

БАШКИНОВА Елена Викторовна

**ОБОБЩЕННЫЕ РЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ
ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТНО – УПРОЧНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Самарском государственном техническом университете.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор Радченко Владимир Павлович.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Локощенко Александр Михайлович;

доктор технических наук, профессор Клебанов Яков Мордухович.

Ведущая организация Самарский государственный аэрокосмический университет.

Защита состоится «18» декабря 2002г. в «13⁰⁰» часов на заседании диссертационного совета Д 212.218.06 при Самарском государственном университете по адресу: 443011, Самара, ул. Академика Павлова, 1, аудитория 203 хим.-био.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного университета

Автореферат разослан «14» ноября 2002г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Л.В. Степанова

Общая характеристика работы

Актуальность темы Проблема увеличения ресурса элементов конструкций со сложными реологическими свойствами материала является центральной для современного машиностроения. В этом плане задачи, стоящие перед современным машиностроением и соответствующими отраслями науки, требуют новых представлений о прочности, разрушении, методах повышения ресурса и его оценки как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации. С математической точки зрения такого рода задачи сводятся к разработке методов решения соответствующих краевых задач в теории ползучести и длительной прочности. Получение точных аналитических решений в задачах нелинейной ползучести – это крайне сложная и в подавляющем числе случаев неразрешимая задача в силу физической нелинейности уравнений состояния реономных материалов. Основной проблемой при разработке численных методов является вычислительная устойчивость алгоритмов, поскольку ползучесть материалов может измеряться сотнями тысяч часов. Другими недостатками численных (сеточных) методов является необходимость хранить информацию о напряженно-деформированном состоянии по пространственной области в каждый момент времени. Такая база данных в информативном плане неудобна для анализа полей напряжений и деформаций, поскольку ее необходимо иметь для каждого вида и уровня нагрузок, а во многих случаях и чрезмерно излишней, т.к. зачастую, при решении ряда задач, достаточно иметь информацию лишь о некоторых параметрах, интегрально или локально характеризующих эволюцию деформированного состояния элемента конструкции во времени вплоть до разрушения. В частности, интегральные характеристики можно использовать при построении моделей длительной прочности (на основе, например, концепции эквивалентных напряженных состояний). Локальные характеристики имеют большое значение при оценке напряженно-деформированного состояния в тонких поверхностно - упрочненных слоях, «наклеенных» на поверхность элемента конструкции и деформирующихся вместе с ним в режиме «жесткого» нагружения при заданных законах для компоненты тензора реологических деформаций в точках поверхности конструкции.

Вышеизложенное и определяет актуальность темы диссертационной работы, заключающейся в разработке обобщенных реологических моделей неупругого деформирования и длительной прочности элементов конструкций и методов решения краевых задач на их основе, которые бы позволили уменьшить размерность решаемой задачи, на несколько порядков снизить объем и время вычислений и являлись бы эффективными в прикладном плане для задач параметрической надежности упрочненных элементов конструкций в условиях ползучести.

Целью работы являлась разработка: 1) обобщенных моделей реологического деформирования и длительной прочности элементов конструкций; 2) методов оценки длительной прочности конструкций с использованием концепции эквивалентных напряженных состояний в детерминированной и стохастической постановках; 3) методов решения краевых задач для поверхностно –упрочненных элементов конструкций с использованием обобщенных моделей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) дано теоретическое обоснование концепции «эталонных» напряжений для исследования ползучести цилиндрических и сферических элементов конструкций, балки при чистом изгибе в условиях однопараметрического нагружения;

2) предложена и обоснована обобщенная модель длительной прочности элементов конструкций в детерминированной и стохастической постановках на основе интегрально - средних эквивалентных напряжений, рассчитываемых по упругому (упругопластическому) решению соответствующей краевой задачи;

3) разработан метод построения обобщенных моделей (приближенных аналитических решений) для цилиндрических и сферических элементов конструкций при ползучести при однопараметрическом нагружении;

4) разработан метод решения краевой задачи для оценки кинетики остаточных напряжений в тонком поверхностно – упрочненном слое на фоне ползучести элемента конструкции с использованием обобщенных моделей;

5) выполнен ряд новых исследований по проверки адекватности обобщенных моделей ползучести и длительной прочности элементов конструкций экспериментальным данным и данным численного решения соответствующих краевых задач;

6) разработаны и проиллюстрированы методы оценки надежности элементов конструкций на основе обобщенных моделей по катастрофическим (длительная прочность) и параметрическим (величина остаточных напряжений) критериям отказа.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых реологических моделей ползучести и длительной прочности элементов конструкций и методов решения краевых задач на их основе, позволяющих понизить размерность решаемых краевых задач, существенно (на несколько порядков) снизить объем вычислений и время расчета, повысить вычислительную устойчивость алгоритмов и сократить до минимума определяющий эксперимент для этих моделей. Предложены эффективные методы оценки длительной прочности элементов конструкций (цилиндрические и сферические элементы, балки) на основе обобщенной модели в отсутствии полной информации о реологических характеристиках материала конструкций. Предложенные модели и методы позволяют научно-обоснованно подходить к проблеме назначения ресурса элементов конструкций по катастрофическим (длительная прочность) и параметрическим критериям отказа.

Достоверность основных научных результатов обеспечивается обоснованностью исходных предположений и гипотез физической природе описываемых процессов; строгостью применения математического аппарата; сравнением данных расчета в детерминированной и стохастической постановках по предложенным моделям и методам с экспериментальными данными и данными численного решения соответствующих краевых задач.

На защиту выносятся:

1) теоретическое обоснование концепции «эталонных» напряжений для исследования ползучести элементов конструкций (толстостенная труба и сфера, изгиб балки) в условиях однопараметрического нагружения;

2) обобщенная модель длительной прочности в детерминированном и стохастическом вариантах на основе интегрально - средних эквивалентных напряжений, рассчитываемых по упругому (упругопластическому) решению;

3) метод решения краевой задачи для оценки кинетики остаточных напряжений в тонком поверхностно – упрочненном слое на фоне ползучести элемента конструкции с использованием приближенного аналитического решения (обобщенной модели);

4) методы оценки ресурса упрочнения элементов конструкций по параметрическим (величина остаточных напряжений) и катастрофическим (длительная прочность) критериям отказа на основе обобщенных моделей;

5) качественные, количественные и экспериментальные результаты при проверке адекватности обобщенных моделей элементов конструкций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 155 наименований и 3 приложений. Работа содержит 173 страниц основного текста, 56 рисунков, 44 таблиц.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ.

Апробация работы. Результаты научных исследований докладывались на восьмой, одиннадцатой и двенадцатой конференциях «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 1998, 2001 и 2002 г.г.); на Международном семинаре «Нелинейное программирование и управление» (Самара, 1998 г.); на Международной конференции «Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте» (Самара, 1999 г.); на первой, второй и третьей Международных конференциях молодых ученых «Актуальные проблемы современной науки» (Самара, 2000, 2001 и 2002 г.г.); на научном семинаре «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. проф. Радченко В.П., 2001-2002 г.г.); на научном семинаре Института механики и технологии СамГТУ (рук. проф. Я.М. Клебанов, 2002 г.); на научном семинаре «Актуальные проблемы механики сплошных сред» Самарского государственного университета (рук. проф. В.И. Астафьев, 2002 г.); на научно-техническом семинаре кафедры «Сопrotивление материалов» Самарского государственного аэрокосмического университета (рук. проф. В.Ф. Павлов и проф. С.И. Иванов, 2002 г.).

Работа выполнялась в рамках плана НИР НИИ Проблем Надежности Механических Систем СамГТУ на 1995-2000г.г. (тема «Разработка структурных и феноменологических моделей деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций в условиях ползучести»); включена в межвузовский план госбюджетных НИР по научному направлению «Механика», утвержденному Министерством образования РФ на 1998-2003 г.г. (тема «Надежность механических систем в промышленности, энергетике и на транспорте») и план НИР СамГТУ по программе Министерства образования РФ на 2001-2005 г.г. (тема «Разработка методов оценки ресурса оболочечных конструкций в условиях ползучести по параметрическим критериям отказа»).

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определяются цели исследований, излагаются научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводится план диссертационной работы, а также сведения об апробации работы и публикациях.

В главе 1 делается краткий обзор литературы, посвященной вопросам построения феноменологических теорий ползучести и длительной прочности и методам решения краевых задач на их основе, которые рассматривались в работах В.И. Астафьева, В.В. Болотина, Б.В. Горева, Ю.И. Кадашевича, Л.М. Качанова, Я.М. Клебанова, Г. Ф. Лепина, А.Ф.Никитенко, В.В. Новожилова, А.М. Локощенко, Н.Н. Малинина, Ю.Н. Работнова, Ю.Н. Радаева, В.П. Радченко, Ю.П. Самарина, О.В. Соснина, С.А. Шестерикова, И.Ю. Цвелодуба, J.A. Betten, J.T. Boyle, F.A. Leckie, J. Spence и многих других авторов.

Здесь же отмечается, что в последние два - три десятилетия интенсивно развивается новое направление – макромеханика элементов конструкций в условиях ползучести. Согласно этому направлению строятся обобщенные модели реологического деформирования и разрушения элементов конструкций в координатах «обобщенная нагрузка - обобщенное перемещение». Эти соотношения связывают интегральные характеристики напряженного и деформированного состояний. Это направление в той или иной мере развивалось в работах С.С. Вялова, Ю.А. Еремина, Е.Е. Елисеевой, Л.М. Качанова, Я.М. Клебанова, Л.В. Кайдаловой, С.Н. Кубышкиной, С.Т. Милейко, Л.А. Муратовой, Ю.Н. Работнова, В.П. Радченко, Ю.П. Самарина, О.В. Сорокина, Ф.А. Leckie, D.J. Margiott, A.S. Mackenzie, R.G. Sin и других. Выделяется научное направление, связанное с применением аналитических и численных моделей элементов конструкций с использованием вариационных принципов, которое развивалось в работах Л.М. Качанова, В.Д. Ключникова, Я.М. Клебанова, Ю.П. Самарина, О.В. Сорокина, С.А. Шестерикова и других авторов. Анализируется предложенная А.М. Локощенко и С.А. Шестериковым возможность использования в качестве обобщенной нагрузки в обобщенной модели длительной прочности элементов конструкций интегрально - средних эквивалентных напряжений.

Выделен класс задач, эффективное решение которых можно осуществить с использованием обобщенных моделей (приближенных аналитических решений) элементов конструкций. К таким задачам относится оценка кинетики остаточных напряжений в поверхностно – упрочненном слое в процессе ползучести элемента конструкции. Выполнен анализ существующих подходов решения сформулированной проблемы.

По результатам литературных данных сформулированы основные глобальные задачи диссертационной работы:

- 1) теоретическое обоснование и разработка обобщенной модели длительной прочности элементов конструкций на основании концепции интегрально - средних эквивалентных напряжений и проверка ее адекватности;
- 2) разработка метода расчета кинетики остаточных напряжений в поверхностно – упрочненном слое цилиндрических и сферических оболочек на основе

обобщенных моделей элементов конструкций (приближенных аналитических решений).

Глава 2 посвящена обобщению концепции эквивалентных напряженных состояний для задач длительной прочности элементов конструкций в условиях неоднородного напряженного состояния. Отмечается, что первая попытка решения этой задачи была выполнена А.М. Локощенко и С.А. Шестериковым (1983-1986 г.г.), которыми было предложено для оценки длительной прочности толстостенных труб использовать интегрально - средние значения эквивалентных напряжений, рассчитанных на основании решения краевой задачи установившейся ползучести. Ими было показано, что в широком диапазоне изменения показателя нелинейности установившейся ползучести $1 \leq n < \infty$ и геометрических параметров $1,1 \leq \beta \leq 1,3$ (β - отношение внешнего и внутреннего радиусов) величина интегрально средних эквивалентных напряжений изменяется в пределах $\sim 1\%$. Другими словами, А.М. Локощенко и С.А. Шестериковым введены некоторые эффективные по объему интегрально - средние эквивалентные напряжения, рассчитанные по решению краевой задачи установившейся ползучести, и по отношению к ним была применена концепция длительной прочности на основе эквивалентных напряженных состояний.

Для обобщения приведенных результатов в п.2.1 была поставлена задача: исследовать, каким образом изменяются интегрально - средние эквивалентные напряжения для ряда конструктивных элементов (толстостенная труба и сфера, балка при чистом изгибе) при ползучести от начального состояния (упругого или упругопластического) при $t=0$ до состояния, соответствующего разрушению элемента конструкции? В качестве основных эквивалентных напряжений использовались:

$$\sigma_{\vartheta 1} = \sigma_{\max}, \quad \sigma_{\vartheta 2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_{\theta})^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2}, \quad \sigma_{\vartheta 3} = \frac{1}{2} (\sigma_{\vartheta}^1 + \sigma_{\vartheta}^2)$$

Остальные известные эквивалентные напряжения в большинстве случаев являются линейными комбинациями приведенных. Интегрально средние эквивалентные напряжения $\bar{\sigma}_{\vartheta j}$ для толстостенных трубы и сферы вводятся соотношениями:

$$\bar{\sigma}_{\vartheta j} = \frac{1}{b-a} \int_a^b \sigma_{\vartheta j}(r) dr, \quad (j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

где a и b соответственно внутренний и внешний радиусы. Исследование величин (1) осуществлялось для толстостенной трубы с доньями при действии внутреннего давления; внутреннего давления и осевой растягивающей силы; бесконечно длинной трубы при тех же нагрузках; толстостенной сферы при действии внутреннего давления; балки в условиях чистого изгиба. При этом анализировались следующие величины:

$$\kappa = \frac{\bar{\sigma}_{\vartheta}^{\infty}}{\bar{\sigma}_{\vartheta}^0}, \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_{\vartheta}^0$ - величина интегрально - среднего значения эквивалентного напряжения

при $t=0$, а $\bar{\sigma}_s^\infty$ - величина интегрально - среднего значения эквивалентного напряжения, соответствующая стадии установившейся ползучести; и

$$k_1 = \frac{\bar{\sigma}_s^t}{\bar{\sigma}_s^0}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_s^t$ - значение интегрально - средней величины эквивалентного напряжения в процессе ползучести при $t \neq 0$. Для оценки (2)-(3) использовались известные аналитические решения краевых задач в упругой области и на стадии установившейся ползучести, а также численные решения соответствующих краевых задач в упругопластической области и в процессе ползучести. Методика численного решения краевых задач была разработана на основе метода сеток и теории ползучести и длительной прочности энергетического типа, предложенной и апробированной в работах Ю.П. Самарина и В.П. Радченко (1986-1992 г.г.). В п.2.2. был выполнен детальный анализ величины (2) и (3) для толстостенных труб при указанных выше нагрузках в условиях стационарного и нестационарного режимов нагружения в широком диапазоне изменения геометрических параметров трубы и реологических характеристик материала. Показано, что интегрально - средняя величина эквивалентного напряжения для толстостенной трубы в достаточно широком геометрическом диапазоне ($1,1 \leq \beta \leq 1,5$) и вариации реологических параметров материала является практически инвариантной величиной (с погрешностью не более 2%) в процессе ползучести вплоть до разрушения.

В п.2.3 были выполнены аналогичные исследования по оценке величины интегрально - средних эквивалентных напряжений (2) и (3) для сферической оболочки при действии внутреннего давления и показано, что она также является практически инвариантной величиной (с погрешностью не более 4%) по отношению к реологическим характеристикам материала и величине $1,1 \leq \beta \leq 1,5$. Такой же вывод был сделан в п. 2.4 при исследовании интегрально - среднего эквивалентного напряжения при чистом изгибе балки, но с весовым коэффициентом, зависящим от геометрии балки. Из выполненных в главе 2 исследований следует, во-первых, что интегрально - среднее значение эквивалентного напряжения можно рассчитывать по упругому (упругопластическому) решению, не привлекая для этого решение краевой задачи для установившейся ползучести. Во-вторых, длительную прочность исследованных элементов конструкций можно прогнозировать по любой одноосной теории ползучести и длительной прочности, заменив в соответствующей модели номинальное напряжение на интегрально - среднее значение эквивалентного напряжения, рассчитанное по упругому (упругопластическому) решению при заданном режиме нагружения.

Глава 3 посвящена построению и анализу обобщенной модели длительной прочности элементов конструкций на основе интегрально - средних эквивалентных напряжений на примере толстостенных трубы и сферы. В силу того, что интегрально - средние эквивалентные напряжения являются практически инвариантной величиной при ползучести для рассматриваемых элементов кон-

струкций, вводится гипотеза, согласно которой длительной прочности элементов конструкции можно сопоставить длительную прочность одноосного образца, номинальное напряжение σ_0 для которого равно значению интегрально-средней величины эквивалентного напряжения $\bar{\sigma}_3$, рассчитанного в упругой (упругопластической) области. Другими словами, время разрушения элемента конструкции при ползучести полагается равным времени разрушения одноосного образца при $\sigma_0 = \bar{\sigma}_3$. Поэтому при наличии необходимой экспериментальной информации о характеристиках ползучести материала интегральное поведение и разрушение элемента конструкции можно рассчитывать при помощи любой одноосной феноменологической теории ползучести и длительной прочности при $\sigma_0 = \bar{\sigma}_3$. В настоящей работе (п.3.2) такого рода обобщенная модель построена на основании детерминированной одноосной модели неупругого реологического деформирования и разрушения, предложенной Ю.П. Самариным и В.П. Радченко (1986-1992 г.г.) и имеющей вид:

$$\varepsilon = e + e^P + p, \quad e = \sigma/E,$$

$$\dot{e}^P = \begin{cases} 0, & \sigma(t) \leq \sigma_{np}; \\ \lambda [a(\sigma(t) - \sigma_{np})^{n_1} - e^P(t)], & a(\sigma(t) - \sigma_{np})^{n_1} > e^P(t), \\ 0, & a(\sigma(t) - \sigma_{np})^{n_1} \leq e^P(t); \end{cases}$$

$$\dot{p} = c \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^n, \quad \sigma = \sigma_0(1 + \omega), \quad \dot{\omega} = \gamma \sigma \dot{e}^P + \alpha \sigma \dot{p},$$

$$\gamma = \gamma_1 (e^P)^{m_2}, \quad \alpha = \alpha_1 (\sigma_0)^{m_1}, \quad (4)$$

где ε - полная деформация; e и e^P - упругая и пластическая деформации соответственно; p - деформация ползучести; σ_0 и σ соответственно номинальное и истинное напряжение; E - модуль Юнга; a , λ , n_1 - константы модели, описывающие диаграмму мгновенного упругопластического деформирования; σ_{np} - предел пропорциональности; c , n , σ_* - константы модели, при помощи которых описывается вторая стадия ползучести материала; γ_1 , m_2 , α_1 , m_1 - константы модели, контролирующие процессы разупрочнения материала при пластической деформации и деформации ползучести соответственно; ω - скалярный параметр поврежденности. В качестве критерия разрушения используется следующее интегральное соотношение энергетического типа

$$\int_0^{t_*} \frac{\sigma de^P}{A_*^P} + \int_0^{t_*} \frac{\sigma dp}{A_*^C(\sigma_0)} = 1, \quad (5)$$

где A_*^P , $A_*^C = \alpha_A (\sigma_0)^{m_A}$ критические величины работ напряжений на деформациях пластичности и ползучести соответственно (α_A , m_A - постоянные характеристики материала), t_* - время разрушения. Таким образом, для оценки

длительной прочности элемента конструкции достаточно в модели (4) - (5) заменить обычное номинальное напряжение σ_0 на величину интегрально - среднего значения эквивалентного напряжения (в некоторых случаях с весовым коэффициентом). Тогда величину ε (и ее компоненты e , e^p и p) можно трактовать как некие эквивалентные деформации.

В п. 3.3 выполнена проверка адекватности детерминированной модели (4)-(5) экспериментальным данным и данным решения соответствующих краевых задач численными методами. В качестве интегрально средних эквивалентных напряжений использовались величины $\bar{\sigma}_{\sigma 1}$, $\bar{\sigma}_{\sigma 2}$ и $\bar{\sigma}_{\sigma 3}$, а подробный анализ в диссертации выполнен для величины $\bar{\sigma}_{\sigma 2}$. Для сравнения результатов расчета по обобщенной модели с экспериментальными данными и данными численного решения краевой задачи использовалась величина средней относительной ошибки отклонения

$$\Delta_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{t_{*j} - t_{ij}}{t_{ij}} \right| \quad (i=1,2), \quad (6)$$

где t_{*j} - экспериментальные данные или данные численного решения краевой задачи, t_{ij} - расчетные данные по обобщенной модели (j - номер реализации), N - количество реализаций ($i=1$ - соответствует сравнению с экспериментальными данными; $i=2$ - сравнению с данными численного решения задачи). Для экспериментальной проверки обобщенной модели длительной прочности (3)-(4) были использованы опытные данные времени до разрушения толстостенных труб при действии внутреннего давления из материала 12ХМФ при $T=590^\circ\text{C}$ (данные И.П. Лагунцова и В.К. Святославова); стали 20 при $T=500^\circ\text{C}$ (Ш.М. Кац); сплава ЭИ 698 при $T=700^\circ\text{C}$ (Б.В. Зверьков). Сравнение данных расчета по обобщенной модели (4)-(5) с данными численного решения краевых задач выполнено для толстостенной трубы с доньями при действии внутреннего давления и трубы при действии внутреннего давления и осевой нагрузки; толстостенной сферы при действии внутреннего давления. Во всех случаях величина ошибки Δ составляла 10-30%, что с учетом естественного разброса экспериментальных данных по длительной прочности этот результат следует считать удовлетворительным.

В п. 3.4 предложен стохастический вариант обобщенной модели длительной прочности, который получен из детерминированной модели (4)-(5) заменой детерминированных параметров c, α_1, α_A на случайные - C, L_1, L_A . Было выполнено построение стохастической модели, а также описание алгоритма оценки случайных параметров модели и проверка ее адекватности экспериментальным данным по длительной прочности толстостенных труб при действии внутреннего давления из стали 20 при $T=500^\circ\text{C}$. Получено соответствие расчетных данных по обобщенной стохастической модели экспериментальным данным по длительной прочности толстостенных труб. Для сопоставимости результатов расчета по разным теориям выполнено сравнение данных расчета по обобщенной стохастической модели длительной прочности с данными численного решения соответствующей стохастической краевой задачи на примере толсто-

стенных труб из стали 20 ($T=500^{\circ}\text{C}$) и показано, что результаты расчета по обобщенной модели длительной прочности элементов конструкций дают сопоставимые результаты с данными решения краевой задачи ползучести и разрушения.

В п. 3.5 выполнен анализ погрешности обобщенной модели длительной прочности элементов конструкций экспериментальным данным и данным расчета по другим теориям с позиций феноменологической теории ползучести и естественного разброса экспериментальных данных.

Пункт 3.6 посвящен рекомендациям по практическому применению обобщенной модели длительной прочности элементов конструкций в условиях длительной эксплуатации (до 100-300 тысяч часов). В частности, в отсутствие информации о характеристиках ползучести материала предложена следующая схема оценки ресурса цилиндрических и сферических оболочек в режиме эксплуатации по техническому состоянию. Одновременно с эксплуатируемым конструктивным элементом параллельно проводится эксперимент в лабораторных условиях над одноосным образцом при напряжении $\sigma_0 = \bar{\sigma}_3^y$, где $\bar{\sigma}_3^y$ - интегрально - среднее значение эквивалентного напряжения, рассчитываемое на основании решения краевой задачи в упругой (упругопластической) области при $t=0$. Тогда поведение образца интегрально описывает поведение конструктивного элемента (по критерию длительной прочности) независимо от характеристик ползучести и в широком диапазоне изменения геометрии ($1,1 \leq \beta \leq 1,5$). В этом случае «эталонный» образец является одним из «диагностических приборов», позволяющим сделать вывод о работоспособности элемента конструкции. Даны и другие решения для оценки ресурса.

Глава 4 посвящена разработке метода расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно – упрочненном слое цилиндрических и сферических элементов конструкций при ползучести (в пределах первых двух стадий) на основе обобщенной модели. В силу того, что толщина упрочненного слоя мала по сравнению с радиусом цилиндрического или сферического образца, то упрочненный слой не оказывает существенного влияния на жесткость и деформируемость самого конструктивного элемента. Поэтому тонкий поверхностно – упрочненный слой можно представить «наклеенным» на цилиндр (сферу) и деформирующимся вместе с ним в режиме «жесткого» нагружения при заданном тензоре деформаций ε_{ij} на поверхности элемента конструкции. Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо иметь решение соответствующей краевой задачи о неупругом деформировании элемента конструкции при действии внешних сил, которое осуществляется, как правило, численными методами. И хотя для решения поставленной задачи о релаксации остаточных напряжений необходимо иметь информацию лишь о кинетике $\varepsilon_{ij}(t)$ на поверхности, при численном решении краевой задачи приходится находить поля деформаций по всему объему во времени. В настоящей работе для определения величины $\varepsilon_{ij}(t)$ в точках поверхности предложено использовать приближенное аналитическое решение (обобщенную модель) неустановившейся ползучести для толстостенных трубы и сферы, которое, следуя Л.М. Качанову, искалось в виде

$$\sigma_i(r, t) = \sigma_i^0 + \tau(t) (\sigma_i^\infty - \sigma_i^0), \quad i = r, \theta, z; \quad \tau(0) = \nu, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tau(t) = 1, \quad (7)$$

где σ_i^0 и σ_i^∞ ($i = r, \theta, z$) – решения, соответствующие упругому состоянию и состоянию установившейся ползучести (соответственно). Представляя полные деформации в виде суммы упругой деформации и деформации ползучести, подставляя их в уравнение совместности и интегрируя полученное по r (r – радиус трубы или сферы) в пределах его изменения ($a \leq r \leq b$), была получена задача Коши для определения $\tau = \tau(t)$, которая решалась численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Для функции $\tau = \tau(t)$ была принята аппроксимация $\tau(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, где λ – const.

Для переменных режимов нагружения модель (7) была обобщена в виде

$$\sigma_i(r, t) = \sigma_i^0(r, t) + \int_0^t e^{-\lambda(t-\tau)} d(\sigma_i^\infty(r, \tau) - \sigma_i^0(r, \tau)), \quad i = r, \theta, z, \quad (8)$$

где интеграл понимается в смысле Стильтьеса.

Деформации ползучести определяются численным интегрированием для квазилинейных уравнений установившейся ползучести

$$\dot{\rho}_{ij} = c(S_0)^{n-1} \left(\frac{3}{2} \sigma_{ij} - \frac{1}{2} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \delta_{ij} \right) \quad (9)$$

где S_0 – интенсивность напряжений, а σ_{ij} в главных осях определяются из (7) или (8) (c, n – const). Модель (7) – (9) представляет собой обобщенную модель элемента конструкции. В п. 4.2 выполнено построение модели (7) – (9) для толстенной трубы при постоянном и переменном внутреннем давлении и проверка ее адекватности данным численного решения соответствующей краевой задачи, а в п.4.3 эта задача рассмотрена для толстостенной сферы.

В п. 4.4 разработан метод оценки релаксации остаточных напряжений в поверхностно – упрочненном слое толстостенной трубы при ползучести на основе приближенного решения (7) – (9). Согласно общей схеме эта задача разбита на две самостоятельных задачи: 1) восстановление полей остаточных напряжений и остаточных пластических деформаций в поверхностно – упрочненном слое на основе экспериментальных данных для одной из компонент тензора напряжений (σ_θ); 2) оценка кинетики остаточных напряжений в поверхностно – упрочненном слое при ползучести трубы под действием внутреннего давления. При этом тонкий поверхностно – упрочненный слой представляется «наклеенным» на трубу и деформирующимся вместе с ней в режиме «жесткого» нагружения при заданных значениях $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_\theta(t)$ и $\varepsilon_z(t)$, определяемых по модели (7) – (9) при $r=a$ для упрочненного слоя на внутренней поверхности трубы и при $r=b$ – на внешней поверхности. Приведены примеры расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно – упрочненном слое на внутренней поверхности трубы из сплава ЭИ 698 при $T=700^\circ\text{C}$ по приведенной методике. Для сравнения эта же задача была решена для случая, когда $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_\theta(t)$ и $\varepsilon_z(t)$ при $r=a$ (или $r=b$) определялись из численного решения соответствующей краевой задачи методом сеток. Показано, что расчет релаксации остаточных напряжений с использованием приближенного решения и численного решения краевой

задачи дают близкие результаты, однако время расчета и объем хранимой информации при использовании решения (7) - (9) на два-три порядка меньше, чем при использовании численного решения для определения $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_\theta(t)$ и $\varepsilon_z(t)$. Это свидетельствует о целесообразности использования обобщенной модели (7) - (9) в задачах о релаксации остаточных напряжений в поверхностно - упрочненном слое.

В п. 4.5 решена задача для поверхностно - упрочненной сферы и получены аналогичные результаты. На рис.1-4 в качестве примера приведены эпюры релаксации остаточных напряжений σ_θ в поверхностно - упрочненном слое на внутренней поверхности сферы из сплава ЭИ 698 при $T=700^\circ\text{C}$ в процессе ползучести, рассчитанных на основании обобщенной модели (сплошные линии), так и на основании численного решения краевой задачи (штриховые линии).

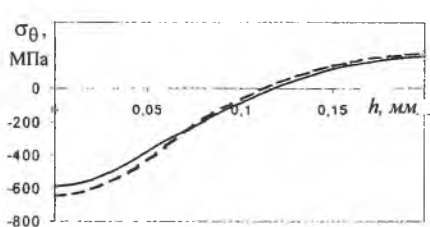


Рис. 1 Эпюры распределения остаточных напряжений $\sigma_\theta(h)$ на внутреннем упрочненном слое: сплошная линия - расчет по обобщенной модели; штриховая линия - расчет на основании решения краевой задачи методом сеток, для сферы из стали ЭИ698 ($T=700^\circ\text{C}$, $q=250\text{МПа}$) при $t=250\text{ч}$: $h=r-a$ - глубина упрочненного слоя.

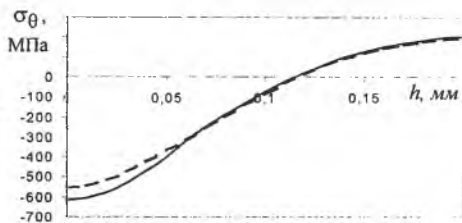


Рис. 2. Эпюры распределения остаточных напряжений $\sigma_\theta(h)$ на внутреннем упрочненном слое: сплошная линия - расчет по обобщенной модели; штриховая линия - расчет на основании решения краевой задачи методом сеток, для сферы из стали ЭИ698 ($T=700^\circ\text{C}$, $q=250\text{МПа}$) при $t=500\text{ч}$: $h=r-a$ - глубина упрочненного слоя.

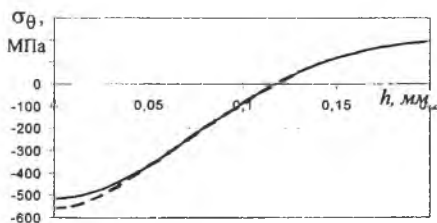


Рис. 3. Эпюры распределения остаточных напряжений $\sigma_\theta(h)$ на внутреннем упрочненном слое: сплошная линия - расчет по обобщенной модели; штриховая линия - расчет на основании решения краевой задачи методом сеток, для сферы из стали ЭИ698 ($T=700^\circ\text{C}$, $q=250\text{МПа}$) при $t=1000\text{ч}$: $h=r-a$ - глубина упрочненного слоя.

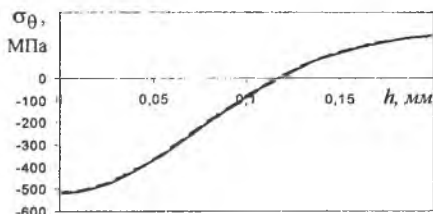


Рис. 4. Эпюры распределения остаточных напряжений $\sigma_\theta(h)$ на внутреннем упрочненном слое: сплошная линия - расчет по обобщенной модели; штриховая линия - расчет на основании решения краевой задачи методом сеток, для сферы из стали ЭИ698 ($T=700^\circ\text{C}$, $q=250\text{МПа}$) при $t=1500\text{ч}$: $h=r-a$ - глубина упрочненного слоя.

Учитывая важность решений $\sigma_{ij}^{\infty}(\bar{r})$, (см. (6), (7)), глава 3 посвящена проблеме получения аналитических решений для краевых задач установившейся ползучести с возмущенными границами в полярной системе координат (несоосные толстостенные и разностенные трубы и т.п.). Разработан метод решения задач такого рода на основе метода возмущений (метода малого параметра) для случая плоской задачи. В качестве основных реологических соотношений использовались квазилинейные уравнения установившейся ползучести. Компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций линеаризовались по малому параметру δ , который характеризует различие между плоским осесимметричным и неосесимметричным состояниями. За начальное состояние принят случай осевой симметрии. Из уравнений равновесия и условий несжимаемости получено дифференциальное уравнение в частных производных четвертого порядка относительно вспомогательной функции $\xi(r, \theta)$, которое решалось методом разделения переменных: $\xi(r, \theta) = rR(r)\varphi(\theta)$, где полагалось $\varphi(\theta) = \cos m\theta$, $R(r) = r^{\mu}$ ($\mu = const$). Построено аналитическое решение для задачи о несоосной толстостенной трубе и выполнено сравнение с аналитическим решением аналогичной осесимметричной задачи.

Основные результаты диссертационной работы.

1. Выполнена обстоятельная аналитическая и численная проверка гипотезы об инвариантности интегрально - среднего значения эквивалентных напряжений элементов конструкций для широкого класса материалов, геометрии и диапазона напряжений (включая напряжения за пределом текучести). Показано, что для цилиндрических и сферических элементов конструкций при однопараметрическом нагружении величина интегрально - среднего значения эквивалентных напряжений является практически инвариантной величиной (с погрешностью не более 2-4%) в процессе ползучести вплоть до разрушения по отношению к характеристикам ползучести и геометрии конструкций.

2. Предложена и обоснована обобщенная модель длительной прочности цилиндрических и сферических элементов конструкций на основе интегрально - средних значений эквивалентных напряжений в детерминированной и стохастической постановках (включая область упругопластического деформирования); выполнена проверка ее адекватности экспериментальным данным для толстостенных труб из стали 20 ($T=500^{\circ}\text{C}$), стали 12ХМФ ($T=590^{\circ}\text{C}$) и сплава ЭИ694 ($T=700^{\circ}\text{C}$) и данным решения соответствующих краевых задач численными методами.

3. Предложен метод построения приближенного аналитического решения (обобщенной модели) неустановившейся ползучести для цилиндрических и сферических элементов конструкций при стационарных и нестационарных режимах однопараметрического нагружения и выполнена проверка его адекватности сравнением с численным решением соответствующих краевых задач методом сеток.

4. Разработан метод расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно - упрочненном слое цилиндрических и сферических тел в условиях ползучести на основе обобщенной модели элемента конструкции, существенно снижающий размерность решаемой краевой задачи, объем и время вычислений и повышающий вычислительную устойчивость алгоритмов и выполнен его сравнительный анализ с данными прямого численного решения краевой задачи методом сеток.

5. Методом малого параметра построен класс приближенных аналитических решений установившейся ползучести для задач с возмущенными границами в полярной системе координат.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Радченко В.П., Башкинова Е.В. Решение краевых задач установившейся ползучести в полярных координатах методом возмущений // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. Вып.5. Самара:СамГТУ, 1998. С. 86-91, автор. 3с.
2. Башкинова Е.В. Решение краевых задач установившейся ползучести методом возмущений в условиях плоского деформированного состояния // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды восьмой межвузовской конференции. Ч. 1.Самара: СамГТУ, 1998. С. 24-28.
3. Радченко В.П., Башкинова Е.В., Саушкин М.Н. Построение приближенного решения для толстостенной трубы при модели установившейся ползучести материала // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды двенадцатой межвузовской конференции. Ч.1.Самара: СамГТУ, 2002. С.224-231, автор 3,2 с.
4. Радченко В.П., Башкинова Е.В., Кубышкина С.Н. Об одном подходе к оценке длительной прочности толстостенных труб на основе интегрально - средних напряженных состояний // Вестник СамГТУ. Серия: Физ.-мат. науки. . Вып.16. Самара:СамГТУ, 2002. С.96-104, автор 4,5 с.
5. Башкинова Е.В. Решение краевой задачи неустановившейся ползучести для неосимметричной толстостенной трубы // Вестник СамГТУ. Серия: Физ.-мат. науки. Вып.16. Самара:СамГТУ, 2002. С.105-110.
6. Башкинова Е.В. Метод возмущений применительно к решению статических задач ползучести // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды одиннадцатой межвузовской конференции. Ч.1.Самара: СамГТУ, 2001. С.20-25.
7. Башкинова Е.В. Построение аналитических решений для краевых задач установившейся ползучести методом малого параметра // Нелинейное моделирование и управление. Тезисы докладов международного семинара. Самара, 1998. С. 11-12.
8. Башкинова Е.В. Решений краевых задач установившейся ползучести для неосоосной толстостенной трубы // Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте. Труды Международной конференции. Ч.1. Самара, 1999. С.18.
9. Башкинова Е.В. Использование метода малого параметра при решении краевых задач с возмущенными граничными условиями // Актуальные проблемы

- современной науки. Тез. докл. первой Международной конференции молодых ученых. Ч. 1. Самара, 2000. С.12.
10. Башкинова Е.В. Построение аналитических решений для краевых задач ползучести с возмущенными границами // Актуальные проблемы современной науки. Тез. докл. второй Международной конференции молодых ученых. Ч. 1. Самара, 2001. С.22.
 11. Башкинова Е.В., Саушкин М.Н. Применение обобщенных моделей элементов конструкций для расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое толстостенных трубы и сферы // Актуальные проблемы современной науки. Труды третьей Международной конференции молодых ученых. Ч.1. Математика. Механика. Самара: СамГТУ, 2002. С.49-50, автор. 1 с.
 12. Башкинова Е.В. К обоснованию концепции «эталонного» напряжения в задачах длительной прочности толстостенных трубы и сферы // Актуальные проблемы современной науки. Труды третьей Международной конференции молодых ученых. Ч.1. Математика. Механика. Самара: СамГТУ, 2002. С.48-49.