



Research Article

Received: October 9, 2023

Accepted: November 9, 2023

Published: November 26, 2023

ISSN 2304-6295

Temperature stress accumulation in polymer composite shells under cyclic temperature impact

Zadorin, Aleksandr Aleksandrovich^{1*} Mishnev, Maxim Vladimirovich¹ Korolev, Aleksandr Sergeevich^{1*}

¹ Department of Building Construction and Structures, South Ural State University, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; aazadorin@susu.ru (Z.A.A); mishnevmv@susu.ru (M.M.V); korolevas@susu.ac.ru (K.A.S)

Correspondence:* email aazadorin@susu.ru, korolevas@susu.ac.ru; contact phone [+79227506508](tel:+79227506508)

Keywords:

Polymers; Composites; Thermal loads; Viscoelasticity; Stress accumulation; Industrial chimneys; Gas ducts

Abstract:

The object of research is a polymer composite based on thermosetting epoxy binder and EZ-200 fiberglass fabric. Its behavior in the operating conditions of industrial chimneys, which include high temperatures, long-term operation, cyclic mechanical and temperature impact, and prolonged thermal aging, is yet to be determined. Viscoelasticity of polymer matrix leads to several possible effects. One is the accumulation of temperature stresses due to non-stationary temperature effects. This work aims to evaluate the possibility of such an effect and assess it. It required us to conduct cyclic heating tests and FE shell calculations. **Method.** Cyclic heating tests were conducted in the specially manufactured testing chamber, which allowed us to prevent specimens from longitudinal deformations, illustrating the work in constrained construction conditions. Specimens were exposed to several heating and cooling cycles, while the longitudinal force was measured during the experiment and converted to stress. To check the adequacy of the equipment and for further calculations, the elastic modulus was calculated through tensile tests. **Results.** It was observed that the stress amplitudes were not the same during the heating-cooling cycles. There was a shift in the compressive stress direction, meaning the possible accumulation of temperature stresses. Calculations of temperature stresses using The Coefficient of Thermal Expansion (CTE) indirectly proved that. The 3-layered sandwich shell of an industrial chimney was calculated using ANSYS Workbench software to assess the influence of stress accumulation on the stress-strain state of the construction. It showed us that there might be a 5-10% increase in stress. Therefore, it should be considered, and further research on this topic is needed.

1 Introduction

Полимерные композиты эффективны при использовании в качестве строительного материала для изготовления газоходов и дымовых труб. Этому способствует выгодное соотношение прочности и собственного веса, стойкость к воздействию агрессивных сред [1], [2], а также возможность управлять свойствами путем изменения структуры [3]. Коррозионная стойкость – главное преимущество перед другими традиционными материалами (например, сталью или железобетоном, сильно подверженным коррозии [4]).

Такого рода конструкции в настоящее время не используют несущую способность материала в полной мере в силу недостаточной изученности его работы в условиях длительной эксплуатации при воздействии температуры, а также малой проработки в нормативной документации (по сравнению с традиционными материалами). Как правило, внешние механические нагрузки воспринимаются поддерживающими конструкциями (решетчатые башни,

Zadorin, A.; Mishnev, M.; Korolev, A.

Temperature stress accumulation in polymer composite shells under cyclic temperature impact;

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; **109** Article No 10920. doi: 10.4123/CUBS.109.20



оттяжки, другие трубы при их реконструкции и установке газоотводящего ствола внутрь). При этом имеется успешный опыт возведения несущих стеклопластиковых труб за рубежом. Например, 52-метровая труба фабрики по переработке сахара в США (1984) [5]. Это означает, что есть перспективы для повышения эффективности использования композитов в строительстве при заполнении информационных пробелов и внесении необходимых данных в нормативную документацию. Развитие несущих композитных труб и газоходов позволит, во-первых, снизить расходы на строительство за счет облегчения или полного отказа от поддерживающих конструкций, а во-вторых, снизить расходы на эксплуатацию, т.к. металлоконструкции башен подвержены коррозии.

Работа материала применительно к условиям эксплуатации в дымовых трубах и газоотводящих трактах включает в себя ряд, требующих проработки вопросов: влияние температуры на физико-механические характеристики, температурное старение, вязкоупругая работа материала (реология) и т.д.

Вопросы жесткости и прочности при нормальных и повышенных температурах в силу того, что эта тема является актуальной для многих областей применения, достаточно хорошо исследованы. 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 как изучение свойств полимеров и композитов при нормальных и повышенных температурах, так и определение их коэффициента линейного температурного расширения (в дальнейшем КЛТР), его нелинейности и взаимосвязи с другими параметрами. Имеются данные о зависимости модуля упругости от температуры и наличия дисперсного наполнителя, а также проведена оценка эффективности применения наполнителей [8]. В [9] приводятся экспериментальные данные о модуле упругости и КЛТР при нормальной и повышенных температурах, подтверждена взаимосвязь этих параметров, а также предложена математическая модель, описывающая ее. Испытания на абразивный износ также показали влияние температуры на работу материала [10]. Значительная часть исследований направлена на прогнозирование и управление свойствами связующего и композита. Имеются данные о конечноэлементном моделировании и вычислении деформационных характеристик стеклопластиков с применением ANSYS Material Designer (<https://www.ansys.com/>) [11]. Используя совместно с этим имеющуюся математическую модель для связующего, учитывающую температуру [12], можно достаточно точно предсказывать свойства композита.

Температурное старение материала также изучалось нами и другими исследователями. В [13] было установлено, что влияние 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 [14–16]. Нами была проведена оценка влияния температурного выдерживания на жесткость и КЛТР материала и сделаны предположения о влиянии старения на внутреннюю макромолекулярную структуру [9], [17], [18].

Вязкоупругая работа полимеров изучалась рядом ученых, и разработаны методы ее описания и предсказания. В статье, посвященной полиэтилену высокой плотности [19] предложена математическая модель, описывающая вязкоупругую работу материала с помощью 7 параметров, определяемых по кривым ползучести и релаксации. Для аналогичного материала был успешно применен [20] метод температурно-временной аналогии [21], позволяющий проводить ускоренные испытания на ползучесть при повышенной температуре. Различные способы моделирования вязкоупругой работы полимеров изучались и сравнивались учеными ранее и позволяют выбрать наиболее перспективные для нашей работы методы. Проведен подробный анализ классических моделей вязкоупругого тела, основанных на комбинациях упругих и вязких элементов [22]. Проведено сравнение теоретических кривых с

Zadorin, A.; Mishnev, M.; Korolev, A.

Temperature stress accumulation in polymer composite shells under cyclic temperature impact;

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; **109** Article No 10920. doi: 10.4123/CUBS.109.20



экспериментальными для полимеров, а также анализ применимости классических и усовершенствованных методов моделирования. Сделан вывод, что классические модели, основанные на экспоненциальных зависимостях, не всегда оказываются применимы для реальных материалов.

За счет вязкоупругой работы полимерной матрицы, композиты также оказываются подвержены явлениям ползучести и релаксации [23]. Реологические модели применимы и для них. Имеются данные о сравнении экспериментальных и теоретических кривых ползучести, полученных на основе классической реологической модели [24] и других, например, моделирования молекулярной динамики [25].

Имеются данные о влиянии вязкоупругой природы материала на работу при динамических и циклических воздействиях [26], [27], а также влияние внутренней структуры и расположения армирования [28], [29]. В [26] делается вывод о необходимости учета вязкоупругих свойств. В каждом случае вопросом остается подбор подходящей модели вязкоупругого материала и определение ее параметров под конкретный материал. В целом, методики испытаний на ползучесть проработаны, в том числе в нормативной документации. Однако, т.к. дымовые трубы и газоходы работают в специфических условиях, сочетающих длительное нагружение, длительное температурное воздействие, а также возможны циклические температурные и механические воздействия, требуется разработка и применение модели вязкоупругого материала, учитывающей одновременное нелинейное изменение жесткости, КЛТР и реологических параметров при нагреве.

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 [30], что циклические температурные воздействия приводят к снижению прочности и жесткости материала.

Целью данного исследования в рамках гранта РФФИ №23–29–00425 была оценка возможности накопления температурных напряжений в полимерном композите при циклическом нагреве-охлаждении в стесненных условиях, а также анализ их влияния на напряженно-деформированное состояние конструкции из подобного композита (стеклопластика).

Для этого были поставлены следующие задачи:

- Испытать стеклопластиковые образцы на циклическое температурное воздействие с регулярными замерами времени, температуры и действующих напряжений;
- Сделать выводы о работе изучаемого материала при циклическом действии температур и оценить влияние остаточных напряжений на напряженно-деформированное состояние конструкции из подобного материала.

2 Materials and Methods

Состав полимерного композита, следующий:

- Эпоксидная смола KER 828 (аналог ЭД20), Производитель: KUMHO P&B Chemicals;
- Изометилтетрагидрофталевый ангидрид (ИЗОМТГФА) (отвердитель для эпоксидной смолы). Производитель: ASSEMBLY Chemicals company Ltd., Nanjing, China;
- Алкофен (ускоритель отверждения эпоксидных смол). Производитель: АО "Эпитал", Москва, Российская Федерация;
- Стеклоткань ЭЗ-200 [31].

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



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

Образцы предварительно растягивались до напряжений около 30 МПа для устранения возможных податливостей системы. После этого, около 5 минут ему давалось отдохнуть, чтобы пропустить этап изначальной наиболее активной релаксации, и уменьшить ее влияние на результаты. Температура контролировалась автоматически термостатом, а также проверялась по образцу-этalonу с вклеенной внутри термопарой. Различия в температурах в течение испытаний составляли не более 2°C. Минимальная и максимальная температуры циклов составляли 30°C и 100°C соответственно, замеры усилия производились при этих значениях температур. Усилия затем переводились в напряжения путем деления на площадь сечения образца.

Также, для дальнейших расчетов и моделирования работы материала в ANSYS (<https://www.ansys.com/>), был определен модуль упругости композита при нормальной температуре.

Для исключения влияния проскальзывания в зажимах удлинение образца измерялось по фиксированной базе с помощью датчиков часового типа с точностью 0.01мм (принципиальная схема см. рис. 2). Датчики устанавливались крест-накрест для исключения влияния перекосов по обеим осям симметрии. Модуль упругости определялся по закону Гука путем деления приращения напряжений σ на относительную деформацию ε :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\Delta L} \cdot L \quad (1)$$

Всего было проведено 7 замеров. Среднее значение модуля упругости составило 10006 МПа с коэффициентом вариации 8.8% (таблица 1). В целом, значения модуля для данного связующего и стеклоткани соответствуют результатам предыдущих исследований [11], поэтому работу изготовленной испытательной камеры было решено считать корректной.

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

№	$\Delta\sigma$, МПа	ε , м/м	E, МПа
1	12.315	0.001291667	9534
2	12.315	0.001041667	11823
3	12.315	0.001208333	10192
4	12.315	0.001208333	10192
5	12.315	0.001333333	9236
6	12.315	0.001291667	9534
7	12.315	0.001291667	9534

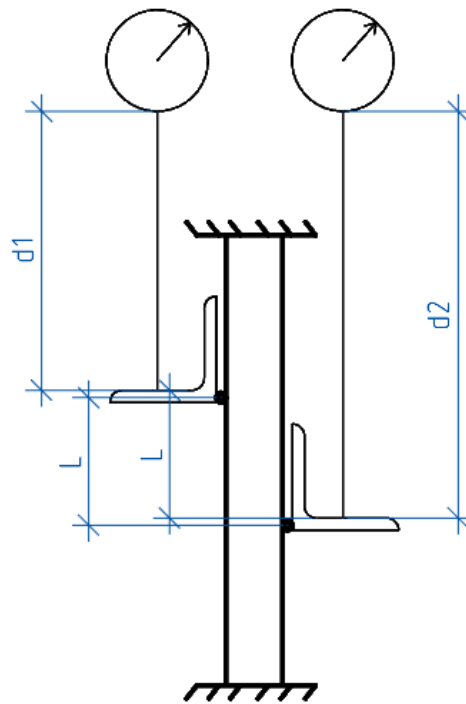


Рис. 2 – Схема к определению модуля упругости
Fig. 2 – The scheme for determining the modulus of elasticity

3 Results and Discussion

Результаты испытаний на циклический нагрев приводятся на рис. 3.

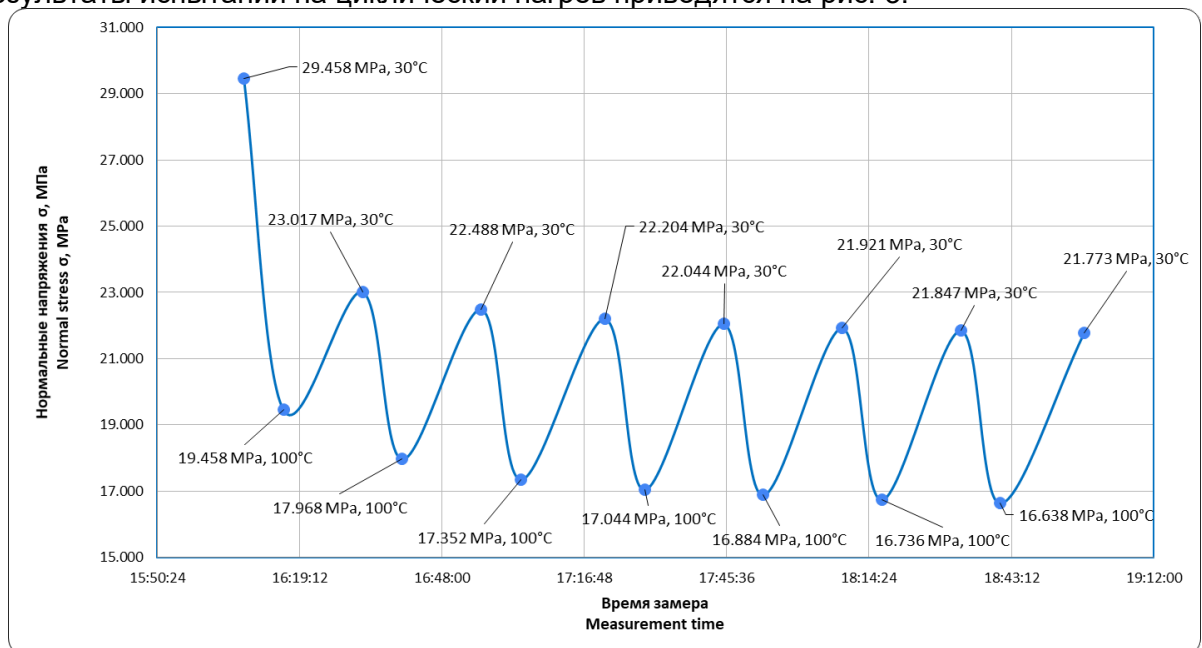


Рис. 3 – Результаты испытаний стеклопластика на циклический нагрев
Fig. 3 – FRP's cyclic heating tests results

После каждого цикла нагрева-охлаждения напряжения в образцах не возвращаются в исходные значения. Постепенное снижение амплитудных значений складывается из накопления температурных сжимающих усилий и релаксации растягивающих. Подробный анализ работы материала и определение соотношения между релаксацией и накоплением температурных напряжений – направление дальнейших исследований. На данный момент сделано предположение, что резкое падение напряжений сразу после 1 цикла связано с “заморозкой”



температурных напряжений, а дальнейшее медленное снижение амплитудных значений – с постепенной релаксацией.

Косвенно это можно проверить путем оценки величины температурных напряжений по известной формуле:

$$\sigma_t = \alpha E_t \Delta t \quad (2)$$

Где α – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР),

E_t – модуль упругости при температуре t ,

Δt – изменение температуры.

Для нашего случая модуль упругости стеклопластика при повышенных температурах определяется из известного из предыдущих исследований [9] отношения $\frac{E_t}{E_{25}}$, где E_t – модуль

упругости при температуре t , E_{25} – начальный модуль упругости при температуре 25°C ($E_{25} \approx E_{30}$). Ранее было получено, что до 100°C включительно у композита падение жесткости не более 10%, после чего, при приближении к температуре стеклования связующего, происходит резкое падение. В данном оценочном расчете примем $\frac{E_t}{E_{30}} = 0.9$.

КЛТР также принимаем по [9], $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Тогда температурные напряжения составят:

$$\sigma_t = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 0.9 \cdot 10006 \cdot 70 = 6.93 \text{ МПа} \quad (3)$$

Напряжения σ_{100} при повышенной температуре можно определить по следующей формуле:

$$\sigma_{100} = \frac{E_t}{E_{30}} \sigma_{30} - \sigma_t \quad (4)$$

Где σ_{30} – изначальные напряжения перед нагревом. То есть, формула (4) учитывает снижение растягивающих напряжений из-за падения жесткости (деформация постоянная, следовательно, падают напряжения), а также добавление сжимающих напряжений от нагрева заземленного стержня.

$$\sigma_{100} = 0.9 \cdot 29.458 - 6.93 = 19.58 \text{ МПа} \quad (5)$$

Напряжение $\sigma_{100} = 19.58 \text{ МПа}$ близко к экспериментальному значению в середине первого цикла (разница 0.62%). Считая, что все температурные напряжения были “заморожены” и остались в образце, оценим значение напряжений в конце первого цикла:

$$\sigma_{30,2} = \sigma_{30} - \sigma_t \quad (6)$$

$$\sigma_{30,2} = 29.458 - 6.93 = 22.53 \text{ МПа} \quad (7)$$

Сходимость с экспериментом довольно близка (разница 2.1%).

На последующих циклах формулы (4–7) перестают работать. В результате эксперимента установлено, что напряжения после первого и последнего циклов отличаются на 15%. Это связано с тем, что новые температурные напряжения поверх накопленных не появляются, и за дальнейшие изменения отвечает релаксация. То есть, растягивающее усилие (верхние точки графика) снижается, и нижние точки также падают вслед за ним, т.к. температурные напряжения либо постоянны, либо релаксируют медленнее растягивающих (т.к. они ниже).

Таким образом, на данном этапе принимается предпосылка о том, что температурные напряжения в полном объеме “замораживаются” после первого цикла нагрева-охлаждения.

В результате постепенно происходит сдвиг в сторону сжимающих напряжений. Они наиболее опасны для тонкостенных оболочек, т.к. при превышении критических значений

приводят к потере устойчивости. Это усугубляется тем, что при нагреве значительно падает жесткость конструкции. По полученным результатам сделан вывод, что даже разовое нарушение температурного режима может привести к возникновению и сохранению остаточных температурных напряжений, суммирующихся с действующими в конструкции. К примеру, при перегреве на 10°C температурные напряжения растут на 15%, а на 20°C – на 30%.

В цилиндрических и конических оболочках газоотводящих сооружений эффект возникновения и накопления напряжений возможен в кольцевом направлении, т.к. материал находится в стесненных условиях (за счет холодной внешней стороны оболочки, либо внешней обшивки в сэндвичевых оболочках).

Учитывая, что зачастую температурные напряжения основные по величине в такого рода конструкциях, при воздействии расчетных нагрузок это может в итоге привести к исчерпанию несущей способности. Помимо нарушений условий эксплуатации, аналогичный эффект может быть при разрушении защитного футеровочного слоя (изменение теплопроводности по толщине оболочки), например, от старения или абразивного износа, а также в результате горячего отверждения при изготовлении.

Чтобы продемонстрировать эффект возможного влияния накопления температурных напряжений, проведен расчет дымовой трубы при действии ветровой и температурной нагрузки. В программном комплексе ANSYS Workbench (<https://www.ansys.com/>) создана КЭ-модель конической дымовой трубы высотой 70 м, диаметром 4–6 м, с толщиной обшивок 12 мм и изоляционным слоем 100 мм (рис. 4). Толщина подобрана из условия обеспечения нормативного отклонения верха трубы по российским нормам [32].

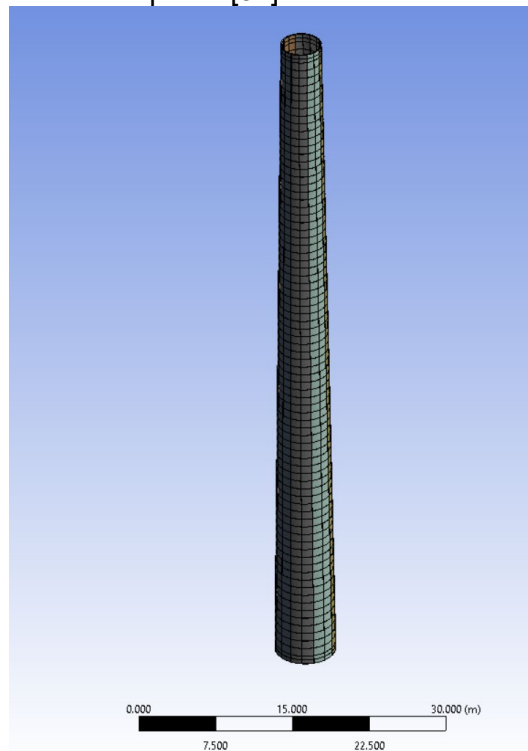


Рис. 4 – КЭ-модель трубы

Fig. 4 – Finite element model of the chimney

Ветровая нагрузка определена в соответствии с [33], а температура снаружи по теплотехническому расчету и требованиям нормативных документов [32], [34] и принята 60°C. Эксплуатационная температура отводимых газов 100°C.

Из рис. 5 можно видеть, что в кольцевом направлении во внутренней обшивке на самом деле возникают температурные сжимающие напряжения вплоть до 14.4 МПа в зоне краевого эффекта у опоры.

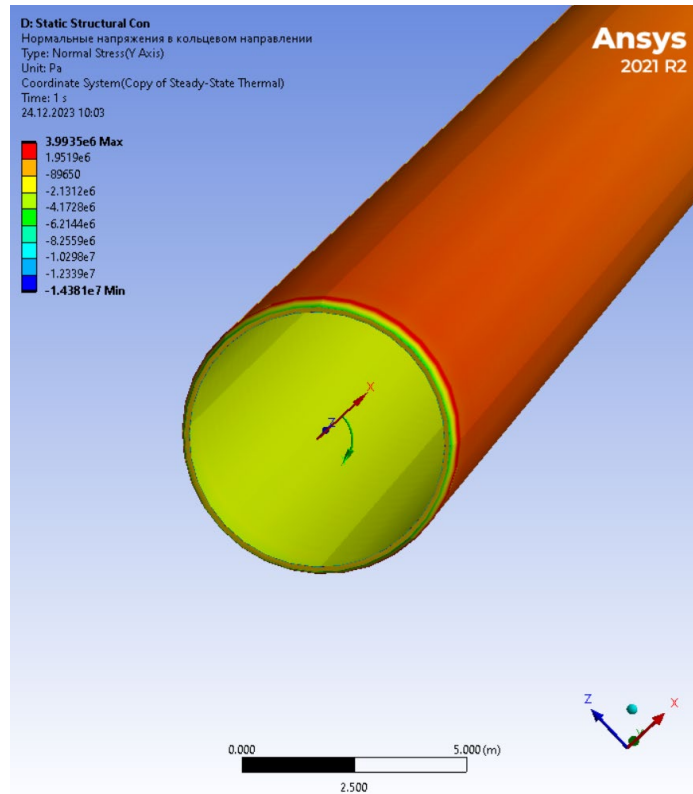


Рис. 5 – Кольцевые напряжения от температурных нагрузок
Fig. 5 – Circumferential temperature stress

Были просчитаны кольцевые температурные напряжения при разных температурах. Было обнаружено, что из-за резкого падения жесткости после 110-120°C они начинают снижаться (рис. 6). Таким образом, для возникновения наихудшего случая может быть достаточно нарушения температурного режима на 10-20°C.

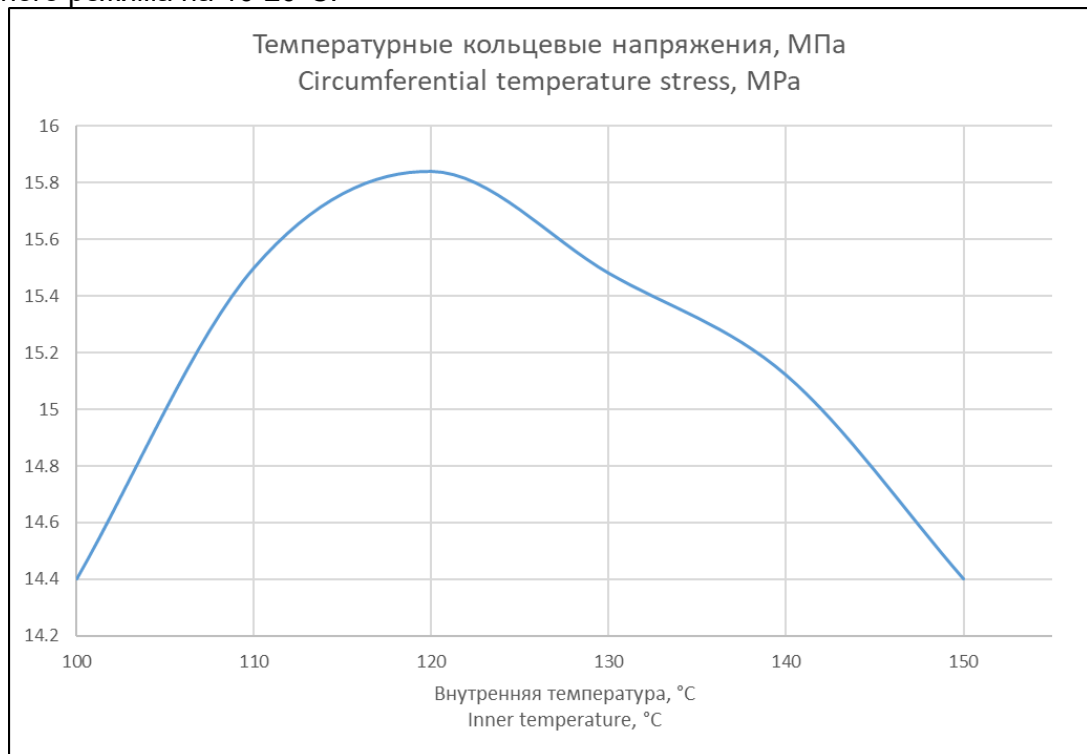


Рис. 6 – Температурные кольцевые напряжения
Fig. 6 – Circumferential temperature stress

Без учета накопления напряжений их величина составила 14.4 МПа. При учете – 15.9 МПа. Таким образом, учет данного возможного эффекта повышает расчетные значения на $\approx 10\%$. Величина приведенных напряжений в трубе при одновременном действии ветра и температуры отличается на 5% (рис. 7).

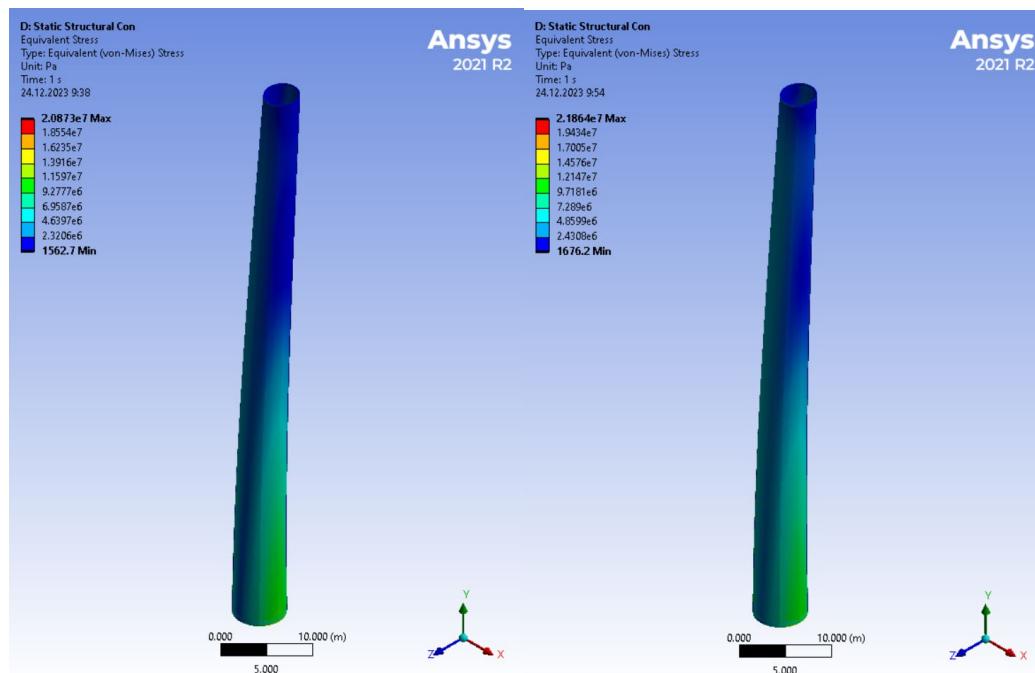


Рис. 7 – Эквивалентные напряжения без учета накопления температурных (слева) и с учетом (справа)

Fig. 7 – Equivalent stress without considering the accumulation of temperature stress (on the left) and with it (on the right)

4 Conclusions

Для развития применения несущих и самонесущих стеклопластиковых труб одним из направлений исследований стало изучение накопления напряжений в композитах при циклических температурных воздействиях.

В данной статье:

- 1) Выполнено экспериментальное исследование стеклопластика на эпоксидном связующем при циклическом термомеханическом воздействии, в результате которого установлены закономерности формирования напряженного состояния.
- 2) Проведен анализ результатов путем сравнения работы оболочки с учетом и без учета накопления напряжений. Установлено, что учет остаточных температурных напряжений приводит к повышению кольцевых и приведенных напряжений на 5...10%.

Было обнаружено, что в композите после нагрева-охлаждения напряжения не возвращаются в изначальное состояние. Это может быть связано с действием одного из, или обоих эффектов: релаксации напряжений (ускоренной нагревом) и накоплением температурных напряжений. По предварительной оценке, сделано предположение, что температурные напряжения “замораживаются” при охлаждении, т.к. разница между амплитудными значениями достаточно точно совпадает с теоретической величиной, посчитанной по КЛТР и жесткости как $\sigma_t = \alpha E_t \Delta t$. Точное соотношение между этими двумя эффектами, а также точный временной анализ НДС композита при действии температуры – направление дальнейших исследований.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о необходимости дальнейшего изучения вязкоупругой работы полимеров и композитов применительно к условиям длительной эксплуатации в дымовых трубах и газоотводящих трактах и связанных с ней эффектов, в том числе накопления напряжений.



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](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>.
- 8 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>.
- 9 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>.
- 10 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>.
- 11 A, Z.A., A, K.N., Vladimirovich, M., Aleksandrovich, A. and Andreevich, N. Prediction of Elastic Characteristics of Fiberglass in Bending: Multi-Scale Finite Element Modeling and Experiment. <https://doi.org/10.4123/CUBS.98.1>.
- 12 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>.
- 13 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>.



- 14 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>.
- 15 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>.
- 16 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>.
- 17 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>.
- 18 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>.
- 19 Drozdov, A.D., Høj Jermiin, R. and de Claville Christiansen, J. (2023) Lifetime Predictions for High-Density Polyethylene under Creep: Experiments and Modeling. *Polymers*, **15**. <https://doi.org/10.3390/polym15020334>.
- 20 Amjadi, M. and Fatemi, A. (2021) Creep Behavior and Modeling of High-Density Polyethylene (HDPE). *Polymer Testing*, **94**. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107031>.
- 21 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>.
- 22 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**. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.007>.
- 23 Raghavan, J. and Meshii, M. (1998) Creep of Polymer Composites. *Composites Science and Technology*, **57**. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00104-8).
- 24 Hassanzadeh-Aghdam, M.K., Ansari, R., Mahmoodi, M.J. and Darvizeh, A. (2018) Effect of Nanoparticle Aggregation on the Creep Behavior of Polymer Nanocomposites. *Composites Science and Technology*, **162**. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.025>.
- 25 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**. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123895>.
- 26 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>.
- 27 Guedes, R.M. (2019) Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites. Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02292-9>.
- 28 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>.
- 29 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>.
- 30 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>.
- 31 GOST 19907-83. Dielectric Fabrics Made of Glass Twisted Complex Threads. Specifications. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294833/4294833537.pdf>.
- 32 SP 43.13330.2012. Constructions of the Industrial Enterprises. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293795/4293795651.pdf>.
- 33 SP 20.13330.2016. Loads and Actions. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293747/4293747667.pdf>.
- 34 SP 61.13330.2012. Designing of Thermal Insulation of Equipment and Pipe Lines. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293796/4293796604.pdf>.