This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Research Article
ISSN 2304-6295
Received: October 13, 2024 *Accepted: October 27, 2024* *Published: November 5, 2024*

Thermomechanical behavior of polymer composites and its calculation with finite element modeling

Zadorin, Aleksandr Aleksandrovich[1*]
Korolev, Aleksandr Sergeevich[1*]
Mishnev, Maxim Vladimirovich[1]

[1] South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation aazadorin@susu.ru (Z.A.A.), korolevas@susu.ac.ru (K.A.S.), mishnevmv@susu.ru (M.M.V.)
Correspondence:* email aazadorin@susu.ru, korolevas@susu.ac.ru; contact phone +79227506508

Keywords:

Polymers; Composites; Thermal loads; Viscoelasticity; Stress accumulation; Industrial chimneys; Gas ducts; Finite element (FE) modeling; Fiber reinforced plastic (FRP); Coefficient of thermal expansion (CTE)

Abstract:

The object of research is thermomechanical behavior of polymer composites based on thermoset epoxy binder and T23 fiberglass fabric. In the operating conditions of industrial chimneys, which include high temperatures, long-term operation, cyclic mechanical and temperature impact, prolonged thermal aging, it is yet to be determined. One of the major concerns is the definition of thermomechanical properties. This work is devoted to the development of the finite element (FE) model which should allow us to predict properties of composite and could be used for calculations of composite structures. **Method.** Tensile tests were conducted in the specially manufactured testing chamber, which allowed us to acquire the modulus of elasticity and coefficient of thermal expansion (CTE) of both polymer and composite. Then, the FE model was developed based on the previous polymer's FE model. **Results**. The proposed FE model showed satisfying results and predicted modulus of elasticity and CTE of polymer composite with high accuracy. The model then was tested on another data from a different batch and appeared to be accurate. Then the model was compared to traditional rod and shell calculations of temperature stress and the results were similar, confirming the adequate stress-strain state of the modeled structure.

1 Introduction

Полимерные композиты представляют собой эффективный материал для создания газоходов и дымовых труб благодаря оптимальному сочетанию их прочности и малого веса, устойчивости к агрессивным воздействиям окружающей среды [1], [2], а также возможности модифицирования свойств за счет изменения структуры материала [3]. Важнейшим преимуществом полимерных композитов является их высокая коррозионная стойкость, которая значительно превосходит показатели традиционных материалов, таких как сталь или железобетон, склонных к быстрому разрушению под воздействием коррозии [4].

На данный момент в таких конструкциях несущая способность не используется в полной мере из-за ограниченного понимания его поведения при длительном термомеханическом воздействии, а также недостаточного отражения этих аспектов в нормативных документах (в отличие от традиционных материалов). Обычно внешние механические нагрузки воспринимаются поддерживающими элементами, такими как решетчатые башни, оттяжки или другие трубы, например при реконструкции и монтаже газоотводящих стволов внутри существующих сооружений. Однако существуют примеры успешного применения несущих стеклопластиковых труб. Так, например, была возведена 52-метровая отдельно стоящая труба на

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

сахароперерабатывающем заводе в США в 1984 году [5]. Это свидетельствует о перспективах улучшения эффективности использования композитов в строительной отрасли посредством устранения информационных пробелов и обновления соответствующих норм. Разработка несущих композитных труб и газоходов может привести к снижению затрат на строительство за счет исключения необходимости в поддерживающих конструкциях или их удешевлении, а также к сокращению расходов на обслуживание, поскольку металлические элементы поддерживающих башен, склонны к коррозии.

Применение материала в условиях эксплуатации дымовых труб и газоотводящих трактов требует решения ряда задач, включая изучение влияния температуры на физико-механические свойства, процессов температурного старения, реологических характеристик материала (вязкоупругое поведение), возникновение температурных напряжений и их возможная аккумуляция.

Вопросы жесткости и прочности при нормальных и повышенных температурах в силу того, что эта тема является актуальной для многих областей применения, изучались довольно обширно. В [6] приводятся кривые напряжений-деформаций для ряда композитов с разной гибридизацией при температурах 25-100°C, а также кривые падения модуля упругости при действии температуры. В [7] проведены испытания трехслойных сэндвичевых систем, состоящих из двух стеклопластиковых обшивок и изолирующего ядра из фенольной пены. Это исследование ценно для нашей области, т.к. стеклопластиковые трубы изготавливаются в том числе трех- или пятислойными. Однако в [7] нагрев производился равномерно с обеих сторон, а в дымовых трубах происходит неравномерное воздействие горячих отводимых газов и холодного наружного воздуха. С одной стороны, это приводит к дополнительным напряжениям от изгиба, а с другой, наружная обшивка остается холодной и дольше не теряет жесткость. В любом случае, анализ воздействия температур на НДС конструкций необходим. В наших предыдущих работах проводилось изучение свойств полимеров и композитов при нормальных и повышенных температурах: получены данные о жесткостных характеристиках [8], изучалась износостойкость материала [9], рассматривались вопросы прогнозирования свойств как полимеров [10], [11], так и композитов [12]. Кроме того, проводилось определение их коэффициента линейного термического расширения (КЛТР), его нелинейности и взаимосвязи с другими параметрами [8], [13].

Температурное старение материала также изучалось нами и другими исследователями. В [14] было установлено, что этот эффект зависит от значения температуры и может быть как положительным (вызывая эффект доотверждения), так и отрицательным (приводя к деградации материала). То есть, температурный режим конструкции оказывает прямое влияние на ее долговременные свойства. Также изучалось влияние старения на работу в разных условиях [15–17]. Нами была проведена оценка влияния температурного выдерживания на жесткость и КЛТР материала и сделаны предположения о влиянии старения на внутреннюю макромолекулярную структуру [8], [18], [19].

Вопросы вязкоупругого поведения полимеров были исследованы многими учеными, и разработаны методы оценки этого явления, включая ускоренные испытания на основе температурно-временной аналогии [20]. Имеются данные о влиянии вязкоупругости на поведение материала при динамических и циклических нагрузках, а также о влиянии внутренней структуры и армирования [21], [22]. Подчеркивается важность учета вязкоупругих свойств материала [23]. Тем не менее, каждый раз возникает необходимость выбора подходящей модели вязкоупругого материала и определения её параметров для конкретного случая. В общем, методики тестирования на ползучесть хорошо проработаны, включая нормативные документы. Однако, учитывая особенности эксплуатации дымовых труб и газоходов, где присутствуют долговременные нагрузки, продолжительное тепловое воздействие, а также возможные циклические температурные и механические воздействия, необходима модель вязкоупругого материала, которая будет учитывать одновременные нелинейные изменения жесткости, коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) и реологических параметров при нагревании. Одно из следствий вязкоупругой природы полимеров – возможность накопления деформаций и напряжений при циклических воздействиях. Их влияние может быть непредсказуемым, т.к. оно зависит одновременно от вязкоупругих свойств, температурных свойств и условий работы сооружения. Эти вопросы поднимались учеными ранее. Установлено [24], что циклические температурные воздействия приводят к снижению прочности и жесткости материала.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Таким образом, определение термомеханических и реологических свойств материала является актуальной темой, широко изучаемой по всему миру. Моделирование и определение механических и температурных свойств термореактивных полимеров и стеклопластиков на их основе были объектами многих исследований. Одним из направлений исследований является моделирование материала и расчет его характеристик различными способами. Можно выделить 2 основных подхода:

1) Аналитическое моделирование с помощью функциональных моделей: начиная от классической модели вязкоупругого тела Кельвина-Фойгта [6], [25], [26], заканчивая моделями с релаксационным ядром и графическими методами прогнозирования деформаций [27], [28];

2) структурное моделирование представлено в различных исследованиях, где структура была смоделирована с помощью компьютерных программ. Например, проектирование трехмерных молекулярных моделей в соответствии с определенными углами связей молекул полимера [29]–[32], молекулярно-динамическое проектирование молекулярной структуры и свойств полимера [33], [34], компьютерное моделирование многомасштабных гетерогенных структур наполненных полимеров и стеклопластиков на молекулярном и надмолекулярном уровне [35]–[37].

В недавних исследованиях моделирование сочетает функциональные и структурные многомасштабные методы [38] с термическими зависимостями механических свойств. Однако прогнозирование эксплуатационных свойств отвержденных полимеров и стеклопластиков остается актуальной научной проблемой, особенно для структурных моделей. Они требуют определения основных элементов, их конфигурации и взаимного расположения в модели, а также механических и тепловых свойств этих элементов.

Использование КЭ-моделирования может позволить легко и быстро прогнозировать эксплуатационные свойства полимеров и стеклопластиков. По этой причине к нему существует постоянный интерес [39], [40].

Целью данного исследования в рамках гранта РНФ №23-29-00425 была разработка альтернативной расчетной модели армированного стекловолокном полимера (стеклопластика), основанной на ранее предложенной КЭ-модели чистого полимера и позволяющей прогнозировать термомеханические характеристики композита, температурные напряжения, обеспечивать корректное определение напряженно-деформированного состояния рассчитываемого элемента, сопоставимое с другими стандартными способами моделирования.

Для этого были поставлены следующие задачи:

- Испытать образцы стеклопластиков и связующего для определения их термомеханических характеристик при различных температурах;
- Разработать КЭ-модель стеклопластика на основе ранее предложенной модели полимера;
- Сравнить работу модели с экспериментальными данными и с КЭ-расчетом по стандартной схеме;
- Сделать выводы о применимости модели и определить направления по ее усовершенствованию.

2 Materials and Methods

Состав полимерного композита:

- Эпоксидная смола KER 828 (аналог ЭД20), Производитель: KUMHO P&B Chemicals;
- Изометилтетрагидрофталевый ангидрид (ИЗОМТГФА) (отвердитель для эпоксидной смолы). Производитель: ASAMBLY Chemicals company Ltd., Nanjing, China;
- Алкофен (ускоритель отверждения эпоксидных смол). Производитель: АО "Эпитал", Москва, Российская Федерация;
- Стеклоткань Т23 [41].

Испытания проводились на испытательной машине Tinius Olsen H100KU (Tinius Olsen Ltd., Суррей, Англия) в специально изготовленной камере, оснащенной нагревательными элементами и термостатом (рис. 1).

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

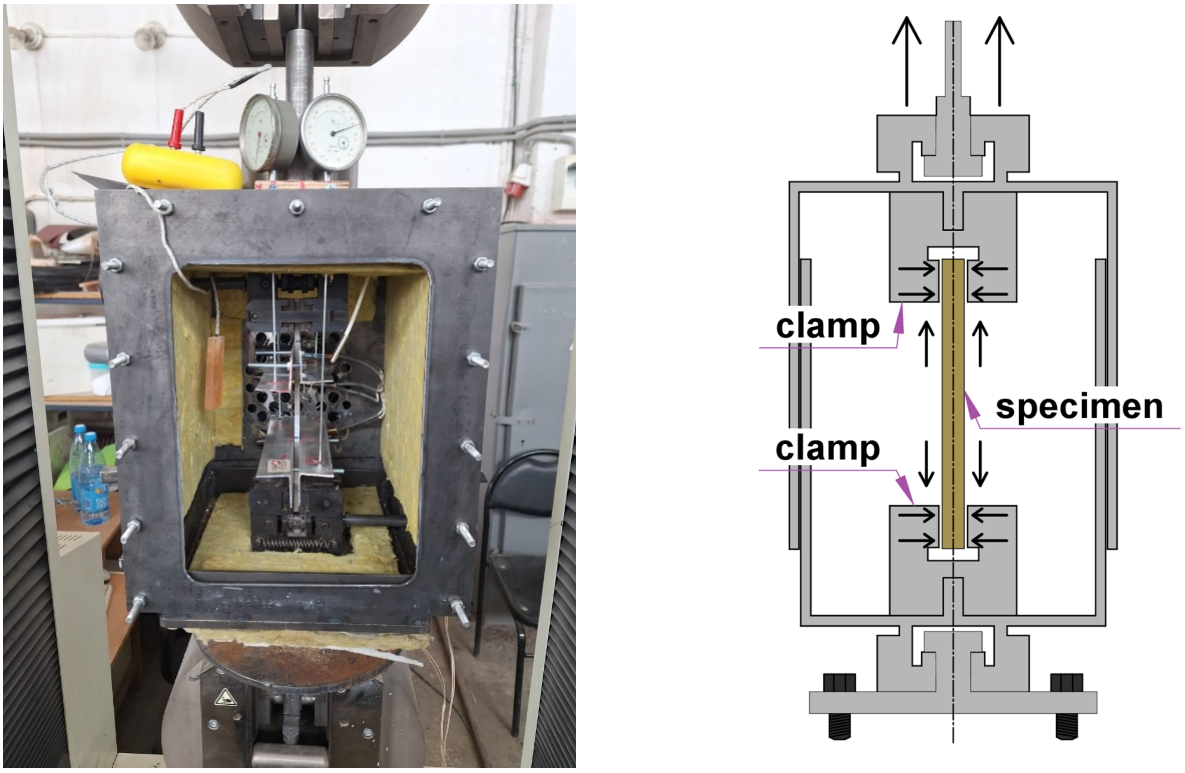

Рис. 1 – Испытательная камера
Fig. 1 – Testing chamber

Методика испытаний на растяжение аналогична ранее подробно описанной авторами [42]. В испытательной камере были определены модуль упругости и прочность чистого связующего и композита при нормальной и повышенных температурах. Коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) был определен в предыдущих исследованиях [8], а также определялся в данной камере путем освобождения верхнего зажима и замера удлинения образца при нагреве.

Ранее авторами была представлена конечноэлементная (КЭ) модель отвержденного полимера [43], позволяющая определять модуль упругости и прочность материала при нормальной и повышенных температурах. В продолжение это работы предлагается модель армированного полимера (стеклопластика).

КЭ-модель стеклопластика была основана на КЭ-модели отвержденного полимера. Как отмечалось ранее, структура модели самоподобна, и мы не строим ее, используя реальный размер и количество связей. Модель полимера представляет собой приближение к реальной хаотической структуре, усредненное на основе условия соответствия плотности связей на единицу объема и соответствия свойств материала. Используя тот же принцип, была разработана модель стеклопластика путем введения стержней, имитирующих стекловолокно. Количество этих элементов и их толщина определялись по соответствующей действительности относительной площади (площади волокон, отнесенной к площади сечения). Эта величина была определена авторами ранее с помощью микрофотографий сечения композита [12]. Стержни из стекловолокна были размещены максимально равномерно по площади сечения. В целом, модель аналогична представленной ранее [43]. 3D вид модели композита приведен на рис. 2.

Характеристики стекловолокна: стеклоткань Т23 изготовлена из E-glass со средним модулем упругости 80–81 ГПа и прочностью 3000–3500 МПа. В текущей модели мы использовали модуль упругости 80 ГПа и прочность 3300 МПа.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

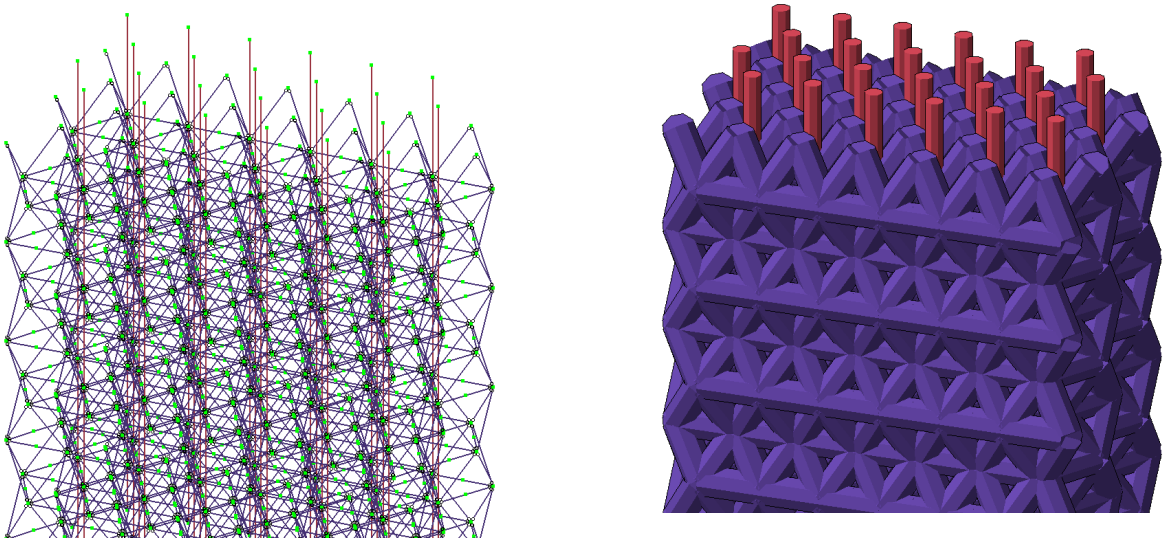

Рис. 2 – Общий вид фрагмента модели и 3D – вид поперечного сечения КЭ-модели композита
Fig. 2 – General view of the fragment of the model and 3D view of the cross-section

Ранее авторами были получены значения КЛТР при различных температурах для полимеров и композитов [8]. Однако при одном и том же связующем свойства материала могут меняться при использовании различных стеклотканей. Чтобы получить возможность рассчитывать строительные конструкции и сооружения, в т.ч. с учетом температурных напряжений и их накопления, например, в дымовых трубах; вести вариантное проектирование; подбирать оптимальное армирование, необходима аналитическая или КЭ модель, позволяющая менять параметры армирования и получать адекватный результат. Имеющаяся на данный момент КЭ-модель позволяет это делать, но без учета температур. Поэтому дальнейшим шагом было внедрение температурного фактора в модель.

Программа позволяет прикладывать температурные нагрузки на стержни, задавая температуру нагрева и КЛТР. Как известно [8], модуль упругости и КЛТР как полимерной матрицы, так и композитов меняется при нагреве, причем нелинейно. Поэтому КЛТР и Е определялись отдельно для заданных значений температур путем приложения минимальной температуры нагрева $dt = 1℃$ и задания параметров модели, соответствующих данной температуре. Таким образом, в КЭ-модели композита на полимерные связи и стекловолокно прикладывалась температурная нагрузка, ранее полученный КЛТР для полимера и известный КЛТР стекловолокна. Было установлено, что оптимальным оказывается значение КЛТР связей на 10% ниже соответствующего полимера, что связано с тем, что сами по себе связи более жесткие и прочные, чем материал в целом. Далее определялся общий КЛТР полимерного или композитного образца и модуль упругости по следующему алгоритму (см. рис. 3):

1. Один конец образца в модели освобождался от связей. Задавались свойства элементов, соответствующие расчетной температуре. На элементы прикладывался нагрев на 1℃. По полученному в результате расчета удлинению образца определялся его КЛТР, пользуясь известной зависимостью (1):

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \,, \tag{1}$$

где α - коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР),
L - изначальная длина образца,
ΔT - изменение температуры.

2. Далее, зная КЛТР образца, его свободный конец в модели защемляли и прикладывали температуру аналогичным образом. Пользуясь другой известной зависимостью (2), определялся модуль упругости при данной температуре:

$$\sigma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \,, \tag{2}$$

Где σ - нормальные напряжения от действия температуры (определялись делением суммарной продольной реакции опор образца на площадь сечения),
E - модуль упругости.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

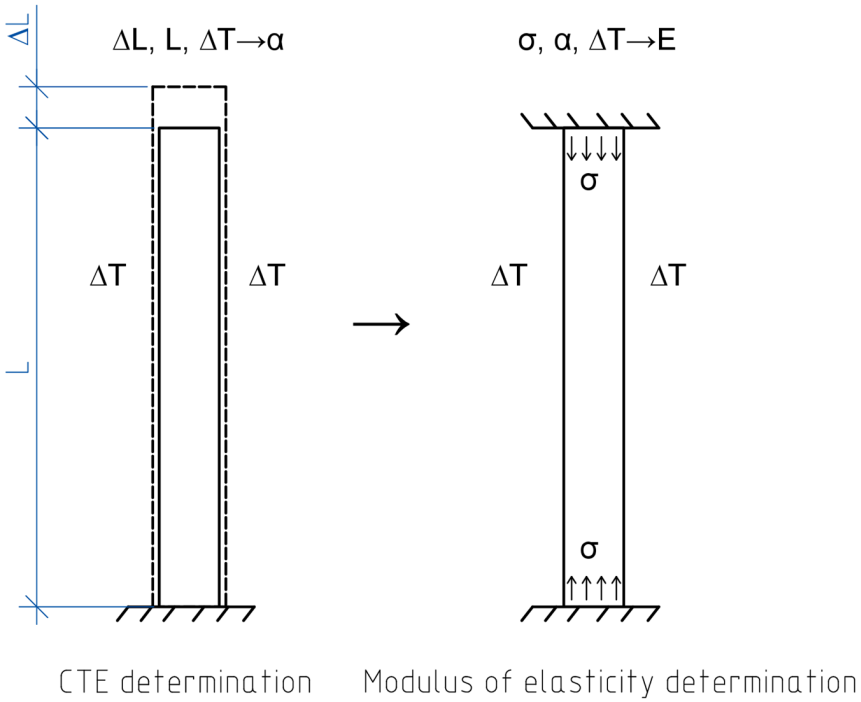

Рис. 3 – Алгоритм расчета КЭ-модели
Fig. 3 – FE model's calculation algorithm

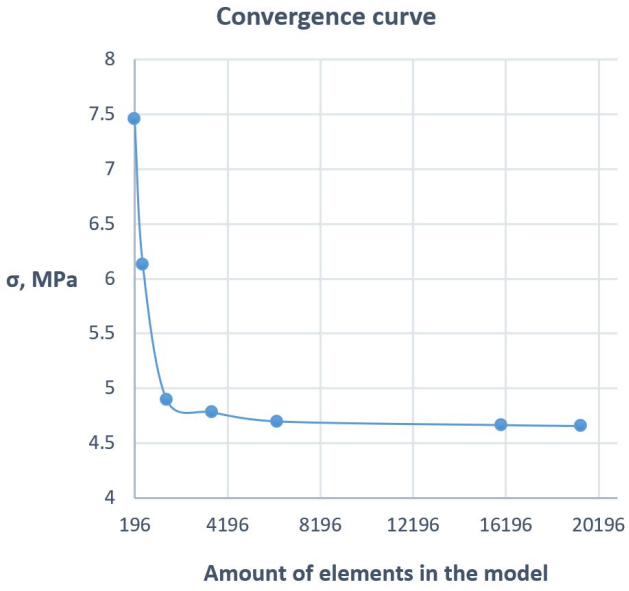

Рис. 4 – Кривая сходимости
Fig. 4 – Convergence curve

Как ранее было упомянуто, структура полимерной матрицы в модели самоподобна. Это свойство позволяет строить модель с любым количеством базовых ячеек на единицу объема. Оценка адекватности принятого масштаба была определена по стандартной кривой сходимости модели. За контролируемый параметр были приняты нормальные напряжения образца (как его суммарная реакция опоры, поделенная на площадь сечения). Ось абсцисс – число элементов в модели. На рис. 4 приводится кривая сходимости. Как видно из графика, при порядке элементов 10^4 достигается сходимость. В итоговой расчетной модели был 19451 элемент.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

3 Results and Discussion

Модель композита сразу показала высокую сходимость с имеющимися экспериментальными данными для подобного композита [8]. В таблице 1 приводится сравнение экспериментальных и полученных по модели данных.

Таблица 1. Модуль упругости композита
Table 1. Elastic modulus of the composite

Температура, ℃	Экспериментальные данные		Рассчитанные по модели данные	
	E, МПа	R, МПа	E, МПа	R, МПа
25℃	12000	160	13000	168

Однако изначально расчет при повышенных температурах не показал адекватных результатов. Исходя из того, что модуль упругости и прочность во всех случаях были завышенными и анализируя модель, было выдвинуто предположение, что это связано с тем, что в модели не учитывается ослабление совместной работы волокон и полимера. Была предпринята попытка условно учесть этот фактор. По аналогии с тем, как в модели полимера мы снижали толщину связей для моделирования их ослабления, в модели композита снижалась толщина волокон, т.е. суммарная продольная составляющая жесткости сечения снижалась.

Таким образом, моделировалось не полное вовлечение волокон в работу сечения, обусловленное снижением жесткости полимерной матрицы. Был введен коэффициент армирования, представляющий собой отношение расчетной площади армирования к полному нормальному значению. Значения коэффициента были аппроксимированы по известным экспериментальным значениям модуля упругости. Расчетные значения относительной площади армирования (отношение площади волокна в сечении к общей площади сечения) приводятся на графике на рисунке 5.

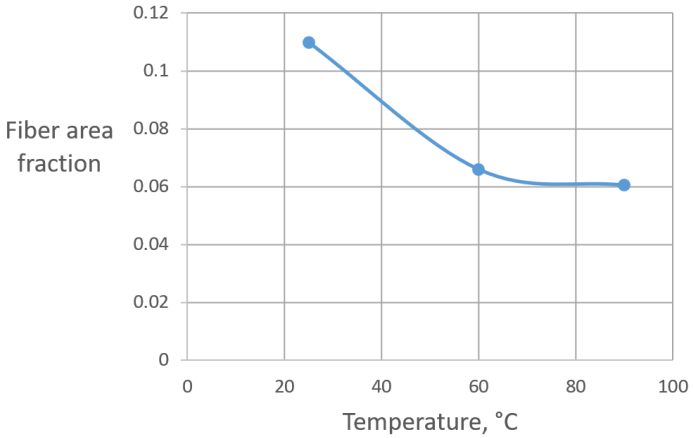

Рис. 5 – Доля площади волокна
Fig. 5 – Fiber area fraction

Таким образом, была получена возможность моделировать работу композита при любой температуре, что открыло нам возможности для перехода к температурным напряжениям и деформациям.

В усовершенствованной модели с помощью методики, описанной ранее, были получены значения модуля упругости и КЛТР полимера и стеклопластика при нормальной и повышенных температурах, и они имели хорошую сходимость с имеющимися экспериментальными данными. Полученные значения в сравнении с известными из предыдущих исследований [8] и испытаний приводятся в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчетов по модели и сравнение с экспериментальными данными
Table 2. The results of calculations based on the model and comparison with experimental data

Температура, ℃	Расчет по модели		Экспериментальные данные		Погрешность, %	
	E, МПа	КЛТР, 1/℃	E, МПа	КЛТР, 1/℃	E, МПа	КЛТР, 1/℃
Чистое связующее						

Zadorin, A.; Korolev, A.; Mishnev, M.
Thermomechanical behavior of polymer composites and its calculation with finite element modeling;
2024; Construction of Unique Buildings and Structures; **113** Article No 11312. doi: 10.4123/CUBS.113.12

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

25℃	2780	$22 \cdot 10^{-6}$	2700	$21 \cdot 10^{-6}$	2.9	4.5
50℃	2390	$25 \cdot 10^{-6}$	2300	$24 \cdot 10^{-6}$	3.8	4
75℃	2213	$27 \cdot 10^{-6}$	2100	$26 \cdot 10^{-6}$	5.1	3.7
100℃	1428	$40 \cdot 10^{-6}$	1400	$38 \cdot 10^{-6}$	2	5
Стеклопластик						
25℃	12745	$8.91 \cdot 10^{-6}$	12000	$9 \cdot 10^{-6}$	5.8	1
50℃	9481	$10.3 \cdot 10^{-6}$	9900	$10 \cdot 10^{-6}$	4.2	2.9
75℃	7975	$11.3 \cdot 10^{-6}$	8360	$11 \cdot 10^{-6}$	4.6	2.7
100℃	6743	$12.7 \cdot 10^{-6}$	7300	$12 \cdot 10^{-6}$	7.6	5.5

Таким образом, модель позволяет прогнозировать термомеханические характеристики композита с высокой точностью, зная характеристики связующего и стеклоткани. Кроме того, из этого следует соответствие рассчитанного напряженно-деформированного состояния (НДС) композита действительности в целом. Для проверки этих выводов далее производится:

1. Проверка модели для предсказания модуля упругости другого композита из другой партии.
2. Сравнительный расчет защемленного элемента на температурное воздействие по предлагаемой структурной модели и по стандартным стержневой и оболочечной моделям.

На данный момент имеются данные о модуле упругости с другой партии образцов связующего и композита, используемых в другом исследовании, при нормальной температуре. Таким образом, задаваясь известными параметрами смолы (и перенося их в модель с помощью корреляционных зависимостей, полученных ранее [43]), проверим работоспособность модели на других данных:

Таблица 3. Результаты расчетов по модели и сравнение с экспериментальными данными другой партии образцов
Table 3. The results of calculations based on the model and comparison with experimental data

Температура, ℃	Расчет по модели	Экспериментальные данные	Погрешность, %
	E, МПа	E, МПа	E, МПа
Чистое связующее			
30℃	3049	3000	1.6
Стеклопластик			
30℃	11887	10783	9.3

Как видно из таблицы 3, модель также хорошо себя показывает на другом наборе данных. Таким образом, делается вывод о возможности применения модели для прогнозирования свойств полимерных композитов различных составов, исходя из свойств связующего и армирования. В перспективе это может позволить ускорить и удешевить проектирование стеклопластиковых конструкций, т.к. отпадает необходимость экспериментального определения характеристик каждого состава. В особенности это упрощает вариантное проектирование и позволяет подобрать оптимальный вариант, при необходимости проверив экспериментально только его.

Сравнительный расчет для подтверждения НДС образца проведен по следующим схемам (температура нагрева одинакова и равна 50℃, во всех случаях стержень защемлен с обоих концов и в нем возникают температурные напряжения):

1. Вышеописанный расчет по структурной модели;
2. Расчет образца как защемленного стержня;
3. Расчет образца как защемленной пластины.

Ниже приводятся изображения схем (рис. 6) и сравнение результатов (таблица 4):

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

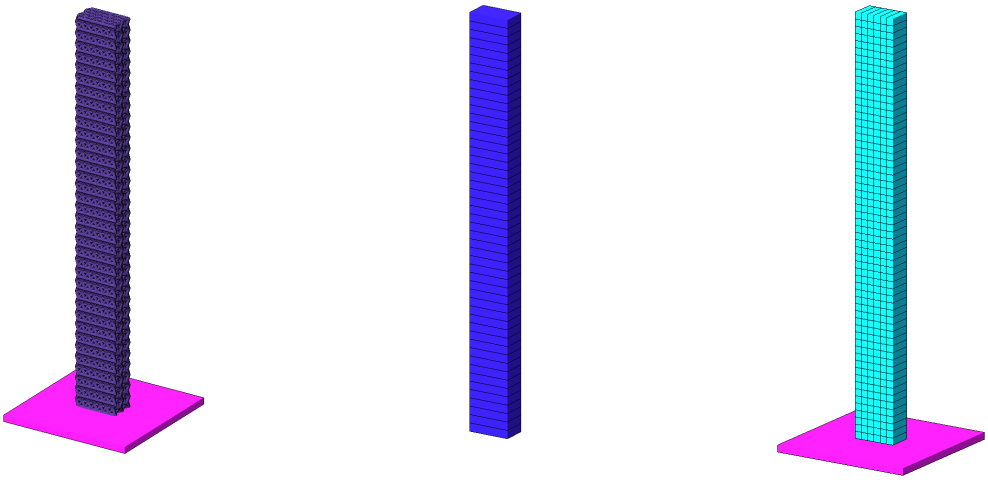

Рис. 6 – Варианты расчетных моделей
Fig. 6 – Variants of calculation models

Таблица 4. Результаты расчетов по модели и сравнение с экспериментальными данными другой партии образцов
Table 4. The results of calculations based on the model and comparison with experimental data

Параметр	Структурная КЭ-модель	Стержневая модель	Оболочечная модель
σ, МПа	4.02	4.08	4.1
E, МПа	8035	8160	8218

Таким образом, предлагаемая структурная модель имеет НДС, аналогичное стандартным схемам. При этом имея преимущество в виде возможности модифицирования свойств связующего и армирования по отдельности, изменяя и прогнозируя свойства композита в целом.

Из недостатков модели можно отметить условный учет неидеальной совместной работы волокна и полимера при нагреве, на данный момент учитываемый с помощью занижения расчетной площади волокна в сечении по корреляционной зависимости. Хоть на данный момент модель позволяет получать точный результат, эта зависимость может оказаться неверной при использовании другого связующего или типа армирования.

4 Conclusions

Для развития применения несущих и самонесущих стеклопластиковых труб одним из направлений исследований стало аналитическое и компьютерное моделирование работы полимеров как чистых, так и армированных стекловолокном. В качестве альтернативы стандартным аналитическим решениям, таким как, например, модель Кельвина-Фойгта и разрабатываемым производным из нее, в данной работе была предложена альтернативная структурная КЭ-модель полимера и композита. Эта модель позволила с высокой точностью определять модуль упругости и КЛТР композиционного материала по известным свойствам его составляющих. При этом эта же модель в целом показывает НДС, аналогичное стандартным решениям. Таким образом, она может применяться в том числе при расчетах и проектировании стеклопластиковых конструкций, за счет своих особенностей позволяя вести вариантное проектирование, подбирать оптимальный состав композита.

В данной статье:

1) Выполнено экспериментальное исследование стеклопластика на эпоксидном связующем и самого связующего при различных температурах для определения его модуля упругости и КЛТР.

2) На основе ранее выдвинутой КЭ-модели связующего, предложена КЭ-модель стеклопластика.

3) Настроенная по экспериментальным данным и известным корреляционным зависимостям под конкретное связующее и армирование модель была использована для расчета КЛТР и модуля упругости композита; результаты сопоставлены с экспериментальным данными и оказались точными.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

4) Напряженно-деформированное состояние образца, определенное по предлагаемой модели, было сопоставлено со стандартными стержневой и оболочечной моделями; результаты также были практически одинаковы.

В дальнейшей работе планируется более точное моделирование зоны контакта волокна и полимера и сдвиговых деформаций в матрице. Также в дальнейшей работе планируются испытания образцов других форм, более близких к интересующих нас оболочкам, например кольцо, и задание аналогичной формы нашей КЭ-модели, т.к. ее строение позволяет задать любую форму.

Таким образом, была разработана и проверена КЭ-модель стеклопластика, имитирующая его внутреннюю структуру. Данная модель позволяет:

1) Прогнозировать свойства композита, основываясь на свойствах его составляющих: полимерного связующего и армирования;

2) Прогнозировать температурные напряжения и деформации этого композита;

3) Сократить стоимость и сроки проектирования стеклопластиковых конструкций за счет возможности виртуально проверить большое количество возможных составов, подобрать оптимальный, при необходимости проведя поверочные испытания только одного интересующего состава.

Предлагаемый способ расчета полимерных композитов является перспективной альтернативой традиционным аналитическим расчетам, в первую очередь за счет упрощения и доступности не только для ученых, но и для инженеров-проектировщиков.

5 Fundings

Проект выполнен при поддержке Российского научного фонда, грант №23–29–00425 https://rscf.ru/project/23-29-00425/.

The work was funded by the Russian Science Foundation, grant №23–29–00425 https://rscf.ru/project/23-29-00425/.

6 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

1 Astashkin, V.M. and Mishnev, M. V. (2016) On the Development of the Manufacturing Technology of Fiberglass Cylindrical Shells of Gas Exhaust Trunks by Buildup Winding. Procedia Engineering. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.144

2 El Damatty, A.A., Awad, A.S. and Vickery, B.J. (2000) Thermal Analysis of FRP Chimneys Using Consistent Laminated Shell Element. *Thin-Walled Structures*, **37**. https://doi.org/10.1016/S0263-8231(99)00041-5

3 Kumar, K., Dixit, S., Prakash, A., Vatin, N.I., Ul Haq, M.Z., Tummala, S.K., Bobba, P.B., Sobti, R. and Kalpana, K. (2023) Understanding Composites and Intermetallic: Microstructure, Properties, and Applications. E3S Web of Conferences, EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001196

4 Idrees, M., Akbar, A., Saeed, F., Saleem, H., Hussian, T. and Vatin, N.I. (2022) Improvement in Durability and Mechanical Performance of Concrete Exposed to Aggressive Environments by Using Polymer. *Materials*, **15**. https://doi.org/10.3390/ma15113751

5 Plecnik, J.M., Whitman, W.E., Baker, T.E. and Pham, M. (1984) Design Concepts for the Tallest Free-standing Fiberglass Stack. *Polymer Composites*, **5**. https://doi.org/10.1002/pc.750050305

6 Tefera, G., Adali, S. and Bright, G. (2022) Flexural and Viscoelastic Properties of FRP Composite Laminates under Higher Temperatures: Experiments and Model Assessment. *Polymers*, **14**. https://doi.org/10.3390/polym14112296

7 Manalo, A., Surendar, S., van Erp, G. and Benmokrane, B. (2016) Flexural Behavior of an FRP Sandwich System with Glass-Fiber Skins and a Phenolic Core at Elevated in-Service Temperature. *Composite Structures*, **152**. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.028

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

8 Korolev, A., Mishnev, M., Ulrikh, D. and Zadorin, A. (2023) Relaxation Model of the Relations between the Elastic Modulus and Thermal Expansivity of Thermosetting Polymers and FRPs. *Polymers*, **15**. https://doi.org/10.3390/polym15030699

9 Mishnev, M., Korolev, A., Ulrikh, D., Gorechneva, A., Sadretdinov, D. and Grinkevich, D. (2023) Solid Particle Erosion of Filled and Unfilled Epoxy Resin at Room and Elevated Temperatures. *Polymers*, **15**. https://doi.org/10.3390/polym15010001

10 Mishnev, M. V, Korolev, A.S., Vatin, N.I., Zadorin, A.A. and Khoroshilov, N.A. (2020) Based on the Hybrid Hot-Curing Epoxy Binder Fiberglass and evaluation of Its Effectiveness in Load-Bearing Chimneys. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **93**, 9302. https://doi.org/10.18720/CUBS.93.2

11 Korolev, A., Mishnev, M., Zherebtsov, D., Vatin, N.I. and Karelina, M. (2021) Polymers under Load and Heating Deformability: Modelling and Predicting. *Polymers*, **13**. https://doi.org/10.3390/polym13030428

12 Mishnev, M., Zadorin, A. and Khoroshilov, N. Prediction of Elastic Characteristics of Fiberglass in Bending: Multi-Scale Finite Element Modeling and Experiment. https://doi.org/10.4123/CUBS.98.1

13 Korolev, A., Mishnev, M. and Ulrikh, D.V. (2022) Non-Linearity of Thermosetting Polymers' and GRPs' Thermal Expanding: Experimental Study and Modeling. *Polymers*, **14**. https://doi.org/10.3390/polym14204281

14 García-Moreno, I., Caminero, M.Á., Rodríguez, G.P. and López-Cela, J.J. (2019) Effect of Thermal Ageing on the Impact and Flexural Damage Behaviour of Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Laminates. *Polymers*, **11**. https://doi.org/10.3390/polym11010080

15 Hannou, A., Ferhoum, R., Almansba, M., Habak, M. and Velasco, R. (2023) Thermal Aging Effect on the Compression Behavior of Thermoplastic Polymers—Proposed Phenomenological Model. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **23**. https://doi.org/10.1007/s11668-023-01608-9

16 Bahrololoumi, A., Shaafaey, M., Ayoub, G. and Dargazany, R. (2022) Thermal Aging Coupled with Cyclic Fatigue in Cross-Linked Polymers: Constitutive Modeling & FE Implementation. *International Journal of Solids and Structures*, **252**. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111800

17 Yang, Y., Xian, G., Li, H. and Sui, L. (2015) Thermal Aging of an Anhydride-Cured Epoxy Resin. *Polymer Degradation and Stability*, **118**. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.04.017

18 Korolev, A., Mishnev, M., Vatin, N.I. and Ignatova, A. (2021) Prolonged Thermal Relaxation of the Thermosetting Polymers. *Polymers*, **13**. https://doi.org/10.3390/polym13234104

19 Mishnev, M., Korolev, A., Ekaterina, B. and Dmitrii, U. (2022) Effect of Long-Term Thermal Relaxation of Epoxy Binder on Thermoelasticity of Fiberglass Plastics: Multiscale Modeling and Experiments. *Polymers*, **14**. https://doi.org/10.3390/polym14091712

20 Lainé, E., Bouvy, C., Grandidier, J.C. and Vaes, G. (2019) Methodology of Accelerated Characterization for Long-Term Creep Prediction of Polymer Structures to Ensure Their Service Life. *Polymer Testing*, **79**. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106050

21 Saood, A., Khan, A.H., Equbal, M.I., Saxena, K.K., Prakash, C., Vatin, N.I. and Dixit, S. (2022) Influence of Fiber Angle on Steady-State Response of Laminated Composite Rectangular Plates. *Materials*, **15**. https://doi.org/10.3390/ma15165559

22 Veerapandian, V., Pandulu, G., Jayaseelan, R., Kumar, V.S., Murali, G. and Vatin, N.I. (2022) Numerical Modelling of Geopolymer Concrete In-Filled Fibre-Reinforced Polymer Composite Columns Subjected to Axial Compression Loading. *Materials*, **15**. https://doi.org/10.3390/ma15093390

23 Eshmatov, B.K., Abdikarimov, R.A., Amabili, M. and Vatin, N.I. (2023) Nonlinear Vibrations and Dynamic Stability of Viscoelastic Anisotropic Fiber Reinforced Plates. *Magazine of Civil Engineering*, **118**. https://doi.org/10.34910/MCE.118.11

24 Mohamed, M., Johnson, M. and Taheri, F. (2019) On the Thermal Fatigue of a Room-Cured Neat Epoxy and Its Composite. *Open Journal of Composite Materials*, **9**, 145–163. https://doi.org/10.4236/ojcm.2019.92007

25 Serra-Aguila, A., Puigoriol-Forcada, J.M., Reyes, G. and Menacho, J. (2019) Viscoelastic Models Revisited: Characteristics and Interconversion Formulas for Generalized Kelvin–Voigt and Maxwell Models. *Acta Mechanica Sinica*, **35**, 1191–1209. https://doi.org/10.1007/s10409-019-00895-6

26 Ribeiro, J.G.T., Castro, J.T.P. de and Meggiolaro, M.A. (2021) Modeling Concrete and Polymer Creep Using Fractional Calculus. *Journal of Materials Research and Technology*, **12**, 1184–1193. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.007

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

27 Askadskii, A.A. and Matseevich, T.A. (2023) Further Research on the Improvement of Models and Computer Programs for the Prediction and Analysis of the Physical Properties of Polymers. *Uspekhi Fizicheskih Nauk*, **193**, 625–668. https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.12.039124

28 Bykov, D.L., Konovalov, D.N., Mel'nikov, V.P. and Osavchuk, A.N. (2010) Method for Identification of the Filled Polymer Material Relaxation Kernel in Millisecond Time Range. *Mechanics of Solids*, **45**, 427–436. https://doi.org/10.3103/S0025654410030131

29 Rudnitsky, V., Kren, A. and Tsarik, S. (2000) Method of Identification of Viscoelastic Materials with a Stress Relaxation Function. 15th World Conf. Non-Destructive Testing, Rome. https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn227/idn227.htm

30 Askadskii, A.A., Matseevich, S. V. and Matseevich, T.A. (2021) Selection of Structural Elements of Cross-Linked Polymers Used in Construction. *Vestnik MGSU*, 347–359. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.3.347-359

31 Askadskiĭ, A. and Matseevich, T. (2022) Influence of the Degree of Crystallinity on the Elastic Modulus in Rubbery State of Polymers. *Plasticheskie massy*, 11–15. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2022-3-4-11-15

32 Hadipeykani, M., Aghadavoudi, F. and Toghraie, D. (2020) A Molecular Dynamics Simulation of the Glass Transition Temperature and Volumetric Thermal Expansion Coefficient of Thermoset Polymer Based Epoxy Nanocomposite Reinforced by CNT: A Statistical Study. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **546**, 123995. https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123995

33 Chang, Z., Wang, Y., Zhang, Z., Gao, K., Hou, G., Shen, J., Zhang, L. and Liu, J. (2021) Creep Behavior of Polymer Nanocomposites: Insights from Molecular Dynamics Simulation. *Polymer*, **228**, 123895. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123895.

34 Eaton, M.D., Brinson, L.C. and Shull, K.R. (2021) Temperature Dependent Fracture Behavior in Model Epoxy Networks with Nanoscale Heterogeneity. *Polymer*, **221**, 123560. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123560

35 Zeng, Q.H., Yu, A.B. and Lu, G.Q. (2008) Multiscale Modeling and Simulation of Polymer Nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, **33**, 191–269. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.09.002

36 Hesseler, S., Stapleton, S.E., Yakovlev, V., Appel, L. and Gries, T. (2018) Micro-Scale Model for a Multi-Scale Modeling Approach of Thermoplastic Fiber Reinforced Polymers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **406**, 012049. https://doi.org/10.1088/1757-899X/406/1/012049

37 Alemi Parvin, S., Ahmed, N.A. and Fattahi, A.M. (2021) Numerical Prediction of Elastic Properties for Carbon Nanotubes Reinforced Composites Using a Multi-Scale Method. *Engineering with Computers*, **37**, 1961–1972. https://doi.org/10.1007/s00366-019-00925-8

38 Shenogina, N.B., Tsige, M., Patnaik, S.S. and Mukhopadhyay, S.M. (2012) Molecular Modeling Approach to Prediction of Thermo-Mechanical Behavior of Thermoset Polymer Networks. *Macromolecules*, **45**, 5307–5315. https://doi.org/10.1021/ma3007587

39 Kouznetsova, V.G., Geers, M.G.D. and Brekelmans, W.A.M. (2004) Multi-Scale Second-Order Computational Homogenization of Multi-Phase Materials: A Nested Finite Element Solution Strategy. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **193**, 5525–5550. https://doi.org/10.1016/j.cma.2003.12.073

40 Gavrilov, A.A. and Chertovich, A. V. (2014) Computer Simulation of Random Polymer Networks: Structure and Properties. *Polymer Science Series A*, **56**, 90–97. https://doi.org/10.1134/S0965545X14010027

41 GOST 19170-2001. Fibre Glass. Constructive Woven Fabrics. Specifications. https://docs.cntd.ru/document/1200028598

42 Zadorin, A., Mishnev, M. and Korolev, A. (2023) Temperature Stress Accumulation in Polymer Composite Shells under cyclic Temperature Impact. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **109**. https://doi.org/10.4123/CUBS.109.20

43 Korolev, A., Zadorin, A. and Mishnev, M. (2024) The Modeling of a Thermosetted Polymer's Deformations Using the Finite Element Method. *AlfaBuild*, **32**. https://doi.org/10.57728/ALF.32.2