



УДК 539.376

Длительное разрушение составного стержня при растяжении в условиях ползучести в присутствии активной среды

Л. В. Фомин, Ю. Г. Басалов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт механики,
Россия, 119192, Москва, Мичуринский проспект, 1.

Аннотация

Рассматривается напряженно-деформированное состояние и длительная прочность составного растягиваемого стержня при ползучести в условиях воздействия на него активной окружающей среды. Конструкция состоит из центрального стержня и двух симметрично расположенных стержней относительно центрального, соединенных с идеальной адгезией. Ползучесть каждой из трех частей стержня описывается степенной реологической моделью с различными значениями параметра. Для определения времени до разрушения используется кинетическое уравнение, описывающее накопление повреждений в процессе ползучести, структура которого одна и та же для всех стержней. Влияние активной среды определяется диффузионным проникновением ее элементов в материал стержня. Используется приближенный метод решения уравнения диффузии, основанный на введении диффузионного фронта. Анализируется распределение напряжений во времени при условии проникновения активной среды в разные части стержня с различными коэффициентами диффузии. Выполнен параметрический анализ влияния напряжений и параметров реологических моделей материалов составного стержня на напряженно-деформированное состояние и длительную прочность как элементов стержневой системы, так и трехстержневой системы в целом. Определена зависимость времени до разрушения от соотношения коэффициентов диффузии активной среды в элементах составного стержня.

Ключевые слова: составной стержень, ползучесть, поврежденность, длительная прочность, активная среда, диффузионный фронт.

Механика деформируемого твердого тела**Краткое сообщение**

© Коллектив авторов, 2024

© СамГТУ, 2024 (составление, дизайн, макет)

 Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Фомин Л. В., Басалов Ю. Г. Длительное разрушение составного стержня при растяжении в условиях ползучести в присутствии активной среды // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2024. Т. 28, № 2. С. 390–400. EDN: **WXJJNS**. DOI: [10.14498/vsgtu2018](https://doi.org/10.14498/vsgtu2018).

Сведения об авторах

Леонид Викторович Фомин  <https://orcid.org/0000-0002-9075-5049>

кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник; лаб. проектирования и прикладных методов расчета композитных конструкций; e-mail: fleonid1975@mail.ru

Юрий Генрихович Басалов  <https://orcid.org/0000-0002-1416-3690>

ведущий инженер; лаб. проектирования и прикладных методов расчета композитных конструкций; e-mail: basalov@yandex.ru

Получение: 6 мая 2023 г. / Исправление: 23 ноября 2023 г. /
Принятие: 17 января 2024 г. / Публикация онлайн: 26 марта 2024 г.

Введение. Актуальность исследований высокотемпературной прочности материалов и конструкций [1], в том числе находящихся в условиях воздействия активных сред [2, 3], не подлежит сомнению. Современные материалы и элементы конструкций должны обеспечивать надежность и работоспособность изделий в течение всего срока службы в рабочих условиях с учетом их взаимодействия с внешними и/или рабочими средами. Наиболее часто для дополнительной защиты элементов конструкций от деструктивного воздействия внешней активной среды применяются типовые элементы составного типа. Внешний слой такой составной конструкции, как правило, контактирует с агрессивным веществом и защищает основные элементы конструкции от его разрушительного воздействия.

В статье [4] рассмотрено напряженно-деформированное состояние, кинетика накопления повреждений в процессе ползучести и определены времена до разрушения составного стержня при различных значениях материальных констант в уравнениях состояния ползучести и длительного разрушения его элементов.

В работе [5] проведен анализ влияния эксплуатационных условий на работу лопаток турбины в составе двигателя. Авторы отмечают, что особенностью работы лопаток турбин практически всех двигателей являются переменные нагрузки, высокие температуры газа перед турбиной, наличие высокоскоростного газового потока, которые в значительной мере усложняют условия работы лопаток, а совместное действие температуры, напряжений и окислительной среды приводит к диффузионным процессам в поверхностных слоях лопаток, ограничивающих их долговечность.

В статье [6] приведены результаты экспериментальных исследований влияния высокотемпературных покрытий на лопатках турбины и компрессора из жаропрочных никелевых и титановых сплавов на характеристики долговечности при газовой коррозии, термических и термомеханических циклических нагрузках: количественные характеристики трещиностойкости, вязкости разрушения, циклической долговечности.

В исследовании [7] определены условия, при которых обработка оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) из сплава Э110 мощным ультрафиолетовым или инфракрасным лазерным излучением приводит к повышению коррозионной стойкости при высокотемпературном (1100 °C) окислении, моделирующем условия аварии с потерей теплоносителя. Исследовано поведение защитных покрытий Al, Al₂O₃ и Cr, нанесенных методом импульсного лазерного осаждения на сталь ЭП823. Показаны методы практически полного подавления коррозии в жидком свинце до температуры 720 °C.

В статье [8] рассматривается радиационная ползучесть ТВЭЛа из двухслойной оболочки UN-SiC. Проведены исследования параметров с точки зрения скорости ползучести SiC при облучении и скорости отжига. Авторы отмечают тепловую эффективность оболочки SiC.

Монография [9] демонстрирует методы противодействия тепловым эффектам быстрой коррозии и деградации открытых материалов и оборудова-

ния, которые могут возникнуть при высоких рабочих температурах. Это первое настоящее практическое руководство по использованию термозащитных покрытий для применения в условиях высоких температур, включая последние разработки в области создания материалов, используемых для защитных покрытий.

Настоящая статья посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния и моделированию процессов разрушения такой типовой конструкции, как составной стержень, находящийся в условиях ползучести [1] при растяжении и воздействии на части стержня активной среды [2, 3].

1. Постановка задачи. Рассматривается составной призматический стержень длиной L прямоугольного поперечного сечения $H \times b$, $L \gg H \gg b$, в системе координат $Oxyz$ (рис. 1), находящийся в состоянии установившейся ползучести под действием постоянной растягивающей силы P , приложенной к его торцам. Расположение частей симметрично относительно срединной плоскости Oxz . Материалы центральной (1) и периферийной (2) частей составного стержня (см. рис. 1) удовлетворяют разным законам ползучести. Дополнительно примем следующее условие: все части составного стержня жестко, без проскальзывания соединены между собой.

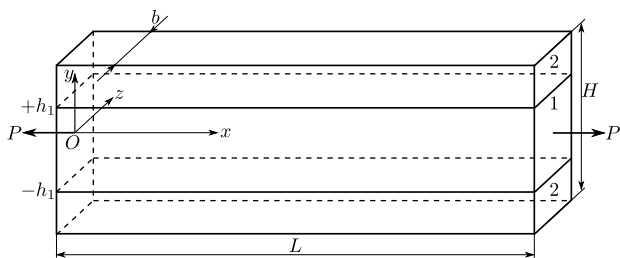


Рис. 1. Схема расположения частей в составном стержне
[Figure 1. Scheme of the arrangement of parts in a composite rod]

Рассмотрим ползучесть данного составного стержня, который дополнительно к действию растягивающей силы находится в активной среде. Влияние активной среды определяется ее диффузионным проникновением в материал составных элементов стержня. Поскольку $L \gg H \gg b$, влиянием диффузии с торцов стержня можно пренебречь, аналогично, влиянием продольной координаты стержня на диффузионный процесс можно пренебречь. Таким образом, процесс диффузии является одномерным по координате z . Ввиду принятых одинаковых граничных условий диффузии на гранях стержня в плоскости xOy процесс диффузии является симметричным относительно оси Oy . Примем различные характеристики диффузионного процесса для центральной части и двух крайних частей стержня. Пусть активная среда проникает в центральную часть (1) с коэффициентом диффузии $D_1 = \text{const}$, а в крайние части (2) — с коэффициентом диффузии $D_2 = \text{const}$.

Таким образом, распределение концентрации элементов активной среды в каждой части составного стержня подчиняется одномерным уравнениям диффузии:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tilde{t}_i} = \frac{1}{12} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{z}^2}, \quad \bar{c} = \bar{c}(\bar{z}, \tilde{t}_i), \quad 0 \leq \bar{z} \leq 1, \quad 0 \leq \tilde{t}_i < \infty, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где $\bar{z} = 2z/b$, $\tilde{t}_i = 48D_it/b^2$, $\bar{c} = c/c_0$; c_0 — равновесная концентрация (экспериментальная константа), достигаемая при $t \rightarrow \infty$. Начальные и граничные условия записываются в виде

$$\bar{c}(\bar{z}, 0) = 0, \quad \bar{c}(1, 0) = 1, \quad \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{z}}(0, \tilde{t}_i) = 0.$$

Предполагается наличие скачка концентрации на границе раздела активной окружающей среды и материала стержня в момент времени $\tilde{t}_i = 0$.

Предлагается приближенный метод решения уравнения диффузии (1), основанный на введении диффузионного фронта, который подробно описан в [2, 3, 10]. Такой подход позволяет разделить весь материал стержня на возмущенную (где среда уже проникла в материал) и невозмущенную (где еще нет проникновения среды) области и затем определять движение границы между этими областями во времени. Решение (распределение концентрации по координатам и времени) ищется в виде полинома, коэффициенты которого в общем виде являются функциями пространственных координат и времени. При этом граничные и начальные условия выполняются точно, а уравнение диффузии удовлетворяется интегрально во всем объеме стержня.

Рассматриваются две последовательные стадии процесса диффузии: стадия проникновения фронта (первая стадия) и стадия насыщения (вторая стадия). На первой стадии невозмущенная и возмущенная области стержня разделены движущейся границей $x = l(t)$, соответствующей диффузионному фронту; на второй стадии концентрация среды распространяется на весь стержень.

На основе предлагаемого подхода получено соотношение для интегрально средних безразмерных концентраций $\bar{c}_{mi}$, определяемых соотношением

$$\bar{c}_{mi} = \bar{c}_m(\tilde{t}_i) \equiv \int_0^1 \bar{c}(\bar{z}, \tilde{t}_i) d\bar{z}, \quad i = 1, 2.$$

Для рассматриваемой задачи

$$\bar{c}_{mi} = \bar{c}_m(\tilde{t}_i) = \begin{cases} \frac{1}{3}\sqrt{\tilde{t}_i}, & 0 \leq \tilde{t}_i \leq 1, \\ 1 - \frac{2}{3}\exp\left(\frac{1-\tilde{t}_i}{4}\right), & \tilde{t}_i > 1. \end{cases} \quad (2)$$

2. Определяющие и кинетические соотношения. Используя принятое условие длинномерности стержня, а также учитывая принцип Сен-Венана, рассмотрим напряженно-деформированное состояние вдали от мест приложения силы к торцам стержня. Аналогично [4] и с дополнительным условием симметрии диффузионного процесса относительно центральной плоскости симметрии примем одномерный вид напряженно-деформированного состояния в составном стержне.

Пусть соотношения, описывающие скорость деформации ползучести соответственно первой (центральной) и двух крайних частей, имеют вид

$$\dot{p}_i = \frac{B_i \sigma_i^n}{(1 - \omega_i)^n}, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

где σ_1 — напряжение в первой (центральной) части стержня, σ_2 — напряжения в двух крайних частях стержня; ω_1, ω_2 — соответствующие параметры поврежденности; B_1, B_2, n — материальные константы; точка означает производную по времени t .

Введем безразмерные переменные:

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1/\sigma_0, \quad \bar{\sigma}_2 = \sigma_2/\sigma_0, \quad \bar{t} = B_1\sigma_0^n t,$$

где σ_0 — некоторое характерное напряжение, например, половина предела кратковременной прочности σ_B ($\sigma_0 = \sigma_B/2$) при соответствующей температуре. Тогда определяющие соотношения (3) будут иметь следующий вид:

$$\frac{dp_1}{d\bar{t}} = \frac{\bar{\sigma}_1^n}{(1 - \omega_1)^n}, \quad \frac{dp_2}{d\bar{t}} = \frac{\bar{B}\bar{\sigma}_2^n}{(1 - \omega_2)^n},$$

где $\bar{B} = B_2/B_1$.

3. Учет влияния активной среды. Большинство экспериментальных данных показывает, что активная среда деструктивно влияет на материал, уменьшает время до разрушения по сравнению с эксплуатацией материалов и элементов конструкций в нейтральных условиях.

Процессы разрушения инициируются ростом повреждений в материале. Учет влияния активной среды в кинетических уравнениях накопления повреждений:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{A\sigma_i^m}{(1 - \omega_i)^m} f_i(\bar{c}_{mi}), \quad i = 1, 2; \\ \omega_i(0) &= 0, \quad \omega_i(t_i^*) = 1, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\omega_i = \omega_i(t)$; t_1^* — время до разрушения центральной части стержня, t_2^* — время до разрушения крайних частей стержня; A, m — материальные константы, которые определяются на основе испытаний на длительную прочность без влияния активной среды (в нейтральных условиях), при этом $f_i(\bar{c}_{mi}) = 1$.

В уравнениях (4) введены возрастающие функции от интегрально средних концентраций $f_i(\bar{c}_{mi})$ такие, что $f_i(0) = 1$.

С учетом единого для определяющих и кинетических уравнений безразмерного времени $\bar{t}$ уравнения (4) примут следующий вид:

$$\frac{d\omega_i}{d\bar{t}} = \frac{\bar{C}\bar{\sigma}_i^m}{(1 - \omega_i)^m} f_i(\bar{c}_{mi}), \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

где $\bar{C} = A\sigma_0^{m-n}/B_1$.

Поскольку кинетические соотношения (5) и соотношения (2) для интегрально средней концентрации $\bar{c}_m$ записаны в различных безразмерных временах $\bar{t}$, $\tilde{t}_1$ и $\tilde{t}_2$, для дальнейших расчетов необходимо перейти к одному единому безразмерному времени для задачи $\tilde{t}$:

$$\tilde{t}_i = K_i \bar{t}, \quad K_i = \frac{48D_i}{B_1\sigma_0^n b^2}, \quad i = 1, 2.$$

Отметим, что $K_2/K_1 = D_2/D_1 = \bar{D}$.

Тогда соотношения (2) примут вид ($i = 1, 2$)

$$\bar{c}_{mi}(\bar{t}) = \begin{cases} \frac{1}{3}\sqrt{K_i\bar{t}}, & 0 \leq \bar{t} \leq 1/K_i, \\ 1 - \frac{2}{3}\exp\left(\frac{1-K_i\bar{t}}{4}\right), & \bar{t} > 1/K_i. \end{cases} \quad (6)$$

Кинетические соотношения для первой (центральной) и двух вторых (крайних) частей составного стержня в едином безразмерном времени $\bar{t}$ примут вид

$$\frac{d\omega_i}{d\bar{t}} = \frac{\bar{C}\bar{\sigma}_i^m}{(1-\omega_i)^m} f_i(\bar{c}_{mi}(\bar{t})), \quad i = 1, 2,$$

где $\bar{c}_{mi}(\bar{t})$ определены в (6).

Принятое условие жесткого соединения частей стержня без проскальзывания и гипотеза плоских сечений дают возможность принять условие $p_1(\bar{t}) = p_2(\bar{t})$. С учетом этого факта и заданного начального условия $p_i(0) = 0$, $i = 1, 2$, имеем

$$\int_0^{\bar{t}} \frac{\bar{\sigma}_1^n}{(1-\omega_1)^n} d\bar{\tau} = \bar{B} \int_0^{\bar{t}} \frac{\bar{\sigma}_2^n}{(1-\omega_2)^n} d\bar{\tau}. \quad (7)$$

Выпишем уравнение равновесия с учетом выражений для безразмерных напряжений $\bar{\sigma}_1$ и $\bar{\sigma}_2$:

$$\Sigma_0 = \alpha\bar{\sigma}_1 + (1-\alpha)\bar{\sigma}_2, \quad (8)$$

где $\Sigma_0 = P/(bH\sigma_0)$, $\alpha = 2h_1/H$.

Выразим $\bar{\sigma}_2$ из (8):

$$\bar{\sigma}_2 = \frac{\Sigma_0 - \alpha\bar{\sigma}_1}{1-\alpha}.$$

С учетом уравнений (5)–(7) получим систему уравнений:

$$\frac{d\omega_1}{d\bar{t}} = \frac{\bar{C}\bar{\sigma}_1^m}{(1-\omega_1)^m} f(\bar{c}_{m1}(\bar{t})), \quad \omega_1(0) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{d\omega_2}{d\bar{t}} = \frac{\bar{C}(\Sigma_0 - \alpha\bar{\sigma}_1)^m}{(1-\alpha)^m(1-\omega_2)^m} f(\bar{c}_{m2}(\bar{t})), \quad \omega_2(0) = 0; \quad (10)$$

$$\int_0^{\bar{t}} \frac{\bar{\sigma}_1^n}{(1-\omega_1)^n} d\bar{\tau} = \bar{B} \int_0^{\bar{t}} \frac{(\Sigma_0 - \alpha\bar{\sigma}_1)^n}{(1-\alpha)^n(1-\omega_2)^n} d\bar{\tau}, \quad (11)$$

где $\omega_1 = \omega_1(\bar{t})$, $\omega_2 = \omega_2(\bar{t})$ и $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_1(\bar{t})$ — неизвестные величины.

В расчетах принят линейный вид функции от интегрально средних концентраций $f(\bar{c}_{mi})$:

$$f(\bar{c}_{mi}(\bar{t})) = 1 + a\bar{c}_{mi}(\bar{t}), \quad i = 1, 2,$$

где константа a определяется из эксперимента на длительную прочность образцов материала, находящихся в активной среде. В [11] для испытаний на длительную прочность образцов из углеродистой стали, находящихся в высокотемпературной воздушной среде [12], определено значение данной величины, равное $a = 9.5$.

Разрушение каждой части стержня определяется условиями $\omega_1(\bar{t}_1^*) = 1$ и $\omega_2(\bar{t}_2^*) = 1$. Общее время до разрушения всего составного стержня определяется величиной $\bar{t}^* = \min\{\bar{t}_1^*, \bar{t}_2^*\}$.

Результатом решения задачи являются зависимости величин $\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i(\bar{t})$, $\omega_i = \omega_i(\bar{t})$, $i = 1, 2$.

4. Пример численного расчета. Численное решение задачи (9)–(11) осуществлялось методом «шагами по времени», широко применяемым в теории неупругого реологического деформирования.

В качестве примера для численного расчета использовались следующие модельные значения параметров, фигурирующие в соотношениях (9)–(11):

$$m = n = 3, \quad \bar{C} = 2, \quad K_1 = 1, \quad K_2 = 2, \quad \bar{B} = 2, \quad \alpha = 0.5, \quad \Sigma_0 = 0.5.$$

Типичные расчетные зависимости для величин $\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i(\bar{t})$, $\omega_i = \omega_i(\bar{t})$, $i = 1, 2$, показаны на рис. 2.

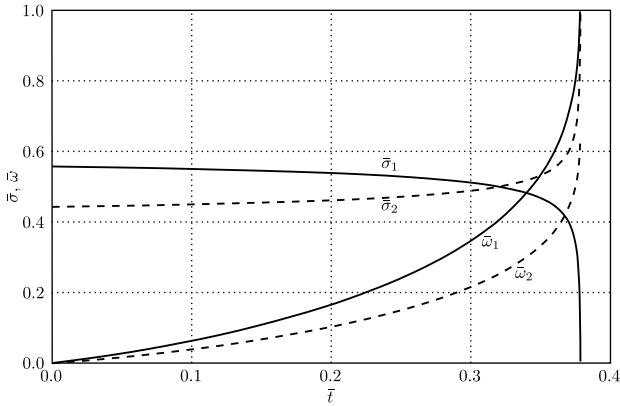


Рис. 2. Графики зависимостей величин $\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i(\bar{t})$, $\omega_i = \omega_i(\bar{t})$, $i = 1, 2$
[Figure 2. Graphs of dependences of quantities $\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i(\bar{t})$, $\omega_i = \omega_i(\bar{t})$, $i = 1, 2$]

5. Анализ полученных результатов. Выполнен параметрический анализ задачи для различных значений m , n , K_1 , K_2 , α и Σ_0 .

Предварительный анализ показал следующее:

- 1) с ростом значения $\bar{D} = D_2/D_1$, характеризующего отношение коэффициентов диффузии активной среды в части составного стержня, время до разрушения $\bar{t}^*$ составного стержня уменьшается;
- 2) с ростом показателей степеней $n = m$ в определяющих и кинетических соотношениях время до разрушения составного стержня увеличивается.

В статье [4] выполнено исследование аналогичного составного стержня без влияния активной среды и показано, что коэффициент $\bar{B} = B_2/B_1$ влияет на характер накопления поврежденности и на очередность разрушения частей составного стержня. Этот характер влияния коэффициента $\bar{B}$ на очередность разрушения частей составного стержня также справедлив и для настоящего исследования. Но в отличие от [4] в настоящей статье определение времен до разрушения составного стержня дополнительно зависит еще от диффузионных процессов в частях составного стержня.

Заключение. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния и определено время до разрушения составного стержня при ползучести в условиях воздействия на него активной окружающей среды и растягивающей нагрузки.

Изучение и моделирование таких процессов является предварительным опорным исследованием перспективной задачи о защите внешних частей составного стержня при его контакте с рабочей активной средой в условиях длительного действия нагрузки и повышенных температур.

На основе кинетической теории ползучести и длительной прочности Ю. Н. Работнова получены зависимости накопления поврежденности от времени в элементах составного стержня, при этом учтено диффузионное проникновение элементов активной среды в части стержня с различными коэффициентами диффузии.

В результате проведенного исследования проанализировано влияние параметров моделей ползучести и длительной прочности, коэффициентов диффузии на время до разрушения составного стержня. Такого рода исследования могут способствовать рациональному выбору необходимых материалов составных конструкций, работающих в активной среде.

Результаты настоящей работы могут быть применены в энергетическом машиностроении, авиационно-космической отрасли, судостроении и нефтехимическом машиностроении.

Конкурирующие интересы. Заявляем, что в отношении авторства и публикации этой статьи конфликта интересов не имеем.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи; все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной рукописи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 20-08-00387) и государственной НИР (номер ЦИТИС АААА-А16-116021110204-3; АААА-А19-119012990120-9).

Библиографический список

1. Работнов Ю. Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Наука, 1966. 752 с.
2. Локощенко А. М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
3. Lokoshchenko A., Fomin L. Kinetic theory of cand long-term strength of metals / *Kinetic Theory*. Rijeka: IntechOpen, 2018. pp. 51–69. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.70768>.
4. Фомин Л. В., Басалов Ю. Г. О длительном разрушении составного растягиваемого стержня в условиях ползучести // *Изв. РАН. МТТ*, 2023. № 1. С. 102–114. EDN: [KLPYU](https://doi.org/10.31857/S0572329922100087). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0572329922100087>.
5. Петрова М. А., Саадатибаи М., Тарасов А. И. Анализ условий работы поверхностных слоев рабочих лопаток турбины современных двигателей // *Научный вестник МГТУ ГА*, 2015. № 217. С. 124–127. EDN: [RWNDAE](https://doi.org/10.31857/S0572329922100087).
6. Абраимов Н. В., Золотарева А. Ю. Влияние высокотемпературных покрытий на характеристики надежности лопаточных элементов ГТД // *Электрометаллургия*, 2019. № 6. С. 24–32. EDN: [OSTDXN](https://doi.org/10.31857/S0572329922100087).
7. Борисов В. М., Трофимов В. М., Сапожков А. Ю. [и др.] О возможностях повышения коррозионной стойкости оболочек ТВЭЛов с использованием мощных лазерных и

- плазменных источников // *Ядерная физика и инжиниринг*, 2015. Т. 6, № 11–12. С. 643–650. EDN: XGWIPF. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079562915060032>.
8. Li W., Shirvan K. Implications of SiC irradiation creep and annealing to UN-SiC fuel rod behavior // *J. Nucl. Mat.*, 2020. vol. 542, 152479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152479>.
9. Bose S. *High Temperature Coatings*. Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann, 2018. xviii+398 pp. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01316-8>.
10. Lokoshchenko A. M., Fomin L. V. Delayed fracture of plates under creep condition in unsteady complex stress state in the presence of aggressive medium // *Appl. Math. Model.*, 2018. vol. 60. pp. 478–489. EDN: XYDIAH. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.03.031>.
11. Фомин Л. В. Описание длительной прочности растягиваемых стержней прямоугольного и круглого поперечных сечений в высокотемпературной воздушной среде // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2013. № 3(32). С. 87–97. EDN: PRWXIE. DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu1228>.
12. Одинг И. А., Фридман З. Г. Роль поверхностных слоев при длительном разрушении металлов в условиях ползучести // *Завод. лаб.*, 1959. Т. 25, № 3. С. 329–332.

MSC: 74R20

Long-term fracture of a composite rod under tension in creep conditions in the presence of an active medium

L. V. Fomin, Yu. G. Basalov

Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics,
1, Michurinsky prospekt, Moscow, 119192, Russian Federation.

Abstract

The stress-strain state and long-term strength of a composite tensile rod under creep conditions in the presence of an active environment are considered. The structure consists of a central rod and two symmetrically arranged rods relative to the central one, connected with perfect adhesion. The creep of each of the three parts of the rod is described by a power rheological model with different parameter values. To determine the time to failure, a kinetic equation is used to describe damage accumulation during creep, which has the same structure for all rods. The influence of the active environment is determined by the diffusion penetration of its elements into the rod material. An approximate method of solving the diffusion equation is used, based on introducing a diffusion front. The distribution of stresses over time is analyzed considering the penetration of the active environment into different parts of the rod with varying diffusion coefficients. A parametric analysis is carried out on the influence of stresses and parameters of the rheological models of the composite rod materials on the stress-strain state and long-term strength as elements of the rod system and the three-rod system as a whole. The relationship between time to failure and the ratio of diffusion coefficients of the active environment in the elements of the composite rod is determined.

Keywords: composite rod, creep, damage, long-term fracture, active medium, diffusion front.

Received: 6th May, 2023 / Revised: 23rd November, 2023 /

Accepted: 17th January, 2024 / First online: 26th March, 2024

Mechanics of Solids Short Communication

© Authors, 2024

© Samara State Technical University, 2024 (Compilation, Design, and Layout)

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this article in press as:

Fomin L. V., Basalov Yu. G. Long-term fracture of a composite rod under tension in creep conditions in the presence of an active medium, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2024, vol. 28, no. 2, pp. 390–400. EDN: **WXJJNS**. DOI: [10.14498/vsgtu2018](https://doi.org/10.14498/vsgtu2018) (In Russian).

Authors' Details:

Leonid V. Fomin  <https://orcid.org/0000-0002-9075-5049>

Cand. Phys. & Math. Sci.; Leading Researcher; Lab. of Design and Applied Methods of Calculation of Composite Structures; e-mail: leonid1975@mail.ru

Yuriy G. Basalov  <https://orcid.org/0000-0002-1416-3690>

Lead Engineer; Lab. of Design and Applied Methods of Calculation of Composite Structures; e-mail: basalov@yandex.ru

Competing interests. We declare that we have no conflicts of interest in the authorship and publication of this article.

Authors' contributions and responsibilities. Each author has participated in the article concept development; the authors contributed equally to this article. The authors are absolutely responsible for submit the final manuscript to print. Each author has approved the final version of manuscript.

Funding. This study was carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-08-00387) and State Budget Research Work (CITiS no. AAAA-A16-116021110204-3; AAAA-A19-119012990120-9).

References

1. Rabotnov Yu. N. *Creep problems in structural members*. Amsterdam, London, North-Holland Publ. Co., 1969, xiv+822 pp.
2. Lokoshchenko A. M. *Creep and Long-term Strength of Metals*. Boca, Raton, CRC Press, 2017, xviii+545 pp. EDN: YKQNZJ. DOI: <https://doi.org/10.1201/b22242>.
3. Lokoshchenko A., Fomin L. Kinetic theory of cand long-term strength of metals, In: *Kinetic Theory*. Rijeka, IntechOpen, 2018, pp. 51–69. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.70768>.
4. Fomin L. V., Basalov Yu. G. On the long-term fracture of a composite tensile rod under creep conditions, *Mech. Solids*, 2023, vol. 58, no. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0025654422100338>.
5. Petrova M. A., Saadatibai M., Tarasov A. I. Analysis of modern turbine engines working surface layers blades work conditions, *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 217, pp. 124–127 (In Russian). EDN: RWNDAE.
6. Abramov N. V., Zolotareva A. Yu. Effect of high-temperature coatings on the reliability characteristics of GTE blade elements, *Russ. Metall.*, 2019, vol. 2019, no. 12, pp. 1268–1274. EDN: KNYMBU. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029519120024>.
7. Borisov V. M., Trofimov V. N., Sapozhkov A. Yu., et al. On the capabilities of improving the corrosion resistance of fuel cladding by using high-power laser and plasma sources, *Nuclear Physics and Engineering*, 2015, vol. 6, no. 11–12, pp. 643–650 (In Russian). EDN: XGWIPF. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079562915060032>.
8. Li W., Shirvan K. Implications of SiC irradiation creep and annealing to UN-SiC fuel rod behavior, *J. Nucl. Mat.*, 2020, vol. 542, 152479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152479>.
9. Bose S. *High Temperature Coatings*. Cambridge, MA, Butterworth-Heinemann, 2018, xviii+398 pp. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01316-8>.
10. Lokoshchenko A. M., Fomin L. V. Delayed fracture of plates under creep condition in unsteady complex stress state in the presence of aggressive medium, *Appl. Math. Model.*, 2018, vol. 60, pp. 478–489. EDN: XYDIAH. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.03.031>.
11. Fomin L. V. Description of creep rupture strength of tensile rod with rectangular and circular cross-section at high temperature air media, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2013, no. 3(32), pp. 87–97 (In Russian). EDN: PRWXIE. DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu1228>.
12. Oding I. A., Fridman Z. G. Role of surface layers in long-term fracture of metals under creep conditions, *Zavod. Lab.*, 1959, vol. 25, no. 3, pp. 329–332 (In Russian).