ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 620.17: 621.785.784: 691.175
https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.491-506

Многоуровневое компьютерное моделирование механических свойств полимерных композиционных материалов

Н.В. Еремин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

kaizoku813@gmail.com

Аннотация

В работе представлены результаты многоуровневого моделирования полимерных композиционных материалов (ПКМ). Показано, что их механические характеристики формируются за счет совокупного вклада микроструктурных, мезоструктурных и макроскопических процессов деформирования. Предложен многомасштабный подход к построению цифровых моделей с учетом структурно-механических особенностей материала. В рамках данного подхода разработаны: микромодель углеродной нити, мезомодель ПКМ на основе триаксиальной ткани и макромодель рефлектора, что обеспечило прогнозирование напряженно-деформированного состояния на различных масштабных уровнях. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния материала и проанализированы процессы его разрушения. Построены диаграммы деформирования и определены эффективные механические свойства ПКМ. Полученные модели обеспечивают возможность проведения виртуальных испытаний без привлечения ресурсоемких экспериментов и могут быть использованы для разработки, адаптации и оптимизации ПКМ под конкретные инженерные задачи.

Ключевые слова: композиционный материал, цифровая модель, механическое свойство, многоуровневое моделирование, виртуальные испытания

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме FEFE-2024-0027.

Для цитирования: *Еремин Н.В.* Многоуровневое компьютерное моделирование механических свойств полимерных композиционных материалов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2025. Т. 167, кн. 3. С. 491–506. https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.491-506.

ORIGINAL ARTICLE
https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.491-506

Multiscale computational modeling of mechanical properties of polymer composite materials

N.V. Eremin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

kaizoku813@gmail.com

Abstract

This article reports the results of a multiscale modeling of polymer composite materials (PCMs). It was demonstrated that their mechanical characteristics are determined by the combined contribution of micro-, meso-, and macroscopic strain processes. A multiscale approach to building digital models that account for the structural and mechanical characteristics of the material was introduced and subsequently applied in order to develop a micro-model of a carbon yarn, a meso-model of a PCM based on triaxial woven fabric, and a macro-model of a reflector, enabling prediction of the stress-strain state across different scales. The stress-strain state of the material was evaluated, and the processes of its fracture were analyzed. The stress-strain diagrams were constructed, and the effective mechanical properties of the PCM were identified. The models obtained make it possible to perform virtual tests without resource-intensive experiments and can be employed in the design, adaptation, and optimization of PCMs for solving specific engineering tasks.

Keywords: composite material, digital model, mechanical property, multiscale modeling, virtual testing

Acknowledgments. This study was carried out as part of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FEFE-2024-0027).

For citation: Eremin N.V. Multiscale computational modeling of mechanical properties of polymer composite materials. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2025, vol. 167, no. 3, pp. 491–506. https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.491-506.
(In Russian)

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в последние десятилетия заняли ключевое место в авиационной, космической, транспортной и других высокотехнологичных отраслях. Их востребованность обусловлена высокой удельной прочностью и жесткостью, а также возможностью целенаправленного варьирования эксплуатационных характеристик в зависимости от требований инженерных задач [1]. В аэрокосмической технике ПКМ

применяются при создании гибких трансформируемых систем – отражающих поверхностей рефлекторов, развертываемых композитных стрел, мачт, а также в конструкциях беспилотных летательных аппаратов. Для подобных изделий характерны повышенные требования к прочности, жесткости и сохранению эксплуатационных свойств в суровых условиях эксплуатации.

Сложная многоуровневая структура ПКМ (рис. 1) формирует целый спектр проблем, связанных с их прочностью, долговечностью и прогнозированием эксплуатационных характеристик. В ряде исследований [2–4] отмечается, что такие материалы необходимо рассматривать как многомасштабные физические системы, поведение которых определяется совокупностью процессов на микро-, мезо- и макроуровнях деформирования. Традиционные подходы, как правило, ограничиваются моделированием на одном масштабном уровне деформирования без учета взаимосвязи с последующими, что не позволяет получить целостное представление о механическом поведении материала. Проведение же комплексных натурных испытаний требует значительных финансовых и временных затрат. В связи с этим использование цифровых двойников (ЦД) и цифровых моделей (ЦМ) становится приоритетным направлением, так как они позволяют интегрировать данные и модели разных масштабных уровней, обеспечивая сокращение затрат на испытания и ускорение разработки конкурентоспособных изделий.

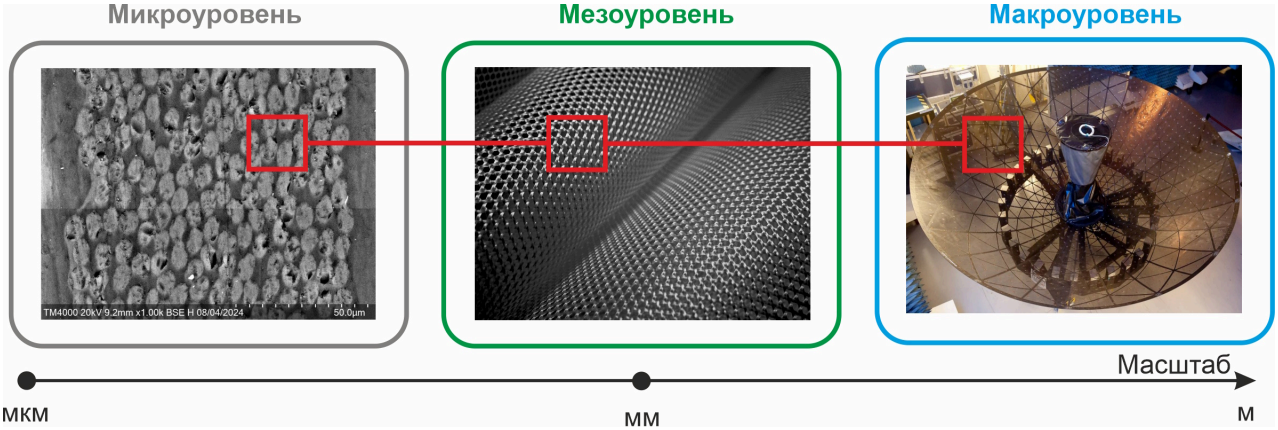

Рис. 1. Многоуровневая структура ПКМ
Fig. 1. Multiscale structure of PCMs

Современные тенденции развития материаловедения и проектирования все в большей степени опираются на цифровизацию [5]. ЦД объединяет экспериментальные данные, численные модели и алгоритмы анализа, позволяя прогнозировать механическое поведение материала под воздействием нагрузок и оптимизировать его физико-механические свойства. Принципы построения ЦД материалов рассмотрены в работе [2], где отмечается важность описания эволюции структуры, процессов и свойств ПКМ на этапах производства и эксплуатации.

Авторами работы [6, 7] предложена многомасштабная модель электромеханического поведения ПКМ на основе углеродных нанотрубок в полимерной матрице с учетом модели непрерывного прогрессирующего повреждения (англ. CDM) и межфазного отслоения. На атомном уровне методом молекулярной динамики определены механические свойства

полимеров и характеристики интерфейса, которые затем были масштабированы через репрезентативный элементарный объем (РЭО, англ. RVE). В исследовании [8] реализован метод FE^2 для анализа ПКМ с порами, где микро- и макромасштабы связаны через РЭО. Существенный вклад в развитие теории внес Димитриенко и соавт. [9, 10], развивая концепцию асимптотической гомогенизации для композитов с многоуровневой структурой. Показано, что данный подход позволяет описывать эволюцию от микродефектов в матрице до мезо- и макроразрушения, а также корректно рассчитывать эффективные характеристики ПКМ. Отдельное направление связано с моделированием процессов изготовления [3, 11, 12]. Так, в [11] представлен ЦД для автоматизированной выкладки слоев вязкоупругого препрега, что позволило проследить формирование структуры материала и рассчитать его эффективные свойства уже на стадии производства.

В работе [13] предложена многомасштабная модель термопластичных тканых ПКМ. На микроуровне детально смоделирована матрица, волокна и интерфейс, что позволило построить различные типы РЭО и предсказать поведение нити при растяжении, сжатии и сдвиге. Полученные данные были интегрированы на мезоуровень, где учтено нелинейное поведение материала. Хофер [14] исследовал вязкоупругое поведение плетеных ПКМ с использованием дробной модели Зенера и расширенной модели Ломница; проведенная валидация показала высокую сходимость с экспериментальными данными и позволила выявить влияние угла плетения и геометрии нити на долговечность конструкции. В исследовании [15] реализован метод прогрессирующего повреждения для композитных баков высокого давления с применением критерия Пака. Сравнение с данными акустической эмиссии показало расхождение не более 5,4 %, что согласуется с результатами работ [16].

Обзор существующих исследований указывает на то, что ключевым направлением современного материаловедения является разработка многоуровневых ЦМ и ЦД, учитывающих иерархическую структуру ПКМ и множество входных параметров материала. В связи с этим цель настоящей работы – развитие многоуровневого подхода и построение ЦМ, обеспечивающих комплексное описание НДС и прогнозирование механических свойств ПКМ.

1. Объект исследования

Объектом исследования являлся ПКМ на основе триаксиальной ткани (ТТ) и высокотемпературной эпоксидной смолы. Типовая схема плетения материала представлена на рис. 2. Для обеспечения высоких показателей прочности и жесткости используется углеродная нить: $E_1 = 260$ ГПа; $E_2 = 23$ ГПа; $v_{12} = 0.2$; $v_{23} = 0.4$; $G_{12} = 9$; $G_{23} = 9$; $X_t = 4.5$ ГПа; $X_c = 2.25$ ГПа. В качестве связующего используется высокотемпературная эпоксидная смола: $E = 3.4$ ГПа; $v = 0.35$; $G = 1.4$; $X_t = 0.086$ ГПа; $X_c = 0.2$.

В процессе плетения структура ткани формируется в виде регулярной гексагональной ячейки. Продольные нити (основа) располагаются под заданными углами переплетения, а поперечные нити (уток) ориентированы перпендикулярно к основе. Геометрические характеристики исследуемой элементарной ячейки ТТ: высота ячейки $H_{cell} = 4.87$ мм; ширина ячейки $B_{cell} = 4.87$ мм; угол армирования $\varphi = 45°$; ширина нити $b_{yarn} = 0.9$ мм; толщина нити $t_{yarn} = 0.07$ мм.

2. Цифровое многоуровневое моделирование

2.1. Структурная схема многоуровневого подхода. Механические свойства ПКМ формируются за счет совокупного вклада микроструктурных, мезоструктурных и макроскопических процессов, возникающих в процессе деформирования материала. В связи с этим разработан многомасштабный подход к построению цифровых моделей ПКМ с учетом структурно-механических особенностей материала (рис. 3).

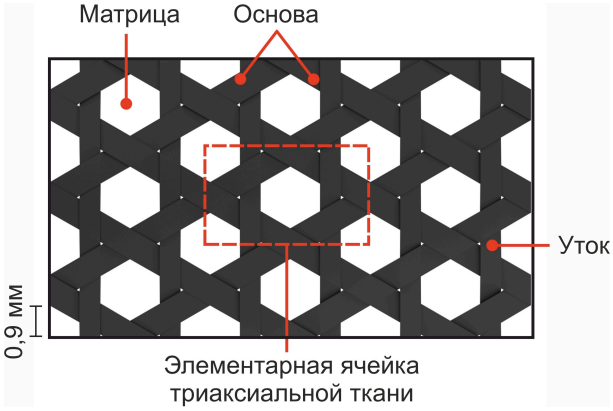

Рис. 2. ПКМ на основе ТТ
Fig. 2. PCM based on TWF

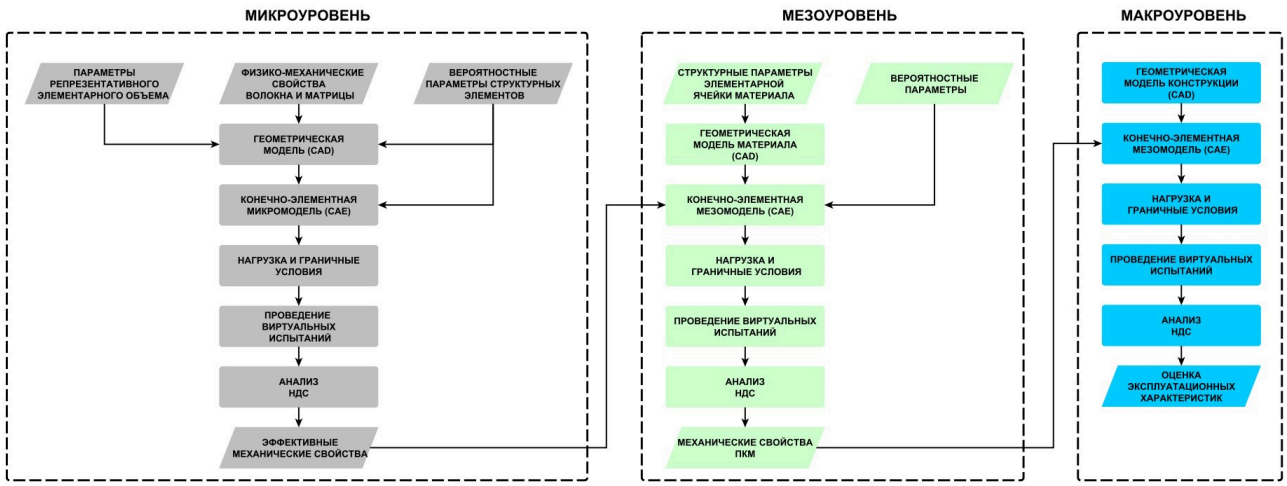

Рис. 3. Структурная схема многоуровневого подхода
Fig. 3. Structural diagram of the multiscale approach

Первоначально моделируется механическое поведение углеродной нити при растяжении и сжатии в различных направлениях. Далее проводится процесс гомогенизации [17], результаты которого переносятся на мезоуровень, где рассматривается ТТ в составе ПКМ. На этом уровне выполняются виртуальные испытания для оценки качественных и количественных характеристик материала при различных режимах нагружения. Заключительный этап связан с макромоделированием конструкции, изготовленной из ПКМ на основе ТТ. Макромасштабный анализ позволяет оценить механическое поведение рассматриваемой конструкции с учетом конструктивно-технологических особенностей ПКМ.

Многоуровневые ЦМ разработаны в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS. Механические свойства ПКМ можно представить трехмерными уравнениями состояния, матричная форма которых имеет следующий вид:

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

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

Для учета волнистости нити и соответствующей локальной жесткости матрица жесткости преобразуется следующим образом:

$$[\bar{C}] = [T]^{-1}[C][T]^{\mathrm{T}},$$

где $[T]$ – матрица преобразований.

Инженерные константы ПКМ определяются через компоненты матрицы податливости S_{ij} по следующим соотношениям:

$$E_{11} = \frac{1}{S_{11}}, \qquad E_{22} = \frac{1}{S_{22}}, \qquad E_{33} = \frac{1}{S_{33}},$$
$$G_{12} = \frac{1}{S_{66}}, \qquad G_{23} = \frac{1}{S_{44}}, \qquad G_{31} = \frac{1}{S_{55}},$$
$$\nu_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11}}, \qquad \nu_{23} = -\frac{S_{23}}{S_{22}}, \qquad \nu_{31} = -\frac{S_{13}}{S_{33}}.$$

Важно отметить, что перечисленные масштабные уровни и соответствующие им ЦМ имеют возможность параметризации и обеспечивают непрерывную передачу данных о материале от одной модели (масштабного уровня деформирования) к другой.

2.2. Цифровая микромодель углеродной нити. Согласно блок-схеме на рис. 3 первоначально моделируется механическое поведение РЭО углеродной нити. Исходя из проведенного анализа микроструктуры [4], углеродная нить представляет собой совокупность большого числа волокон, распределенных в матрице случайным образом. Различие механических свойств волокон и матрицы, а также влияние объемного содержания волокон обусловливают необходимость в получении эффективных механических свойств отдельной нити.

Будем считать, что комплексная нить, пропитанная эпоксидной смолой, представляет собой трансверсально-изотропный материал с плоскостью изотропии, перпендикулярной направлению волокон (однонаправленный ПКМ). В этом случае нить может быть представлена как система из волокон и матрицы (рис. 4). В пропитанной углеродной нити объемная доля волокон равна 52 % при среднем диаметре волокон 7 мкм.

Поскольку ПКМ характеризуется выраженной структурно-механической неоднородностью [18], то была разработана параметрическая модель со случайным распределением волокон и механических свойств каждой нити [4]. Для волокон, матрицы и интерфейсов

использовались линейные изотропные модели материала, а разрушение моделировалось одномоментным снижением жесткости конечного элемента (коэффициент снижения 10^{-6}) согласно критерию максимальных напряжений. Дискретизация конечно-элементной сетки выполнялась 8-узловыми конечными элементами (типа SOLID). Оптимальный размер конечных элементов был получен после анализа сходимости сетки, когда уровень напряжений при изменении сетки практически не изменялся.

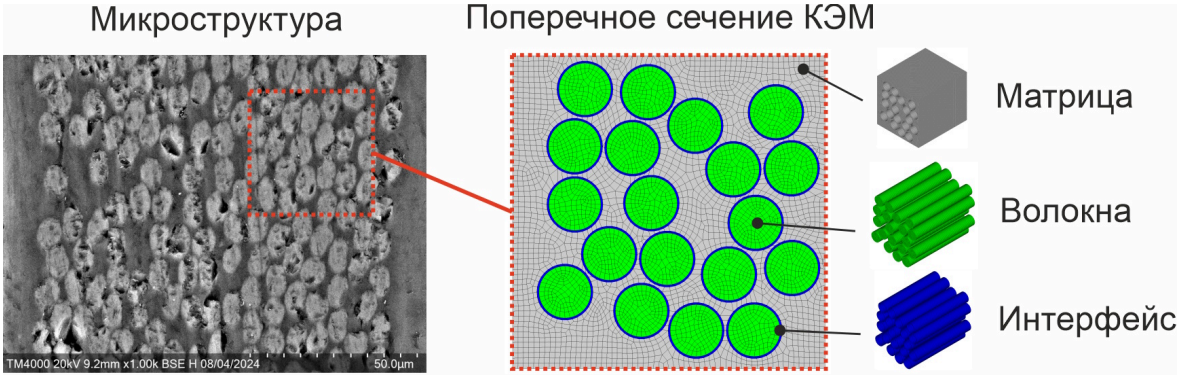

Рис. 4. Цифровая микромодель углеродной нити
Fig. 4. Digital micro-model of the carbon yarn

2.3. Цифровая мезомодель триаксиальной ткани. На мезоуровне исследовалось механическое поведение ПКМ на основе ТТ (рис. 5). В качестве базовой структуры формировалась гексагональная элементарная ячейка [19], в пределах которой задавалась схема армирования в плоскостях x и y. На основе этой геометрии строилась объемная модель ТТ. Геометрическая модель нити представлялась в виде отдельных простейших геометрических фигур, а ее волнистость описывалась кусочно-линейной функцией. Матрица имела форму параллелепипеда.

В расчетах применялась ортотропная модель материала. Разрушение моделировалось с использованием модели непрерывного прогрессирующего повреждения [20] согласно критерию прочности Хашина [21]. В такой модели поврежденность рассматривалась как процесс непрерывной деградации жесткостных свойств материала, где для каждого конечного элемента рассчитывалась соответствующая поврежденная матрица жесткости:

$$[C]_d = \frac{1}{A}\begin{bmatrix} (1-d_f)E_f & (1-d_f)(1-d_m)\nu_{21}E_f & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)\nu_{12}E_f & (1-d_m)E_m & 0 \\ 0 & 0 & A(1-d_s)G \end{bmatrix},$$

где d_f, d_m, d_s – параметры поврежденности волокна, матрицы и при сдвиге соответственно; $A = 1 - \nu_{12}\nu_{21}(1-d_f)(1-d_m)$; E_f, E_m, G – модули упругости для волокна, матрицы и при сдвиге соответственно.

Разброс механических свойств нитей учитывался с помощью усеченного нормального распределения. Дискретизация конечно-элементной сетки выполнялась с помощью 8-узловых твердотельных конечных элементов (типа SOLID) с шестью степенями свободы в каждом узле. Нити и матрица имели общие узлы, формируя конформную сетку, включающую около 400000 конечных элементов.

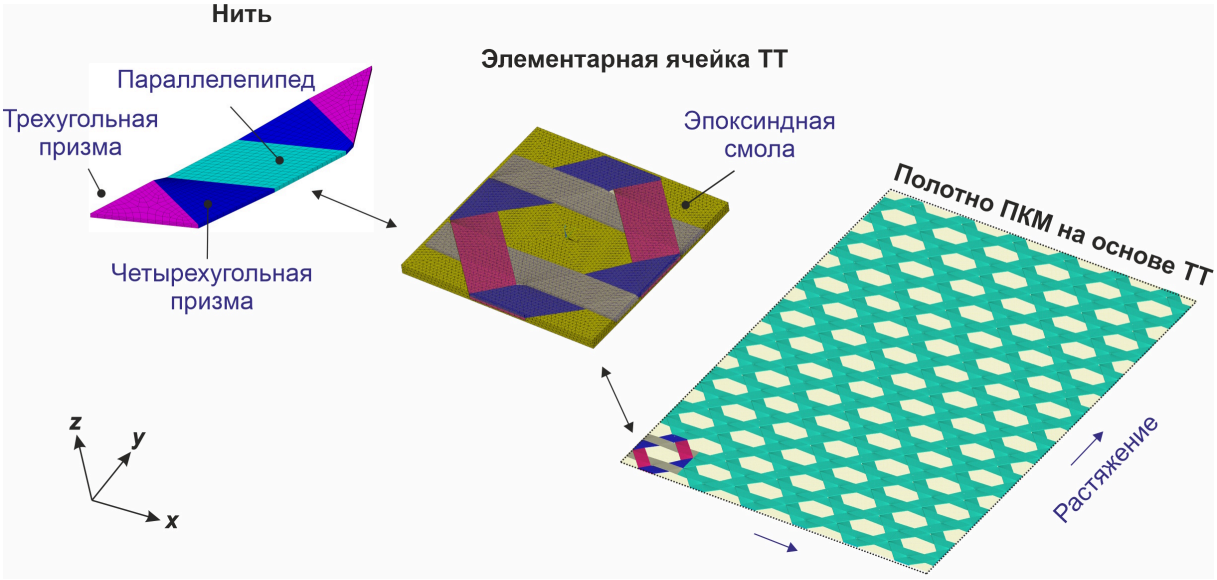

Рис. 5. Цифровая мезомодель ПКМ
Fig. 5. Digital meso-model of the PCM

2.4. Цифровая макромодель параболического рефлектора. На макроуровне исследовалось механическое поведение параболического рефлектора диаметром 1.5 м (рис. 6), используемого в высокоточных телекоммуникационных системах [22]. Отражающая поверхность была выполнена из ПКМ на основе ТТ, что обеспечило высокую удельную прочность, стабильность формы и устойчивость к внешним нагрузкам.

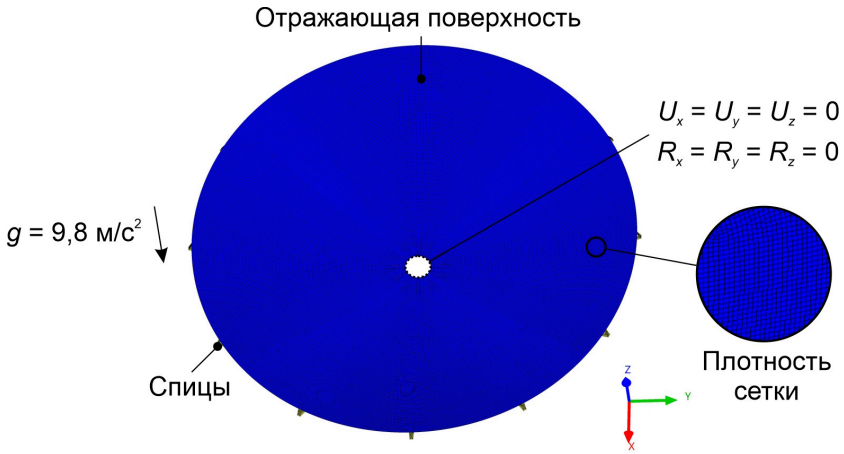

Рис. 6. Цифровая макромодель параболического рефлектора
Fig. 6. Digital macro-model of the parabolic reflector

Дискретизация модели выполнялась с использованием 8-узловых оболочечных конечных элементов (типа SHELL). Модель включала в себя 158220 конечных элементов и 169872 узлов. Для учета геометрической и физической нелинейности использовалась опция больших перемещений. В качестве нагружения учитывалось действие силы тяжести в направлении оси Z, при этом центральная область рефлектора была зафиксирована по всем степеням свободы.

3. Результаты и обсуждения

С использованием разработанной микромодели проведены виртуальные испытания РЭО углеродной нити при различных схемах нагружения. На рис. 7 представлены диаграммы деформирования при растяжении и сжатии в двух направлениях.

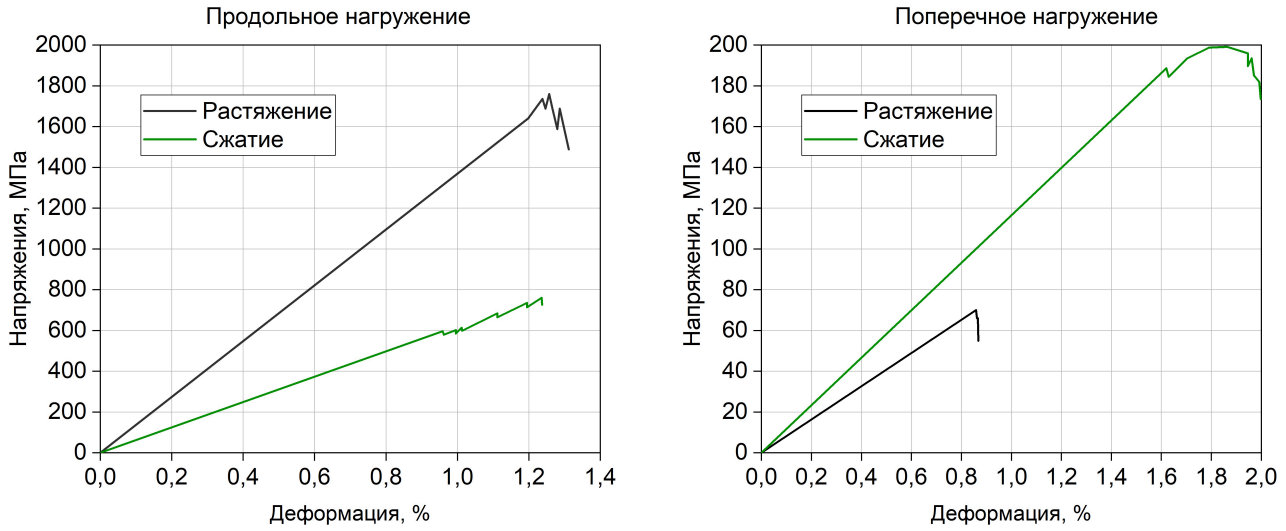

Рис. 7. Диаграммы деформирования углеродной нити
Fig. 7. Stress-strain diagrams of the carbon yarn

При продольном растяжении несущая способность ПКМ в основном определяется прочностными свойствами армирующих волокон. Разрушение возникает в волокнах, прочность которых снижена вследствие вариации механических свойств. Локальные повреждения повышают уровень напряжений в материале, формируя концентраторы, способствующие дальнейшему развитию разрушения. Предельное состояние достигается при накоплении критического количества поврежденных волокон и локальных областей разрушения матрицы, что отражается падением максимальных напряжений на диаграмме деформирования. В поперечном направлении поведение материала контролируется прочностными характеристиками связующего. Разрушение в этом случае инициируется образованием и накоплением трещин в матрице, которые, распространяясь по ее сечению, формируют концентрацию напряжений. При этом волокна, как правило, не разрушаются. С использованием полученных данных были рассчитаны эффективные механические свойства: $E_1 = 136000$ МПа; $E_2 = E_3 = 8130$ МПа; $v_{12} = v_{13} = 0.25$; $v_{23} = 0.45$; $X_t = 1767$ МПа; $X = -752$ МПа; $Y_t = 70$ МПа; $Y_c = -200$ МПа; $S_l = 70$ МПа. Валидация цифровой модели была проведена в работе [23], при этом расхождение между экспериментальными данными и виртуальными испытаниями не превышало 15 %.

Далее были проведены виртуальные испытания ПКМ на основе ТТ на мезоуровне при одноосном растяжении (рис. 8). В качестве исходных данных использовались результаты виртуальных испытаний на микроуровне, что обеспечило согласованность параметров модели и позволило учесть влияние микроструктурных процессов деформирования.

При продольном растяжении максимальные значения главных напряжений σ_1 были в нитях утка, ориентированных вдоль направления действия внешней нагрузки. Наибольшая концентрация напряжений наблюдалась в зонах пересечения утка с нитями основы,

где геометрия переплетения приводит к локальной неравномерности напряженного состояния и повышенному уровню нагружения в матрице. Распределение σ_2 указало на наличие поперечных напряжений в нитях основы; они были обусловлены изгибом волокон в местах переплетения и отражали характер поперечной связи между системами нитей. При поперечном нагружении наблюдалась концентрация напряжений в нитях основы, которые приняли большую часть приложенной нагрузки. Анализ развития поврежденности (рис. 9) указал на то, что начало разрушения возникло в области пересечения основы и утка. С увеличением нагрузки поврежденность распространилась по диагонали относительно направления нагружения, что было связано с особенностями перераспределения нагрузки в структуре ТТ. Сравнительный анализ между моделированием и экспериментальными данными продемонстрировал схожий процесс развития повреждений, что подтвердило корректность и применимость разработанной модели. После оценки НДС были определены эффективные механические свойства материала: $E_1 = 22060$ МПа; $E_2 = 6333$ МПа; $v_{12} = 0.6$; $v_{23} = 0.55$; $X_t = 290$ МПа; $Y_t = 65$ МПа.

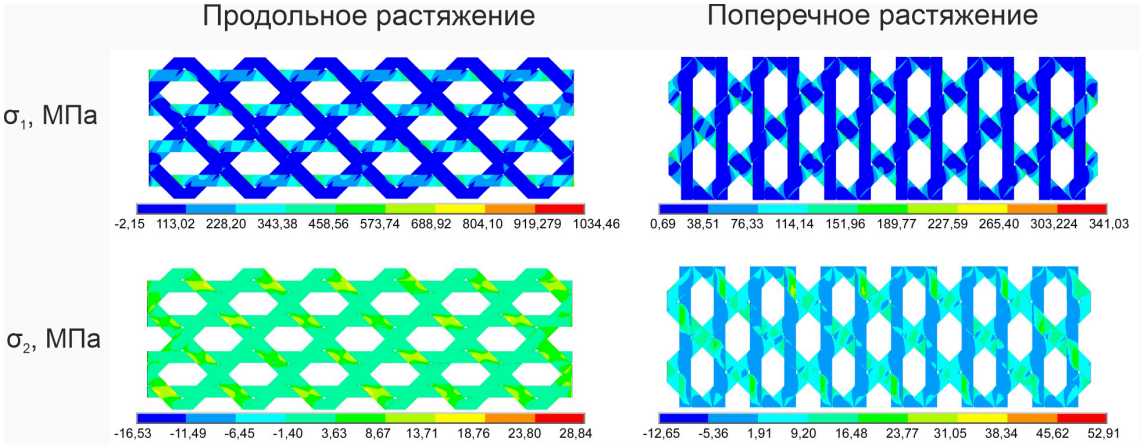

Рис. 8. Распределение главных напряжений σ_1 и σ_2 ПКМ на основе ТТ
Fig. 8. Distribution of principal stresses σ_1 and σ_2 in the PCM based on TWF

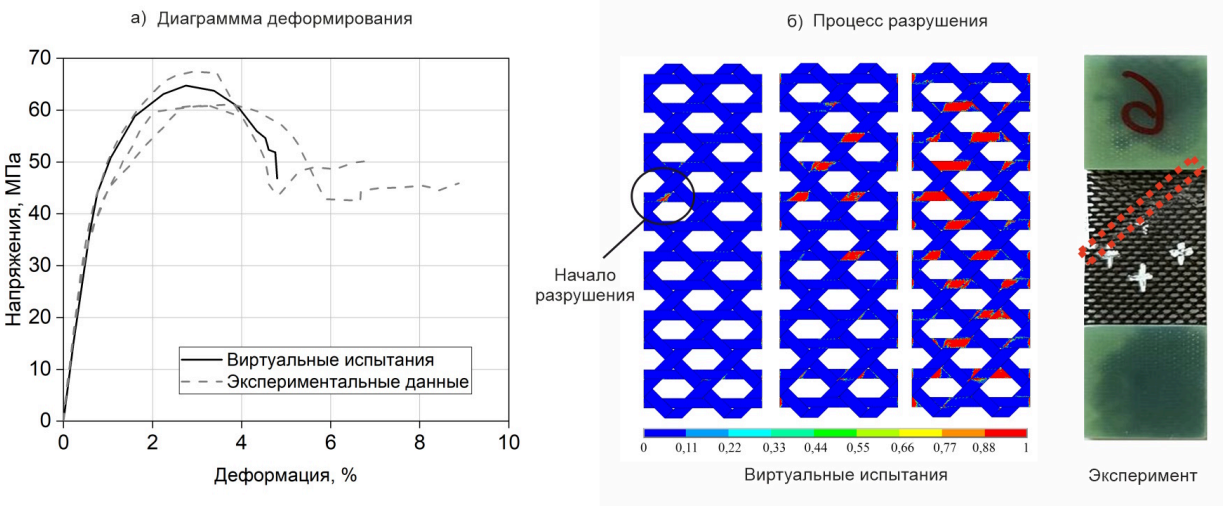

Рис. 9. Диаграмма деформирования (а) и поврежденность (б) ПКМ при поперечном растяжении
Fig. 9. Stress-strain diagram (a) and damage evolution (b) in the PCM under transverse tension

На заключительном этапе проведена оценка механического поведения рефлектора. Распределение общих перемещений отражающей оболочки (рис. 10) имеет ярко выраженный радиальный характер: в зоне центрального закрепления они близки к нулю и постепенно возрастают по мере удаления от центра, достигая максимума на периферии. Такая картина полностью соответствует ожидаемому поведению тонкой осесимметричной оболочки. На кромке наблюдаются локальные зоны повышенных перемещений, формирующиеся в пролетах между силовыми ребрами, что связано с меньшей жесткостью конструкции в этих областях. Выявленная неравномерность по окружности отражает анизотропию, обусловленную сегментной структурой и системой ребер.

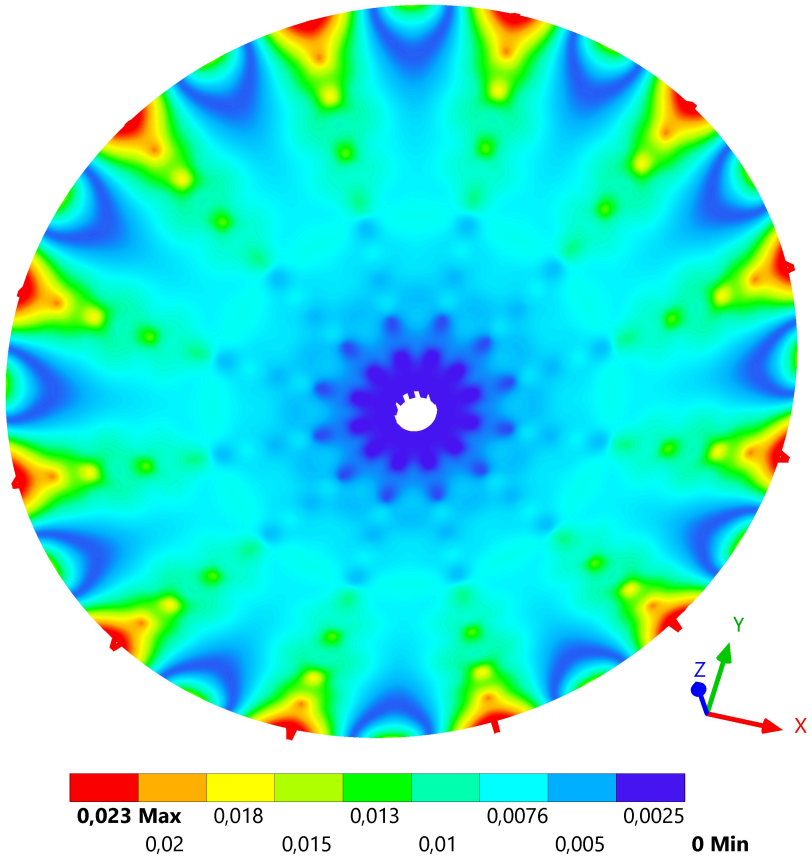

Рис. 10. Распределение общих перемещений отражающей поверхности рефлектора, мм
Fig. 10. Distribution of total displacements of the reflective surface of the reflector, mm

Основным критерием качества работы рефлектора является величина среднеквадратического отклонения (СКО) от номинальной формы, которая определяется следующим образом:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(u_i - u_a)^2} \leq 0.3\,\text{мм},$$

где u_i – перемещение i-го узла поверхности; u_a – среднее значение перемещений по поверхности; N – общее количество узлов.

По результатам расчета установлено, что СКО отражающей поверхности составляет 0.012 мм, что на порядок ниже предельно допустимого значения.

Заключение

В работе предложен и реализован многоуровневый подход к компьютерному моделированию механических свойств ПКМ. Разработанные ЦМ на микро-, мезо- и макроуровнях обеспечили комплексную оценку НДС ПКМ с учетом структурно-механических особенностей материала. На микроуровне рассчитаны эффективные характеристики углеродной нити с учетом случайного распределения волокон и разброса механических свойств. Мезоуровневый анализ позволил выявить закономерности деформирования и разрушения ТТ. Макромодель параболического рефлектора показала применимость предложенного подхода к анализу ответственных высокоточных конструкций.

Интеграция микро-, мезо- и макроуровневых моделей в рамках единой методологии позволяет не только повысить точность прогнозирования механического поведения ПКМ с учетом их сложной иерархической структуры, но и существенно снизить необходимость в ресурсоемких экспериментальных исследованиях. Полученные результаты формируют основу для разработки ЦД ПКМ и конструкций, способных достоверно прогнозировать механические свойства ПКМ.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The author declares no conflicts of interest.

Литература

1. *Холмогоров С.А., Левшонкова Н.В.* Экспериментальные исследования механизмов разрушения трехслойных тест-образцов с несущими слоями из однонаправленного волокнистого композита [0°] при осевом сжатии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2022. Т. 164, кн. 4. С. 357–370. https://doi.org/10.26907/2541-7746.2022.4.357-370.

2. *Kalidindi S.R., Buzzy M., Boyce B.L., Dingreville R.* Digital twins for materials // Comput. Mater. Sci. 2022. V. 9. Art. 818535. https://doi.org/10.3389/fmats.2022.818535.

3. *Wang Y., Tao F., Zuo Y., Zhang M., Qi Q.* Digital-twin-enhanced quality prediction for the composite materials // Engineering. 2023. V. 22. P. 22–33. https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.08.019.

4. *Eremin N.V., Moskvichev E.V.* Multilevel model for calculating the strength and the service life of a metal composite pressure vessel // Russ. Metall. (Metally). 2023. V. 2023, No 10. P. 1557–1564. https://doi.org/10.1134/S0036029523100075.

5. *Плескачевский Ю.М., Шимановский А.О.* Компьютерное моделирование структуры и свойств композитов в нагруженных конструкциях // Механ. машин, механизм. и матер. 2016. № 1 (34). С. 41–50.

6. *Lee W., Chung I., Baek K., Im S., Cho M.* Multiscale modeling to characterize electromechanical behaviors of CNT/polymer nanocomposites considering the matrix damage and interfacial debonding // Mech. Adv. Mater. Struct. 2020. V. 29, No 16. P. 2322–2341. https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1861396.

7. *Vashisth A., Bakis C.E.* Multiscale characterization and modeling of nanosilica-reinforced filament wound carbon/epoxy composite // Mater. Perform. Charact. 2019. V. 8, No 1. P. 1–21. https://doi.org/10.1520/MPC20180108.

8. *Christoff B.G., Almeida J.H.S., Jr., Ribeiro M.L., Maciel M.M., Guedes R.M., Tita V.* Multiscale modelling of composite laminates with voids through the direct FE^2 method // Theor. Appl. Fract. Mech. 2024. V. 131. Art. 104424. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104424.

9. *Димитриенко Ю.И., Соколов А.П.* Многомасштабное моделирование упругих композиционных материалов // Матем. моделир. 2012. Т. 24, № 5. С. 3–20.

10. *Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В.* Многомасштабное моделирование упругопластических композитов с учетом повреждаемости // Матем. моделир. и числ. методы. 2016. № 10. С. 3–23.

11. *Chen Y.-W., Joseph R.J., Kanyuck A., Khan S., Malhan R.K., Manyar O.M., McNulty Z., Wang B., Barbič J., Gupta S.K.* A digital twin for automated layup of prepreg composite sheets // J. Manuf. Sci. Eng. 2022. V. 144, No 4. Art. 041010. https://doi.org/10.1115/1.4052132.

12. *Kibrete F., Trzepieciński T., Gebremedhen H.S., Woldemichael D.E.* Artificial intelligence in predicting mechanical properties of composite materials // J. Compos. Sci. 2023. V. 7, No 9. Art. 364. https://doi.org/10.3390/jcs7090364.

13. *Múgica J.I., Lopes C.S., Naya F., Herráez M., Martínez V., González C.* Multiscale modelling of thermoplastic woven fabric composites: From micromechanics to mesomechanics // Compos. Struct. 2019. V. 228. Art. 111340. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111340.

14. *Hofer U., Luger M., Traxl R., Lackner R.* Multiscale modeling of the viscoelastic response of braid-reinforced polymers: Model formulation and experimental assessment considering different rheological models // Composites, Part B. 2020. V. 182. Art. 107398. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107398.

15. *Lin S., Yang L., Xu H., Jia X., Yang X., Zu L.* Progressive damage analysis for multiscale modelling of composite pressure vessels based on Puck failure criterion // Compos. Struct. 2021. V. 255. Art. 113046. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113046.

16. *Spahn J., Andrae H., Kabel M., Mueller R., Linder C.* Multiscale modeling of progressive damage in elasto-plastic composite materials // Proc. 11th World Congr. on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th Eur. Conf. on Computational Mechanics (ECCM V), 6th Eur. Conf. on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI). V. IV. Õnate E., Oliver J., Huerta A. (Eds.). Barcelona: CIMNE, 2014. P. 3426–3437.

17. *Соколов А.П., Першин А.Ю., Козов А.В., Кириллов Н.Д.* Гомогенизация многоуровневых многокомпонентных гетерогенных структур для определения физико-механических характеристик композиционных материалов // Физ. мезомехан. 2018. Т. 21, № 5. С. 90–107.

18. *Breuer K., Spickenheuer A., Stommel M.* Statistical analysis of mechanical stressing in short fiber reinforced composites by means of statistical and representative volume elements // Fibers. 2021. V. 9, No 5. Art. 32. https://doi.org/10.3390/fib9050032.

19. *Zhao Q., Hoa S.V., Ouellette P.* Triaxial woven fabric (TWF) composites with open holes (part II): Verification of the finite element models // J. Compos. Mater. 2003. V. 37, No 10. P. 849–873. https://doi.org/10.1177/0021998303037010001.

20. *Wang L., Zheng C., Luo H., Wei S., Wei Z.* Continuum damage modeling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel // Compos. Struct. 2015. V. 134. P. 475–482. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.107.

21. *Hashin Z.* Failure criteria for unidirectional fiber composites // J. Appl. Mech. 1980. V. 47, No 2. P. 329–334. https://doi.org/10.1115/1.3153664.

22. *Евдокимов А.С., Пономарев С.В., Буянов Ю.И.* Совместный расчет напряженно-деформированного состояния и диаграммы направленности космических рефлекторов // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и механ. 2011. № 1 (13). С. 74–82.

23. *Eremin N.V., Moskvichev V.V.* A probabilistic model of fracture of the composite material of a composite overwrapped pressure vessel // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1431. Art. 012020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1431/1/012020.

References

1. Kholmogorov S.A., Levshonkova N.V. Experimental research of the failure mechanisms of sandwich specimens with facing layers from unidirectional fiber-reinforced plastic with [0°] lay-up under axial compression. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2022, vol. 164, no. 4, pp. 357–370. https://doi.org/10.26907/2541-7746.2022.4.357-370. (In Russian)

2. Kalidindi S.R., Buzzy M., Boyce B.L., Dingreville R. Digital twins for materials. *Comput. Mater. Sci.*, 2022, vol. 9, art. 818535. https://doi.org/10.3389/fmats.2022.818535.

3. Wang Y., Tao F., Zuo Y., Zhang M., Qi Q. Digital-twin-enhanced quality prediction for the composite materials. *Engineering*, 2023, vol. 22, pp. 22–33. https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.08.019.

4. Eremin N.V., Moskvichev E.V. Multilevel model for calculating the strength and the service life of a metal composite pressure vessel. *Russ. Metall. (Metally)*, 2023, vol. 2023, no. 10, pp. 1557–1564. https://doi.org/10.1134/S0036029523100075.

5. Pleskachevskii Yu.M., Shimanovskii A.O. Computer simulation of the structure and properties of composites in loaded constructions. *Mech. Mach., Mech. Mater.*, 2016, no. 1 (34), pp. 41–50. (In Russian)

6. Lee W., Chung I., Baek K., Im S., Cho M. Multiscale modeling to characterize electromechanical behaviors of CNT/polymer nanocomposites considering the matrix damage and interfacial debonding. *Mech. Adv. Mater. Struct.*, 2022, vol. 29, no. 16, pp. 2322–2341. https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1861396.

7. Vashisth A., Bakis C.E. Multiscale characterization and modeling of nanosilica-reinforced filament wound carbon/epoxy composite. *Mater. Perform. Charact.*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 1–21. https://doi.org/10.1520/MPC20180108.

8. Christoff B.G., Almeida J.H.S., Jr., Ribeiro M.L., Maciel M.M., Guedes R.M., Tita V. Multiscale modelling of composite laminates with voids through the direct FE^2 method. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2024, vol. 131, art. 104424. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104424.

9. Dimitrienko Yu.I., Sokolov A.P. Multiscale modeling of elastic composite materials. *Mat. Model.*, 2012, vol. 24, no. 5, pp. 3–20. (In Russian)

10. Dimitrienko Yu.I., Gubareva E.A., Sborshchikov S.V. Multiscale modeling of elastic-plastic composites with an allowance for fault probability. *Math. Model. Comput. Methods*, 2016, no. 10, pp. 3–23. (In Russian)

11. Chen Y.-W., Joseph R.J., Kanyuck A., Khan S., Malhan R.K., Manyar O.M., McNulty Z., Wang B., Barbič J., Gupta S.K. A digital twin for automated layup of prepreg composite sheets. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2022, vol. 144, no. 4, art. 041010. https://doi.org/10.1115/1.4052132.

12. Kibrete F., Trzepieciński T., Gebremedhen H.S., Woldemichael D.E. Artificial intelligence in predicting mechanical properties of composite materials. *J. Compos. Sci.*, 2023, vol. 7, no. 9, art. 364. https://doi.org/10.3390/jcs7090364.

13. Múgica J.I., Lopes C.S., Naya F., Herráez M., Martínez V., González C. Multiscale modelling of thermoplastic woven fabric composites: From micromechanics to mesomechanics. *Compos. Struct.*, 2019, vol. 228, art. 111340. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111340.

14. Hofer U., Luger M., Traxl R., Lackner R. Multiscale modeling of the viscoelastic response of braid-reinforced polymers: Model formulation and experimental assessment considering different rheological models. *Composites, Part B*, 2020, vol. 182, art. 107398. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107398.

15. Lin S., Yang L., Xu H., Jia X., Yang X., Zu L. Progressive damage analysis for multiscale modelling of composite pressure vessels based on Puck failure criterion. *Compos. Struct.*, 2021, vol. 255, art. 113046. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113046.

16. Spahn J., Andrae H., Kabel M., Mueller R., Linder C. Multiscale modeling of progressive damage in elasto-plastic composite materials. *Proc. 11th World Congr. on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th Eur. Conf. on Computational Mechanics (ECCM V), 6th Eur. Conf. on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI)*. Vol. IV. Õnate E., Oliver J., Huerta A. (Eds.). Barcelona, CIMNE, 2014, pp. 3426–3437.

17. Sokolov A.P., Pershin A.Yu., Kozov A.V., Kirillov N.D. Homogenization of multilevel multicomponent heterogeneous structures for determining the physical and mechanical characteristics of composites. *Fiz. Mezomekh.*, 2018, vol. 21, no. 5, pp. 90–107. (In Russian)

18. Breuer K., Spickenheuer A., Stommel M. Statistical analysis of mechanical stressing in short fiber reinforced composites by means of statistical and representative volume elements. *Fibers*, 2021, vol. 9, no. 5, art. 32. https://doi.org/10.3390/fib9050032.

19. Zhao Q., Hoa S.V., Ouellette P. Triaxial woven fabric (TWF) composites with open holes (part II): Verification of the finite element models. *J. Compos. Mater.*, 2003, vol. 37, no. 10, pp. 849–873. https://doi.org/10.1177/0021998303037010001.

20. Wang L., Zheng C., Luo H., Wei S., Wei Z. Continuum damage modeling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel. *Compos. Struct.*, 2015, vol. 134, pp. 475–482. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.107.

21. Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *J. Appl. Mech.*, 1980, vol. 47, no. 2, pp. 329–334. https://doi.org/10.1115/1.3153664.

22. Evdokimov A.S., Ponomarev S.V., Buyanov Yu.I. Joint calculation of the stress-strain state and antenna patterns of spacecraft reflectors. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Mat, Mekh.*, 2011, no. 1 (13), pp. 74–82. (In Russian)

23. Eremin N.V., Moskvichev V.V. A probabilistic model of fracture of the composite material of a composite overwrapped pressure vessel. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1431, art. 012020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1431/1/012020.

Информация об авторах

Никита Викторович Еремин, кандидат технических наук, заведующий научной лабораторией, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева
E-mail: *kaizoku813@gmail.com*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8027-9483

Author Information

Nikita V. Eremin, Cand. Sci. (Engineering), Head of Scientific Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
E-mail: *kaizoku813@gmail.com*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8027-9483

Поступила в редакцию 16.09.2025 Received September 16, 2025
Принята к публикации 19.09.2025 Accepted September 19, 2025