



УДК: 691.175.3

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.9

EDN: FTDCEN

Моделирование процесса деструкции композитных стержней при совместном воздействии силовых факторов и агрессивных сред

Р.А. Каюмов¹, А.М. Сулейманов¹, И.З. Мухамедова¹, Е.С. Михалдыкин²

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

²ЮМАТЕКС, г. Москва, Российская федерация

Аннотация. Для прогнозирования долговечности конструкций из композиционных материалов, в частности, из стеклопластиков (из них изготавливаются многие элементы, например, дорожных переходов, легкие ферменные и рамочные конструкции), необходимо знать законы их деградации. Целью работы является разработка метода оценки остаточной прочности композита при одновременном воздействии агрессивных сред и силовых факторов. Для этого решаются следующие задачи: разработать аналитический и численный методы расчета параметров напряженно-деформированного состояния образцов при продольном изгибе, предложить кинетические соотношения для ряда механических характеристик (упругих характеристик, концентрации агрессивной среды и глубины ее проникновения, предела прочности), получить параметры предложенных законов изменения механических характеристик на основе решения задачи идентификации, провести сравнение результатов, полученных экспериментально, аналитически и методом конечных элементов.

Приведены результаты натурных испытаний образцов, которые доведены до разрушения, но с периодическими замерами остаточных прогибов и пределов прочности. Построена модель диффузии агрессивной среды в материал. При описании явления деградации материала использовано соотношение, в котором в качестве параметра, характеризующего процесс деструкции, использована дополнительная деформация, вызванная деградацией композита. Для нее определяющее соотношение представлено в виде дифференциального уравнения по времени. Приведены результаты проведенных натурных экспериментов, сравнение их с решениями задачи деградации аналитическим и численным методами. Предложенные модели позволили получить достаточно хорошее согласование результатов расчетов и экспериментов.

Ключевые слова: эксперименты, деструкция, разрушение, модель деформирования, численное моделирование

Для цитирования: Каюмов Р.А., Сулейманов А.М., Мухамедова И.З., Михалдыкин Е.С. Моделирование процесса деструкции композитных стержней при совместном воздействии силовых факторов и агрессивных сред // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 99-110, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.9, EDN: FTDCEN

Modeling the destruction process of composite rods under the combined influence of force factors and aggressive environments

R.A. Kayumov¹, A.M. Suleymanov¹, I.Z. Mukhamedova¹, E.S. Mikhaldykin²

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

²UMATEX, Moscow, Russian Federation

Abstract. To predict the durability of structures made of composite materials, in particular, fiberglass (many elements are made from them, for example, road crossings, light truss and frame structures), it is necessary to know the laws of their degradation. The aim of this study is to develop a method for assessing the residual strength of a composite under the simultaneous influence of aggressive environments and force factors. The following problems were solved. Analytical and numerical methods were developed for calculating the parameters of the stress-strain state of specimens under longitudinal bending. Kinetic relationships were proposed for several mechanical characteristics (elastic properties, aggressive environment concentration and penetration depth, and tensile strength). Parameters for the proposed laws of change in mechanical characteristics were obtained based on the solution of an identification problem. The results obtained experimentally, analytically, and using the finite element method were compared. The results of full-scale tests of specimens brought to failure, but with periodic measurements of residual deflections and tensile strength, are presented. The model of aggressive environment diffusion into the material is constructed. When describing the phenomenon of material degradation, a relationship was used in which additional deformation caused by the degradation of the composite was used as a parameter characterizing the destruction process. The constitutive relation for this problem is presented as a time-differential equation. The results of field experiments are presented, compared with solutions to the degradation problem using analytical and numerical methods. The proposed models yielded reasonably good agreement between the calculated and experimental results.

Keywords: experiments, destruction, failure, deformation model, numerical modeling

For citation: Kayumov R.A., Suleimanov A.M., Mukhamedova I.Z., Mikhaldykin E.S. Modeling the destruction process of composite rods under the combined influence of force factors and aggressive environments // News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 99-110, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.9, EDN: FTDCEN

1. Введение

Элементы строительных конструкций часто испытывают не только статическое и циклическое нагружение, но и воздействие влаги, ультрафиолета и агрессивных сред, поскольку они находятся в открытом пространстве. Все это может вызвать неупругие деформации, а также привести к деградации материала.

Для описания процесса деградации предложен ряд теорий [1-2]. В частности, были введены разные меры деградации:

$$\omega(\tau) = (A_0 - A_{eff}) / A_0, \quad \sigma_{eff}(\tau) = \sigma / (1 - \omega(\tau)) \quad (1)$$

где A_0 , A_{eff} (см.²) - начальная и реально несущая нагрузку площади сечения, ω - параметр поврежденности (безразмерная величина), σ - напряжение (Н/см.²), τ - время (час.).

Физическое уравнение для описания процесса деградации было принято в виде [1]:

$$\dot{\omega} = [B \cdot \sigma / (1 - \omega(\tau))]^n, \quad \omega(0) = 0. \quad (2)$$

Здесь B (см.²/Н), n (безразмерная величина), зависят от температуры, интенсивности и вида агрессивной среды. В случае сложного напряженного состояния были предложены и другие меры деградации, учитывающие и физически нелинейное деформирование материалов [3-4]. Для композитов они были рассмотрены, например, в [5-6].

Процесс деформирования и деградации армированных сред имеет особенности в зависимости от структуры и типа компонент композиционных материалов (КМ), от вида

нагружения (в частности, для композитов, образованных укладкой углепластика под углом $\pm 45^\circ$, характерно наличие неупругих деформаций). Поэтому модели, применяемые для описания этих процессов, отличаются от обычно применяемых для металлических элементов конструкций. При этом вид связи напряжений с полными деформациями зависит от состояний «нагрузка-разгрузка» и от знака деформации. В осях ортотропии слоя принимается, что деформации, вызванные микроповреждениями, появляются только при растяжении поперек армирования и сдвиге. Иногда принимается, что при сжатии отсутствуют линейные деформации, вызванные деградацией КМ, а при сдвиге накопление повреждений считается не зависящим от знака касательных напряжений.

В общем случае уровень деградации учитывается не только при оценке прочности, но и в физических соотношениях, описывающих упругие и реологические процессы. Например, в [7] рассмотрена связанная задача теории пластического течения и теории поврежденности, в [1] физические соотношения для параметра поврежденности содержат деформации ползучести.

Существуют теории, в которых в качестве меры деградации используется величина интенсивности накопленных деформаций ползучести (см. в [8-9]). В работе [10] было предложено следующее соотношение для параметра деградации:

$$\omega(\tau) = 1 - \sigma / \left(\sigma + \int_0^\tau M(\tau - \theta) \cdot \sigma(\theta) d\theta \right). \quad (3)$$

В интегральной форме соотношение для параметра деградации было предложено и в [11]:

$$\omega(\tau) = (1 + m) \int_0^\tau \frac{(\tau - \theta)^m}{\zeta^{1+m}} d\theta. \quad \zeta = \zeta(\sigma). \quad (4)$$

При циклическом нагружении в ряде работ в качестве параметра деградации принимались также и другие величины, например, - относительное изменение модуля упругости, отношение плотностей в текущий и начальный моменты времени [12,13]. Имеются предложения оценивать уровень деградации остаточной жесткостью или остаточной прочностью [14].

Прогнозированию поведения элементов конструкций в условиях накопления повреждений с использованием методов теории вероятности посвящена работа [15], в которой приводится значительный экспериментальный материал.

Обзор методов экспериментальной оценки уровня деградации материала и его эволюции можно найти, например, в [16]. Результаты большой серии экспериментов, посвященных анализу процессов деградации композитов, можно найти также в [17-18]. В ряде экспериментальных работ используется анализ генерации тепла, образующегося при необратимых деформациях [19].

Некоторые другие подходы к анализу процессов деградации и разрушения можно найти, например, в [20-21], в том числе и для композитов. Они позволяют проводить оценку долговечности конструкций [21-22].

По результатам приведенного краткого обзора можно сделать следующие некоторые выводы. Как было отмечено выше, в ряде работ (см., например, [12]) предлагается в качестве параметра поврежденности принимать падение секущего модуля на текущем этапе цикла нагружения. Однако это можно считать справедливым только в случае, когда нет деформаций, вызванных реологическими свойствами композита. Наличие вязкоупругих и вязкопластических деформаций приводит к тому, что секущий модуль на этапе одного цикла нагружения растет, особенно на начальных циклах (это обнаружено и в авторских экспериментах для образцов, образованных перекрестной укладкой углепластика под углом $\pm 45^\circ$ при циклическом нагружении). Оказалось, что такой рост модуля даже при малых нагрузках может продолжаться в течение нескольких часов. Поэтому величина падения секущего модуля, вызванная накоплением повреждений, может быть определена только при известных законах для реологических составляющих деформаций. Поскольку даже во время статических испытаний композита может происходить деградация материала (скорее всего, это будет иметь место), значит, будет происходить изменение секущего модуля на одном цикле, вызванное также и деградацией.

Поэтому сводить задачу только к изменению секущего модуля в рассматриваемом случае для образцов, образованных перекрестной укладкой углепластика под углом $\pm 45^\circ$, при циклическом нагружении вызывает сомнения.

Аналогичные недостатки имеют модели, описывающие деградацию материала, например, основанные на потере энергии (выделении тепла), поскольку эти потери вызываются также вязкоупругими и вязкопластическими деформациями.

Для подходов, аналогичных классическим [1,2] и использующим эффективные или эквивалентные напряжения (см., например, [7-9]), можно отметить, что они не учитывают изменение жесткости материала. А это может быть важным при расчете элементов конструкций, на которые накладываются ограничения не только по прочности, но также по деформациям и перемещениям.

Для моделей деградации, основанных на соотношениях наследственного типа, можно отметить тот недостаток, что они приводят к «залечиванию» (т.е. к исчезновению) повреждений с течением времени после снятия нагрузки.

У эндохронных теорий также имеются недостатки. Относительно материалов, образованных перекрестной укладкой монослоев под углом $\pm 45^\circ$, известно, что они проявляют достаточно сильные реологические свойства даже при не очень больших временах нагружения и напряжениях, а деформации ползучести сопоставимы с упругими деформациями. Поэтому для таких композитов использование каких-либо других моделей, например, использующих эндохронные теории накопления повреждений без учета реального времени, может вызвать трудности. Например, в [23-25] предлагается комплексная система прогнозирования усталостной долговечности в режиме реального времени.

По результатам обзора можно сделать вывод, что любые модели деградации имеют как свои достоинства, так и недостатки. Для одних классов конструкционных материалов (в том числе, композиционных) и одних условий работы они приводят к хорошему согласованию с экспериментом, а для других нет. Поэтому продолжается разработка различных теорий, которые могли бы приводить к менее сложным методикам проведения экспериментов или к менее сложным расчетным методам.

Вопросы влияния различных дефектов и накопления повреждений на механические характеристики композитных конструкций рассмотрены также в работах [26-28], в которых также проведен обзор существующих математических и экспериментальных методов, предложены модели деградации свойств композитов, дается оценка влияния поврежденности на изменение свойств композита и на распределение напряжений.

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

Задачи исследования: провести натурные испытания на продольный изгиб стеклопластиковых образцов; разработать методы оценки их напряженно-деформированного состояния с учетом геометрической нелинейности; разработать кинетические соотношения для механических параметров; разработать аналитический и численный методы решения задачи продольного изгиба; получить параметры предложенных законов изменения механических характеристик на основе решения задачи идентификации путем сравнения расчетных и экспериментальных результатов; провести сравнение результатов, полученных экспериментально, аналитически и методом конечных элементов.

2. Материалы и методы

Рассматривается плоский стеклопластиковый образец, установленный после продольного изгиба между двумя опорами (см.рис.1). Закон Гука при упругом изгибе записывается в виде:

$$M = E_0 J w'''. \quad (5)$$

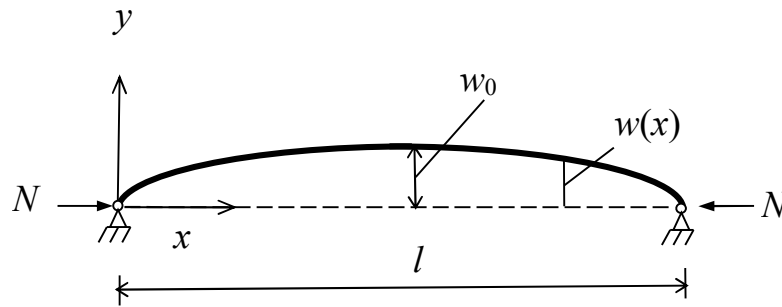


Рис. 1. Схема деформирования плоского образца при продольном изгибе. (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Schematic diagram of deformation of a flat specimen under longitudinal bending. (illustration by the authors)

В соотношении (5), а также на рис.1 через $w(x)$ обозначен прогиб стержня, продольно изогнутого под действием сжимающей силы N , w_0 – прогиб в центре, штрихами обозначены производные функции $w(x)$ по координате x , J – это момент инерции сечения, E_0 – Модуль упругости, который можно определить из соотношения:

$$N = \left(1 + \frac{\pi^2 w_0^2}{8l_0^2} \right) \frac{\pi^2 E_0 J}{l_0^2}. \quad (6)$$

Здесь l_0 – начальная длина стержня.

Соотношение (6) получено в [29] из решения геометрически нелинейной задачи о продольном изгибе балки.

В случае, когда волокна расположены вдоль образца, можно считать, что деформациями ползучести при наличии деградации можно пренебречь. Тогда можно записать соотношение:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{\omega}. \quad (7)$$

Здесь ε^{el} – упругая часть деформации, ε^{ω} – деформация, вызванная деградацией материала под действием агрессивной среды интенсивности γ .

Далее вводится гипотеза, согласно которой ε^{ω} считается зависящей от времени, от напряжения и интенсивности γ агрессивной среды в следующем виде:

$$\varepsilon^{\omega} = \beta(\gamma) \cdot |\sigma|^{k_{\sigma\omega}} [1 + \Omega(\gamma) \cdot |\varepsilon^{\omega}|^{k_{\omega}}]. \quad (8)$$

Параметры k_{σ} , k_{ω} и функции β , Ω должны быть определены из экспериментов. В простейшем случае для уменьшения искомых величин можно, например, принять $\beta = \beta_0 \gamma$, $\Omega = \Omega_0 \gamma$.

Глубина проникновения агрессивной среды по толщине обозначается через ξ . Далее необходимо принять закон распределения γ по этой глубине. Если следовать аппроксимации результатов, получаемых на основе закона Фика, то можно принять квадратичную функцию:

$$\gamma = a \cdot y^2 + c, \quad \text{При } \xi < h/2: \quad a = \gamma_0 / (\xi \cdot h - \xi^2), \quad c = -a(h/2 - \xi)^2. \quad (9a)$$

$$\text{При } \xi > h/2: \quad a = 8\gamma_0(1 - \xi/h) / \xi^2, \quad c = \gamma_0(2\xi/h - 1)^2. \quad (9b)$$

Для параметра ξ принимается кинетическая гипотеза в виде:

$$\xi = h \cdot \xi_0 \cdot k \cdot t^{k-1} / (1 + \xi_0 t^k)^2, \quad \xi(0) = 0. \quad (10)$$

Это соотношение может быть проинтегрировано в виде:

$$\xi = h \xi_0 t^k / (1 + \xi_0 t^k). \quad (11)$$

Для интенсивности агрессивной среды на поверхности принимается зависимость в виде:

$$\gamma_0 = \gamma_{00} \cdot (1 + \varphi_0 \cdot (\varepsilon^{\omega})^{k_{\gamma}}). \quad (12)$$

Здесь γ_{00} - интенсивность агрессивной среды в поверхностном слое образца в начале процесса. Поскольку образцы тонкие, то можно использовать гипотезу Бернулли:

$$\varepsilon = C \cdot y. \quad (13)$$

Закон Гука запишется в виде:

$$\sigma = E \varepsilon^{el} = E(\varepsilon - \varepsilon^o). \quad (14)$$

Тогда в центральном сечении для изгибающего момента можно записать соотношение:

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma \cdot y \cdot dy = \int_{-h/2}^{h/2} E(\varepsilon - \varepsilon^o) y \cdot dy. \quad (15)$$

Из рис.1 следует, что $M = N \cdot w_0$. Тогда зависимость между N, w_0 и деформациями получается в виде:

$$N \cdot w_0 = \int_{-h/2}^{h/2} E \cdot (C \cdot y - \varepsilon^o) y dy. \quad (16)$$

Интегрировать (16) приходится численно. Для определения C используем геометрическое соотношение, которое связывает деформацию ε с прогибом на поверхности балки:

$$\varepsilon^{\max} = \frac{h}{2} C = \frac{h}{2} w''. \quad (17)$$

Прогиб w будем аппроксимировать функцией:

$$w(x) = w_0 \sin \frac{\pi x}{l}. \quad (18)$$

Тогда из (17) и (18) вытекает соотношение для C :

$$C = w_0 \pi^2 / l^2. \quad (19)$$

Для модуля упругости E вводится аппроксимация (далее t_0 - масштабирующий делитель):

$$E = E_0 / (1 + (\alpha_0 t / t_0)^{k_E}). \quad (20)$$

Для оценки остаточной прочности материала принимается предположение о том, что с увеличением параметра деградации ε^o уменьшаются пределы прочности на растяжение σ^+ и сжатие σ^- . Можно в простейшем случае принять следующую зависимость:

$$\sigma^+ = \sigma_0^+ (1 - s_0^+ |\varepsilon^o|)^{k_{Limit}}, \quad \sigma^- = \sigma_0^- (1 - s_0^- |\varepsilon^o|)^{k_{Limit}}. \quad (21)$$

Для определения искомых параметров приходится минимизировать квадратичную невязку системы уравнений (20), (16), (11). После этого по результатам испытаний на прочность в различные моменты выдержки в агрессивной среде можно найти параметры, входящие в (21) путем минимизации невязки экспериментальных и расчетных значений σ^+ и σ^- .

3. Результаты и обсуждение

Были проведены экспериментальные исследования находящейся в щелочной среде плоской стеклопластиковой балки, схемы нагружения и закрепления которой приведены на рис.1. Были получены значения предела прочности, упругие характеристики, значения остаточных прогибов в различные моменты времени. Далее методом идентификации были получены значения механических характеристик, входящих в соотношения (8)-(21). Затем были проведены расчеты напряжений, деформаций и остаточных пределов прочности аналитическим и численным методами.

Ниже рассмотрен пример решения задачи моделирования процесса деградации стеклопластика при продольном изгибе образца, находящегося в щелочной среде, для случая степени концентрации $c = 15\%$. Приведены результаты натурных испытаний и расчётов. Принималось, что максимальное напряжение в центральном сечении составляет 30% от предельного. Было принято, что

$$l_0 = 350 \text{ мм.}, \quad b = 50 \text{ мм.}, \quad h = 5 \text{ мм.}, \quad w_0 = 50 \text{ мм.}, \quad \sigma_0^+ = \sigma_0^- = 900 \text{ МПа}, \quad E_0 = 23,6 \text{ ГПа}$$

В результате решения задачи идентификации были найдены значения параметров модели деформирования и деградации, которые приводятся ниже.

$$\begin{aligned}
s_0^+ = s_0^- = 71,5; \quad k_{\sigma Limit} = 7,0; \quad \alpha_0 = 2,64 k_{\sigma}; \quad \Omega_0 = 0,005; \\
t_0 = 100, \text{ час.}; \quad k_E = 7,9; \quad k_{\omega} = 1,0; \quad k_{\sigma\omega} = 2,0; \quad k_{\gamma} = 2,0; \\
\varphi_0 = 1,01 \cdot 10^3; \quad \gamma_{00} = c \cdot 1,33 \cdot 10^{-6}; \quad \beta_0 = 10^{-5}; \quad \xi_0 = 0,5;
\end{aligned}
\quad (22)$$

При использовании метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования процесса деструкции относительно вектора деформации, возникающего при развитии поврежденности, кинетическая зависимость была принята в виде:

$$\{\mathcal{E}^{\omega}\} = [D]^{-1} \cdot \{\sigma\} \cdot z \cdot \omega^k. \quad (23)$$

Здесь $[D]$ - матрица упругих постоянных для плоского напряженного состояния; z, k - некоторые постоянные величины, определяемые из экспериментов.

С учетом процесса накопления микроповреждений, полная деформация ε примет вид:

$$\{\varepsilon\} = \{e\} + \{\varepsilon^{\omega}\}. \quad (24)$$

где $\{e\}$ - упругая часть деформации. С учетом вышеизложенного, закон Гука примет вид:

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{\omega}\}). \quad (25)$$

Согласно принципу Лагранжа, можно записать следующее соотношение:

$$\int_V \delta \varepsilon^T \{\sigma\} dV = \delta \{U\}^T \{P\}. \quad (26)$$

Здесь $\{U\}$ - вектор перемещений, $\{P\}$ - вектор внешних сил, знак « T » означает операцию транспонирования. Таким образом, разрешающее уравнение равновесия в МКЭ примет вид:

$$[K]\{U\} = \{P\} + \{P^{\omega}\}. \quad (27)$$

Здесь $[K]$ - глобальная матрица жесткости. В узлах сетки, кроме вектора внешних узловых сил, действуют компоненты, отвечающие за процесс деградации $\{P^{\omega}\}$:

$$\{P^{\omega}\} = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon^{\omega}\} dV. \quad (28)$$

Для решения задачи продольного изгиба была использована методика, изложенная в работе [29]

Как видно из сравнения приведенных ниже результатов расчета с экспериментальными данными, предложенные соотношения позволяют достаточно хорошо описывать процесс деградации стеклопластика в щелочной среде при рассмотренных силовых воздействиях.

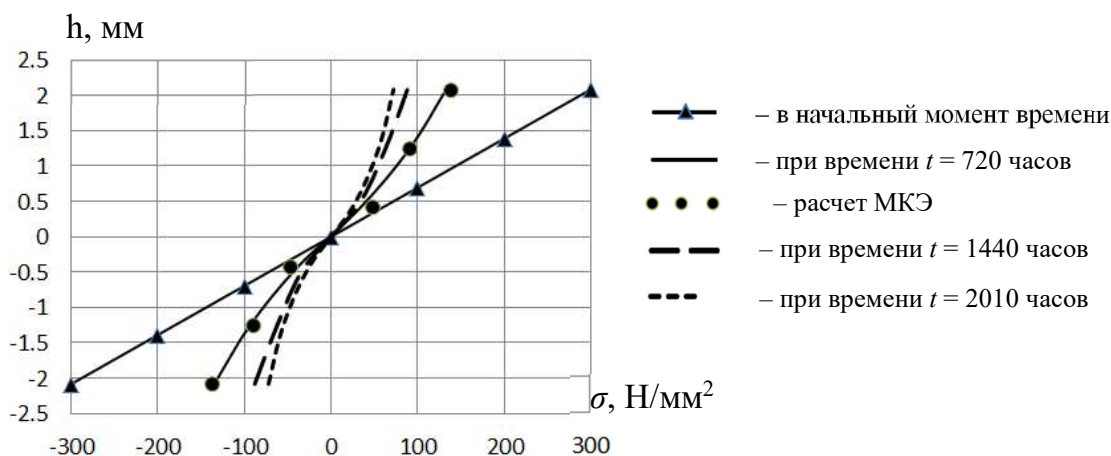


Рис.2. Распределение нормальных напряжений (по высоте среднего сечения образца в различные моменты времени) (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Distribution of normal stresses (along the height of the average cross-section of the specimen at different points in time) (illustration by the authors)

Аналогичные натурные испытания были проведены авторами при других значениях концентрации щелочи и других значениях максимальных напряжений в центральном сечении в начале процесса. Далее были проведены расчеты аналитическим и численным методами. Они тоже показали хорошее согласование с экспериментом.

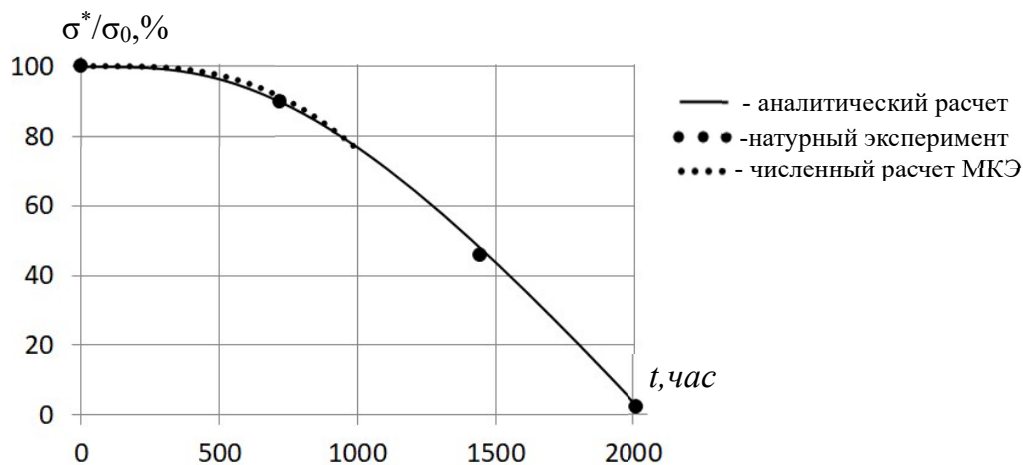


Рис.3. Расчётные значения предела прочности (в % к первоначальному) на поверхности образца в различные моменты времени. (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Calculated values of ultimate tensile strength (as a percentage of the initial tensile strength) on the specimen surface at different points in time. (illustration by the authors)

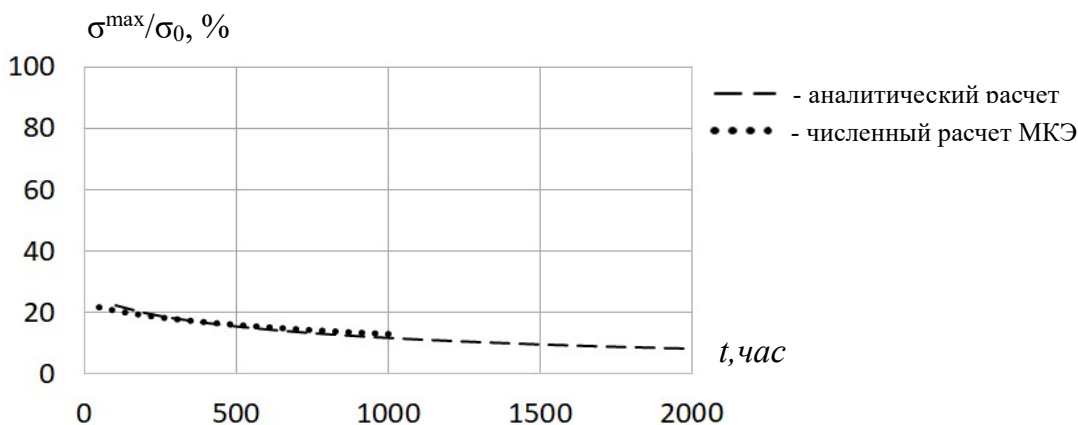


Рис.4. Значения максимальных напряжений (в % к первоначальному) в центральном сечении в различные моменты времени. (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Maximum stress values (as a percentage of the initial stress) in the central cross-section at different points in time. (illustration by the authors)

4. Заключение

1. В работе изложен краткий обзор моделей, описывающих процесс деградации материалов. Предложены модели, описывающие изменения с течением времени механических характеристик, а именно, упругих, прочностных, диффузионных. Эти модели позволили получить достаточно хорошее согласование результатов расчётов и экспериментов. Они позволяют обойти недостатки, присущие, некоторым известным теориям, предложенным в работах Работнова, Качанова, Мураками, Леметра, и др., в которых. Предложена модель диффузии агрессивной среды в материал, позволяющая обойти недостаток, присущий модели, которая описывается вторым законом Фика (который требует решения дифференциального уравнения и по времени, и по пространственным координатам. Как показано выше, он более правдоподобно описывает процесс диффузии агрессивной среды в рассматриваемый материал.

2. При описании явления деградации материала также используется отличное от обычных соотношение определяющее (предлагается использовать дополнительную деформацию, вызванную деградацией композита). Оно представлено в виде

дифференциального уравнения по времени. Это позволяет использовать простые методы его решения.

3. Полученные механические характеристики материала, физические соотношения и предложенные методы можно использовать для разработки способов оценки долговечности балок при продольном изгибе балок из рассмотренных материалов при наличии щелочной среды. Для прикидочных расчетов их можно использовать и в других случаях - при простом растяжении, сжатии, при поперечном изгибе.

4. Предложенные модели позволяют использовать методы, называемые методом температурно-временной и др., разработанные для теории ползучести. Однако это потребует дополнительных исследований.

5. Процессы диффузии и деградации в общем случае должны зависеть от знака напряжений и температуры. Учет этих эффектов потребует провести ряд экспериментальных и теоретических исследований. Кроме того, не было учтено влияние касательных напряжений. Для определения жесткостных, реологических характеристик и для учета влияния деградации от касательных напряжений и агрессивных сред потребуются проводить ряд экспериментальных и теоретических исследований при других видах закреплений и нагружений образцов.

Благодарности

Работа выполнена за счет представленного в 2025 г. Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Список литературы/References

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
Rabotnov Yu. N. Creep of structural elements. Moscow: Science, 1966. 752 p.
2. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. с.26-31.
Kachanov L. M. On the failure time under creep conditions // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. OTN. 1958. No. 8. P. 26-31.
3. Абдусаттаров А., Старовойтов Э.И., Рузиева Н. Б. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях. Ташкент, 2023. 381 с.
Abdusattarov A., Starovoytov E. I., Ruzieva N. B. Deformation and damage of elastic-plastic structural elements under cyclic loading. Tashkent, 2023. 381 p.
4. Sultanov L. U., Kadirov A. M., Modeling of Deformation of Solids with Material Damage//Lecture Notes in Computational Science and Engineering. 2022. Vol.141. P. 505 – 513.
5. Мураками С., Радаев Ю. Н. Математическая модель трехмерного анизотропного состояния поврежденности // Мех. тв. тела, 1996. № 4. с. 93 – 110.
Murakami S., Radaev Yu. N. Mathematical model of three-dimensional anisotropic state of damage // Mechanical Engineering, 1996. No. 4. P. 93 – 110.
6. Вильдеман В. Э., Староверов О. А., Мугатаров А. И., Кучуков А. М. Усталостная чувствительность стеклопластиков в условиях пропорционального циклического растяжения с кручением // Вестник ПНИПУ. Механика. 2023. № 6. С. 29 – 40.
Vildeman V. E., Staroverov O. A., Mugatarov A. I., Kuchukov A. M. Fatigue sensitivity of fiberglass under conditions of proportional cyclic tension with torsion // Bulletin of PNIPU. Mechanics. 2023. No. 6. P. 29 – 40.
7. Астафьев В. И., Радаев Ю. Н., Степанова Л. В. Нелинейная механика разрушения. Самара. Изд-во “Самарский университет”, 2001. 632 с.
Astafiev V. I., Radaev Yu. N., Stepanova L. V. Nonlinear mechanics of fracture. Samara. Samara University Publishing House, 2001. 632 p.
8. Ovchinnikov I. I., Mavzovin V. S. Modeling the stress-strain state of a circular plate subject to general corrosion according to various models // E3S Web of Conferences. 2021. P. 8. DOI 10.1051/e3sconf/2021263303009.

9. Dumansky A., Alimov M. Identification of elastic characteristics of unidirectional cfrp under off-axis tension taking into account the rates of loading // *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 910 KEM. P. 1096-1103.
10. Локощенко А. М., Фомин Л. В., Терауд В. В., Басалов Ю. Г., Агабабян В. С. Ползучесть и длительная прочность металлов при нестационарных сложных напряженных состояниях // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки»* Т. 24. № 2. 2020. С. 275 – 318.
Lokoshchenko A. M., Fomin L. V., Teraud V. V., Basalov Yu. G., Agababyan V. S. Creep and long-term strength of metals under non-stationary complex stress states // *Bulletin of Samara State Technical University. Series “Physical and Mathematical Sciences”* Vol. 24. No. 2. 2020. P. 275 – 318.
11. Лебедев М. П., Старцев О. В. Изменение прочности армированных пластиков при длительной эксплуатации в открытых климатических условиях // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2023. Т. 14. № 1. С. 40 – 45.
Lebedev M. P., Startsev O. V. Change in the strength of reinforced plastics during long-term operation in open climatic conditions // *Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences*. 2023. Vol. 14. No. 1. P. 40–45.
12. Арутюнян А. Р. Формулировка критерия усталостной прочности композиционных материалов // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2020. Т. 7 (65). Вып. 3. С. 511 – 517.
Arutyunyan A. R. Formulation of the fatigue strength criterion for composite materials // *Bulletin of St. Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2020. Vol. 7 (65). Iss. 3. P. 511 – 517.
13. Saitova R., Arutyunyan A., Altenbach H. High temperature creep and embrittlement in metals and alloys under conditions of the long-term usage // *Acta Mechanica*. 2024. 235(10): 6033-6055 DOI 10.1007/s00707-024-04026-6.
14. Cao L., Zhang T., Cui J., Vassilopoulos A.P. Transfer learning-based approach for evaluating residual stiffness in carbon fiber reinforced composites and adhesives // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 159, 2025, 111624, DOI 10.1016/j.engappai.2025.111624.
15. Агамиров Л.В., Агамиров В.Л., Тутова Н.В., Фролова Е.А. Вероятностные методы и компьютерная реализация расчетов на прочность при переменных нагрузках. Москва, 2024. 122 с.
Agamirov L.V., Agamirov V.L., Tutova N.V., Frolova E.A. Probabilistic methods and computer implementation of strength calculations under variable loads. Moscow, 2024. 122 p.
16. Сметанин И.В. Численное исследование процесса высокотемпературной ползучести и длительной прочности конструкционных сплавов при одноосном растяжении. Проблемы прочности и пластичности. 2021. Т. 83.3. С. 294 – 310.
Smetanin I.V. Numerical study of high-temperature creep and long-term strength of structural alloys under uniaxial tension. Problems of Strength and Plasticity. 2021. Vol. 83.3. P. 294 – 310.
17. Tao R. , Bao X., Shen J., Shi J., Wu X., Chen X., Cui H. Assessment of shield tunnel sealing degradation induced by rubber aging: An integrated experimental and numerical approach // *Construction and Building Materials*. Vol. 492. 2025, 142977. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2025.142977.
18. Kong D., Guo Q., Zhang J., Li W., Dong W. Experimental and numerical insights into the degradation mechanism of hybrid fibers-reinforced alkali-activated materials under coupled sulfate attack and dry-wet cycles // *Construction and Building Materials*. Vol. 500. 2025. 144266. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144266
19. Изюмова А. Ю., Вшивков А. Н., Плехов О. А. Развитие экспериментальной методики оценки эволюции усталостной трещины в титановых сплавах на основе энергетического подхода // *Физическая мезомеханика*. 2023. Т. 26. № 5. С. 61 – 70.
Izyumova A. Yu., Vshivkov A. N., Plekhov O. A. Development of an experimental technique for assessing the evolution of a fatigue crack in titanium alloys based on the

- energy approach // *Physical Mesomechanics*. 2023. Vol. 26. No. 5. P. 61 – 70.
20. Волков И.А., Игумнов Л.А., Костюков В.Е., Прилуцкий М.Х. Численный анализ долговечности элементов конструкций при термоциклическом нагружении // *Проблемы прочности и пластичности*. 2023. Т. 85. № 4. С. 551 – 564.
Volkov I.A., Igumnov L.A., Kostyukov V.E., Prilutsky M.Kh. Numerical analysis of the durability of structural elements under thermal cycling loading // *Problems of Strength and Plasticity*. 2023. Vol. 85. No. 4. P. 551 – 564.
21. Игумнов Л.А., Волков И.А., Казаков Д.А., Шишулин Д. Н., Модин И. А. Численное моделирование процесса ползучести титанового сплава при многоосном напряженном состоянии с учетом влияния агрессивной среды // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-матем. науки*. 2021. Т. 25. № 3. С. 435 – 456.
Igumnov L.A., Volkov I.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Modin I.A. Numerical modeling of the creep process of a titanium alloy under multiaxial stress state taking into account the influence of an aggressive environment // *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and mathematical sciences*. 2021. Vol. 25. No. 3. P. 435 – 456.
22. Li B., Chen C., Guo J., Liu Z., Qi B., Hua C. Multi-stress accelerated degradation modelling and reliability assessment method based on fatigue driving force energy and considering uncertainty damage // *Reliability Engineering & System Safety* Vol. 269, May 2026, 112100. DOI 10.1016/j.res.2025.112100
23. Курбатов Ю. Е., Кашеварова Г. Г. Определение упругих характеристик цементного камня для прогнозирования усталостной долговечности бетона // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 4. С. 476 – 486.
Kurbatov Yu. E., Kashevarova G. G. Determination of elastic characteristics of cement stone for predicting the fatigue life of concrete // *Bulletin of MGSU*. 2022. Vol. 17. No. 4. P. 476 – 486.
24. Ledon D. R., Bannikov M. V., Oborin V. A., Bayandin Yu. V., Naimark O. B. Prediction of the fatigue life of vt1-0 titanium in various structural states under very high cycle fatigue // *Letters on Materials*. 2021. Vol. 11. No. 4 (44). P. 422 – 426. DOI 10.22226/2410-3535-2021-4-422-426.
25. Брянский А. А., Башков О. В., Белова И. В., Башкова Т. И. Исследование развивающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 2. С. 7 – 16. DOI 10.18323/2782-4039-2022-2-7-16.
Bryansky A. A., Bashkov O. V., Belova I. V., Bashkova T. I. Study of developing damage under bending loading of polymer composite materials and their identification by the acoustic emission method // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. No. 2. P. 7 – 16. DOI 10.18323/2782-4039-2022-2-7-16.
26. Сапожников С. Б., Лешков Е. В., Игнатова А. В. Неупругое деформирование и прочность тканевого стеклопластика с отверстием при однократном и ультра малоцикловом нагружениях // *Композиты и наноструктуры*. 2025. Т. 17. № 4. С. 263 – 273. DOI 10.36236/1999-7590-2025-17-4-263-273.
Sapozhnikov S. B., Leshkov E. V., Ignatova A. V. Inelastic deformation and strength of fabric fiberglass with a hole under single and ultra-low-cycle loading // *Composites and Nanostructures*. 2025. Vol. 17. No. 4. P. 263-273. DOI 10.36236/1999-7590-2025-17-4-263-273.
27. Локощенко А. М., Агахи К. А., Фомин Л. В. Изгиб балки при ползучести с учетом поврежденности и разносопротивляемости материала // *Машиностроение и инженерное образование*. 2023. № 3, с. 29 – 35.
Lokoshchenko A. M., Agakhi K. A., Fomin L. V. Bending of a beam during creep taking into account damage and wear resistance of the material // *Mechanical engineering and engineering education*. 2023. No. 3, P. 29 – 35.
28. Paimushin, V. N., Kayumov, R. A., Kholmogorov S. A. Degradation of the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic under Cyclic Loading // *Mechanics of Composite Materials*, 2023. 59(2). P. 371 – 380. DOI 10.1007/s11029-023-10101-1.

29. Каюмов Р. А., Мухамедова И. З., Хайдаров Л. И., Тазюков Б. Ф. О задаче деградации композитных балок при продольном изгибе и методе решения при больших перемещениях // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. 2024, Т. 166, кн. 3 С. 364 – 376. DOI 10.26907/2541-7746.2024.3.364-376.

Kayumov R. A., Mukhamedova I. Z., Khaidarov L. I., Tazyukov B. F. On the problem of degradation of composite beams under longitudinal bending and the solution method for large displacements // Scientific Notes of Kazan University. Series: Physical and Mathematical Sciences. 2024, Vol. 166, Book 3, P. 364 – 376. DOI 10.26907/2541-7746.2024.3.364-376.

Информация об авторах

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

Мухамедова Инзилия Заудатовна, кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: muhamedova-inzilija@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5869-6686

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

Rashit A. Kayumov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: kayumovra@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4036-1121

Alfred M. Suleimanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4036-1121

Inziliya Z. Mukhamedova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: muhamedova-inzilija@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5869-6686

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

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

Дата поступления: 03.02.2026

Дата принятия: 29.04.2026