

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

УДК 539.376, 539.42



Фомин Леонид Викторович

**Ползучесть и длительная прочность стержней и пластин
при растяжении и изгибе с учетом влияния агрессивной
среды**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва

2015

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”

**Научный
руководитель**

Локощенко Александр Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные
оппоненты**

Ванько Вячеслав Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры “Прикладная математика” Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана”

Думанский Александр Митрофанович, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Институт машиноведения имени А.А. Благонравова” Российской академии наук

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный университет”, математико-механический факультет

Защита диссертации состоится 30 октября 2015 года в 15 часов 00 мин на заседании диссертационного совета Д 501.001.91 по механике при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки МГУ по адресу: Москва, Ломоносовский проспект, д.27, сектор А, 8 этаж, к. 812 и на сайте <http://mech.math.msu.su>

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.91,
доктор физико-математических наук, профессор

С.В. Шешенин

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации.

На современном этапе развития, когда требования безопасности и надежности материалов и конструкций выдвигаются на первые позиции, использование передовых материалов, которые могут и должны работать в условиях высоких температурных и силовых воздействий, а также в присутствии агрессивных сред, становится необходимым условием развития экономики и жизни государства в целом.

Для оптимального решения фундаментальных и прикладных задач в этой области моделирование влияния указанных воздействий на материал и его прочностные и эксплуатационные характеристики становится необходимой и актуальной задачей механики деформируемого твердого тела. В частности, описание и моделирование процессов высокотемпературной ползучести и длительной прочности металлов с учетом накопления поврежденности материала и влияния агрессивной окружающей среды является неотъемлемой фундаментальной и прикладной проблемой. Актуальность исследования подобных процессов в настоящее время очевидна с точки зрения надежности элементов конструкций. Следует отметить, что подобное исследование должно охватывать широкий круг материалов, в том числе и те, свойства которых зависят от вида напряженно-деформированного состояния. Поэтому в данной диссертационной работе, наряду с задачами о растяжении стержней, рассматриваются задачи об изгибе стержней при ползучести, материал которых обладает различными свойствами при растяжении и сжатии. Определение времени до разрушения прямоугольной пластины, являющейся одним из распространенных элементов конструкций, в указанных условиях имеет как фундаментальный, так и прикладной характер при расчете элементов конструкций энергетического и авиационно-космического назначения.

Все вышеизложенное и определяет актуальность тематики диссертационной работы

Степень разработанности проблемы.

Актуальность обозначенных научных задач определяет необходимость их исследования и высокий научный уровень подхода к их решению. Широкий круг известных ученых занимаются решением фундаментальных и прикладных задач в этой области, в области моделирования влияния воздействий на прочностные и эксплуатационные характеристики материала.

В предлагаемой диссертационной работе автор рассматривает новый подход (с использованием дробно-степенных соотношений) с учетом влияния агрессивной среды, которому в настоящее время в научной литературе уделяется недостаточно внимания.

Цели и задачи диссертации.

Общая особенность диссертационной работы – развитие кинетической теории Ю.Н. Работнова и получение решений рассматриваемых задач при использовании определяющего и кинетического уравнений, как правило, в виде дробно-степенных зависимостей скорости ползучести и скорости накопления поврежденности от напряжения. При этом мгновенными упругопластическими деформациями пренебрегается по сравнению с деформациями ползучести. Сингулярность указанных соотношений позволяет учитывать, кроме проявления вязких свойств материала, также характеристики мгновенного разрушения.

В представляемой диссертационной работе ставятся и достигаются следующие цели и задачи:

1. Оценка влияния агрессивной среды на длительную прочность растягиваемых стержней с различными формами поперечных сечений.

2. Описание известных экспериментальных данных по длительной прочности растягиваемых стержней круглого и прямоугольного поперечных сечений с учетом влияния агрессивной среды.
3. Моделирование постепенного ослабления диффузионного процесса во времени с помощью учета переменного коэффициента диффузии.
4. Решение связанной задачи определения длительной прочности растягиваемого стержня, в которой учитывается взаимная зависимость уровня концентрации среды в материале стержня и величины накапливаемой поврежденности.
5. Решение цикла задач об изгибе балок при ползучести в различных постановках: с учетом разнсопротивляемости материала, дополнительного учета уровня накопленной при ползучести поврежденности, влияния агрессивной среды.
6. Исследование рассеянного разрушения прямоугольной пластины при изгибе с учетом влияния агрессивной среды в случае нестационарного плоского напряженного состояния. Определение времени до разрушения такой пластины при последовательном ступенчатом изгибе во взаимно ортогональных плоскостях.
7. Разработка метода определения накопления поврежденности во времени на основе обработки серии реальных кривых ползучести с учетом определяющего соотношения кинетической теории.

Научная новизна.

Во всей диссертационной работе для построения аналитических зависимостей времен до разрушения стержней и пластин, подверженных влиянию агрессивной среды, как правило, используются определяющее и кинетическое уравнения с дробно-степенными зависимостями скорости деформации ползучести и скорости накопления поврежденности от напряжения.

1. На основе кинетической теории с двумя структурными параметрами, а именно, концентрацией агрессивной окружающей среды и поврежденностью, определены особенности диффузионного процесса и длительной прочности.
 - а) Определено влияние формы поперечного сечения растягиваемых стержней на их длительную прочность с учетом влияния агрессивной среды.
 - б) Проведено моделирование длительной прочности растягиваемых стержней в агрессивной среде с учетом переменного коэффициента диффузии.
 - в) Решена связанная задача о диффузии агрессивной среды в растягиваемом стержне и накоплении поврежденности в нем в процессе ползучести.
2. Решен цикл задач об изгибе балки в условии ползучести при использовании дробно-степенных определяющих и кинетических соотношений. В этих соотношениях учитываются разнсопротивляемость материала при растяжении и сжатии, накопление повреждений в процессе ползучести и влияние агрессивной окружающей среды.
3. Предложен метод расчета времен до разрушения изгибаемых пластин при нестационарном сложном напряженном состоянии при учете влияния агрессивной окружающей среды. Использовались степенные и дробно-линейные определяющие и кинетические соотношения ползучести и длительной прочности. Показано, что время до разрушения пластины при использовании скалярного параметра поврежденности меньше, чем при использовании векторного параметра поврежденности.

4. Предложен новый метод определения зависимости поврежденности в растягиваемом стержне от времени, основанный на обработке серии экспериментальных кривых ползучести, с учетом определяющего уравнения кинетической теории. В этой постановке предполагается наличие поврежденности только на III стадии ползучести.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют фундаментальное значение в области механики деформируемого твердого тела, и особенно в развитии кинетической теории ползучести и длительной прочности Ю.Н. Работнова. Применение дробно-степенных определяющих и кинетических соотношений позволяет адекватно моделировать процессы ползучести и длительного разрушения с учетом влияния среды в стержне при растяжении и изгибе, прямоугольной пластины при изгибе, находящейся в условии нестационарного сложного напряженного состояния.

Также результаты диссертации могут иметь широко распространенное прикладное значение в областях, связанных с высокотемпературной ползучестью и длительной прочностью. К таким областям, в частности, относится авиационно-космическое и энергетическое машиностроение.

Методология и методы исследования.

Теоретической и методической основой исследования является кинетическая теория ползучести и длительной прочности Ю.Н. Работнова. В решении задач, учитывающих влияние агрессивной среды, используется приближенный метод решения уравнения диффузии на основе введения диффузионного фронта среды. Времена до разрушения определяются с использованием критериев разрушения, построенных с учетом скалярного и векторного параметров поврежденности.

Конкретизация и развитие кинетической теории Ю.Н. Работнова осуществляется с учетом введения двух структурных параметров: поврежденности и концентрации элементов окружающей агрессивной среды в материале стержней и пластин.

Предлагается новый метод определения поврежденности, основанный на обработке экспериментальных кривых ползучести с учетом определяющего соотношения кинетической теории.

Научные положения, выносимые на защиту.

- 1) Проведен анализ влияния формы поперечных сечений стержней на характеристики диффузионного процесса в них и на характеристики длительной прочности.
- 2) Определено влияние вида зависимости коэффициента диффузии от концентрации на характеристики длительной прочности растягиваемых стержней.
- 3) Определено взаимное влияние концентрации агрессивного вещества и поврежденности в материале растягиваемого в процессе ползучести стержня на диффузионный процесс, накопление повреждений и характеристики длительной прочности.
- 4) Определены характеристики ползучести и времена до разрушения балок при изгибе в процессе ползучести с учетом разнсопротивляемости, накопления поврежденности и влияния агрессивной среды.
- 5) Определены времена до разрушения прямоугольной пластины под действием кусочно-постоянных изгибающих моментов, приложенных к различным краям пластины, с учетом влияния агрессивной окружающей среды. Времена до разрушения определены с помощью кинетической теории ползучести и длительной прочности с использованием скалярного и векторного параметров поврежденности.

- 6) Разработан новый метод определения поврежденности, основанный на обработке серии экспериментальных кривых ползучести, с учетом определяющего соотношения кинетической теории.

Достоверность научных исследований вытекает из использования классического аппарата механики сплошных сред. Применяемая дробно-степенная модель ползучести и длительной прочности априори ограничивает уровень допускаемых напряжений различными пределами кратковременной прочности при растяжении и сжатии.

Учет влияния агрессивной среды на длительную прочность подтверждает многочисленные экспериментальные данные о снижении времени до разрушения в условиях длительного высокотемпературного действия напряжений. Показана аналогия с результатами испытаний на длительную прочность стержней при кусочно-постоянном растягивающем напряжении.

Предложенный новый метод определения поврежденности основан на результатах серии экспериментов с учетом определяющего соотношения ползучести.

Апробация результатов.

Результаты исследований и основные положения диссертации обсуждались на заседаниях секции “Ползучесть и высокотемпературная прочность” НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова (2009-2015 гг.); на конференциях “Ломоносовские чтения” (Секция механика, Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2009, 2010, 2012, 2013, 2014 гг.); на Международных инновационно-ориентированных конференциях молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (Москва, ИМАШ РАН имени А.А. Благоднарова, 2009, 2010, 2011 гг.); на X Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике (Нижегородский государственный университет имени

Н.И. Лобачевского, 24-30 августа 2011 г.); на Международной конференции “Живучесть и конструкционное материаловедение” (Москва, ИМАШ РАН имени А.А. Благонравова, 22-24 октября 2012 г.); на Международной конференции по механике и баллистике “8 Окуневские чтения” (Санкт-Петербург, 25-28 июня 2013 г.); на Международной конференции по механике композитных материалов МСМ-2014 (Рига, 2-6 июня 2014 г.); на научном семинаре механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова “Актуальные проблемы геометрии и механики” под руководством профессоров Д.В. Георгиевского, М.В. Шамолина и С.А. Агафонова (19 декабря 2014 г.); на научно-исследовательском семинаре лаборатории “Упругость и пластичность” НИИ механики МГУ под руководством профессора Р.А. Васина (11 марта 2015 г.); на научно-исследовательском семинаре кафедры теории пластичности механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством члена-корреспондента РАН Е.В. Ломакина (23 марта 2015 г.); на научно-исследовательском семинаре кафедры теории упругости механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством профессора И.А. Кийко (1 апреля 2015 г.); на научно-исследовательском семинаре кафедры механики композитов механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством профессора Б.Е. Победри (6 апреля 2015 г.).

Публикации по теме диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатной работе, в том числе в 9 статьях в научных журналах, из них 8 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 2 статьи в сборниках трудов конференций и 10 тезисов докладов. Кроме того, исследования по теме диссертации включены в содержание 5 научных отчетов НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова (2009–2012 гг., 2015 г.).

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка используемых источников, включающего 63 источника. Общее число страниц 198, число таблиц 16, число рисунков 45.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 11-08-00007 и № 14-08-00528).

Личный вклад автора

Во всех проведенных исследованиях постановка задач принадлежит научному руководителю, все преобразования и вычисления выполнены лично автором диссертации, а анализ полученных результатов проведен совместно научным руководителем и автором диссертации.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору А.М. Локощенко за постановку задач и общее руководство работой, автор выражает благодарность безвременно ушедшему (2010 г.) первому научному руководителю доктору физико-математических работ, доценту В.Н. Кузнецову, а также кандидату физико-математических наук К.А. Агахи за консультации и внимание к работе.

Основное содержание работы

Во введении приводятся и обосновываются актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные научные положения, выносимые на защиту, приводятся структура диссертационной работы, а также сведения о публикациях автора.

Глава 1. Моделирование процессов ползучести и длительной прочности при растяжении стержней с учетом поврежденности материала и влияния агрессивной среды

Глава 1 состоит из 3-х параграфов.

В параграфе 1.1 рассматривается приближенный метод решения уравнения диффузии, основанный на введении диффузионного фронта.

В связи с громоздкостью точного решения уравнения диффузии и необходимостью удерживать большое количество членов ряда для получения приемлемой точности в расчетах в начале параграфа описан приближенный метод решения уравнения диффузии, основанный на введении диффузионного фронта. Такой подход позволяет разделить весь материал поперечного сечения стержня на возмущенную (где среда уже проникла в материал) и невозмущенную области (где еще нет проникновения среды) и затем отслеживать во времени движение границы между этими областями. Зависимость концентрации от времени аппроксимируется в виде полиномов относительно поперечной координаты стержня, причем граничные и начальное условия выполняются точно, а уравнение диффузии удовлетворяется интегрально во всем поперечном сечении стержня.

Рассматриваются две стадии процесса диффузии: стадия проникновения фронта и стадия насыщения, когда концентрация во всем объеме рассматриваемого стержня отлична от нуля.

В диссертации показано, что представление приближённого решения уравнения диффузии в виде полинома с зависящими от времени коэффициентами приводит к решению задачи с достаточно высокой степенью точности (менее 2 %).

Далее определена взаимосвязь времен до разрушения образцов с учетом и без учета влияния агрессивной среды. Впервые для построения аналитических зависимостей времен до разрушения образцов с учетом влияния агрессивной среды и в нейтральных условиях используется кинетическое уравнение с дробно-степенной зависимостью скорости накопления поврежденности от напряжения. В качестве примера моделирования рассматриваются известные экспериментальные данные по длительной прочности образцов прямоугольного (виде тонкой полосы) и круглого поперечных сечений, находящихся в условиях высокотемпературной воздушной среды.

В завершающем подразделе параграфа оценивается влияние формы поперечного сечения растягиваемых стержней на длительную прочность в присутствии агрессивной окружающей среды. Предварительно проводится сравнение процессов диффузии в образцах различных поперечных сечений при условии равенства характерных размеров.

Полученная с помощью кинетической теории Ю.Н. Работнова взаимосвязь времен до разрушения стержней с учетом t^* и без учета t_0^* влияния агрессивной окружающей среды:

$$t_0^* = \left[(n+1) A \sigma_0^n \right]^{-1} = \int_0^{t^*} f(\bar{c}_m(t)) dt,$$

где σ_0 - номинальное напряжение, A , n - материальные параметры, $\bar{c}_m(t)$ - интегрально средняя концентрация элементов агрессивной среды в материале стержня

использовалась для сравнения времен до разрушения стержней с различными формами поперечных сечений.

На рис. 1 представлено сравнение времен до разрушения стержней с различными формами поперечных сечений. В качестве примера рассматривалась длительная прочность образцов из α -Fe, находящихся в среде водорода.

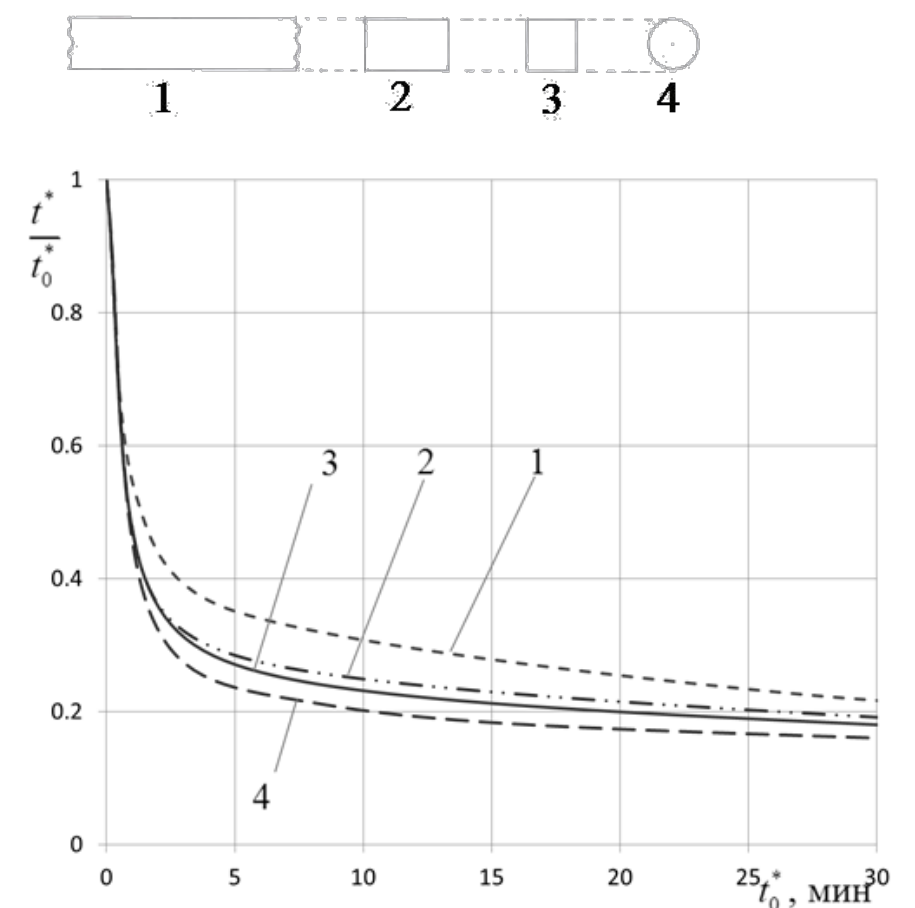


Рис. 1. Сравнение времен до разрушения стержней с различными формами поперечных сечений.

Из рис. 1 следует, что среди рассматриваемых форм поперечного сечения стержней при условии равенства характерных размеров минимальное время до разрушения соответствует стержню круглого поперечного сечения.

В параграфе 1.2 рассматривается влияние вида зависимости коэффициента диффузии от концентрации агрессивной среды на характеристики диффузионного процесса и длительной прочности растягиваемых стержней. При накоплении элементов внешней среды в материале стержня процесс диффузии постепенно замедляется.

Диффузионный процесс в таких условиях моделируется с помощью уравнения диффузии, в котором коэффициент диффузии D является монотонно убывающей функцией от концентрации c .

В качестве примера рассмотрим три вида зависимости $D(c)$:

$$D_0(c) = D_0 = \text{const}, \quad D_1(c) = D_0(1 + k_1 c)^{-1}, \quad D_2(c) = D_0(1 + k_2 c^2)^{-1},$$

D_0 - коэффициент диффузии в начальный момент времени, k_1 и k_2 - постоянные коэффициенты.

Используется приближенный метод решения уравнения диффузии, основанный на введении диффузионного фронта. Для определения времен до разрушения используется кинетическая теория Ю.Н. Работнова с дробно-степенной функцией зависимости скорости накопления поврежденности от напряжения:

$$\frac{d\omega}{dt} = B \left(\frac{\sigma}{\sigma_b - \sigma} \right)^n \frac{1}{(1 - \omega)^n} f(\bar{c}_m(t)),$$

здесь учет влияния агрессивной среды на материал определяется введением функции от интегрально средней концентрации $f(\bar{c}_m(t))$.

При определении времени до разрушения t^* стержней, растягиваемых в присутствии агрессивной среды, принимается функция $f(\bar{c}_m(t))$ линейного виде $f(\bar{c}_m(t)) = 1 + a\bar{c}_m(t)$, где $a = 9.5$ - оптимально найденная из экспериментов константа. В результате расчета построены графики соотношений времен до разрушения для различных зависимостей $D(c)$, представленные на рис. 2.

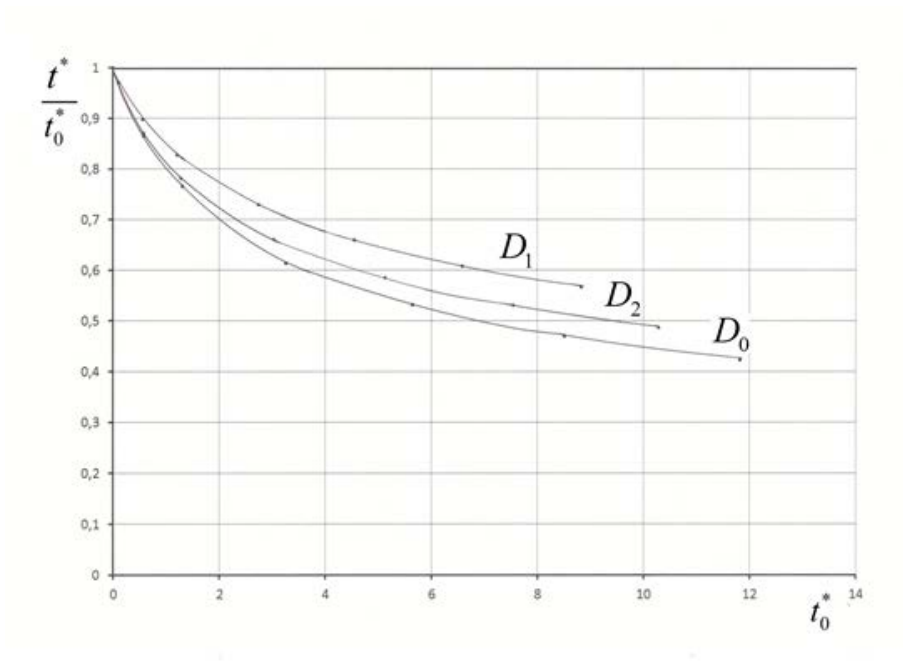


Рис. 2. Графики соотношений времен до разрушения для различных зависимостей $D(c)$.

Среди рассматриваемых видов зависимостей $D(c)$ наибольшее влияние на время до разрушения оказывает максимальная среди рассмотренных зависимость $D_0(c) = D_0 = \text{const}$.

В параграфе 1.3 решена связанная задача о диффузии агрессивной среды и накоплении поврежденности в процессе ползучести. Диффузионный процесс связан с накоплением поврежденности, а накопление поврежденности определяется значением концентрации. Задача решена в двух постановках: коэффициент диффузии зависит от поперечной координаты и времени и частный случай – только от времени.

Для простоты примем, что зависимость $D(\omega)$ - линейная:

$$D(\omega) = D_0(1 + k\omega), \quad D_0 = \text{const}, \quad k = \text{const}.$$

В первой постановке задача решается с учетом распространения фронта разрушения. Используются безразмерные переменные:

$$\bar{y} = \frac{2y}{H_0}, \quad \bar{t} = \frac{48D_0}{H_0^2}t, \quad \bar{c} = \frac{c}{c_0}, \quad k_1 = \frac{A\sigma_0^n H_0^2}{48D_0}, \quad \bar{\gamma} = \gamma \frac{H_0}{2},$$

где y - координата вдоль толщины стержня ($y = 0$ - в середине поперечного сечения стержня), t - время, c - концентрация, c_0 - постоянная концентрация на границе материала стержня и внешней среды, H_0 - высота поперечного сечения, $D_0 = \text{const}$ - коэффициент диффузии, γ - коэффициент массообмена.

Система уравнений на первой стадии имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{12} \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left[(1 + k\omega) \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{y}} \right], \\ \frac{\partial \omega(\bar{y}, \bar{t})}{\partial \bar{t}} = k_1 (1 - \omega(\bar{y}, \bar{t}))^{-n} f(\bar{c}(\bar{y}, \bar{t})), \\ f(\bar{c}(\bar{y}, \bar{t})) = 1 + a \cdot \bar{c}(\bar{y}, \bar{t}), \\ 0 \leq \bar{y} \leq 1, \quad 0 \leq \omega \leq 1, \quad 0 \leq \bar{t} < \bar{t}_1 \end{cases} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\omega(\bar{y}, 0) = 0, \quad \bar{c}(\bar{y}, 0) = 0, \quad \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{y}}(1, \bar{t}) = \bar{\gamma} [\bar{c}(1, \bar{t}) - 1], \quad \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{y}}(0, \bar{t}) = 0,$$

где $\bar{y} = 0$ - центр поперечного сечения, $\bar{y} = 1$ - координата исходной поверхности.

Расчет на первой стадии проводится до тех пор ($\bar{t} = \bar{t}_1$), пока на поверхности стержня поврежденность не достигнет значения $\omega(\bar{y} = 1, \bar{t}_1) = 1$, после этого возникает фронт разрушения с координатой $\bar{\xi}(\bar{t})|_{\omega=1}$, движущийся от поверхности вглубь материала стержня – вторая стадия. При этом площадь поперечного сечения уменьшается и напряжение увеличивается $\sigma = \sigma(\bar{t}) = \sigma_0 (\bar{\xi}(\bar{t}))^{-1}$.

В качестве примера было проведено вычисление времени до разрушения $\bar{t}^*$ при условии $\bar{\xi}(\bar{t}^*) = 0.5$ и при следующих значениях констант:

$$n = 3, \quad \bar{\gamma} = 1, \quad k = 4, \quad k_1 = 0.01, \quad a = 9.5.$$

Время достижения поврежденности на поверхности $\omega(\bar{y}=1, \bar{t}_1)=1$ составляет $\bar{t}_1 = 5.56$. При $\bar{t} > \bar{t}_1$ в стержне развивается фронт разрушения (рис. 3), общее время до разрушения равно $\bar{t}^* = 5.56 + 1.44 = 7.00$.

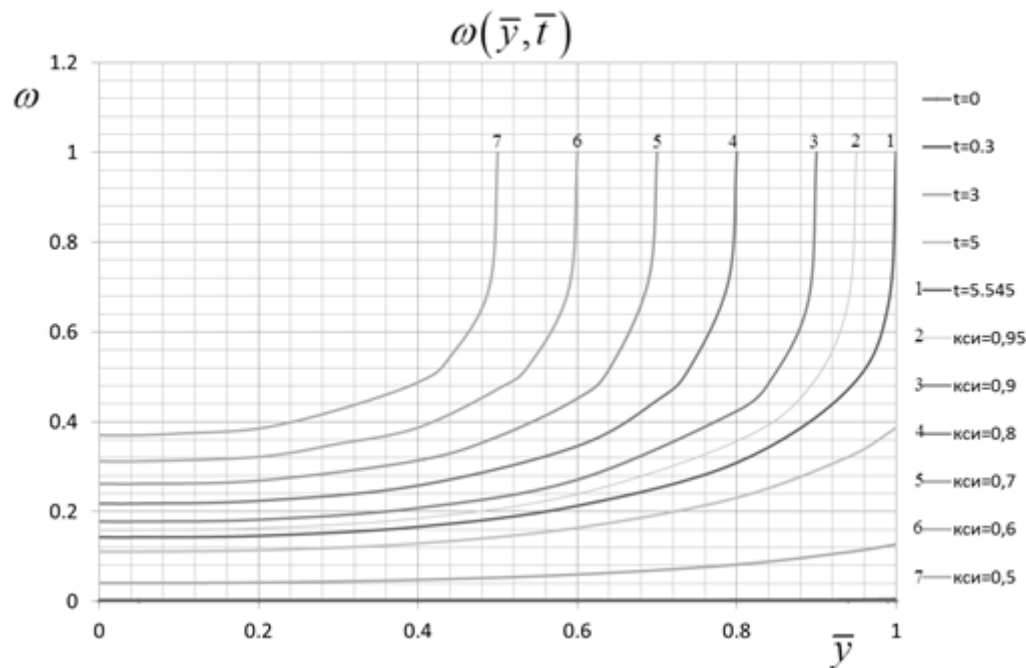


Рис. 3. Распределение поврежденности вдоль координаты $\bar{y}$ в различные моменты времени (до распространения фронта разрушения) и в различные моменты движения фронта разрушения.

Далее рассматривается упрощённая постановка задачи, в которой под $\omega(\bar{t})$ понимается интегрально средняя повреждённость в сечении стержня, критерий разрушения $\omega(\bar{t}^*)=1$. В этом случае система уравнений принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{12}(1 + k\omega) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{y}^2}, \\ \frac{d\omega}{d\bar{t}} = k_1(1 - \omega)^{-n} f(\bar{c}_m(\bar{t})). \end{cases} \quad (2)$$

Время до разрушения в упрощённой постановке (2) $\bar{t}^* = 7.16$ больше времени $\bar{t}^* = 7.00$, соответствующего системе уравнений (1), так как в последнем случае появление фронта разрушения приводит к уменьшению

площади поперечного сечения и соответственно к ускорению процесса разрушения.

Глава 2. Чистый изгиб балок при ползучести с учетом разнсопротивляемости материала, накопления поврежденности и влияния агрессивной среды

Глава состоит из 4-х параграфов.

В данной диссертационной работе впервые рассматривается изгиб балок при ползучести с использованием в модели ползучести дробно-степенных определяющих и кинетических соотношений.

Определяющее соотношение ползучести имеет вид:

$$\dot{\rho} = A \left(\frac{\sigma}{\sqrt{(\sigma_{b1} - \sigma)(\sigma - \sigma_{b2})}} \right)^n, \quad (3)$$

где $\sigma_{b1} > 0$, $\sigma_{b2} < 0$ - пределы кратковременной прочности материала при растяжении σ_{b1} и сжатии σ_{b2} при соответствующей температуре испытания.

На рис. 4 представлен качественно график зависимости скорости деформации ползучести от напряжения для дробно-степенной модели ползучести, которая учитывает разнсопротивляемость материала. Учет разнсопротивляемости производится за счет введения в определяющее соотношение ползучести пределов кратковременной прочности σ_{b1} и σ_{b2} .

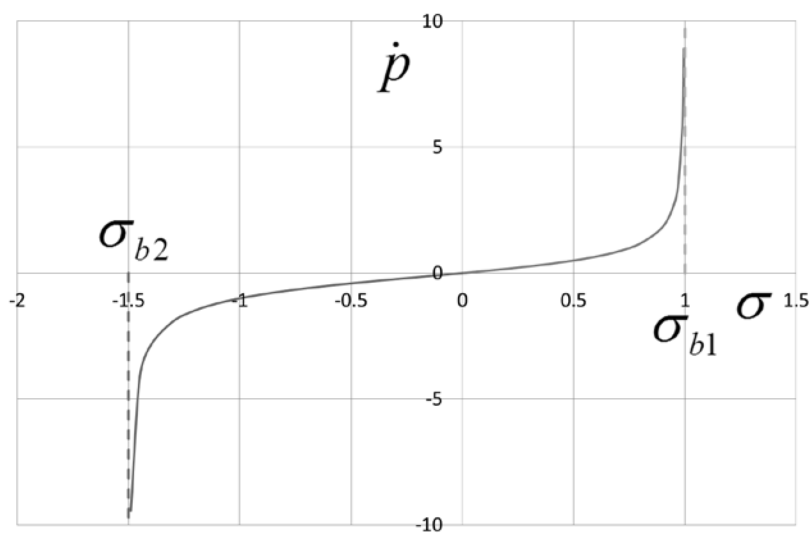


Рис. 4. Качественно график зависимости скорости деформации ползучести от напряжения для дробно-степенной модели ползучести.

В параграфе 2.1 проводится обзор ряда известных задач о чистом изгибе балок при ползучести.

В параграфе 2.2 рассматривается задача о чистом изгибе балки с учетом разных свойств материала на растяжение и сжатие при ползучести на установившейся стадии.

Рассмотрим чистый изгиб балки в условиях высокотемпературной ползучести. Примем, что сечение балки имеет две оси симметрии (Ox и Oy), изгибающий момент M действует в плоскости yOz . Толщина сечения балки по оси y равна H_0 , ширина b , длина l удовлетворяет неравенствам $l \gg H_0, l \gg b$.

Задача решается с использованием определяющего соотношения вида (3).

Принимается гипотеза плоских сечений, в которой учитывается смещение нейтральной оси y_0 по напряжениям $\sigma_z(y_0) \equiv 0$.

Построенные с использованием указанного определяющего соотношения и гипотезы плоских сечений системы уравнений равновесия для балок прямоугольного и круглого поперечных сечений решаются численно. На рис. 5 показаны соответствующие распределения напряжений

по поперечной безразмерной координате квадратного поперечного сечения $\bar{y} = 2y/H_0$ и для круглого (радиус R) поперечного сечения $\hat{y} = \frac{y}{R}$ с учетом равенства осевых моментов инерции сечений и внешнего изгибающего момента в зависимости от показателя степени в определяющем соотношении.

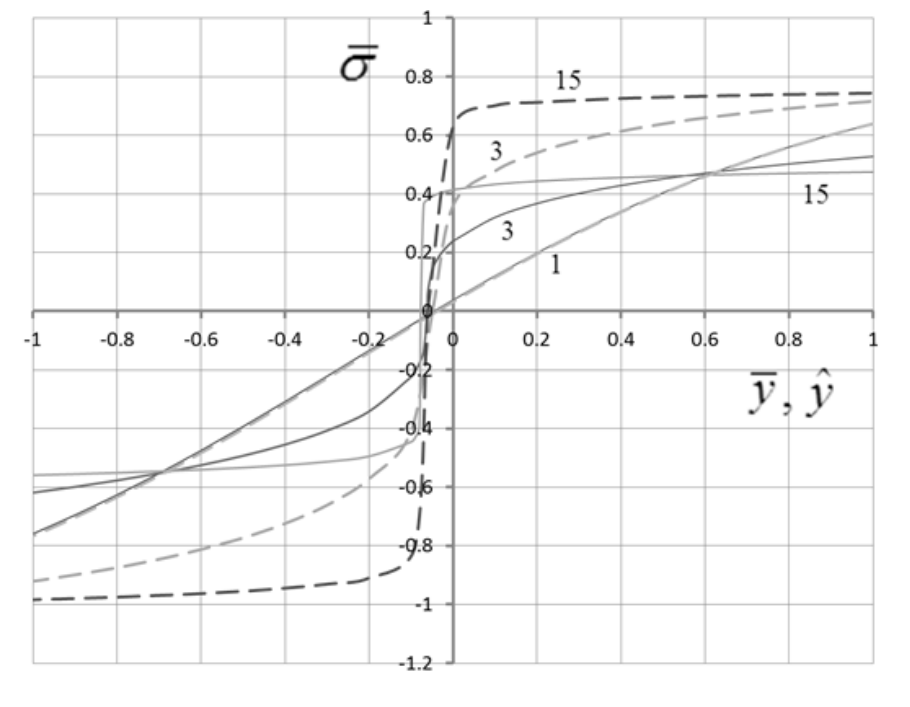


Рис. 5. Эпюры безразмерного напряжения $\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_{b1}$ для балок квадратного и круглого сечений при $n = 1, 3, 15$.

Сплошной линией обозначены распределения напряжений для квадратного, штриховой линией – для круглого поперечных сечений.

В параграфе 2.3. рассматривается задача о чистом изгибе балки при ползучести с учетом поврежденности и разных свойств материала на растяжение и сжатие.

В этом случае к определяющим соотношениям добавляются кинетические соотношения для поврежденности ω . Эти соотношения имеют следующий вид:

$$\frac{\partial p}{\partial \bar{t}} = \begin{cases} \left[\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{(1-\bar{\sigma})(\alpha+\bar{\sigma})(1-\omega)}} \right]^n & \text{при } \bar{\sigma} > 0, \\ \left[\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{(1-\bar{\sigma})(\alpha+\bar{\sigma})}} \right]^n & \text{при } \bar{\sigma} \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \bar{t}} = \begin{cases} \bar{B} \left[\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{(1-\bar{\sigma})(\bar{\sigma}+\alpha)(1-\omega)}} \right]^m & \text{при } \bar{\sigma} > 0, \\ 0 & \text{при } \bar{\sigma} \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $\alpha = -\sigma_{b2}/\sigma_{b1}$ - коэффициент разносопротивляемости.

Полная система уравнений строится на основе уравнений равновесия, учитывающих области сжимающих ($-1 \leq \bar{y} \leq \bar{y}_0$) и растягивающих ($\bar{y}_0 \leq \bar{y} \leq 1$) напряжений, к которым добавляется кинетическое соотношение для сплошности $\psi = 1 - \omega$.

Решение полученной системы уравнений проводится по шагам до тех пор, когда на поверхностном растянутом, самом ослабленном слое сплошность достигнет нулевого значения: $\psi(\bar{y}=1, \bar{t}^*) = 0$ (повреждённость $\omega(\bar{y}=1, \bar{t}^*) = 1$). В этот момент времени $\bar{t} = \bar{t}^*$ появляется фронт разрушения, который с течением времени начинает продвигаться вглубь балки. Движение фронта разрушения описывается координатой $\bar{\xi}(\bar{t})$ (безразмерная координата $\bar{\xi} = 2\xi/H_0$). Интегрирование уравнений равновесия в растянутой зоне балки проводится до этой координаты. Напряжения в балке перераспределяются таким образом, что в неразрушенной части стержня сохраняется равновесие по внутренним усилиям (напряжениям). Расчёт проводится до того значения $\bar{t}^{**}$, при котором напряжения на внешних сторонах растянутой и сжатой зон достигнут соответствующих значений σ_{b1} и σ_{b2} . Этот момент времени $\bar{t} = \bar{t}^{**}$, соответствующий предельному

напряжённому состоянию, является моментом разделения балки на две части, т.е. разрушения балки.

В качестве примера рассматривается изгиб балки при значениях $\alpha = 1.5$, $m = n = 3$, $\bar{B} = 20$, $\bar{M} = 0.5$.

На основе полученного решения полной системы уравнений построены зависимости поврежденности (рис. 6) от поперечной координаты и эпюры распределения напряжений (рис. 7) по поперечному сечению балки при различных значениях $\bar{t}$.

$$(\bar{t}_0 = 0, \bar{t}_1 = 0.1, \bar{t}_2 = 0.2, \bar{t}_3 = 0.21, \bar{t}_4 = \bar{t}^* = 0.2221, \bar{t}_5 = 0.222111, \bar{t}_6 = \bar{t}^{**} = 0.2221118).$$

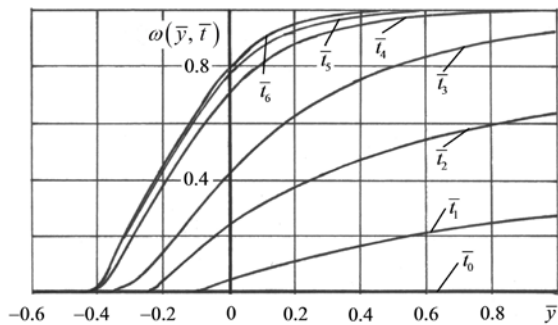


Рис. 6. Зависимости поврежденности $\omega(\bar{y}, \bar{t})$ от времени $\bar{t}$.

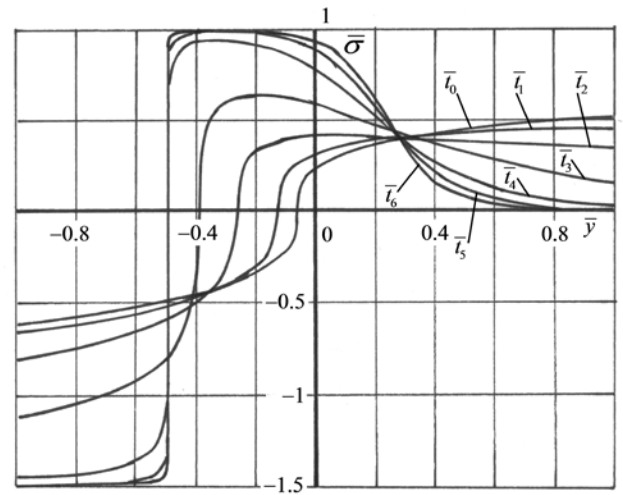


Рис. 7. Эпюры напряжений $\bar{\sigma}(\bar{y}, \bar{t})$ в поперечном сечении балки при различных значениях $\bar{t}$.

Условие продвижения фронта разрушения с поверхности вглубь балки имеет вид $\omega(\bar{y} = \bar{\xi}, \bar{t}) = 1$. Расчёты показали, что интервал времени продвижения фронта вплоть до разрушения составляет всего 0.005% от полного времени $\bar{t}^{**}$. Глубина проникновения фронта равна $\bar{\xi}(\bar{t}^{**}) = 0.9$, что составляет 5 % от толщины стержня.

В параграфе 2.4 рассматривается задача об изгибе балки при ползучести с учетом диффузии окружающей среды, накопления поврежденности и разнсопротивляемости материала.

В качестве определяющего и кинетического уравнений рассматриваются уравнения (4) и (5), дополненные линейной функцией от интегрально средней концентрации среды $\bar{c}_m$. Используются безразмерные переменные, кроме того, $\bar{c}_m = c_m / c_0$.

Система определяющих и кинетических соотношений ползучести в безразмерном виде с учётом дробно-степенной функции принимается в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial \bar{t}} = \begin{cases} \left[\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{(1-\bar{\sigma})(\alpha + \bar{\sigma})} \cdot \psi} \right]^n \cdot (1 + \gamma_1 \bar{c}_m(\bar{t})) & \text{при } \bar{\sigma} > 0, \\ \left[\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{(1-\bar{\sigma})(\alpha + \bar{\sigma})}} \right]^n \cdot (1 + \gamma_1 \bar{c}_m(\bar{t})) & \text{при } \bar{\sigma} \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \bar{t}} = \begin{cases} -\bar{B} \left[\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{(1-\bar{\sigma})(\alpha + \bar{\sigma})} \cdot \psi} \right]^m \cdot (1 + \gamma_2 \bar{c}_m(\bar{t})) & \text{при } \bar{\sigma} > 0, \\ 0 & \text{при } \bar{\sigma} \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

В соотношениях (6) и (7) γ_1 и γ_2 - константы, характеризующие влияние диффузионного процесса, $\bar{B}$, n и m - материальные константы.

В качестве примера было проведено исследование ползучести балки вплоть до разрушения при следующих значениях параметров: $\bar{M} = 0.5$, $\bar{B} = 20$, $n = m = 3$, $\alpha = 1.5$, $\gamma_1 = 0.2$, $\gamma_2 = 0.8$. Вычисления показали, что присутствие агрессивной среды при данных значениях параметров приводит к уменьшению времени до разрушения балки $\bar{t}^{**}$ на 18%.

Глава 3 Длительное разрушение пластин при изгибе в условиях сложного напряженного состояния с учетом влияния агрессивной среды

Глава 3 посвящена исследованию длительного разрушения прямоугольной пластины при изгибе в условиях нестационарного плоского напряженного состояния при действии кусочно-постоянных изгибающих моментов, приложенных по краям пластины, с учетом влияния агрессивной среды.

Постановка задачи описывается в **параграфе 3.1.**

В параграфе 3.2. рассматривается определение компонент напряженно-деформированного состояния при использовании степенной модели ползучести с учетом влияния агрессивной среды.

Учет влияния агрессивной среды производится путем введения в степенное определяющее соотношение функции от интегрально средней концентрации агрессивной среды в материале пластины:

$$\dot{p}_u = A \sigma_u^n f(\bar{c}_m(\bar{t})),$$

где $\dot{p}_u$ - интенсивность скоростей деформаций ползучести, точка над p_u означает производную по времени t , σ_u - интенсивность напряжений, $\bar{c}_m(\bar{t})$ - интегрально средний уровень концентрации элементов окружающей среды в пластине, A , n - материальные константы.

В результате решения системы уравнений равновесия с использованием гипотезы пропорциональности девиаторов напряжений и скоростей деформаций ползучести получается, что напряжения не зависят от агрессивной среды:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \beta^\gamma z |z|^{(\gamma-1)} M_1, \\ \sigma_2 = \beta^\gamma z |z|^{(\gamma-1)} M_2, \end{cases} \quad \beta = \frac{2}{H} \left(\frac{2(2n+1)}{H^2 n} \right)^n$$

где z - координата вдоль толщины пластины H , $\gamma = 1/n$.

Далее рассматривается длительная прочность пластины при кусочно-постоянном изгибающем моменте в случае одноосного нагружения, когда изгибающие моменты M_1 и M_2 действуют в одной плоскости (подраздел 3.2.1), и в случае действия изгибающих моментов во взаимно ортогональных плоскостях (подраздел 3.2.2).

В первом случае кинетическое уравнение для поврежденности принимается в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{d\omega}{d\bar{t}} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^k f(\bar{c}_m(\bar{t})) & \text{при } \sigma > 0, \\ 0 & \text{при } \sigma \leq 0, \end{cases}$$

где σ_0 - постоянная величина размерности МПа, ω - скалярный параметр поврежденности. В соответствии с кинетической теорией критерием разрушения пластины принимается: $\omega(\bar{t}_\omega^*) = 1$, где $\bar{t}_\omega^*$ - время до разрушения пластины, определенное с использованием скалярного параметра поврежденности.

Во втором случае кинетическое уравнение при учете скалярного параметра поврежденности рассматривается в следующем виде:

$$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{d\bar{t}} = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_0} \right)^k f(\bar{c}_m(\bar{t})),$$

где σ_u - интенсивность напряжений.

Кинетические уравнения при учете векторного параметра поврежденности $\vec{\Omega}$ примем в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\Omega}_i = \frac{d\Omega_i}{d\bar{t}} = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^k f(\bar{c}_m(\bar{t})) & \text{при } \sigma_i > 0, \quad i=1, 2 \\ 0 & \text{при } \sigma_i \leq 0, \end{cases}$$

где Ω_i - проекция вектора поврежденности на i -ю ось системы координат.

Поврежденность (модуль вектора поврежденности): $\Omega = \sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}$.

Критерий разрушения пластины в случае векторного параметра поврежденности: $[\Omega_1(\bar{t}_\Omega^*)]^2 + [\Omega_2(\bar{t}_\Omega^*)]^2 = 1$.

Принимается линейный вид функции $f(\bar{c}_m(\bar{t}))$: $f(\bar{c}_m(\bar{t})) = 1 + a\bar{c}_m(\bar{t})$.

Далее в работе определяются времена до разрушения пластины при различных значениях константы $\zeta = M_2/M_1$.

Графики зависимостей $\omega(\bar{t})$ и $\Omega(\bar{t})$ показаны рис. 8

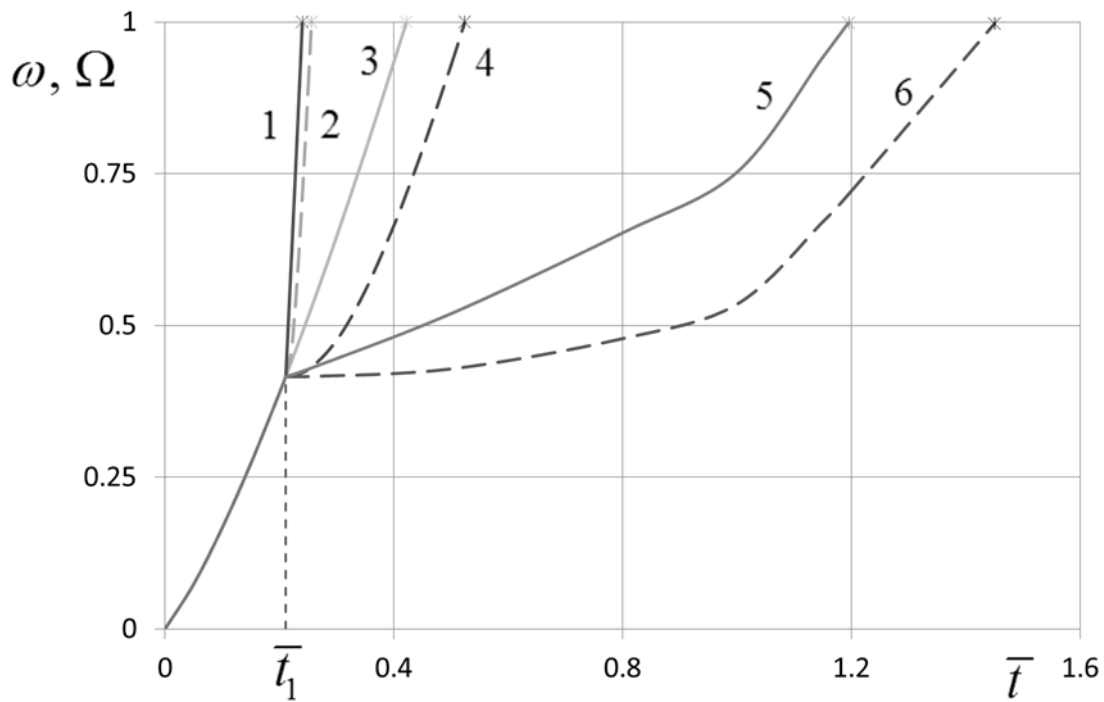


Рис. 8. Поврежденность при различных значениях $\zeta = M_2/M_1$.

На рисунке сплошная линия обозначает зависимость скалярного параметра ω от времени t . Штриховая линия обозначает зависимость векторного параметра Ω от времени t . Линии 1, 2 соответствуют параметру $\zeta = 2$, линии 3, 4 – параметру $\zeta = 1$, линии 5, 6 – параметру $\zeta = 0.5$.

Из рис. 8 следует, что векторный подход всегда приводит к большему значению времени до разрушения, чем скалярный.

В параграфе 3.3 рассматривается определение компонент напряженно-деформированного состояния и времени до разрушения при использовании дробно-линейной модели ползучести.

В результате численного расчета получены зависимости скалярного и векторного параметров поврежденности от времени и определены соответствующие времена до разрушения.

Глава 4. Новый метод определения поврежденности при ползучести

Глава 4 состоит из 2-х параграфов

В параграфе 4.1 показано, что поврежденность может быть определена непосредственно из обработки серии экспериментальных кривых.

Определяющее соотношение теории ползучести в классической постановке кинетической теории Ю.Н. Работнова имеет вид:

$$\dot{p} = A_0 \left(\frac{\sigma}{1-\omega} \right)^n, \quad \omega(t=0) = 0, \quad \omega(t=t^*) = 1. \quad (9)$$

Рассматривается новый подход. Используя уравнение (9), находим поврежденность непосредственно из серии опытов следующим образом. Получив из i -го эксперимента с заданным уровнем напряжения σ_i деформацию p как функцию времени $p = p(t)$ и определим производную деформации $\dot{p}(t)$. Зная $\dot{p}(t)$, найдём из (9) поврежденность $\omega_i = \omega(t, \sigma_i)$ в виде:

$$\omega(t, \sigma_i) = 1 - \left[\frac{A_0}{\dot{p}(t)} \right]^{\frac{1}{n}} \sigma_i.$$

Константы A_0 и n определяются из обработки установившихся стадий (II стадии) серии экспериментальных кривых ползучести.

Таким образом, функция $\omega_i = \omega(t, \sigma_i)$ определяется из эксперимента с точностью, равной точности экспериментальных данных для каждой кривой семейства.

Необходимо заметить, что в отличие от классического подхода, когда принимается, что поврежденность в образце возникает в начале опыта, в новой постановке поврежденность, имеющая смысл микропор и микротрещин в стержне, возникает на III стадии и является причиной развития данной стадии.

В связи с этим, в работе предлагается аппроксимация именно III стадии ползучести. При этом вид аппроксимации для всех кривых семейства одинаков, а коэффициенты аппроксимации зависят от уровня напряжения.

На рис. 9 приведены полученные зависимости поврежденности от времени для семейства кривых ползучести (аппроксимации известных

кривых ползучести приводятся в следующем параграфе 4.2 диссертации) на основе представленного нового метода.

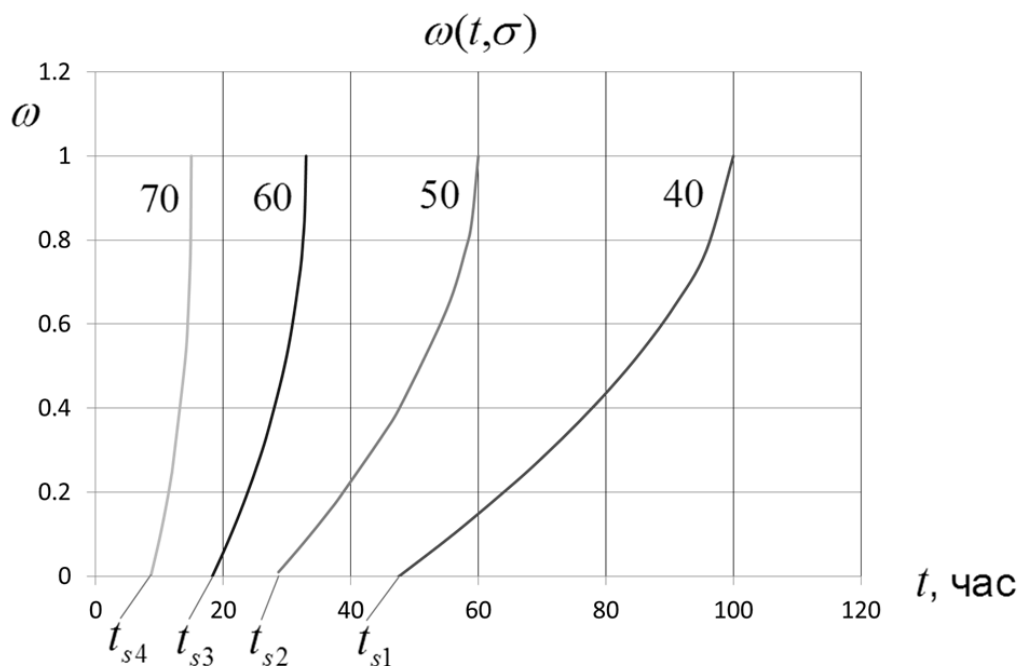


Рис. 9. Зависимости поврежденности от времени для семейства кривых ползучести, полученные на III стадии ползучести.

В параграфе 4.2 используется аппроксимационный метод описания кривой ползучести. Новизна постановки задачи заключается в том, что вид функции для аппроксимации выбирается один и тот же для всего семейства кривых ползучести, а коэффициенты аппроксимации зависят от уровня напряжения.

Заключение

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. В диссертационной работе получены решения цикла задач о растяжении стержня и изгибе стержня и пластины при ползучести вплоть до разрушения с учетом влияния агрессивной среды. При этом определяющие и кинетические уравнений используются, как правило, в виде дробно-степенных зависимостей скорости ползучести и скорости накопления поврежденности от напряжения.
2. Сингулярность предлагаемых соотношений вблизи характерных для данного материала предельных напряжений, а именно, пределов кратковременной прочности дает возможность более адекватного (по сравнению с общепринятой степенной моделью) описания поведения материалов при ползучести под действием напряжений, близких к пределам кратковременной прочности при заданной температуре.
3. На основе кинетической теории с двумя структурными параметрами, а именно, концентрации элементов окружающей среды в материале и поврежденности, определены связанные характеристики диффузионного процесса и длительной прочности при растяжении.
4. Результаты исследования, применения и развития предложенных соотношений могут использоваться для анализа поведения при ползучести и определения времен до разрушения материалов и элементов конструкций с учетом влияния агрессивной среды.
5. Использование критериев разрушения, учитывающих скалярный и векторный параметры поврежденности, дает возможность применять их в условиях сложного напряженного состояния с учетом влияния

агрессивной среды и, как следствие, вносит общий вклад полученных результатов в развитие механики повреждений.

6. Предложен новый метод определения поврежденности при ползучести непосредственно путем обработки серии кривых ползучести с учетом определяющего соотношения. Этот метод основывается на предположении возникновения поврежденности только на III стадии ползучести.
7. В качестве научной перспективы дальнейших работ видится развитие и продвижение нового метода определения поврежденности на случай сложного напряженного состояния с учетом векторной и, возможно, что требует дополнительного анализа, тензорной природы поврежденности, применение и развитие дробно-степенных определяющих и кинетических соотношений с учетом взаимного влияния агрессивной среды и накопления поврежденности при ползучести в случае сложного напряженного состояния.

Список основных публикаций в рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Моделирование процесса ползучести с учетом стадии предразрушения и идентификация модели / *К.А. Агахи, Ю.Г. Басалов, В.Н. Кузнецов, Л.В. Фомин* // Вестн. Самарского гос. тех. ун-та. Сер.: Физ. мат. науки. 2009. № 2(19). С. 243–247.
2. *Агахи К.А., Кузнецов В.Н., Ковальков В.К., Фомин Л.В.* Модифицированная кинетическая теория ползучести // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. № 4 Часть 4. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011 – С. 1340-1342.
3. *К.А. Агахи, В.Н. Кузнецов, А.М. Локощенко, В.К. Ковальков, Л.В. Фомин.* Моделирование процесса ползучести на основе аппроксимации экспериментальных данных. / Машиностроение и инженерное образование, 2011, №2, с. 52-57.
4. *Локощенко А.М., Агахи К.А., Фомин Л.В.* Чистый изгиб балки в условиях ползучести из разносопротивляющегося материала // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.- мат. науки. 2012. № 1(26). С. 66-73
5. *Локощенко А.М., Агахи К.А., Фомин Л.В.* Изгиб балки при ползучести с учетом поврежденности и разносопротивляемости материала. // Машиностроение и инженерное образование. 2012. № 3. С. 29-35.
6. *Локощенко А.М., Агахи К.А., Фомин Л.В.* Ползучесть балок при изгибе в агрессивных средах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №4. С. 7-75.

ISSN 1052-6188, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2013, Vol. 42, No. 4, pp. 319-324. ©Allerton Press, Inc., 2013, Original Russian Text ©A.M. Lokoshchenko, K.A. Agakhi, **L.V. Fomin**, 2013, published in Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosta Mashin, 2013, No. 4, pp. 70-75 Bending Creep of Beams in Aggressive Media DOI: 10.3103/S1052618813040079. (Scopus).

7. **Л. В. Фомин**. Описание длительной прочности растягиваемых стержней прямоугольного и круглого поперечных сечений в высокотемпературной воздушной среде // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, №3(32). 2013. С. 87-97.
8. *Локощенко А.М., Фомин Л.В.* Моделирование длительной прочности растягиваемых стержней в агрессивной среде с учетом переменного коэффициента диффузии // Механика композитных материалов. Рига. 2014. №6. С. 1033-1042.

Lokoshchenko A., **Fomin L.** Modelling the Creep Rupture of Tensile Rods in an Aggressive Medium With Account of a Variable Diffusion Coefficient // *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 50, No. 6, January, 2015 (Russian Original Vol. 50, No. 6, November-December, 2014) P. 739–746. DOI [10.1007/s11029-015-9463-1](https://doi.org/10.1007/s11029-015-9463-1) (Web of Science, Scopus).

В других изданиях

9. *Кузнецов В.Н., Агахи К.А., Фомин Л.В.* Моделирование процесса ползучести с учетом стадии предразрушения // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Апрель 2009 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. – М.: Изд-во Московского университета, 2009, с. 97-98.
10. **Фомин Л.В.** Анализ и идентификация модели, описывающей ускоряющуюся стадию ползучести // Ломоносовские чтения. Тезисы

- докладов научной конференции. Секция механики. Апрель 2009 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. – М.: Изд-во Московского университета, 2009, с. 148.
11. **Фомин Л.В., Кузнецов В.Н.** Экспериментальное определение функции поврежденности в кинетической модели ползучести Ю.Н. Работнова. // XXII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2009). Материалы конференции 16-18 ноября 2009 г. с. 53.
 12. **Л.В. Фомин, В.Н. Кузнецов.** Экспериментальное определение функции поврежденности в кинетической модели ползучести Ю.Н. Работнова. XXI Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2009). Избранные труды конференций ИМАШ РАН. Москва 2010 с. 126-132.
 13. **В.Н. Кузнецов, К.А. Агахи, Л.В. Фомин.** Самосогласованный вариант кинетической теории ползучести Ю.Н. Работнова. Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Апрель 2010 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. – М.: Изд-во Московского университета, 2010 – с. 117.
 14. **К.А. Агахи, Л.В. Фомин.** О выводе дифференциального уравнения для функции поврежденности в кинетической теории ползучести. Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Апрель 2010 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. – М.: Изд-во Московского университета, 2010 – с. 19.
 15. **Л.В. Фомин, В.Н. Кузнецов.** Конкретизация механического уравнения состояния в кинетической теории ползучести Ю.Н. Работнова. XXII Международная Инновационно-ориентированная конференция

- молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС – 2010). 26-29 октября 2010 г. Материалы конференции ИМАШ РАН. Москва 2010 г. с. 19.
16. *В.Н. Кузнецов, К.А. Агахи, В.К. Ковальков, Л.В. Фомин.* О реологических определяющих соотношениях для нестабильных материалов и их идентификации. Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Апрель 2010 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. – М.: Изд-во Московского университета, 2010 – с. 118.
17. *Локощенко А.М., Агахи К.А., Фомин Л.В.* Изгиб балок при ползучести с учетом поврежденности и разнсопротивляемости материала растяжению и сжатию. Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Апрель 2012 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. – М.: Изд-во Московского университета. 2012. С. 112.
18. *Локощенко А.М., К.А. Агахи, Л.В. Фомин.* Ползучесть и длительная прочность стержней при растяжении и изгибе в агрессивных средах // Международная конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение»: Труды конференции. Том II (Москва, 22-24 октября 2012 г.). / М: Изд-во ИМАШ РАН, 2012. С. 170-181.
19. *Фомин Л.В.* Ползучесть и длительная прочность растягиваемых стержней в агрессивной окружающей среде // Международная конференция “Восьмые Окуневские чтения” 25-28 июня 2013 г. Санкт–Петербург: материалы докладов. С. 290-291.
20. *Локощенко А.М., Агахи К.А., Фомин Л.В.* О влиянии агрессивной среды на ползучесть и длительную прочность при растяжении и изгибе. Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции.

Секция механики. Апрель 2013 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова.
– М.: Изд-во Московского университета. 2013. С. 93.

21. *Локощенко А.М., Фомин Л.В.* Длительное разрушение пластин при изгибе с учетом влияния агрессивной среды // Успехи современного естествознания. Физ.-мат. науки. Москва “Академия естествознания”. 2015 . №1. Часть 4. С. 639-640.