



Моделирование деградации композитных стержней в агрессивной среде при воздействии силовых факторов

Ф.Р. Шакирзянов¹, Р.А. Каюмов¹, А.М. Сулейманов¹, Е.С. Михалдыкин²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская федерация

²ЮМАТЕКС, г. Москва, Российская федерация

Аннотация. В современном строительстве композитные стержни (в частности, стеклопластиковая арматура) всё шире применяются в несущих конструкциях, эксплуатируемых в агрессивных средах — щелочной среде бетона, хлоридных солях, кислотах. Однако одновременное воздействие механических нагрузок и агрессивной среды приводит к деградации материала, снижению его прочности и жёсткости, что затрудняет прогнозирование остаточной прочности и долговечности таких конструкций и создаёт риск их преждевременного разрушения. Это обусловлено ужесточением условий работы несущих конструкций и повышенными требованиями к их надёжности.

Целью работы является разработка методики деградации композитных материалов и прогнозирования их долговечности. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: разработка методов оценки напряженно-деформированного состояния с учетом геометрической нелинейности, разработка численного метода расчёта продольного изгиба, идентификация параметров законов изменения механических характеристик путем сопоставления расчетных и опытных данных, сравнение экспериментальных результатов с данными МКЭ.

Создан метод прогноза остаточной прочности композита, эксплуатируемого в агрессивной среде под нагрузкой. Проведены натурные испытания образцов из стеклопластика, доведенных до разрушения, и определена их остаточная прочность. Разработана численная методика расчета методом конечных элементов (МКЭ) для определения напряженного деформированного состояния образцов при продольном изгибе. Предложена модель диффузии агрессивной среды в композиционный материал. В качестве параметра разрушения принята дополнительная деформация, обусловленная деградацией; для неё записано дифференциальное уравнение.

На основе кинетических зависимостей определены упругие свойства, распределение концентрации и пределы прочности в последовательные моменты времени. Параметры моделей найдены из решения задачи идентификации, после чего выполнено сопоставление расчётных (МКЭ) и опытных данных. Предложенные модели обеспечили достаточно хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Практическая значимость результатов для строительной отрасли заключается в возможности прогнозирования остаточной прочности и долговечности композитных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, что повышает надёжность и безопасность зданий и сооружений.

Ключевые слова: эксперименты, композит, модель деформирования, диффузия, деградация, численное моделирование.

Для цитирования: Шакирзянов Ф.Р., Каюмов Р.А., Сулейманов А.М., Михалдыкин Е.С. Моделирование деградации композитных стержней в агрессивной среде при воздействии силовых факторов // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 141-152, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.9, EDN: HKITGY

Modeling the degradation of composite rods in an aggressive environment under the influence of mechanical loads

F.R. Shakirzyanov¹, R.A. Kayumov¹, A.M. Suleimanov¹, E.S. Mikhaldykin²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²UMATEX, Moscow, Russian Federation

Abstract. In modern construction, composite rods (in particular, fiberglass reinforcement) are increasingly used in load-bearing structures operated in aggressive environments such as the alkaline environment of concrete, chloride salts, and acids. However, the simultaneous impact of mechanical loads and aggressive environment leads to material degradation, reducing its strength and stiffness, which complicates prediction of the residual strength and durability of such structures and creates a risk of their premature failure. It is caused by the tightening of operating conditions for load-bearing structures and increased requirements for their reliability.

The aim of the work is to develop a methodology for the degradation of composite materials and prediction of their durability. To achieve this aim, the following tasks were solved: developing methods for assessing the stress-strain state taking into account geometric non-linearity, developing a numerical method for calculating longitudinal bending, identifying the parameters of the laws of change in mechanical characteristics by comparing calculated and experimental data, and comparing experimental results with FEM data.

A method has been created for predicting the residual strength of a composite operated in an aggressive environment under load. Full-scale tests of fiberglass samples brought to failure were carried out, and their residual strength was determined. A numerical procedure for finite element method (FEM) calculation has been developed to determine the stress-strain state of samples under longitudinal bending. A model describing the diffusion of an aggressive medium into a composite is proposed. A model of diffusion of an aggressive medium into a composite material is proposed. An additional strain caused by degradation is adopted as the failure parameter; a differential equation is written for it.

Based on kinetic relationships, the elastic properties, concentration distribution, and ultimate strengths were determined at successive time instants. The model parameters were found from solving an identification problem, after which a comparison of calculated (FEM) and experimental data was performed. The proposed models provided fairly good agreement between calculated and experimental data.

The practical significance of the results for the construction industry lies in the possibility of predicting the residual strength and durability of composite structures operated in aggressive environments, which improves the reliability and safety of buildings and structures.

Keywords: experiments, composite, deformation model, diffusion, degradation, numerical simulation

For citation: Shakirzyanov F.R., Kayumov R.A., Suleimanov A.M., Mikhaldykin E.S. Modeling the degradation of composite rods in an aggressive environment under the influence of mechanical loads // News of KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 141-152, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.9, EDN: HKITGY

1. Введение

Условия работы несущих конструкций постоянно ужесточаются: растут нагрузки, расширяется рабочий диапазон температур, увеличивается требуемый срок службы. В связи с этим к материалам предъявляются повышенные требования.

В авиационной и космической технике композиты используют для обшивок, крыльев и силовых элементов, где важно сочетать малую массу с высокой прочностью. Это снижает расход топлива и повышает эффективность аппаратов. Особый интерес представляют полимерные композиционные материалы (ПКМ): их удельная прочность в несколько раз выше, чем у традиционных материалов, но при этом они заметно проявляют неупругие свойства.

Поведение композита при деформировании и накоплении повреждений зависит от структуры компонентов и вида нагружения. В многослойных ПКМ неупругие деформации развиваются специфически, поэтому для них нужны модели, отличные от тех, что применяют для металлов. Пример такого подхода приведен в [1].

Степень деградации учитывают не только при оценке прочности, но и в физических соотношениях, описывающих упругие и реологические процессы. Например, в [2] предложены соотношения для параметра поврежденности, включающие деформации ползучести. В качестве меры деградации используют интенсивность накопленных деформаций ползучести [3].

По аналогии с наследственной теорией упругости, для нелинейно-вязкоупругих изотропных материалов в [4] предложено записывать деформации, вызванные деградацией, в интегральной форме только через напряжения. При этом критерий прочности содержит лишь упругие деформации и параметр деградации.

В роли параметра деградации при циклическом нагружении выступают разные величины: относительное изменение модуля упругости [5], отношение текущей плотности к начальной [6], остаточная жёсткость или остаточная прочность [7].

Ряд экспериментальных исследований деградации композитов описан в [8]. В частности, в этой работе представлены результаты оценки долговечности стеклопластиковой арматуры в щелочной среде бетона. Для обработки экспериментальных данных и прогнозирования остаточной прочности авторы [8] применили гибридные модели на основе искусственных нейронных сетей с использованием трёх роевых алгоритмов оптимизации. Исследование подтверждает, что длительное воздействие щелочной среды приводит к заметному снижению прочностных характеристик композита, а предложенные модели позволяют достаточно точно описывать этот процесс. Другие подходы к анализу деградационных и разрушающих процессов, включая численные методы, изложены в [9-10].

После внедрения неметаллической арматуры в бетонные конструкции, исследования влияния агрессивной щелочной среды на прочность стеклопластиковых волокон стали особенно актуальны. Применение ПКМ в бетонных конструкциях, работающих при высокой влажности или под действием солевых растворов, позволяет заметно увеличить срок службы [11-13]. Однако, при эксплуатации стеклопластиковая арматура подвергается химическому воздействию щелочных веществ, содержащихся в бетоне. Работы [14-16] посвящены изучению свойств неметаллической композитной арматуры при взаимодействии с бетоном. Согласно литературным данным, при действии таких агрессивных сред, как хлоридные соли и кислоты, стеклопластиковая арматура позволяет увеличить срок службы строительных конструкций в 2-3 раза по сравнению с металлической.

Вопросы прогнозирования длительной прочности и оценки долговечности стеклопластиковых ПКМ и конструкций из них рассмотрены в [17-19]. Исследования в этом направлении проводили и авторы настоящей работы. В [20] разработана методика оценки долговечности стеклопластиковых элементов конструкций на основе модифицированной теории Журкова и закона линейного суммирования повреждений с учётом одновременного действия силовых факторов, влажной среды и переменной температуры. Кроме этого, выполнены экспериментальные исследования длительной прочности [17, 21].

Отдельно изучено влияние влагонасыщения. Показано, что стеклопластиковые ПКМ с наиболее выраженной поверхностной деструкцией поглощают больше влаги, а их механические свойства заметно ухудшаются по мере роста степени влагонасыщения [21-23]. В работах [24, 25] проанализировано коррозионное разрушение стеклопластиковых стержней в кислых средах с учетом предварительного напряжения и предложен метод оценки их стойкости к коррозионному разрушению под нагрузкой. Изменения механических характеристик стеклопластика под действием щелочных сред, в том числе имитирующих щелочную среду влажного бетона, представлено в экспериментальном исследовании [26, 27].

На сегодняшний день выполнено много экспериментальных исследований композитов при действии силовых факторов, температуры, влаги, ионизирующего

излучения, холодной плазмы, ультрафиолета, а также после биоповреждений. Часто эксперименты проводят при экстремальных нагрузках и воздействиях. К настоящему времени в механике композитов в основном отработаны методы определения физико-механических характеристик при раздельном действии разных факторов для стационарных статических и циклических нагрузок [17, 28-29]. Ряд теоретических подходов уже имеет экспериментальное подтверждение. Например, это доказано при оценке долговечности материалов на основе закона линейного суммирования повреждений. Также данный подход применим для анализа деформативности при ползучести с использованием температурно-временной аналогии [30].

В ряде работ [17-19] разрабатываются методики исследования долговечности стеклопластиковых стержней, основанные на длительной выдержке образцов под постоянной нагрузкой до момента разрушения. Однако в этих методиках учитывается лишь один эксплуатационный фактор – механическая нагрузка, и, соответственно, они не могут обеспечивать достоверный прогноз срока службы материала при комплексном воздействии факторов, ответственных за старение и разрушение композитной арматуры. Некоторые авторы использовали выдержку образцов арматуры в щелочной среде в нагруженном и ненагруженном состояниях в течение 1 месяца, что, недостаточно для прогнозирования длительной щелочестойкости материала [31]. Кроме того, небольшой уровень нагрузок – от 10 до 40% от значения разрушающего напряжения – не позволяет реализовать принцип ускоренных испытаний, поскольку этот уровень механической нагрузки близок к реальным нагрузкам в процессе эксплуатации. Согласно ГОСТ 31938-2012 (введен в действие с 1 января 2014 г.), выдержка образцов проводится в течение 30 суток в щелочном растворе с последующим определением предела прочности при растяжении и предела прочности сцепления с бетоном. Однако эти испытания тоже не дают представления о длительной прочности и эксплуатационной надёжности ПКМ.

В современной науке большое внимание уделяется разработке методов идентификации физико-механических характеристик и повреждений фаз материала композитов, из которого изготовлены элементы конструкций [32, 33]. Такие методы позволяют, с одной стороны, прогнозировать состояние эксплуатируемых изделий, а с другой – определять характеристики фаз материала на образцах, изготовленных по той же технологии, что и сами конструкции. Это дает возможность косвенно учитывать влияние технологии производства и выявлять параметры, которые трудно или невозможно определить непосредственно в лабораторных экспериментах на стандартных образцах.

Одной из трудностей при этом является проблема вычленения из экспериментальных данных различных частей деформаций, а именно: упругих, наследственно-упругих, вязкопластических и вызванных деградацией.

Целью предлагаемой работы является разработка метода оценки степени деградации композиционного материала (стеклопластика) и его остаточной прочности.

Задачи исследования:

1. Разработать методы оценки напряженного деформированного состояния с учетом геометрической нелинейности.
2. Разработать численный метод расчета продольного изгиба.
3. Идентифицировать параметры законов изменения механических характеристик путём сопоставления расчётных и опытных данных;
4. Сравнить результаты, полученные экспериментально и МКЭ.

2. Материалы и методы

Рассматривается плоское напряженное состояние стеклопластиковой балки. К одному из ее торцов прикладывается продольное перемещение в направлении образца, что соответствует постановке задачи о продольном изгибе. При этом задача решается в геометрически нелинейной постановке:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u + (\nabla u)^T \nabla u], \quad (1)$$

где u – вектор перемещений, ε – тензор деформаций Грина, ∇ – векторный дифференциальный оператор.

В качестве меры напряжений принимается второй тензор Пиолы, который определяется как:

$$S = J F^{-1} (C : \varepsilon^e) F^{-T}, \quad (2)$$

где $J = \det(F)$, $F = I + \nabla u$ – градиент деформации, C – тензор упругих характеристик материала, ε^e – тензор упругой деформации.

Принимались следующие исходные данные: длина образца $l=350$ мм, ширина $b=50$ мм, толщина $h=5$ мм, начальный модуль упругости $E=23.6$ ГПа, предел прочности на растяжение и сжатие $\sigma_0^+ = \sigma_0^- = 900$ МПа. Максимальное напряжение в центральном сечении составляет 30% от предельного.

После продольного изгиба балка крепится между двумя опорами (рис. 1) и далее образец помещается в агрессивную среду, которая имитирует щелочную среду. В качестве щелочи рассматривался раствор из KOH и $NaOH$ при концентрации $c=10\%$.

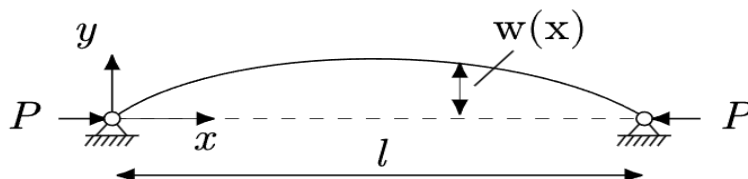


Рис. 1. Схема деформирования плоского образца (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Deformation scheme of a flat specimen (illustration by the authors)

Под воздействием агрессивной среды в образце происходит деградация материала, которая выражается в ухудшении его механических свойств, а именно в снижении прочности и жесткости.

После натурных испытаний измерялись предел прочности, упругие характеристики и остаточные прогибы образцов. После выдержки образцы доводились до разрушения для определения остаточной прочности.

Волокна композита, изготовленного пултрузионным способом, расположены вдоль образца, поэтому можно считать, что деформациями ползучести при наличии деградации можно пренебречь. Тогда можно записать, что полная деформация состоит из упругой и деформации от агрессивной среды:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^\omega. \quad (3)$$

Далее вводится гипотеза, согласно которой ε^ω считается зависящей от параметра деградации ω :

$$\varepsilon^\omega = \alpha \omega I, \quad (4)$$

где α – коэффициент, определяемый экспериментально, ω – параметр деградации, I – единичный тензор.

Параметр деградации ω считается равным нулю в начальный момент времени и достигает значения, равного 1 при разрушении материала. Для его определения принято следующее дифференциальное соотношение:

$$\dot{\omega} = (\beta \cdot c)^k \frac{|\gamma \cdot \sigma|^m}{(1 - \omega)^n}, \quad (5)$$

где β, γ, k, m, n – коэффициенты, определяемые экспериментально, c – концентрация агрессивной среды в композите.

Долговечность стеклопластика в агрессивной среде определяется количеством среды, диффундирующей в материал. Как правило, для описания этого процесса используют зависимость на основе второго закона Фика:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla c). \quad (6)$$

В качестве граничных условий принимается, что концентрация агрессивной среды на границе образца равна её концентрации в щелочи, то есть задаются граничные условия Дирихле:

$$c|_{\Omega} = c_0, \quad (7)$$

где c_0 – концентрация агрессивной среды в щелочи, Ω – граница области.

Для оценки снижения модуля упругости E с течением времени вводится соотношение:

$$E = E_0(1 - \omega). \quad (8)$$

Аналогичное предположение вводится и для прочности: чем больше параметр деградации ω , тем ниже пределы на растяжение σ^+ и сжатие σ^- . В простейшем случае можно принять следующую зависимость:

$$\begin{aligned} \sigma^+ &= \sigma_0^+(1 - \omega), \\ \sigma^- &= \sigma_0^-(1 - \omega). \end{aligned} \quad (9)$$

Для оценки прочности принимается критерий максимальных напряжений, который можно записать в виде:

$$f(\sigma) = \max\left(\frac{|\sigma_1|}{\sigma^*}, \frac{|\sigma_2|}{\sigma^*}, \frac{|\sigma_3|}{\sigma^*}\right). \quad (10)$$

Если $\sigma_i \geq 0$, то $\sigma^* = \sigma^+$, а если $\sigma_i < 0$, то $\sigma^* = \sigma^-$. При $f(\sigma) \geq 1$ считается, что материал разрушен.

Задача решается МКЭ с использованием комплекса COMSOL. Была разработана программа, позволяющая проводить расчеты напряженного деформированного состояния образца при продольном изгибе с учетом деградации материала.

Для определения искомых параметров в соотношениях (4), (5) были проведены натурные испытания образцов из стеклопластика, находящихся в щелочной среде. Для этого были изготовлены образцы из стеклопластика, которые подвергались продольному изгибу и выдерживались в щелочной среде в течение определенного времени. В процессе испытаний измерялись значения предела прочности, упругие характеристики и остаточные прогибы образцов.

На основе натурных испытаний проведена идентификация параметров модели деградации. При этом приходится минимизировать квадратичную невязку системы уравнений:

$$\begin{aligned} \delta &= \sum_{i=1}^N \left(E_{\text{экс}}^i - E_{\text{числ}}^i(D, \alpha, \beta, \gamma, k, m, n) \right)^2 + \\ &+ \sum_{i=1}^N \left(\sigma_{\text{экс}}^i - \sigma_{\text{числ}}^i(D, \alpha, \beta, \gamma, k, m, n) \right)^2 \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (11)$$

где N – количество экспериментов, $E_{\text{экс}}^i, \sigma_{\text{экс}}^i$ – экспериментальные значения, $E_{\text{числ}}^i, \sigma_{\text{числ}}^i$ – значения, полученные из численных расчетов.

3. Результаты и обсуждение

Ниже рассмотрено решение задачи моделирования процесса деградации стеклопластика при продольном изгибе образца. На рис. 2-3 приведены мозаики напряжений в образце при продольном изгибе до погружения в щелочную среду, а также после выдержки в щелочи в течение 1440 часов, при расчете рассмотрена лишь половина балки, а слева задано условие симметрии. В процессе деградации с течением времени напряжения сверху балки уменьшаются, а снизу увеличиваются (на 30%), а прогиб балки увеличивается (на 5%).

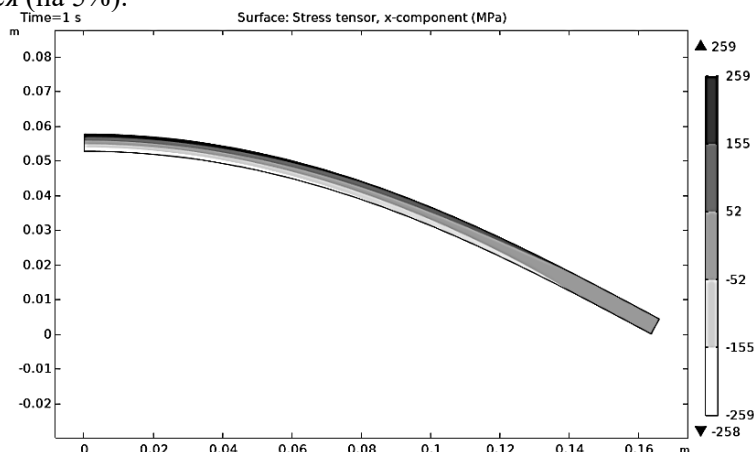


Рис. 2. Мозаика напряжений в половине образца при продольном изгибе при $t=0$ (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Stress mosaic in half of the specimen under longitudinal bending at $t=0$ (illustration by the authors)

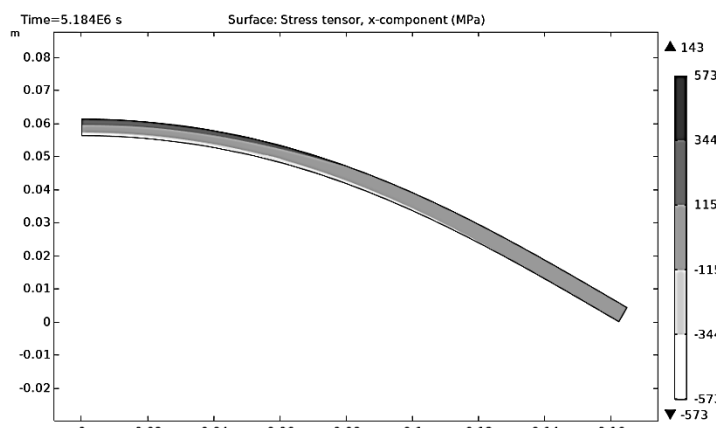


Рис. 3. Мозаика напряжений в половине образца при продольном изгибе при $t=1440$ часов (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Stress mosaic in half of the specimen under longitudinal bending at $t=1440$ hours (illustration by the authors)

На рис. 4 показана мозаика распределения концентрации агрессивной среды в образце при продольном изгибе. Как видно из рисунка, концентрация агрессивной среды в более нагруженной части образца возрастает заметно сильнее, чем в менее нагруженной. Неравномерность распределения концентрации по длине балки приводит к увеличению параметра деградации в центральной части образца, как следствие, к снижению жесткости и прочности материала.

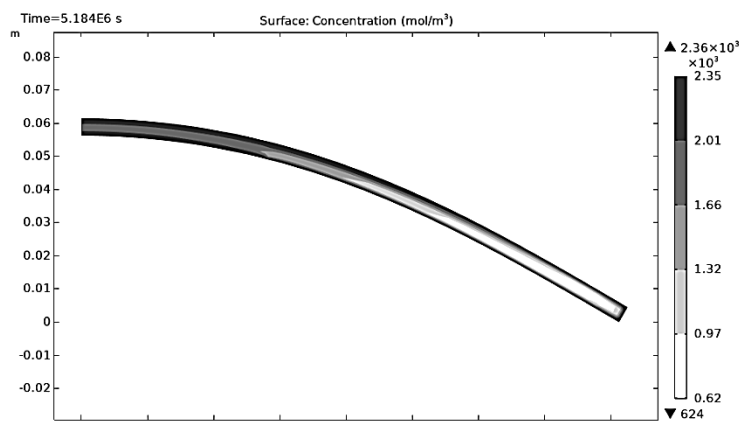


Рис. 4. Концентрация агрессивной среды в половине образца при продольном изгибе (при $t=1440$ часов) (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Concentration of the aggressive medium in half of the specimen under longitudinal bending (at $t=1440$ hours) (illustration by the authors)

Результаты расчетов воздействия щелочи на образец показаны на рис. 5 для остаточной прочности σ^* и на рис. 6 для модуля упругости E .

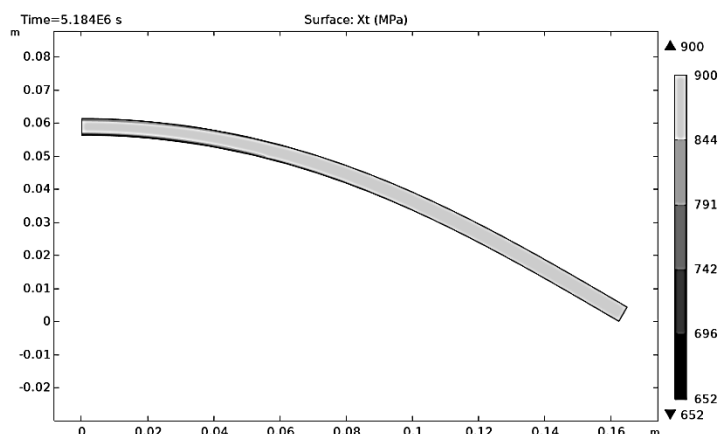


Рис. 5. Остаточная прочность материала в половине образца при продольном изгибе (при $t=1440$ часов) (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Residual strength of the material in half of the specimen under longitudinal bending (at $t=1440$ hours) (illustration by the authors)

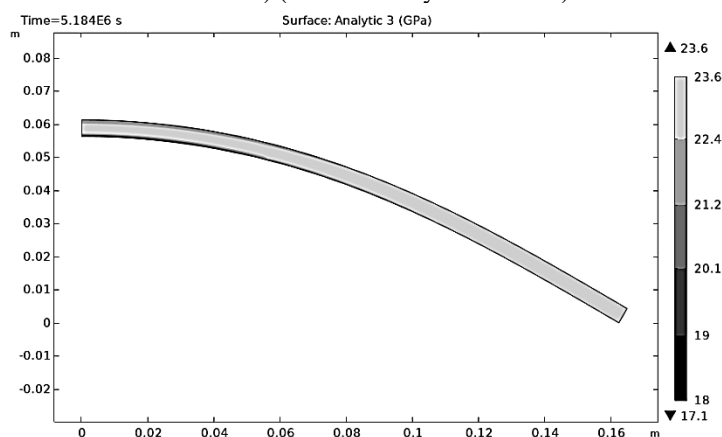


Рис. 6. Модуль упругости в половине образца при продольном изгибе (при $t=1440$ ч) (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Elastic modulus in half of the specimen under longitudinal bending (at $t=1440$ hours) (illustration by the authors)

Из решения задачи идентификации были найдены значения параметров модели деформирования и деградации, которые приводятся ниже:

$$D=2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}, \alpha=0,1, \beta=0,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{моль}, \gamma=1 \cdot 10^{-10} \text{ 1/Па}, k=0,92, m=1, n=7.$$

Как видно из сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, представленных на рис. 7, предложенные соотношения позволяют достаточно хорошо описывать процесс деградации стеклопластика в щелочной среде при рассматриваемых силовых воздействиях.

Были проведены испытания и конечно-элементные расчёты при других концентрациях щелочного раствора и других начальных максимальных напряжениях в центральном сечении. Их результаты также показали хорошее согласие с экспериментом.

Полученные результаты согласуются с данными других авторов. В частности, в работах [14, 34] показано, что длительная выдержка стеклопластиковых стержней в щелочной среде приводит к снижению прочности на 20-40 % за 1000-1500 часов, что близко к значениям, полученным в настоящей работе. Аналогичная тенденция отмечена в [16] для ПКМ стержней в морской воде и щелочных растворах.

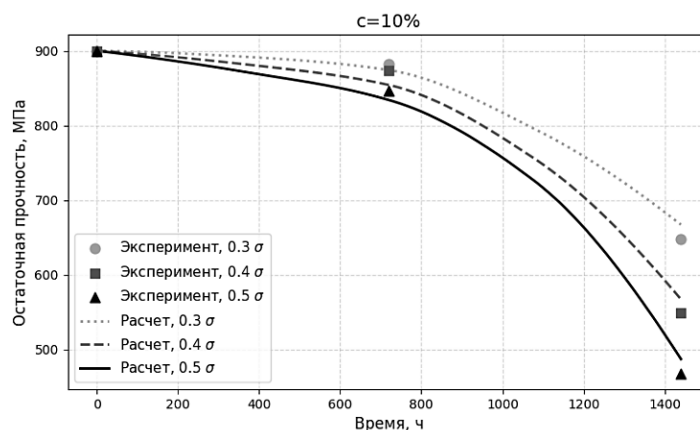


Рис. 7. Изменение прочности образца во времени при разных значениях начальных напряжений (иллюстрация авторов)

Fig. 7. Variation of specimen strength over time at different initial stress values (illustration by the authors)

4. Заключение

1. Разработана модель, отражающая изменение упругих, прочностных и диффузионных свойств материала во времени. С её помощью удалось добиться хорошего совпадения расчётных и опытных данных.

2. Полученные механические характеристики, физические зависимости и разработанный метод могут быть использованы для оценки долговечности балок из исследуемых материалов, работающих в условиях продольного изгиба и воздействия щелочной среды.

3. Процессы диффузии и деградации могут зависеть от знака напряжений и температуры. Учет этих факторов, а также касательных напряжений потребует дополнительных исследований при различных видах закрепления и нагружения.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

Список литературы/References

1. Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 263 с.
Alfutov N. A., Zinovyev P. A., Popov B. G. Analysis of multilayer plates and shells made of composite materials. Moscow, Machine-building Publishing house., 1984, 263 p.
2. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
Rabotnov Yu. N. Creep of structural elements. Moscow, Science, 1966, 752 p.
3. Cocks A. C. F., Ashby M. F. The growth of a dominant crack in a creeping material // Scripta Metallurgica. – 1982. – Vol. 16, no. 1. – P. 109-114. DOI: 10.1016/0036-9748(82)90413-6.
4. Ахундов М. Б. Повреждаемость и деформирование нелинейных наследственных сред при сложнапряженном состоянии // Механика композитных материалов. – 1991. – № 2. – С. 235–239.
Akhundov M. B. Damageability and deformation of nonlinear hereditary media under a complex stress state. // Mechanics of composite materials, 1991, No. 2, P. 235-239.
5. Арутюнян А. Р., Арутюнян Р. А. Критерий усталостной прочности композиционных материалов, основанный на концепции поврежденности // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – Т. 3. – С. 556-558.
Arutyunyan A. R., Arutyunyan R. A. A fatigue strength criterion for composite materials based on the damage concept. // XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of

- Theoretical and Applied Mechanics: collection of papers. Ufa, RITs BashGU Publ., 2019, Vol. 3, P. 556-558.
6. Arutyunyan R. A. High-Temperature Embrittlement and Long-Term Strength of Metallic Materials // *Mechanics of Solids*. – 2015. – Vol. 50, No. 2. – P. 191-197. DOI: 10.3103/S0025654415020089.
 7. Gao J., Zhu P., Yuan Y., Wu Z., Xu R. Strength and stiffness degradation modeling and fatigue life prediction of composite materials based on a unified fatigue damage model // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – Vol. 137. – Art. no. 106290. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106290.
 8. Khan K., Iqbal M., Jalal F.E., Nasir Amin M., Waqas Alam M., Bardhan A. Hybrid ANN models for durability of GFRP rebars in alkaline concrete environment using three swarm-based optimization algorithms // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 352. – Art. no. 128862. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128862.
 9. Ma P.-S., Zhang L.-W. High pressure and long-term gas diffusion coupled damage of composites through a multi-physical phase field framework // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2023. – Vol. 410. – Art. no. 116006. DOI: 10.1016/j.cma.2023.116006.
 10. Loukil M. S., Varna J. Effective shear modulus of a damaged ply in laminate stiffness analysis: Determination and validation // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 54, no. 9. – P. 1-16. DOI: 10.1177/0021998319874369.
 11. Yang W., Zhang X., Zhang K., Wu W., Liu L., Huang Y., Quan W., Tang Z., Xiong X., Li C. Effect of glass fiber on flexural performance of GFRP-RC beams under sustained loading and alkaline environment: Experimental, numerical and analytical investigations // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 433. – Art. no. 136620. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136620.
 12. Zhang C., Zhu Z., Wang S., Zhang J. Macro-micro mechanical properties and reinforcement mechanism of alkali-resistant glass fiber-reinforced concrete under alkaline environments // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 368. – Art. no. 130365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130365.
 13. Ji X.-L., Chen L.-J., Liang K., Pan W., Su R.K.-L. A review on FRP bars and supplementary cementitious materials for the next generation of sustainable and durable construction materials // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 383. – Art. no. 131403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131403.
 14. Wang P., Ke L., Wang Z., Zhao J., Li W., Leung C.K.Y. Effects of alkaline concentration and saline contents on degradation of tensile properties, microstructure and chemical characterization of glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebars // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 69. – Art. no. 106222. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106222.
 15. Nassar R.-U.-D., Soroushian P., Balachandra A., Weerasiri R., Darsanasiri N. Factors influencing strength loss of glass-fiber-reinforced composite bars in highly alkaline environment of concrete // *Structural Concrete*. – 2022. – Vol. 23, no. 2. – P. 1005-1017. DOI: 10.1002/suco.202100645.
 16. Sun Y., Jin Z., Zhang X., Pang B. Degradation of GFRP bars in alkaline environments: An experimental and molecular dynamics study // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 77. – Art. no. 107449. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107449.
 17. Qin G., Fan M., Li M., et al. Review of aging mechanisms, mechanical properties, and prediction models of fiber-reinforced composites in natural environments // *Polymer Composites*. – 2024. – Vol. 45, No. 16. – P. 14448. DOI: 10.1002/pc.28799.
 18. Ghabezi P., Harrison N.M. Multi-scale modelling and life prediction of aged composite materials in salt water // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2024. – Vol. 43, No. 3-4. – P. 205-219. DOI: 10.1177/07316844231160189.
 19. Старцев О. В. и др. Исследование долговечности полимерных композиционных материалов при статических нагрузках // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. – 2019. – № 6. – С. 9-20.
Startsev O. V. et al. Investigation of the durability of polymer composite materials under static loads. // *All materials. Encyclopedic reference book*, 2019, No. 6, P. 9-20.
 20. Каюмов Р. А., Шарафутдинова А. А. Об оценке долговечности строительных

- конструкций из стеклопластика // Известия КазГАСУ. – 2017. – № 2 (40). – С. 114–123.
- Kayumov R. A., Sharafutdinova A. A. On assessing the durability of fiberglass building structures. News of KSUAE, 2017, No. 2 (40), P. 114-123.
21. Каблов Е. Н., Старцев В. О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – № 12. – С. 7-16.
- Kablov E. N., Startsev V. O. Climatic aging of polymer composite materials for aviation purposes. I. Assessment of the influence of significant environmental factors. Deformation and destruction of materials, 2019, No. 12, P. 7-16.
22. Ke L., Leung C.K.Y., Wang P. Experimental and numerical research on the diffusion-degradation process of GFRP composite // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 327. – Art. no. 129031. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129031.
23. Zeng J.-J., Zhuge Y., Liang S.-D., Bai Y.-L., Liao J., Zhang L. Durability assessment of PEN/PET FRP composites based on accelerated aging in alkaline solution/seawater with different temperatures // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 327. – Art. no. 126992. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126912.
24. Feng S.-Z., Zeng J.-J., Zhao B., Hao Z.-H., Zhuge Y., Zhong Q.-M., Zhang Z.-W. Accelerated aging tests of large-diameter GFRP bars in alkaline environment // Composites Part C: Open Access. – 2024. – Vol. 14. – Art. no. 100486. DOI: 10.1016/j.jcomc.2024.100486.
25. Lebedev M. P., Startsev O. V., Kychkin A. K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics // Heliyon. – 2020. – Vol. 6, No. 3. – e03481. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03481.
26. D'Antino T., Bertolli V., Pisani M.A., Poggi C. Tensile and interlaminar shear behavior of thermoset and thermoplastic GFRP bars exposed to alkaline environment // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 72. – Art. no. 106581. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106581.
27. Zeng J.-J., Hao Z.-H., Liang Q.-J., Zhuge Y., Liu Y. Durability assessment of GFRP bars exposed to combined accelerated aging in alkaline solution and a constant load // Engineering Structures. – 2023. – Vol. 297. – Art. no. 116990. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116990.
28. Guo R., Li C., Xian G. Water absorption and long-term thermal and mechanical properties of carbon/glass hybrid rod for bridge cable // Engineering Structures. – 2023. – Vol. 274. – Art. no. 115176. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115176.
29. Ortiz J.D., Khedmatgozar Dolati S.S., Malla P., Nanni A., Mehrabi A. FRP-Reinforced/Strengthened Concrete: State-of-the-Art Review on Durability and Mechanical Effects // Materials. – 2023. – Vol. 16, no. 5. – Art. no. 1990. – DOI: 10.3390/ma16051990.
30. Iqbal M., Zhang D., Jalal F.E. Durability evaluation of GFRP rebars in harsh alkaline environment using optimized tree-based random forest model // Journal of Ocean Engineering and Science. – 2022. – Vol. 7, no. 6. – P. 596-606. DOI: 10.1016/j.joes.2021.10.012.
31. Паймушин В. Н., Каюмов Р. А., Холмогоров С. А. Особенности и модели деформирования косоугольно армированных волокнистых композитов со структурой $[\pm 45]_2s$ при растяжении // Механика композитных материалов. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 205-224. DOI: 10.3103/S1066369X18060087.
- Paimushin V. N., Kayumov R. A., Kholmogorov S. A. Specific features and deformation models of obliquely reinforced fibrous composites with a $[\pm 45]_2s$ structure under tension. Mechanics of composite materials, 2019, Vol. 55, No. 2, P. 205-224. DOI: 10.3103/S1066369X18060087.
32. Alsuhaibani E., Yazdani N., Beneberu E. Durability and Long-Term Performance Prediction of Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates // Polymers. – 2022. – Vol. 14, No. 15. – Art. no. 3207. DOI: 10.3390/polym14153207.
33. Karimi S., Yu J. Utilizing a combination of experimental and machine learning methods to predict and correlate between accelerated and natural aging of CFRP/AL adhesive joints under hygrothermal conditions // Polymer Composites. – 2024. – Vol. 46, No. 5. – P. 4096-

4111. DOI: 10.1002/pc.29226.

34. Micelli F., Corradi M., Aiello M.A., Borri A. Effect of Different Constituent Fiber, Resin, and Sizing Combinations on Alkaline Resistance of Basalt, Carbon, and Glass FRP Bars // Journal of Composites for Construction. – 2020. – Vol. 24, No. 3. – Art. no. 04020010. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001009.

Информация об авторах

Шакирзянов Фарид Рашитович, кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: faritbox@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6514-8335

Каюмов Рашит Абдулхакович, доктор физико-математических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: kayumovra@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0711-9429

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: alfred-sulejmanov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4036-1121

Михалдыкин Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, АО «ЮМАТЕКС», г. Москва, Российская Федерация

Email: e.mikhaldykin@umatex.ru, ORCID: 0000-0002-9457-9345

Information about the authors

Farid R. Shakirzyanov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: faritbox@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6514-8335

Rashit A. Kayumov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: kayumovra@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0711-9429

Alfred M. Suleimanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: alfred-sulejmanov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4036-1121

Evgeny S. Mikhaldykin, Candidate of Technical Sciences, “UMATEX” company, Moscow, Russian Federation

Email: e.mikhaldykin@umatex.ru, ORCID: 0000-0002-9457-9345

Дата поступления: 10.07.2026

Дата принятия: 29.09.2026