конструкции с учетом конструктивно-технологических особенностей материала.

Перечисленные масштабные уровни и соответствующие им модели должны иметь возможность параметризации и обеспечивать передачу данных материала от одной модели (масштабного уровня деформирования) к другой.

Разработка цифровых моделей прогнозирования механического поведения композиционного материала

В настоящих исследованиях многоуровневые цифровые модели разработаны в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS. Связь между напряжениями и деформациями определялась следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; C_{ij} – компоненты матрицы жесткости.

Компоненты матрицы жесткости $[C]_k$ связаны следующим образом:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_{22}E_{33}\Delta}, & C_{12} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_{22}E_{33}\Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_{11}E_{33}\Delta}, \\ C_{13} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_{22}E_{33}\Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_{11}E_{22}\Delta}, & C_{22} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_{11}E_{33}\Delta}, \\ C_{23} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_{11}E_{33}\Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_{11}E_{22}\Delta}, & C_{33} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_{11}E_{22}\Delta}, \\ C_{44} &= 2G_{23}, & C_{55}^k &= 2G_{31}, & C_{66}^k &= 2G_{12}, \\ \Delta &= (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}) / E_{11}E_{22}E_{33}, \end{aligned} \quad (5)$$

где E_{ij} , G_{ij} , ν_{ij} – ортотропные механические свойства.

Матрица жесткости должна быть преобразована с учетом волнистости нити для моделирования локальной жесткости, учитывающей направление нити по отношению к системе координат конечного элемента:

$$[\bar{C}] = [T]^{-1} [C] [T]^T, \quad (6)$$

где $[T]$ – матрица преобразования.

Инженерные константы ортотропного материала могут быть рассчитаны путем инвертирования матрицы жесткости:

$$[\bar{C}]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{12}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{13}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{21}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{31}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{32}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

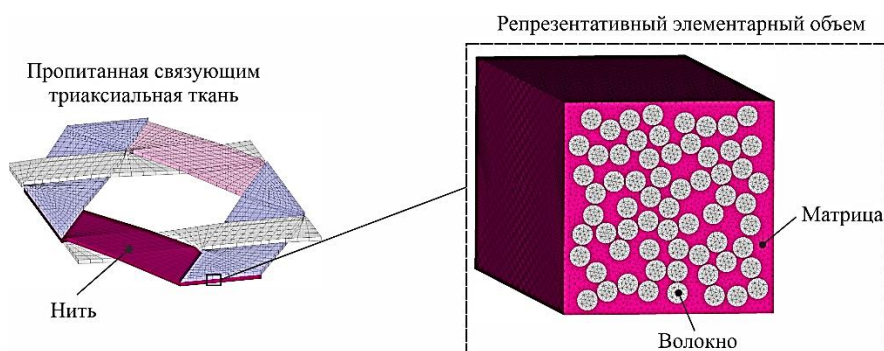


Рис. 4

Поскольку КМ характеризуется выраженной структурно-механической неоднородностью на микроуровне, то основной особенностью модели является случайное распределение положения волокон в репрезентативном элементарном объеме и случайное распределение их механических свойств. Это определяет необходимость многовариантного моделирования в вероятностной постановке, чтобы учесть вариативность и найти усредненные параметры нити. Для этого была разработана параметрическая конечно-элементная модель мик-

Цифровая микромодель

Согласно блок-схеме (рис. 3) первоначально моделируется механическое поведение репрезентативного элементарного объема углеродной нити на микроуровне. Из статьи [15] известно, что нить содержит большое количество волокон, а их распределение носит случайный характер. Эффективные механические свойства пропитанной волокнистой нити можно получить путем проведения микромасштабного анализа, предполагая, что пропитанная нить – это однонаправленный КМ. В связи с этим целесообразно рассматривать нить, которая представляет собой систему из волокон и матрицы в форме прямоугольного параллелепипеда (рис. 4). Объемная доля волокон в пропитанной углеродной нити составляет 52%. Диаметр волокон 7 мкм. Физико-механические свойства представлены в табл. 1.

роуровня со случайным распределением исходных данных [10].

Дискретизация конечно-элементной сетки выполнена 4-узловыми конечными элементами. Волокна жестко связаны с матрицей конформной конечно-элементной сеткой, которая включала в себя до 100000 конечных элементов. Оптимальный размер конечных элементов получен после анализа сходимости сетки, когда уровень напряжений при изменении сетки практически не изменялся.

Для волокна и матрицы задается изотропная модель деформирования. При моделировании учитывается разрушение как волокон, так и матрицы путем снижения жесткости конечных элементов по критерию прочности изотропного материала.

Разработанная модель позволяет проводить многократные виртуальные испытания при различных видах нагружения и строить соответствующие диаграммы деформирования материала. При обработке набора диаграмм определяются эффективные механические свойства нити. Полученные параметры являются исходными данными для модели на мезоуровне.

Цифровая мезомодель

Прогнозированию механического поведения под воздействием внешних нагрузок и механических свойств ТТ посвящены работы [16...18]. Однако разработка упрощенных моделей для экономии времени при вычислениях, которые способны дать высокую сходимость с экспериментальными данными, остается важной задачей,

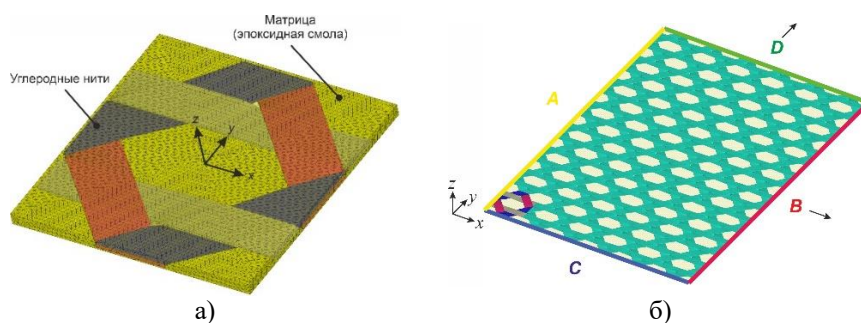


Рис. 5

Дискретизация конечно-элементной модели выполнена с помощью 8-узловых твердотельных конечных элементов с шестью степенями свободы в каждом узле (рис. 5, б). Нити и матрица имеют общие узлы и образуют конформную конечно-элементную сетку. Общее количество конечных элементов ячейки составило 15257 элементов и 29818 узлов. Для исследования процессов деформирования рассматривался образец КМ, состоящий из ячеек 6x8 представительного объема (рис. 5, б), что является достаточным согласно работе [19].

Схема нагружения образца КМ ТТ представлена на рис. 5, б. Рассматривалось два

особенно при создании ЦД. На основе полученных экспериментальных исследований и теоретических соотношений структуры ТТ (1-3) разработана параметрическая конечная-элементная модель для анализа НДС и разрушения материала.

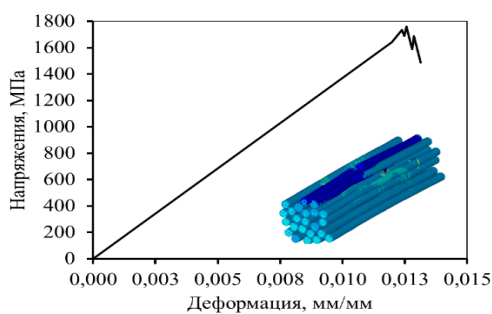
Модель позволяет варьировать следующие параметры: угол армирования основы, ширину и толщину нити, зазор между основой и утком (см. рис. 2). Первоначально строится гексагональное отверстие, затем с помощью вспомогательных инструментов определяется схема армирования в плоскости x и y , а также периметр элементарной ячейки. Далее с помощью инструментов выдавливания и булевых операций определяется объемная элементарная ячейка ТТ. Геометрическая модель нити представляется в виде отдельных простейших геометрических фигур, а ее направление (волнистость) описывается кусочно-линейной функцией (рис. 5, а). Матрица представляется в форме параллелепипеда.

граничных случая: растяжение вдоль оси x и вдоль оси y . При расчетном случае №1 перемещения для набора узлов A зафиксированы по всем степеням свободы, а для набора узлов B перемещения разрешены только по оси y . При расчетном случае №2 перемещения для набора узлов C зафиксированы по всем степеням свободы, а для набора узлов D перемещения разрешены только по оси y . Нагрузка задавалась в виде линейного перемещения для набора узлов B и D .

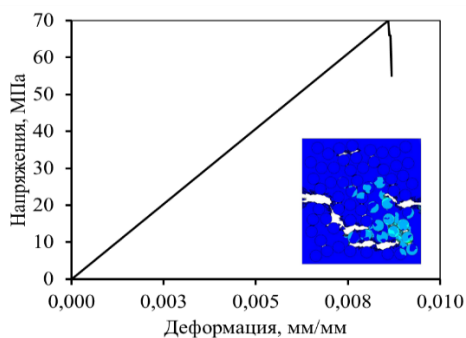
Результаты и их обсуждения

Первоначально были проведены виртуальные испытания пропитанной нити на микроуровне с целью определения эффек-

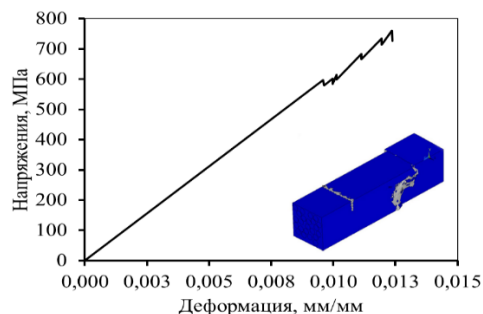
тивных механических свойств. На рис. 6 представлены диаграммы деформирования нити при растяжении (рис. 6, а) и сжатии



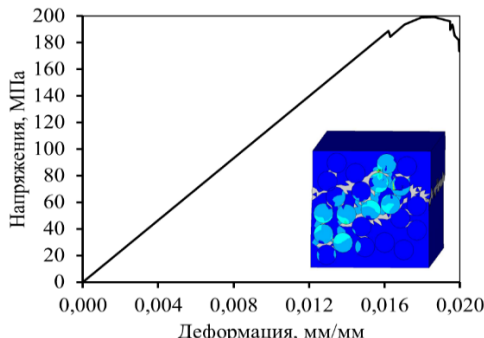
а)



в)



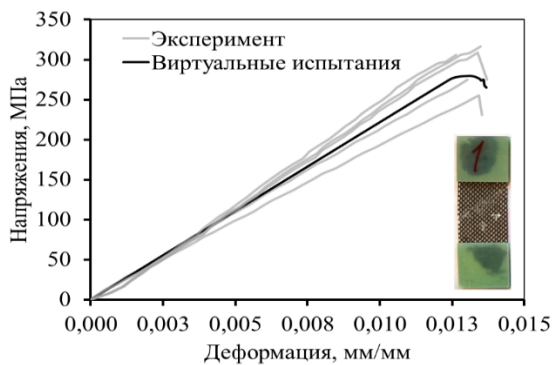
б)



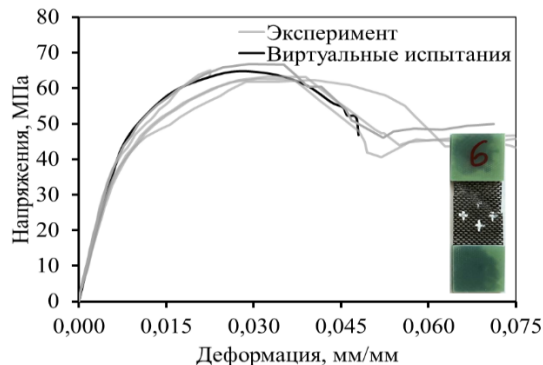
г)

Рис. 6

В результате определены эффективные механические свойства углеродной нити, пропитанной эпоксидным связующим: $E_1 = 136$ ГПа; $E_2 = 8,13$ ГПа; $\nu_{12} = 0,25$; $\nu_{23} = 0,45$; $G_{12} = 2,98$ ГПа; $X_t = 1,76$ ГПа; $X_c = -0,76$ ГПа; $Y_t = 0,07$ ГПа; $Y_c = -0,2$ ГПа; $S_l = 0,07$ ГПа. Полученные данные использованы в качестве начальных параметров при проведении виртуальных испытаний с соответствующей оценкой НДС КМ на мезоуровне.



а)



б)

Рис. 7

Для продольного нагружения характерно резкое разрушение материала при

(рис. 6, б) вдоль направления волокон; при растяжении (рис. 6, в) и сжатии (рис. 6, г) поперек направления волокон.

На рис. 7 представлены диаграммы деформирования моделирования КМ на мезоуровне и экспериментальных исследований при воздействии растягивающих нагрузок до разрушения. Экспериментальные исследования проводились на плоских образцах с размерами 30x100x0,23 мм на испытательной универсальной машине Tinius Olsen 100ST.

уровне деформаций более 1,4%. При поперечном нагружении характер деформирова-

ния материала имеет ярко выраженную нелинейность и сопровождается постепенным разрушением углеродных нитей. При достижении деформаций более 5% мате-

риал теряет несущую способность. После проведения виртуальных испытаний определены механические свойства КМ, которые представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Характеристика	E_1 , ГПа	E_2 , ГПа	ν_{12}	ν_{21}	X_{ts} , ГПа	Y_{ts} , ГПа
Эксперимент	22,29	6,55	0,59	0,56	0,28	0,064
Виртуальные испытания	22,06	6,33	0,6	0,55	0,29	0,065

Разница между экспериментальными и расчетными механическими свойствами составляет не более 3,4%, что указывает на качественное и количественное соответствие.

З а к л ю ч е н и е

Разработанный ЦД КМ на основе ТТ под воздействием механических нагрузок позволяет исследовать материал на различных масштабных уровнях для точного предсказания его механического поведения и проводить виртуальные испытания материала без привлечения ресурсоемких экспериментальных исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Al-Fasih M.Y.* Flexural behavior of sandwich beams with novel triaxially woven fabric composite skins // *Steel Compos. Struct.* 2020, 34. P. 299...308.
2. *Al-Fasih M.Y., Kueh A.B.H., Abo Sabah S.H., Yahya M.Y.* Tow waviness and anisotropy effects on Mode II fracture of triaxially woven composite // *Steel Compos. Struct.* 2018, 26. P. 241...253.
3. *Al-Fasih M.Y., Kueh A.B.H., Abo Sabah S.H., Yahya M.Y.* Influence of tows waviness and anisotropy on effective Mode I fracture toughness of triaxially woven fabric composites // *Eng. Fract. Mech.* 2017, 182. P. 521...536.
4. *Кожевникова Л.В., Карева Т.Ю., Кожевников С.О.* Сравнительное исследование физико-механических свойств триаксиальной ткани и ткани ортогонального строения полотняного переплетения // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности.* 2022. № 3 (399). С. 148...151.
5. *Kueh A.B.H.* Fitting-free hyperelastic strain energy formulation for triaxial weave fabric composites // *Mech. Mater.* 2012, 47. P. 11...23.
6. *Kueh A.B.H.* Size-influenced mechanical isotropy of singly-ply triaxially woven fabric composites // *Compos Part A Appl Sci Manuf.* 2014, 57. P. 76...87.
7. *Deng X., Xu Y., Clarke C.* Wrinkling modelling of space membranes subject to solar radiation pressure // *Compos. B Eng.* 2019, 157. P. 266...275.

8. *Eremin N.V., Shigin A.O., Sokolov Y.A.* Mechanical calculation of elastic folding of a thin-walled deployable composite boom for space applications // *Mechanics of Advanced Materials and Structures.* 2023. P. 1...11.
9. *Rao Y., Zhang Ch., Li W.* Structural Analysis for Triaxial Woven Fabric Composites of Carbon Fiber // *Composite Structures.* 2019, 219. P. 42...50.
10. *Eremin N.V., Moskvichev E.V.* Multilevel Model for Calculating the Strength and the Service Life of a Metal Composite Pressure Vessel // *Russian Metallurgy (Metally).* 2023. № 10. С. 1557...1564.
11. *Kalidindi S.R., Buzzy M., Boyce B.L., Dingreville R.* Digital Twins for Materials // *Sec. Computational Materials Science.* 2022, 9. P. 9:818535 – DOI: 10.3389/fmats.2022.818535.
12. *Wang Y., Tao F., Zuo Y. et al.* Digital-Twin-Enhanced Quality Prediction for the Composite Materials // *Engineering.* 2023, 22. P. 22...33.
13. *Chen Y.-W., Joseph R.J., Kanyuck A. et al.* A Digital Twin for Automated Layup of Prepreg Composite Sheets // *J. Manuf. Sci. Eng. Apr.* 2022, 144(4). P. 1...12.
14. *Zambal S., Eitzinger Ch., Clarke M. et al.* A digital twin for composite parts manufacturing: Effects of defects analysis based on manufacturing data // 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). 2018. P. 803...808.
15. *Fang G., Liang J., Lu Q.* Investigation on the compressive properties of the three dimensional four-directional braided composites // *Compos. Struct.* 2011, 93(2). P. 392...405.
16. *Zhou X., Ma X., Fan Y., Li H.* Tensile and bending behavior of thin-walled triaxial weave fabric composites // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics.* 2019, 14. P. 1...10.
17. *Zhou H., Xiao X., Qian K.* Investigations of bursting performance of triaxial woven fabric from numerical simulation and experimental tests // *Materials Research Express.* 2019, 6(11). P. 1...14.
18. *Wang Z., Bai J., Sobey A. et al.* Optimal design of triaxial weave fabric composites under tension // *Composite Structures.* 2018, 1. P. 616...624.
19. *Zhao Q., Hoa S.V., Ouellette P.* Triaxial Woven Fabric (TWF) Composites with Open Holes (Part II): Verification of the Finite Element Models // *Journal of Composite Materials.* 2003, 37(10). P. 849...873.

REFERENCES

1. *Al-Fasih M.Y.* Flexural behavior of sandwich beams with novel triaxially woven fabric composite skins // *Steel Compos. Struct.* 2020, 34. P. 299...308.
2. *Al-Fasih M.Y., Kueh A.B.H., Abo Sabah S.H., Yahya M.Y.* Tow waviness and anisotropy effects on Mode II fracture of triaxially woven composite // *Steel Compos. Struct.* 2018, 26. P. 241...253.
3. *Al-Fasih M.Y., Kueh A.B.H., Abo Sabah S.H., Yahya M.Y.* Influence of tows waviness and anisotropy on effective Mode I fracture toughness of triaxially woven fabric composites // *Eng. Fract. Mech.* 2017, 182. P. 521...536.
4. *Kozhevnikova L.V., Kareva T.Yu., Kozhevnikov S.O.* Comparative study of physical and mechanical properties of triaxial fabric and fabric with plain weave orthogonal structure // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2022, 3(399). P. 148...151.
5. *Kueh A.B.H.* Fitting-free hyperelastic strain energy formulation for triaxial weave fabric composites // *Mech. Mater.* 2012, 47. P. 11...23.
6. *Kueh A.B.H.* Size-influenced mechanical isotropy of singly-ply triaxially woven fabric composites // *Compos Part A Appl Sci Manuf.* 2014, 57. P. 76...87.
7. *Deng X., Xu Y., Clarke C.* Wrinkling modelling of space membranes subject to solar radiation pressure // *Compos. B Eng.* 2019, 157. P. 266...275.
8. *Eremin N.V., Shigin A.O., Sokolov Y.A.* Mechanical calculation of elastic folding of a thin-walled deployable composite boom for space applications // *Mechanics of Advanced Materials and Structures.* 2023. P. 1...11.
9. *Rao Y., Zhang Ch., Li W.* Structural Analysis for Triaxial Woven Fabric Composites of Carbon Fiber // *Composite Structures.* 2019, 219. P. 42...50.
10. *Eremin N.V., Moskvichev E.V.* Multilevel Model for Calculating the Strength and the Service Life of a Metal Composite Pressure Vessel // *Russian Metallurgy (Metally).* 2023. № 10. C. 1557...1564.
11. *Kalidindi S.R., Buzzy M., Boyce B.L., Dingreville R.* Digital Twins for Materials // *Sec. Computational Materials Science.* 2022, 9. P. 9:818535 – DOI: 10.3389/fmats.2022.818535.
12. *Wang Y., Tao F., Zuo Y. et al.* Digital-Twin-Enhanced Quality Prediction for the Composite Materials // *Engineering.* 2023, 22. P. 22...33.
13. *Chen Y.-W., Joseph R.J., Kanyuck A. et al.* A Digital Twin for Automated Layup of Prepreg Composite Sheets // *J. Manuf. Sci. Eng. Apr.* 2022, 144(4). P. 1...12.
14. *Zambal S., Eitzinger Ch., Clarke M. et al.* A digital twin for composite parts manufacturing: Effects of defects analysis based on manufacturing data // 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). 2018. P. 803...808.
15. *Fang G., Liang J., Lu Q.* Investigation on the compressive properties of the three dimensional four-directional braided composites // *Compos. Struct.* 2011, 93(2). P. 392...405.
16. *Zhou X., Ma X., Fan Y., Li H.* Tensile and bending behavior of thin-walled triaxial weave fabric composites // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics.* 2019, 14. P. 1...10.
17. *Zhou H., Xiao X., Qian K.* Investigations of bursting performance of triaxial woven fabric from numerical simulation and experimental tests // *Materials Research Express.* 2019, 6(11). P. 1...14.
18. *Wang Z., Bai J., Sobey A. et al.* Optimal design of triaxial weave fabric composites under tension // *Composite Structures.* 2018, 1. P. 616...624.
19. *Zhao Q., Hoa S.V., Ouellette P.* Triaxial Woven Fabric (TWF) Composites with Open Holes (Part II): Verification of the Finite Element Models // *Journal of Composite Materials.* 2003, 37(10). P. 849...873.

Рекомендована заседанием научной лаборатории «Системная инженерия и цифровизация» СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Поступила 26.09.24.