

УДК: 691.175.3

DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_275

EDN: UVYIOO



## Численное моделирование напряженно-деформированного состояния гибридных композитов

Ф.Р. Шакирзянов<sup>1</sup>, А.И. Валиев<sup>1</sup>, А.М. Сулейманов<sup>1,2</sup>, Р.К. Низамов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

<sup>2</sup>Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** *Постановка задачи.* Одним из способов внедрения в строительную практику гибридных (с гетероолокнистым наполнением) полимерных композитов конструкционного назначения является совершенствование их численного моделирования напряженно-деформированного состояния на различных этапах разработки, позволяющего на раннем этапе выполнить предварительную оценку оптимальных вариантов. Цель исследования заключается в определении предельной нагрузки, которую выдержит композит при изгибе, растяжении и сжатии, оценка влияния содержания различных фаз с рекомендациями по назначению геометрических параметров и механических характеристик композита. Задачами исследования являются: выполнение прочностных расчетов на растяжение, сжатие, изгиб гибридных композитов, сравнительный анализ различного армирования на прочностные и жесткостные параметры, предварительная оценка оптимального варианта армирования гибридного композита.

*Результаты.* В работе произведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния гибридных полимерных композитов, а именно проведены расчеты на растяжение, сжатие и изгиб. Проведен сравнительный анализ различного армирования на прочностные и жесткостные параметры. Разработана аналитическая методика предварительной оценки оптимального варианта армирования гибридного полимерного композита.

*Выводы.* Значимость полученных результатов в строительной отрасли заключается в том, что численное моделирование напряженно-деформированного состояния гибридных полимерных композитов позволяет расширить область их применения, модель рекомендуется использовать при решении научных и инженерных задач.

**Ключевые слова:** стеклопластик, углепластик, гибриды, растяжение, сжатие, изгиб, оптимизация

**Для цитирования:** Шакирзянов Ф.Р., Валиев А.И., Сулейманов А.М., Низамов Р.К. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния гибридных композитов // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 275-285, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_275, EDN: UVYIOO

## Numerical modeling of stress-strain state of hybrid composites

F.R. Shakirzyanov<sup>1</sup>, A.M. Suleymanov<sup>1</sup>, A.I. Valiev<sup>1,2</sup>, R.K. Nizamov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup>Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

**Abstract.** *Problem statement.* One of the ways to introduce hybrid (with heterofiber filling) polymer composite materials of structural purpose into the construction practice is to improve

their numerical modeling of the stress-strain state at various stages of development, which allows performing a preliminary assessment of optimal options at an early stage. The purpose of the study is to determine the ultimate load that the composite will withstand in bending, tension and compression, to assess the influence of the content of different phases with recommendations for the assignment of geometric parameters and mechanical characteristics of the composite. The objectives of the research are performance of strength calculations in tension, compression, bending of hybrid beams, comparative analysis of different reinforcement on strength and stiffness parameters, preliminary evaluation of the optimal variant of reinforcement of hybrid composite.

*Results.* Numerical modeling of stress-strain state of hybrid polymer composite materials, namely, tensile, compression and bending calculations have been carried out. Comparative analysis of different reinforcement on strength and stiffness parameters has been carried out. The method of preliminary estimation of the optimal variant of reinforcement of hybrid polymer composite material has been analytically developed.

*Conclusions.* The significance of the obtained results in the construction industry lies in the fact that numerical modeling of the stress-strain state of hybrid polymer composite materials allows expanding the field of their application, the model is recommended to be used in solving scientific and engineering problems.

**Keywords:** fiberglass, carbon fiber, hybrid, tension, compression, bending, optimization

**For citation:** Shakirzyanov F.R., Valiev A.I., Suleymanov A.M., Nizamov R.K. Numerical modeling of stress-strain state of hybrid composites // News KSUAE, 2023, № 4(66), p. 275-285, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_275, EDN: UVYIOO

## 1. Введение

Разработка и внедрение новых классов композиционных материалов, постоянное расширение сферы полимерных композитов, в частности в сфере строительства, стимулируют развитие исследований по прогнозированию их свойств, методов расчета и оптимизации конструкций из них [1-3]. По данным объема рынка полимерных композитов потребление в период с 2017-2023 гг. выросло на 17,1% и ожидается, что в период с 2023-2029 гг. будет расти каждый год на 3,67% в объемном выражении [4-6].

В последнее десятилетие технологически реализованы новые и перспективные классы конструкционных композитов, в частности гибридные. Гибридными называют композиционные материалы, содержащие более одного вида армирующего компонента в единой матрице [7-9].

При использовании в качестве армирующего материала только стекловолокна в композите не удастся получить материал, жесткость которого была бы на уровне жесткости металлов. Для повышения жесткости композитов создаются гибридные композиты, которые содержат углеродные волокна. Углеродное волокно повышает прочность гибридного композита при растяжении, сжатии и изгибе. Поэтому изготавливаются композиты, в которых перемежаются слои стекловолокна и слои углеродного волокна. Возможны также варианты композитов, у которых слои представляют собой переплетение стекловолокон с углеродными.

Кроме того, включения других высокопрочных волокон, обладающей большей работой разрушения повышает ударную вязкость, которые не достигается обычными методами. Также гибридизации материала углеволокнами улучшает низкую прочность при сжатии. Еще большее влияние гибридизация оказывает на модуль упругости при сжатии: этот параметр почти удваивается при введении всего 5% углеволокна в композитный материал с массовой долей стекловолокна 50%. Несмотря на положительные стороны гибридизации, оценка упруго-прочностных характеристик гибридных композитов с различным по объему типов наполнителей представляет сложность, в связи с невозможностью применения правила аддитивности, за счет различных свойств образованных межфазных слоев на границе «волокно-матрица».

Целью работы является определение предельной нагрузки, которую выдержит композитная балка при изгибе, растяжении и сжатии, оценка влияния содержания

различных фаз с рекомендациями по назначению геометрических параметров и механических характеристик композита.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести прочностные расчеты на растяжение, сжатие и изгиб гибридных балок численно;
- провести сравнительный анализ различного армирования на прочностные и жесткостные параметры балки;
- произвести оценку оптимального варианта армирования гибридного композита.

## 2. Материалы и методы

При расчете композитных балок учитывались следующие геометрические размеры и механические характеристики материалов.

Для балки прямоугольного сечения принимались следующие размеры:  $L=160$  мм,  $H=5$  мм,  $B=13$  мм. Толщина каждого слоя  $t=0,25$  мм. Балка состоит из 20 слоев.

В расчетах приняты характеристики материалов, представленные в табл. 1 и 2:

а) углепластик:

Таблица 1

$E_1$ Н/мм <sup>2</sup>	$E_2$ Н/мм <sup>2</sup>	$G_{12}$ Н/мм <sup>2</sup>	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	$X_{1t}$ Н/мм <sup>2</sup>	$X_{1c}$ Н/мм <sup>2</sup>	$X_{2t}$ Н/мм <sup>2</sup>	$X_{2c}$ Н/мм <sup>2</sup>	$T_{12}$ Н/мм <sup>2</sup>
1,21e11	8,6e9	4,7e9	0,27	0,4	2,23e9	1,082e9	2,9e7	1e8	6e7

б) стеклопластик:

Таблица 2

$E_1$ Н/мм <sup>2</sup>	$E_2$ Н/мм <sup>2</sup>	$G_{12}$ Н/мм <sup>2</sup>	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	$X_{1t}$ Н/мм <sup>2</sup>	$X_{1c}$ Н/мм <sup>2</sup>	$X_{2t}$ Н/мм <sup>2</sup>	$X_{2c}$ Н/мм <sup>2</sup>	$T_{12}$ Н/мм <sup>2</sup>
4,5e10	1e10	5e9	0,3	0,4	1,1e9	6,75e8	3,5e7	1,2e8	8e7

где:

$E_1$  — модуль упругости композита в продольном направлении, МПа;

$E_2$  — модуль упругости композита в поперечном направлении, МПа;

$G_{12}$  — модуль сдвига композита, МПа;

$\nu_{12}, \nu_{21}$  — коэффициенты Пуассона;

$X_{1t}$  — предел прочности композита при растяжении в продольном направлении, МПа;

$X_{1c}$  — предел прочности композита при сжатии в продольном направлении, МПа;

$X_{2t}$  — предел прочности композита при растяжении в поперечном направлении, МПа;

$X_{2c}$  — предел прочности композита при сжатии в поперечном направлении, МПа;

$T_{12}$  — предел прочности композита при межслойном сдвиге, МПа.

Расчет балок выполнен в ПК «ANSYS 2020 R2». Расчет выполнен в предположении, что слои многослойного материала идеально связаны между собой (т.е. взаимное проскальзывание слоев отсутствует).

Рассмотрены 5 вариантов расчета напряженно-деформированного состояния балок:

- 1) балка состоит только из стеклопластика;
- 2) балка состоит только из углепластика;
- 3) верхний и нижний слой из углепластика, остальные стеклопластик;
- 4) балка состоит попеременно из углепластика и стеклопластика;
- 5) верхний и нижний 3 слоя из углепластика, остальные стеклопластик.
- 6) верхний и нижний 7 слоев из углепластика, остальные стеклопластик.

Блок-схема (алгоритм) построения конечно-элементной модели полимерных композитов, в том числе, гибридных в ПК «ANSYS 2020 R2» представлена на рис. 1.

Прогнозирование упруго-механических характеристик гибридных полимерных композитов в численной модели выполнено согласно допущениям по [11, 12]:

-структура гибридного материала симметрична относительно срединной плоскости;

-слои деформируются совместно и линейно;

-структура гибридного материала без дефектов с оптимальным (идеальным) взаимодействием компонентов.

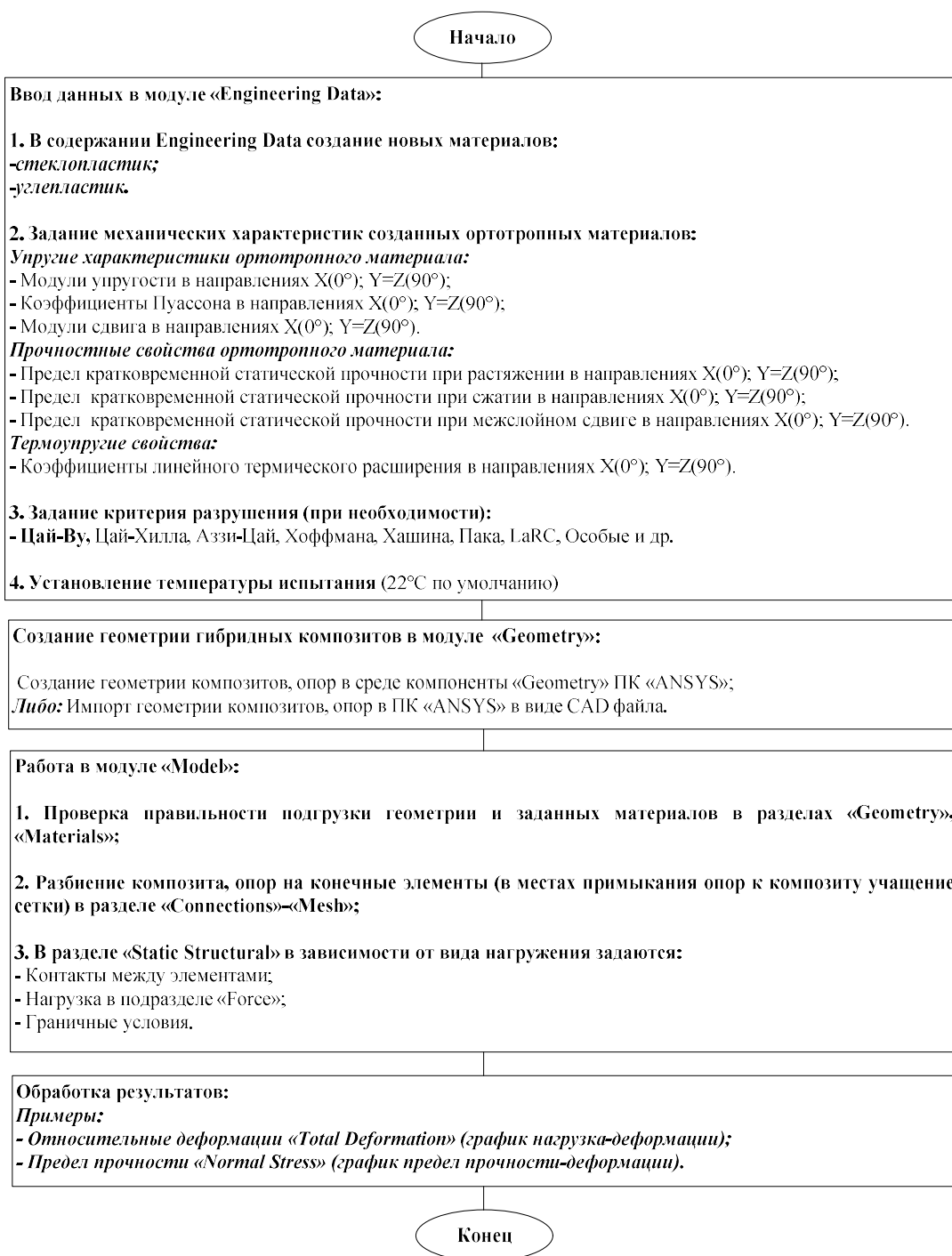


Рис. 1. Блок-схема (алгоритм) построения конечно-элементной модели гибридного полимерного композита (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Block diagram (algorithm) for building a finite element model of hybrid polymer composite (illustration by the authors)

Расчетные схемы балок при растяжении, сжатии и изгибе представлены на рис. 2. При растяжении балки принималась нагрузка  $P=10000$  Н, при изгибе (показана половина балки в виду симметрии задачи)  $P=100$  Н. Сжатие балки моделировалась кинематически (слева и справа опоры считались жесткими, т. е.  $\mu = 0.5$ ).

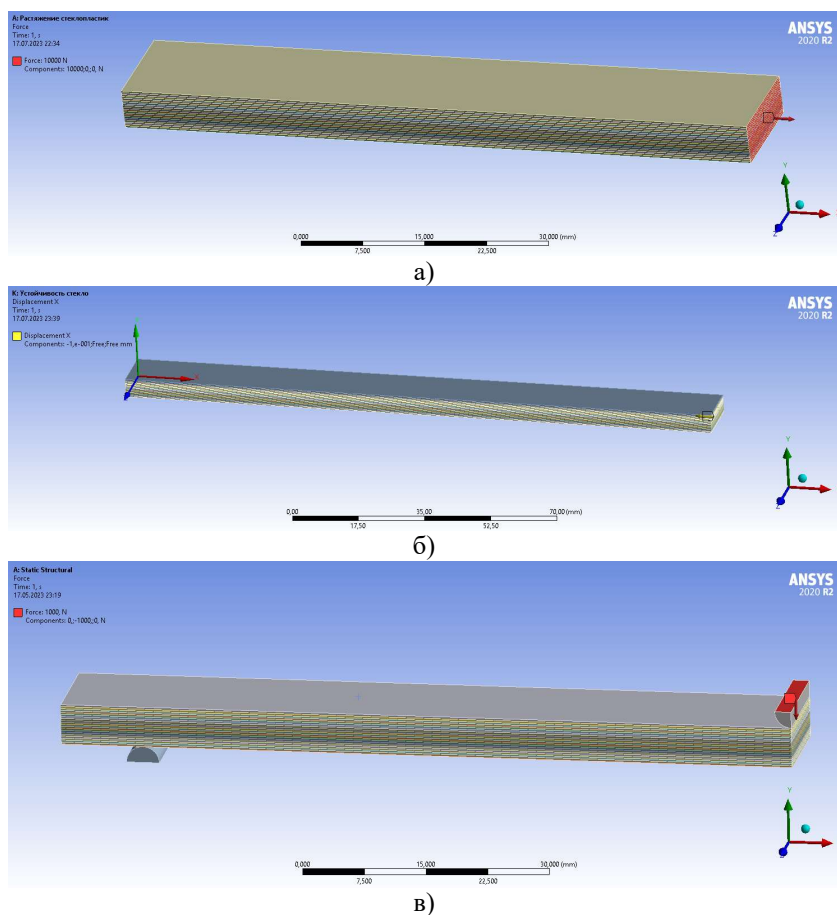


Рис. 2. Расчетная схема балки при а) растяжении, б) сжатии, в) изгибе (иллюстрация авторов)  
 Fig. 2. Calculation diagram of a beam in a) tension, b) compression, c) bending (illustration by the authors)

Для предварительного определения оптимального сечения балки из гибридного композита были приняты следующие критерии прочности:

- 1) при растяжении определяется наименьшая цена используемого материала при условии прочности на растяжении (по формулам 1 и 2):

$$Pr \rightarrow \min, \tag{1}$$

$$\sigma \leq \sigma_{\text{раст}} \tag{2}$$

- 2) при изгибе ищется наименьшая цена используемого материала с учетом выполнения условия прочности и жесткости балки (по формулам 3-6):

$$Pr \rightarrow \min, \tag{3}$$

$$\sigma \leq \sigma_{\text{раст}}, \tag{4}$$

$$|\sigma| \leq \sigma_{\text{сж}}, \tag{5}$$

$$v \leq [v] \tag{6}$$

- 3) при расчете на сжатие балки также ищется наименьшая цена используемого материала с учетом выполнения условия прочности и устойчивости балки (по формулам 7-10):

$$Pr \rightarrow \min, \tag{7}$$

$$\sigma \leq \sigma_{\text{раст}}, \tag{8}$$

$$|\sigma| \leq \sigma_{\text{сж}}, \tag{9}$$

$$P \leq P_{kr} \tag{10}$$

За счет того, что гибридного балка состоит из 20 слоев по 0,25 мм со структурой симметричной относительно срединной плоскости, рассмотрены все возможные варианты армирования, а именно 1024 варианта: сверху и снизу, чередованием, чередованием по 2 и т.п.

### 3. Результаты

В расчете были рассмотрены разные варианты армирования стеклопластика углепластиковыми слоями. Проведены расчеты по определению нормальных ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ), касательных напряжений ( $\tau_{xy}$ ) в балке, определением прогибов ( $V$ ) при нагрузке ( $P^*$ ,  $R_{кр}$ ). Результаты расчетов на растяжение ( $P=10000$  Н) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вид балки	Материал	V, мм	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\tau_{xy}$ , МПа	$P^*$ , кН
Вариант 1	Стеклопластик	0,27	153,8	0,0	0,0	71,5
Вариант 2	Углепластик	0,101	153,8	0,0	0,0	155,4
Вариант 3	Углепластик	0,237	353,9	0,4	0,97	67,5
	Стеклопластик		131,7	3,6	1,14	
Вариант 4	Углепластик	0,15	249,1	0,67	0,39	68,9
	Стеклопластик		159	9,34	0,74	
Вариант 5	Углепластик	0,18	279	1,08	1,21	47,2
	Стеклопластик		159,3	13,2	1,84	

Результаты расчетов на изгиб ( $P=100$  Н) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Вид балки	Материал	V, мм	$\sigma_x^+$ , МПа	$\sigma_x^-$ , МПа	$\sigma_y^+$ , МПа	$\sigma_y^-$ , МПа	$\tau_{xy}^+$ , МПа	$\tau_{xy}^-$ , МПа	$P^*$ , кН
Вариант 1	Стеклопластик	4,54	209,7	331,9	5,9	26,6	2,7	1,1	0,203
Вариант 2	Углепластик	3,12	274,4	461,1	4,2	17,3	2,5	0,8	0,235
Вариант 3	Углепластик	3,62	386,5	579,8	4,7	17,4	2,6	0,7	0,187
	Стеклопластик		127,3	166,7	4,7	11,4	0,8	0,4	
Вариант 4	Углепластик	3,44	331,4	525,6	4,5	17,6	2,5	0,8	0,206
	Стеклопластик		103,5	144,6	4,9	11,3	0,8	0,4	
Вариант 6	Углепластик	3,01	274,8	460,1	4,3	17,3	2,5	0,7	0,235
	Стеклопластик		50,6	50,2	2,3	3,4	0,4	0,2	

Результаты расчетов на сжатие приведены в табл. 5.

Таблица 5

Вид балки	Материал	$R_{кр}$ , кН	$\sigma_x^+$ , МПа	$\sigma_x^-$ , МПа	$\sigma_y^+$ , МПа	$\sigma_y^-$ , МПа	$\tau_{xy}^+$ , МПа	$\tau_{xy}^-$ , МПа	$P^*$ , кН
Вариант 1	Стеклопластик	7,56	366,8	655,7	29,7	50,9	37,8	37,8	0,103
Вариант 2	Углепластик	15,541	904,9	1371,0	11,1	16,4	89,1	89,1	0,067
Вариант 3	Углепластик	10,323	737,7	1540,0	8,0	16,1	91,2	91,2	0,066
	Стеклопластик		230,7	560,2	11,2	25,7	24,0	24,0	
Вариант 4	Углепластик	12,465	874,0	1461,6	20,6	33,7	92,5	92,5	0,065
	Стеклопластик		275,6	517,4	13,5	22,6	24,2	24,2	

Также были проведены оптимизационные расчеты при разных вариантах сочетаний материалов из стеклопластика и углепластика, построены диаграммы функций напряженности, удлинения/прогибов балки, цены балки для различных вариантов армирования (цены приняты согласно рыночным данным). В данной статье приведены некоторые из них (рис. 3, 4). На рис. 3 представлена диаграмма функций напряженности при растяжении для различных вариантов армирования.

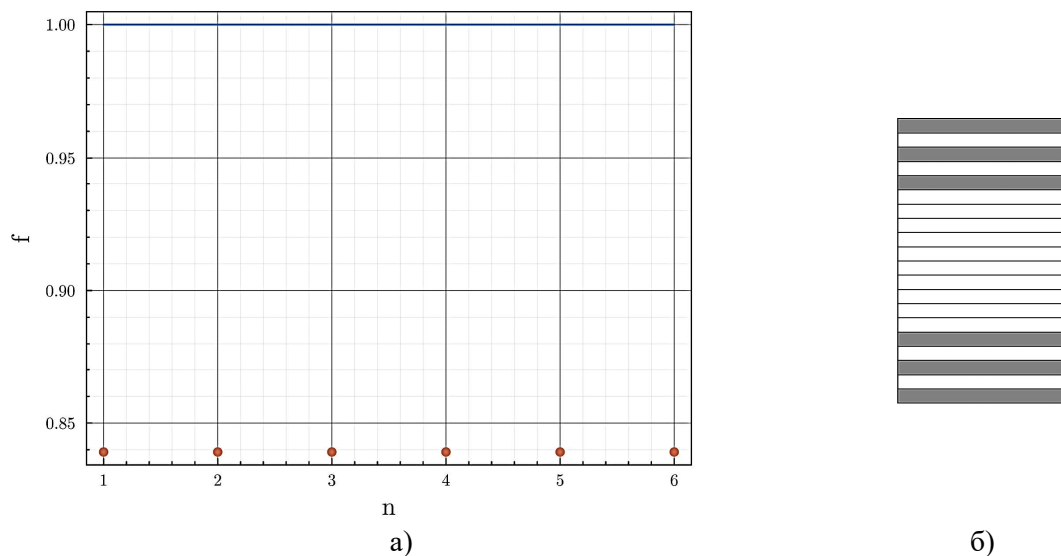


Рис. 3. Диаграмма а) функций напряженности при растяжении для различных вариантов армирования, где  $n$  – количество армирующих слоев б) пример армирования чередованием слоев (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Diagram of a) tensile stress functions for different reinforcement variants, where  $n$  is the number of reinforcements b) example of alternating layer reinforcement (illustration by the authors)

В результате расчета оптимальными вариантами армирования при растяжении получились все случаи, ниже синей линии ( $f=1$ ) (см. рис. 3).

Согласно диаграмме функций напряженности (рис. 4), при изгибе для различных вариантов армирования при заданных нагрузках, все варианты удовлетворяют условиям прочности.

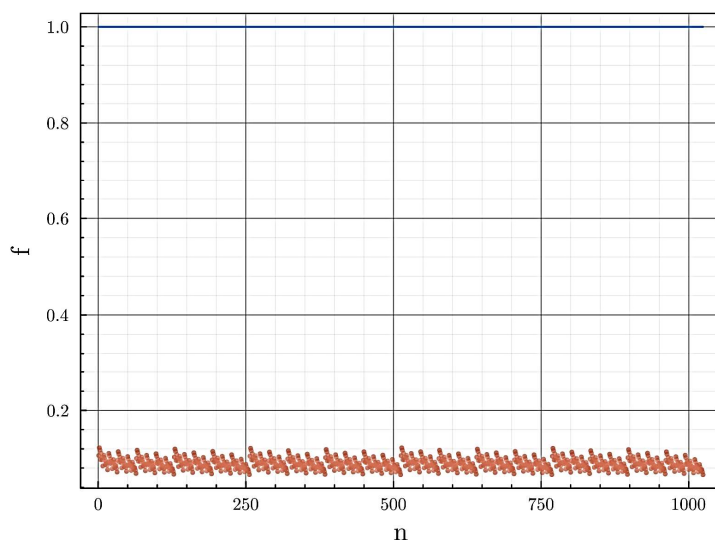


Рис. 4. Диаграмма функций напряженности при изгибе для различных вариантов армирования, где  $n$  – варианты армирования (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Diagram of bending stress functions for different reinforcement variants, where  $n$  – reinforcement variants (illustration by the authors)

На рис. 5 представлена диаграмма прогибов балки при изгибе (частный случай: армирование сверху и снизу), по которой можно сделать вывод, что только 4 варианта

расчета проходят по условию жесткости. Условие жесткости выполняется для случая с 4 слоями углепластика снаружи.

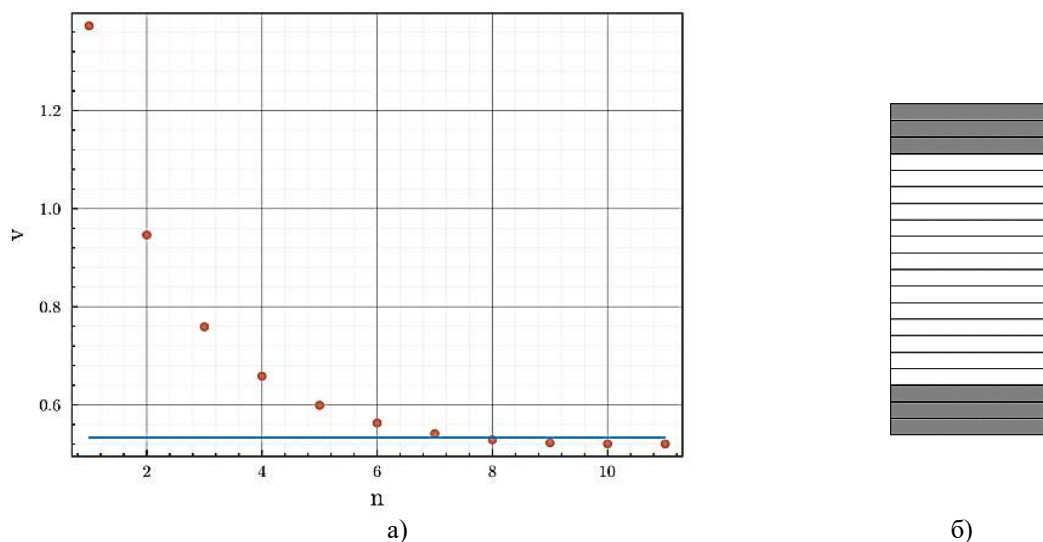


Рис. 5. Диаграмма а) прогибов балки для различных вариантов армирования сверху и снизу б) пример армирования композита (иллюстрация авторов)  
 Fig. 5. Diagram of a) beam deflections for different top and bottom reinforcement options b) example of composite reinforcement (illustration by the authors)

Функция напряженности, при сжатии для различных вариантов армирования также удовлетворяют условиям прочности. На рис. 6 представлена диаграмма влияния армирования на нагрузку, при которой происходит потеря устойчивости балки для различных вариантов армирования. Из рис. 6 видно, что только для варианта с 1 слоем армирования наружных слоев не выполняется условие устойчивости.

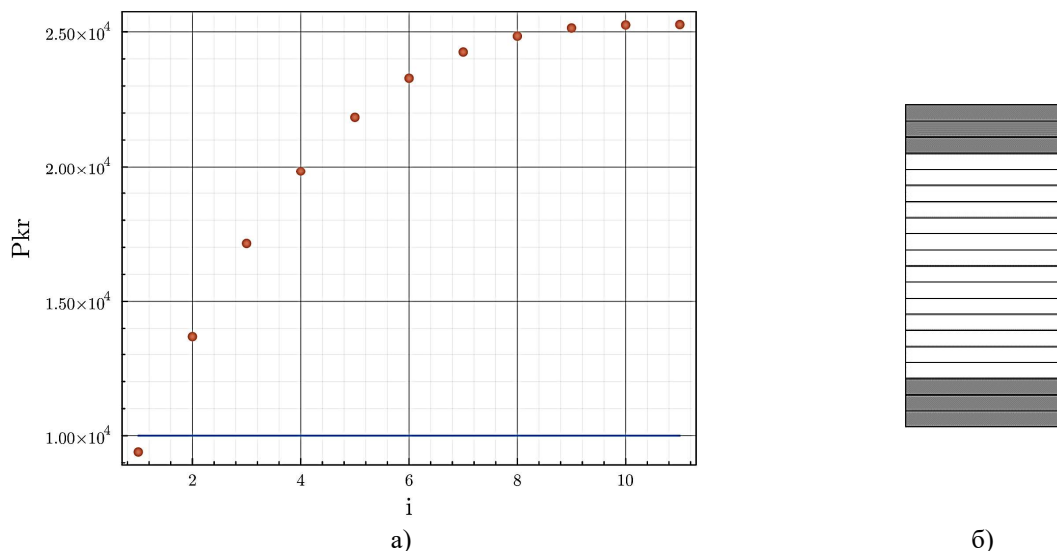


Рис. 6. Диаграмма а) нагрузка, при которой происходит потеря устойчивости балки при сжатии для различных вариантов армирования, где i- вариант армирования б) вариант армирования (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Diagram a) load at which the beam stability is lost in compression for different reinforcement variants, where i- reinforcement variant b) reinforcement variant (illustration by the authors)

#### 4. Обсуждения

Для дальнейших расчетов, верификации численной модели необходимо провести натурные испытания образцов с целью определения механических параметров гибридного композита и дальнейших расчетов сложных сечений и их минимизации по цене. Так, в работе [7] представлены результаты натурального исследования упруго-



механических характеристик гибридных полимерных композитов на основе сочетания углеродных и базальтовых волокон намоткой, в работе [8] проведено натурное исследование, предполагающее отрицательное влияние гибридизации на предел прочности при сжатии при смешивании стеклянных и углеродных волокон и полимерного связующего. Верификация модели по натурным испытаниям позволит ввести корректировки в модель напряженно-деформированного состояния для определенного типа гибридного полимерного композита.

Для полного регулирования упруго-механических свойств полимерных композитов путем оптимального соотношения различных типов наполнителей необходимо исключить главный недостаток в виде остаточных напряжений после формования изделия с учетом воздействия агрессивных факторов в процессе эксплуатации [5, 10, 11].

Для прогнозирования тех или иных параметров перспективным направлением является применение оптимальных моделей прогнозирования физико-механических характеристик, таких как машинное обучение [12-14] с использованием генетических алгоритмов, искусственных нейронных сетей, алгоритмов случайного леса, повышения градиента и др. [15-17].

### 5. Заключение

В данной работе представлены результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния гибридных полимерных композитов на растяжение, сжатие и изгиб:

1. При растяжении для гибридных композитов наблюдается уменьшение предельной нагрузки на 5,6% при 1 слое армирования наружных слоев углепластиками, на 7,8% при чередовании слоев, на 34% с 3 слоями армирования наружных слоев углепластиками по сравнению со стеклопластиками;

2. При сжатии для гибридных полимерных композитов наблюдается увеличение критической нагрузки при потере устойчивости для композитов с 1 слоем армирования наружных слоев углепластиками составляет 26,8%, при чередовании слоев 39,4% по сравнению со стеклопластиками;

3. Наблюдаются уменьшение прогибов при изгибе для гибридных полимерных композитов с 1 слоем армирования наружных слоев углепластиками на 20,3%, при чередовании слоев на 24,2%, с 7 слоями армирования наружных слоев углепластиками на 33,7% по сравнению со стеклопластиками;

4. Выполнена предварительная оценка оптимальных вариантов. Функции напряженности для различных видов нагружений удовлетворяют условиям прочности. Сравнительный анализ различного армирования на прочностные и жесткостные параметры позволяет подобрать необходимые параметры в зависимости от заданной нагрузки и требований к деформациям, прочности и устойчивости:

а) при изгибе условие жесткости выполняется для случая с 4 слоями углепластика снаружи и более;

б) только для варианта с 1 слоем армирования наружных слоев углепластиками не выполняется условие устойчивости.

### Список литературы/ References

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334. [Kablov E.N. Materials of new generation and digital technologies of their processing // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2020. T. 90. № 4. P. 331-334.]
2. Цыгвинцев, И.В. Применение композитных материалов в строительстве / И.В. Цыгвинцев, П.И. Постникова, И.В. Сенцов // Инновационное развитие. — 2017. — № 7(12). — С. 26–29. [Tsygvintsev, I.V. Application of composite materials in construction / I.V. Tsygvintsev, P.I. Postnikova, I.V. Sentsov // Innovative development. - 2017. - № 7(12). - P. 26-29.]
3. Храмова, Т.А. Исследование технологии применения композитных материалов для строительства и реконструкции объектов инфраструктуры / Т.А. Храмова // Аллея науки. — 2017. — Т. 1. — № 8. — С. 201–211. [Khramova, T.A. Research of the

- technology of composite materials application for construction and reconstruction of infrastructure objects / Т.А. Khramova // *Alley of Science*. - 2017. - Vol. 1. - № 8. - P. 201-211.]
4. Федонюк, Н.Н. Проектирование конструкций из гибридных полимерных композиционных материалов по прототипу и результаты исследований по выбору их рациональных составов и структур / Н.Н. Федонюк // *Труды ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова*. – 2011. – № 58. – С. 59-90. [Fedonyuk, N.N. Designing of structures from hybrid polymer composite materials according to the prototype and the results of research on the choice of their rational compositions and structures / N.N. Fedonyuk // *Proceedings of the Krylov Central Scientific Research Institute named after A.N. Krylov*. - 2011. - № 58. - P. 59-90.]
  5. Агеева Т. Г., Баринов Д. Я., Просвириков В. М. Определение теплофизических и оптических характеристик гибридных композиционных материалов для крыла суборбитального многоразового космического аппарата туристического класса // *XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, 2017*. – С. 44–45. [Ageeva T. G., Barinov D. Y., Prosvirikov V. M. Determination of thermophysical and optical characteristics of hybrid composite materials for the wing of suborbital reusable tourist-class spacecraft // *XLI Academic Readings on Cosmonautics, dedicated to the memory of Academician S. P. Korolev and other outstanding Russian scientists - pioneers of space exploration, 2017*. - P. 44-45]
  6. Л. А. Абдрахманова, К. Р. Хузиахметова, Р. К. Низамов, В. Г. Хозин. Модификаторы для жестких поливинилхлоридных композиций строительного назначения // *Строительные материалы*. – 2020. – № 12. – С. 34-39. – DOI 10.31659/0585-430X-2020-787-12-34-39. – EDN PIPPNJ [L. A. Abdrakhmanova, K. R. Khuziakhmetova, R. K. Nizamov, V. G. Khozin. Modifiers for rigid polyvinyl chloride compositions for construction purposes // *Construction materials*. – 2020. – No. 12. – P. 34-39. – DOI 10.31659/0585-430X-2020-787-12-34-39. – EDN PIPPNJ]
  7. Журковский М. Е., Сакошев З. Г., Блазнов А. Н. Исследование механических свойств намоточных гибридных полимерных композиционных материалов // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2018. – № 3 (23). – С. 39–43. [Zhurkovskiy M. E., Sakoshev Z. G., Blaznov A. N. Research of mechanical properties of winding hybrid polymer composite materials // *South-Siberian Scientific Bulletin*. - 2018. - № 3 (23). - P. 39-43.]
  8. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы: учебное пособие. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с. // *Электронно-библиотечная система IPR BOOKS*. URL: <http://www.iprbookshop.ru/13214.html> (дата обращения: 10.09.2023). [Mikhailin Yu. A. Structural polymer composite materials: textbook. - SPb.: Scientific bases and technologies, 2010. - 822 p. // *Electronic library system IPR BOOKS*. URL: <http://www.iprbookshop.ru/13214.html> (reference date: 10.09.2023).]
  9. Resource-saving polymer compositions for construction purposes / R. Galeev, R. Nizamov, L. Abdrakhmanova, V. Khozin // *IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. Vol. 890*. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012111. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012111. – EDN LOMNOQ.
  10. Lu, L.; Dao, M.; Kumar, P.; Ramamurty, U.; Karniadakis, G.E.; Suresh, S. Extraction of mechanical properties of materials through deep learning from instrumented indentation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2020, 117, 7052–7062. DOI: 10.1073/pnas.1922210117.
  11. Yang, Z.; Yabansu, Y.C.; Jha, D.; Liao, W.-K.; Choudhary, A.N.; Kalidindi, S.R.; Agrawal, A. Establishing structure-property localization linkages for elastic deformation of three-dimensional high contrast composites using deep learning approaches. *Acta Mater.* 2018, 166, 335–345. DOI: 10.3390/met12020223.
  12. Karamov, R.; Akhatov, I.; Sergeichev, I.V. Prediction of Fracture Toughness of Pultruded Composites Based on Supervised Machine Learning. *Polymers* 2022, 14. <https://doi.org/10.3390/polym14173619>.

13. Song, L.; Meng, S.; Xu, C.; Fang, G.; Yang, Q. Finite element-based phase-field simulation of interfacial damage in unidirectional composite under transverse tension. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 2019, 27, 55011. DOI: 10.1088/1361-651X/ab1f63.
14. Almeida-Fernandes, L.; Silvestre, N.; Correia, J.R.; Arruda, M. Fracture toughness-based models for damage simulation of pultruded GFRP materials. *Compos. Part B Eng.* 2020, 186. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107818.
15. Fernandes, L.A.; Silvestre, N.; Correia, J.R. Characterization of transverse fracture properties of pultruded GFRP material in tension. *Compos. Part B Eng.* 2019, 175. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107095.
16. Chen, C.-T.; Gu, G.X. Machine learning for composite materials. *MRS Commun.* 2019, 9, 556–566. DOI: 10.1557/mrc.2019.32.
17. Ramprasad, R.; Batra, R.; Pilania, G.; Mannodi-Kanakkithodi, A.; Kim, C. Machine learning in materials informatics: Recent applications and prospects. *NPJ Comput. Mater.* 2017, 3, 1. DOI: 10.1038/s41524-017-0056-5.

### Информация об авторах

**Фарид Рашитович Шакирзянов**, кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация  
Email: faritbox@mail.ru

**Валиев Алмаз Илсурович**, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация  
E-mail: tatcomposite@mail.ru

**Сулейманов Альфред Мидхатович**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, член-корр. Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация  
E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

**Низамов Рашит Курбангалиевич**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, академик Академии наук Республики Татарстан г. Казань, Российская Федерация  
Email: Nizamov@kgasu.ru

### Information about the authors

**Farid R. Shakirzyanov**, candidate of physical and mathematical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation  
Email: faritbox@mail.ru

**Almaz I. Valiev**, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation  
Email: tatcomposite@mail.ru

**Alfred M. Suleymanov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, corr.-m. Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation  
E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

**Rashit K. Nizamov**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, academic of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation  
Email: Nizamov@kgasu.ru