

На правах рукописи



Цветков Виталий Владимирович

**Краевые задачи ползучести поверхностно  
упрочнённых цилиндров при различных видах  
квазистатического нагружения**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Самара – 2018

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Радченко Владимир Павлович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
«Прикладная математика и информатика»,  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»

Официальные оппоненты: **Овчинников Игорь Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Транспортное  
строительство» ФГБОУ ВО «Саратовский  
государственный технический университет  
имени Гагарина Ю. А.», г. Саратов

**Келлер Илья Эрнстович**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
научный сотрудник Института механики  
сплошных сред Уральского отделения  
Российской академии наук (ИМСС УрО РАН)  
— филиала ФГБУН Пермский федеральный  
исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный  
исследовательский университет имени  
академика С. П. Королева», г. Самара

Защита состоится «28» июня 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.243.10 при ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», расположенном по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, к. 9, ауд. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В. А. Артисевич Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского и на сайте <http://www.sgu.ru/research/dissertation-council/d-212-243-10>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к. ф.-м. н.

Сафонов Роман Анатольевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Основное направление развития современной науки и инженерной практики в машиностроении, аэрокосмическом комплексе и энергетической промышленности заключается в повышении показателей эксплуатационной надёжности при ужесточении температурно-силовых режимов нагружения элементов конструкций. Как правило, разрушение металлических деталей при эксплуатации начинается с поверхности, поскольку поверхностный слой изначально является ослабленным и оказывается наиболее нагруженным при всех видах напряжённого состояния. Поэтому с целью увеличения ресурса и продления срока службы таких деталей применяют различные методы упрочнения поверхности для создания в поверхностном слое благоприятных сжимающих остаточных напряжений.

Однако в процессе эксплуатации детали при механическом нагружении в условиях повышенных температур происходит накопление реологических деформаций. Это приводит к перераспределению (релаксации) полей остаточных напряжений с течением времени, в результате чего положительный эффект от применения упрочняющих технологий снижается. Таким образом, возникает проблема оценки скорости (времени) релаксации остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях при температурно-силовом нагружении.

В настоящее время данная задача в полном объёме решена лишь для цилиндрических деталей в условиях термоэкспозиции (чисто температурной выдержки без механических нагрузок) либо при одноосном растяжении. Но как известно, большинство реальных деталей машин и элементов конструкций в процессе эксплуатации подвержено воздействию сложного напряжённого состояния. Поэтому естественным образом возникает необходимость в разработке методов решения краевых задач для оценки кинетики напряжённо-деформированного состояния упрочнённых деталей при различных видах температурно-силового нагружения.

Вышеизложенное определяет актуальность тематики диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы** является разработка и экспериментальная проверка метода решения краевых задач ползучести поверхностно упрочнённых полых и сплошных цилиндрических образцов при различных видах квазистатического температурно-силового нагружения (термоэкспозиция, осевое растяжение, крутящий момент, внутреннее давление и их комбинации) и исследование влияния вида напряжённого состояния на релаксацию остаточных напряжений.

Достижение поставленной цели связано с решением следующих задач:

- 1) разработка метода решения краевой задачи ползучести и длительной прочности сплошных и полых цилиндров и его экспериментальная проверка в условиях сложного напряжённого состояния при различных видах квазистатического нагружения (осевое растяжение, кручение, действие внутреннего давления и их комбинации);
- 2) проведение сравнительного анализа данных расчёта длительной прочности по разработанному методу решения краевой задачи с данными расчёта при использовании концепции эквивалентных напряжённых состояний при разных видах напряжённого состояния;

- 3) разработка метода решения краевых задач для оценки кинетики напряжённно-деформированного состояния в поверхностно упрочнённых цилиндрических изделиях в условиях ползучести при сложном напряжённом состоянии (термоэкспозиция, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации) и его экспериментальная проверка;
- 4) исследование влияния вида напряжённного состояния на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых полых и сплошных цилиндрических образцах;
- 5) разработка алгоритмов и программного обеспечения для реализации предложенных методов решения краевых задач.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- 1) разработан метод решения краевой задачи о реологическом деформировании и разрушении цилиндрических элементов конструкций в условиях совместного действия растягивающей силы, крутящего момента и внутреннего давления;
- 2) выполнена проверка адекватности предложенного метода экспериментальным данным по ползучести и длительной прочности сплошных и полых цилиндрических образцов из стали 45 ( $T = 725^\circ\text{C}$ ,  $T = 740^\circ\text{C}$ ), сплава АМГ-6М ( $T = 450^\circ\text{C}$ ), стали 20 ( $T = 500^\circ\text{C}$ ), стали ЭИ694 ( $T = 700^\circ\text{C}$ ), стали 12Х18Н10Т ( $T = 850^\circ\text{C}$ ), сплава ЭИ698ВД ( $T = 750^\circ\text{C}$ ) при различных видах напряжённного состояния (осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации); выполнен сравнительный анализ данных расчёта длительной прочности по разработанному методу решения краевых задач с данными расчёта при использовании концепции эквивалентных напряжённных состояний при разных видах напряжённного состояния;
- 3) предложен вариант обобщения модели ползучести и длительной прочности энергетического типа на случай материалов, проявляющих анизотропию свойств ползучести при чистом растяжении и чистом сдвиге; изложена методика идентификации параметров предложенной реологической модели и выполнена проверка её адекватности экспериментальным данным по ползучести и длительной прочности сплошных и полых цилиндрических образцов из сплава Д16Т ( $T = 250^\circ\text{C}$ ) и сплава РА6 ( $T = 150^\circ\text{C}$ ); произведено сравнение с данными расчёта из независимых источников;
- 4) разработан метод решения краевых задач для оценки кинетики напряжённно-деформированного состояния в поверхностно упрочнённых цилиндрических изделиях в условиях ползучести при сложном напряжённом состоянии (термоэкспозиция, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации), выполнена проверка его адекватности экспериментальным данным по кинетике остаточных напряжений для сплошных цилиндрических образцов из сплава ЖС6УВИ ( $T = 675^\circ\text{C}$ ) в условиях термоэкспозиции и сплава ЖС6КП ( $T = 800^\circ\text{C}$ ) в условиях действия растягивающей нагрузки;
- 5) проведено теоретическое исследование влияния вида напряжённного состояния на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых полых и сплошных цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП ( $T = 900^\circ\text{C}$ ) на модельных примерах (кручение, растяжение + кручение, внутреннее давление, внутреннее давление + растяжение, внутреннее давление + кручение);

6) разработано новое математическое и программное обеспечение для численной реализации разработанных методов решения краевых задач кинетики напряжённо-деформированного состояния упрочнённых и неупрочнённых цилиндрических деталей в условиях ползучести.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) метод решения краевой задачи о реологическом деформировании и разрушении цилиндрических элементов конструкций в условиях совместного действия растягивающей силы, крутящего момента и внутреннего давления;
- 2) вариант обобщения модели ползучести и длительной прочности энергетического типа на случай материалов, проявляющих анизотропию свойств ползучести при чистом растяжении и чистом сдвиге;
- 3) метод решения краевых задач для оценки кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённых цилиндрических изделиях в условиях ползучести при сложном напряжённом состоянии (термоэкспозиция, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации);
- 4) результаты новых теоретических исследований влияния вида температурно-силового нагружения на кинетику напряжённо-деформированного состояния поверхностно упрочнённых сплошных и полых цилиндрических изделиях.

**Практическая значимость** работы заключается в постановке и решении новых краевых задач механики упрочнённых конструкций в условиях ползучести. Разработанные методики решения краевых задач, реализованные в виде программного обеспечения, позволяют оценить остаточный ресурс упрочнённых цилиндрических изделий и провести параметрический анализ влияния различных факторов на процесс релаксации остаточных напряжений при оценке эффективности упрочнения при температурно-силовом нагружении деталей. Полученные новые теоретические данные по релаксации остаточных напряжений дополняют соответствующую информационную базу данных и востребованы в инженерной практике в энергетическом машиностроении, авиадвигателестроении и других областях.

**Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается сравнением результатов расчётов характеристик напряжённо-деформированного состояния с известными экспериментальными данными и данными расчёта из независимых источников; адекватностью используемых математических моделей реологического деформирования и разрушения элементов конструкций реальным экспериментальным данным; корректностью использования математического аппарата, законов механики деформируемого твёрдого тела; экспериментальной проверкой используемых гипотез и результатов численного решения краевых задач ползучести и релаксации остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических изделиях для частных видов температурно-силового нагружения.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка источников из 189 наименований. Работа содержит 195 страниц основного текста, 51 рисунок, 26 таблиц и 3 приложения.

**Апробация работы.** Результаты научных исследований опубликованы в 26 печатных работах и были представлены на конференциях различного уровня: на Международных молодёжных научных конференциях «XL Гагаринские

чтения», «XLII Гагаринские чтения» (г. Москва, 2014, 2016 гг.); на девятой, десятой Всероссийских научных конференциях с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2013, 2016 гг.); на X Всероссийской конференции по механике деформируемого твёрдого тела (г. Самара, 2017 г.), на конференциях «XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред», «XIX Зимняя школа по механике сплошных сред», «XX Зимняя школа по механике сплошных сред» (г. Пермь, 2013, 2015, 2017 гг.); на Международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 2013 г.); на Международной научной конференции «Дифференциальные уравнения и смежные проблемы» (г. Самара, 2017 г.); на Международных молодёжных научных конференциях по естественно-научным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу — творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2013, 2014, 2016, 2017 гг.); на Всероссийской научной конференции, посвящённой 75-летию со дня рождения доктора физико-математических наук, профессора Г. И. Быковцева «Актуальные проблемы математики и механики» (г. Самара, 2013 г.); на научных семинарах «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. д.ф.-м.н., профессор В. П. Радченко, 2014–2018 гг.).

**Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке** Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №13-01-00699, №16-01-00249-а) и в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации по программе АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект №2.1.1/13944).

**Внедрение.** Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВО «СамГТУ» и включены в лекционный материал курсов «Математические основы механики поверхностного пластического упрочнения», «Численные методы решения краевых задач механики деформируемого твёрдого тела» и «Реологические модели» основной образовательной программы подготовки аспирантов и бакалавров, а также в расчётную практику профильных отделов ПАО «Кузнецов» (г. Самара).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 26 печатных работах, из них 2 статьи в журналах из базы Web of Science, 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 1 авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 8 статей в сборниках трудов конференций и 11 тезисов докладов, основные 20 из которых приведены ниже в списке публикаций.

**Личный вклад автора.** Работы [2, 10–20] выполнены самостоятельно, в основных работах [1, 3–6] диссертанту принадлежит совместная постановка задач и разработка методов решения, анализ и систематизация полученных результатов, проведение расчётов. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежат как постановка задач, так и результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук В. П. Радченко за постановку задач и поддержку работы, а также доценту, кандидату физико-математических наук М. Н. Саушкину за консультации и постоянное внимание к работе.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определяются цели исследования, излагаются научная новизна и практическая значимость работы, формируются основные положения, выносимые на защиту, приводится структура диссертационной работы, а также сведения о публикациях автора.

### **Глава 1. Аналитический обзор и постановка задач исследования.**

**В пункте 1.1** дан краткий обзор существующих методов определения остаточных напряжений после процедуры упрочнения цилиндрических деталей. Проанализированы известные в настоящее время экспериментальные, теоретические и феноменологические методы определения остаточных напряжений в упрочнённых деталях, представленные работами А. Н. Архипова, М. А. Биргера, В. Б. Бойцова, С. А. Бордакова, А. С. Букатого, В. С. Вакулюка, Г. Н. Гутмана, С. И. Иванова, В. А. Кирпичёва, Б. А. Кравченко, Ю. И. Няшина, В. Ф. Павлова, А. А. Поздеева, В. П. Радченко, В. П. Сазанова, Ю. П. Самарина, М. Н. Саушкина, О. Ю. Семеновой, Ю. М. Темиса, П. В. Трусова, П. А. Чепы, А. О. Чернявского, А. В. Чиркова и других исследователей. Отмечено, что чисто экспериментальные методы не позволяют в полном объёме определить характеристики напряжённо-деформированного состояния упрочнённой детали, а немногочисленные аналитические и численные методы разработаны слабо и имеют ограниченную область применения. Исходя из этого сделан вывод, что применительно к задаче восстановления полной картины напряжённо-деформированного состояния цилиндрических деталей после упрочнения предпочтительно использование феноменологических подходов, поскольку они основаны на частично известной экспериментальной информации о тензоре остаточных напряжений (одна или две компоненты). Изложен научно-обоснованный феноменологический метод восстановления (реконструкции) напряжённо-деформированного состояния после процедуры упрочнения сплошных и полых цилиндрических изделий, представленный в цикле работ В. П. Радченко и М. Н. Саушкина и используемый в расчётных методиках диссертационной работы.

**В пункте 1.2** рассматривается влияние поверхностного упрочнения на сопротивление усталости и физико-механические параметры поверхностного слоя упрочнённых конструкций. Проанализированы литературные источники, посвящённые исследованию данного вопроса. Отмечено, что применение методов поверхностного пластического упрочнения способствует повышению сопротивления многоциклового усталости. Также отмечен факт увеличения параметров шероховатости и существенное повышение микротвердости упрочнённых деталей по сравнению с неупрочнёнными, что связано с наличием в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

**В пункте 1.3** рассмотрен вопрос кинетики напряжённо-деформированного состояния поверхностно упрочнённых деталей в условиях температурно-силового нагружения. Выполнен анализ экспериментальных и теоретических исследований, посвящённых релаксации остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. Сделан вывод о том, что краевая задача релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести цилиндрических деталей в настоящее время решена лишь для простейших случаев нагружения (чисто температурная выдержка либо осевое растяжение).

**В пункте 1.4** выполнено обоснование модели ползучести и длительной прочности, используемой в диссертационной работе при решении краевых задач. Отмечено, что значительный вклад в развитие теории реологического деформирования и разрушения металлических материалов внесли В. И. Астафьев, Б. В. Горев, Ю. И. Кадашевич, Л. М. Качанов, Я. М. Клебанов, А. М. Локощенко, Н. Н. Малинин, И. В. Наместникова, А. Ф. Никитенко, В. В. Новожилов, Ю. Н. Работнов, Ю. Н. Радаев, В. П. Радченко, Ю. П. Самарин, О. В. Соснин, С. А. Шестериков, И. Ю. Цвелодуб, J. Betten, J. T. Boyle, F. A. Leckie, J. Spence и многие другие исследователи. Выделен энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности<sup>1</sup>, используемый в расчётных методиках в рамках настоящей диссертационной работы. Изложена методика идентификации параметров, входящих в определяющие соотношения данной теории, с использованием модифицированного метода наименьших квадратов.

**В пункте 1.5** по результатам аналитического обзора сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

**Глава 2. Решение краевой задачи о реологическом деформировании и разрушении цилиндрических элементов конструкций в условиях совместного действия растягивающей силы, крутящего момента и внутреннего давления.**

**Глава 2** посвящена разработке метода решения краевой задачи ползучести и длительной прочности сплошных и полых цилиндров и его экспериментальная проверка в условиях сложного напряжённого состояния (осевое растяжение, кручение, действие внутреннего давления и их комбинации).

**В пункте 2.1** приведена постановка рассматриваемой краевой задачи.

**В пункте 2.2** разработана методика расчёта кинетики напряжённо-деформированного состояния в процессе ползучести цилиндрического образца в условиях совместного действия осевой силы, крутящего момента и внутреннего давления для полых образцов и растягивающей нагрузки и крутящего момента для сплошных образцов.

**В пункте 2.3** на основе энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности выполнена экспериментальная проверка предложенной методики для известных экспериментальных данных по ползучести и длительной прочности цилиндрических образцов при различных видах напряжённого состояния. Выполнен расчёт кинетики напряжённо-деформированного состояния для сплошных и полых цилиндрических образцов из следующих материалов: сталь 45 при  $T = 725^\circ\text{C}$  и  $T = 740^\circ\text{C}$  (растяжение; кручение), сплав АМГ-6М при  $T = 450^\circ\text{C}$  (растяжение; кручение), сталь 20 при  $T = 500^\circ\text{C}$  (растяжение; внутреннее давление), сталь ЭИ694 при  $T = 700^\circ\text{C}$  (растяжение; внутреннее давление; кручение + внутреннее давление), сталь 12Х18Н10Т при  $T = 850^\circ\text{C}$  (растяжение; растяжение + кручение; растяжение + внутреннее давление), сплав ЭИ698ВД при  $T = 750^\circ\text{C}$  (растяжение; растяжение + кручение). Показано, что наблюдается соответствие данных расчёта по разработанной методике решения краевой задачи с использованием энергетического варианта теории ползучести с существующими экспериментальными данными и данными расчёта из независимых источников. Это позволяет судить об адек-

---

<sup>1</sup> Радченко В. П., Ерёмин Ю. А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. М.: Машиностроение-1, 2004. 265 с



ватности экспериментальным данным предложенной методики расчёта кинетики напряжённо-деформированного состояния на основе энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности.

**В пункте 2.4** предложен вариант обобщения модели ползучести и длительной прочности энергетического типа для материалов, проявляющих анизотропию свойств ползучести при чистом растяжении и чистом сдвиге. Для этого в базовой реологической модели (без учёта первой стадии ползучести) произведено разделение определяющих соотношений для диагональных (нормальных) и недиагональных компонент тензоров напряжений и деформаций с использованием расширенного набора материальных констант ( $i, j, k = 1, 2, 3$ ):

$$\dot{p}_{ij} = \begin{cases} \frac{3}{2}cS^{m-1}\left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{kk}\right), & i = j, \\ \frac{3}{2}c^*S^{m-1}\sigma_{ij}, & i \neq j; \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0(1 + \omega); \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = \alpha \sum_{k=1}^3 \sigma_{kk}\dot{p}_{kk} + \alpha^* \sigma_{ij}\dot{p}_{ij} \quad (i \neq j); \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha_1(S_0)^{m_\alpha}; \quad \alpha^* = \alpha_1^*(S_0)^{m_\alpha^*}, \quad (4)$$

где  $p_{ij}$  — тензор деформации ползучести,  $\sigma_{ij}^0$  и  $\sigma_{ij}$  — тензоры номинальных и истинных напряжений соответственно;  $S_0$  и  $S$  — интенсивности тензоров номинальных и истинных напряжений соответственно;  $\omega$  — скалярный параметр повреждённости;  $m$  — показатель нелинейности ползучести;  $c, \alpha_1, m_\alpha, c^*, \alpha_1^*, m_\alpha^*$  — параметры модели. Первое соотношение в (1) записано для диагональных компонент тензора деформаций ползучести  $p_{ij}$  при  $i = j$ , второе — для недиагональных компонент  $p_{ij}$  ( $i \neq j$ ), которые связаны с соответствующими сдвиговыми деформациями ползучести  $\gamma_{ij}^p$  по формуле  $\gamma_{ij}^p = 2p_{ij}$ .

Расчёт осуществляется до тех пор, пока хотя бы в одной точке конструкции не выполнится условие

$$\Omega(t^*) = \int_0^{t^*} \left( \sum_{k=1}^3 \frac{\sigma_{kk} dp_{kk}}{A_1(S_0)^{m_A}} + \frac{\sigma_{ij} dp_{ij}}{A_1^*(S_0)^{m_A^*}} \right) = 1 \quad (i \neq j), \quad (5)$$

где  $A_1, m_A, A_1^*, m_A^*$  — параметры модели.

В частном случае для модели изотропной ползучести верны соотношения  $c^* = c, \alpha_1^* = \alpha_1, m_\alpha^* = m_\alpha, A_1^* = A_1, m_A^* = m_A$ .

**В пункте 2.5** изложена методика идентификации параметров предложенной в п. 2.4 модели ползучести анизотропно разупрочняющихся материалов на конкретных примерах для образцов из алюминиевых сплавов Д16Т ( $T = 250^\circ\text{C}$ ) и РА6 ( $T = 150^\circ\text{C}$ ). В основе данной методики лежит построение реологических моделей частного вида при чистом растяжении (с использованием экспериментальных кривых ползучести в координатах «осевая деформация ползучести  $p_z$  — время  $t$ ») и при чистом сдвиге (с использованием экспериментальных кривых в координатах «сдвиговая деформация ползучести  $\gamma^p$  — время  $t$ » при кручении тонкостенных трубок). Выполнены расчёты кинетики

напряжённно-деформированного состояния цилиндрических образцов из сплава Д16Т и сплава РА6 при осевом растяжении, чистом кручении, а также при кручении совместно с растяжением. Для толстостенных образцов из сплава Д16Т проведено сравнение результатов расчёта полной осевой деформации  $\varepsilon_z = \varepsilon_z(t)$  и угла закручивания  $\theta = \theta(t)$  по моделям ползучести изотропного и анизотропного материалов с имеющейся экспериментальной информацией, а также с данными расчёта по энергетическому варианту теории ползучести О. В. Соснина<sup>2</sup>.

**В пункте 2.6** приведены выводы по главе 2.

**Глава 3. Метод расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом цилиндрическом образце в условиях ползучести при различных видах напряжённого состояния.**

**В главе 3** разработан метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых полых и сплошных цилиндрических образцах в условиях ползучести при различных видах температурно-силового нагружения: термоэкспозиция, осевое растяжение, крутящий момент, внутреннее давление и их комбинации.

**В пункте 3.1** сформулирована постановка задачи главы 3.

**В пункте 3.2** приведена методика восстановления полной картины напряжённно-деформированного состояния в сплошных и полых цилиндрических образцах после процедуры поверхностного пластического деформирования<sup>3</sup>. Задача решается в стандартной цилиндрической системе координат  $(r, \theta, z)$ . С использованием экспериментально известной компоненты  $\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}(r)$  остальные компоненты остаточных напряжений и пластических деформаций определяются по следующим формулам:

$$\sigma_r^{\text{res}}(r) = \frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta^{\text{res}}(\xi) d\xi; \quad (6)$$

$$q_\theta(r) = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{E_0(1 + \alpha\mu)^2} r^{-\nu} \int_{R_1}^r \xi^{\nu-1} [\sigma_r^{\text{res}}(\xi) + (1 + \alpha)\sigma_\theta^{\text{res}}(\xi)] d\xi - \quad (7)$$

$$- \frac{1 + \mu}{E_0(1 + \alpha\mu)} [(1 - \mu)\sigma_\theta^{\text{res}}(r) - \mu\sigma_r^{\text{res}}(r)], \quad \nu = \frac{2 + \alpha}{1 + \alpha\mu};$$

$$q_z(r) = \alpha q_\theta(r), \quad q_r(r) = -(1 + \alpha)q_\theta(r); \quad (8)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E_0} [\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)] \right\} dr; \quad (9)$$

$$\sigma_z^{\text{res}}(r) = E_0 [\varepsilon_z^0 - q_z(r)] + \mu [\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)], \quad (10)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — внутренний и внешний радиусы цилиндра соответственно;

<sup>2</sup> Соснин О. В., Горев Б. В., Никитенко А. Ф. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. 95 с.

<sup>3</sup> Радченко В. П., Саушкин М. Н. Феноменологический метод расчёта остаточных напряжений и пластических деформаций в полом поверхностно упрочнённом цилиндрическом образце // Прикладная математика и механика. 2013. Т. 77, № 1. С. 143–152.

$\sigma_r^{\text{res}}$ ,  $\sigma_\theta^{\text{res}}$ ,  $\sigma_z^{\text{res}}$  — радиальное, окружное и осевое остаточные напряжения соответственно;  $q_r$ ,  $q_\theta$ ,  $q_z$  — соответствующие компоненты тензора остаточных пластических деформаций;  $E_0$  — модуль Юнга при температуре упрочнения  $T_0$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\alpha$  — феноменологический параметр анизотропии упрочнения.

Полученные поля остаточных напряжений и пластических деформаций играют роль начальных данных для последующего решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести.

**В пункте 3.3** приведена постановка рассматриваемой краевой задачи, включающая уравнения равновесия, уравнение совместности деформаций, гипотезы плоских сечений и прямых радиусов, а также краевые условия. Указаны основные отличия в методике решения краевой задачи для сплошного и полого цилиндров: различаются краевые условия, кроме того, для сплошных образцов внутренний радиус  $R_1 = 0$  и отсутствуют члены, порождённые внутренним давлением.

**В пункте 3.4** разработана методика расчёта кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённых сплошных и полых цилиндрических образцах вследствие ползучести при различных видах температурно-силового нагружения (совместное действие растягивающей силы, крутящего момента и внутреннего давления). В качестве начального (при  $t = 0 - 0$ ) напряжённого состояния принимается тензор остаточных напряжений, полученный с использованием методики (6)–(10).

Вначале рассматривается режим температурной нагрузки с температуры при упрочнении  $T = T_0$  (как правило, комнатная температура), значение модуля Юнга при которой составляет величину  $E = E_0$ , до температуры эксплуатации  $T = T_1$  ( $T_1 > T_0$ ), значение модуля Юнга при которой равно  $E = E_1$  ( $E_1 < E_0$ ). Показано, что при температурном нагружении в момент времени  $t = 0 + 0$  (предполагается, что нагрев произошёл «мгновенно») происходит изменение компонент тензора напряжений в  $E_1/E_0$  раз и соответствующее изменение компонент тензора упругих деформаций.

Затем рассматривается нагружение образца осевой силой  $F$ , крутящим моментом  $M$  и внутренним давлением  $q$  в момент времени  $t = 0 + 0$ . При этом происходит ступенчатое изменение компонент тензора напряжений на величину «рабочих» напряжений, соответствующих упругому решению краевой задачи:

$$\begin{aligned}\sigma_z^0(r, 0 + 0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_z^{\text{res}}(r) + \frac{F}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}; \\ \sigma_\theta^0(r, 0 + 0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_\theta^{\text{res}}(r) + \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[ 1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right]; \\ \sigma_r^0(r, 0 + 0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_r^{\text{res}}(r) + \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[ 1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right]; \\ \tau_0(r, 0 + 0) &= \frac{M}{J} r, \quad J = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r^3 dr = \frac{\pi(R_2^4 - R_1^4)}{2},\end{aligned}\tag{11}$$

где  $J$  — момент инерции сечения относительно оси стержня. Здесь и в дальнейшем  $\sigma_z^0 = \sigma_z^0(r, t)$ ,  $\sigma_\theta^0 = \sigma_\theta^0(r, t)$ ,  $\sigma_r^0 = \sigma_r^0(r, t)$ ,  $\tau_0 = \tau_0(r, t)$  — осевая, окружная,

радиальная и касательная компоненты тензора номинальных напряжений.

Далее необходимо разрешить соотношения рассматриваемой краевой задачи относительно компонент тензора напряжений. При помощи математических преобразований задача сводится к решению дифференциального уравнения второго порядка относительно радиальной компоненты  $\sigma_r^0 = \sigma_r^0(r, t)$ :

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_r^0(r, t)}{dr^2} + 3r \frac{d\sigma_r^0(r, t)}{dr} = g(r, t), \quad (12)$$

где

$$g(r, t) = \frac{E_1}{1 - \mu^2} \left[ \frac{2 + \alpha}{1 + \alpha} q_r(r) + p_r(r, t) - p_\theta(r, t) - r \left( \frac{dp_\theta(r, t)}{dr} + \mu \frac{dp_z(r, t)}{dr} \right) + \frac{r(1 + \alpha\mu)}{1 + \alpha} \frac{dq_r(r)}{dr} \right]; \quad (13)$$

$p_r, p_\theta, p_z$  — компоненты тензора деформаций ползучести; время  $t$  играет роль параметра.

Решение этого дифференциального уравнения при заданных граничных условиях имеет вид:

а) для сплошных образцов ( $R_1 = 0, q = 0$ )

$$\left. \frac{d\sigma_r^0(r, t)}{dr} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \sigma_r^0(r, t) \right|_{r=R_2} = 0; \quad (14)$$

$$\sigma_r^0(r, t) = - \int_r^{R_2} \frac{1}{\xi^3} \int_0^\xi g(\eta, t) \eta d\eta d\xi; \quad (15)$$

б) для полых образцов ( $R_1 > 0, q \geq 0$ )

$$\left. \sigma_r^0(r, t) \right|_{r=R_1} = -q; \quad \left. \sigma_r^0(r, t) \right|_{r=R_2} = 0; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \sigma_r^0(r, t) = & \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[ 1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right] + \frac{1}{2} \int_{R_1}^r \frac{g(\xi, t)}{\xi} d\xi + \\ & + \frac{1}{2r^2} \left[ \frac{r^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left( \int_{R_1}^{R_2} g(\xi, t) \xi d\xi - R_2^2 \int_{R_1}^{R_2} \frac{g(\xi, t)}{\xi} d\xi \right) - \int_{R_1}^r g(\xi, t) \xi d\xi \right]. \quad (17) \end{aligned}$$

Используя найденную величину  $\sigma_r^0 = \sigma_r^0(r, t)$ , из уравнений равновесия определяются окружная  $\sigma_\theta^0 = \sigma_\theta^0(r, t)$ , осевая  $\sigma_z^0 = \sigma_z^0(r, t)$  и касательная  $\tau_0 = \tau_0(r, t)$  компоненты тензора напряжений по следующим формулам:

$$\sigma_{\theta}^0(r, t) = \frac{d}{dr} [r\sigma_r^0(r, t)]; \quad (18)$$

$$\varepsilon_z(t) = \frac{F}{\pi(R_2^2 - R_1^2)E_1} + \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r \left\{ q_z(r) + p_z(r, t) - \frac{\mu}{E_1} [\sigma_r^0(r, t) + \sigma_{\theta}^0(r, t)] \right\} dr; \quad (19)$$

$$\sigma_z^0(r, t) = E_1 [\varepsilon_z(t) - q_z(r) - p_z(r, t)] + \mu [\sigma_{\theta}^0(r, t) + \sigma_r^0(r, t)]; \quad (20)$$

$$\theta(t) = \frac{M}{G_1 J} + \frac{2\pi}{J} \int_{R_1}^{R_2} \gamma^p(r, t) r^2 dr, \quad G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \mu)}; \quad (21)$$

$$\tau_0(r, t) = G_1 [r\theta(t) - \gamma^p(r, t)], \quad (22)$$

где  $G_1$  — модуль сдвига материала при температуре  $T = T_1$ .

Формулы (15)–(22) позволяют определить характеристики напряжённо-деформированного состояния цилиндрического образца в процессе ползучести в любой момент времени. При этом для нахождения значений реологических компонент  $p_z$ ,  $p_{\theta}$ ,  $p_r$ ,  $\gamma^p$  можно использовать любую теорию ползучести, которая бы адекватно описывала экспериментальные данные; в настоящем диссертационном исследовании для этой цели используется энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности.

Пусть теперь в момент времени  $t = t^* + 0$  после ползучести «мгновенно» производится силовая, а затем температурная разгрузка образца с температуры  $T = T_1$  до температуры  $T = T_0$ . При этом происходит ступенчатое изменение компонент тензора напряжений на величину «рабочих» напряжений, после чего значения полученных напряжений изменяются в  $E_0/E_1$  раз:

$$\begin{aligned} \sigma_z^0(r, t^* + 0) &= \frac{E_0}{E_1} \left( \sigma_z^0(r, t^* - 0) - \frac{F}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \right); \\ \sigma_{\theta}^0(r, t^* + 0) &= \frac{E_0}{E_1} \left( \sigma_{\theta}^0(r, t^* - 0) - \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[ 1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right] \right); \\ \sigma_r^0(r, t^* + 0) &= \frac{E_0}{E_1} \left( \sigma_r^0(r, t^* - 0) - \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[ 1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right] \right); \\ \tau_0(r, t^* + 0) &= \frac{E_0}{E_1} \left( \tau_0(r, t^* - 0) - \frac{M}{J} r \right). \end{aligned} \quad (23)$$

**В пункте 3.5** выполнена проверка адекватности разработанной методики решения краевой задачи экспериментальным данным по кинетике остаточных напряжений в сплошных цилиндрических образцах из жаропрочных сплавов ЖС6УВИ в условиях термоэкспозиции при температуре  $T = 675^\circ\text{C}$  и ЖС6КП в условиях действия растягивающей нагрузки при  $T = 800^\circ\text{C}$ .

В качестве примера на рис. 1 приведены экспериментальные и расчётные кривые одноосной ползучести  $p_z = p_z(t)$ , а также результаты расчёта релакса-

ции осевой компоненты тензора напряжений  $\sigma_z^0 = \sigma_z^0(r, t)$  для образцов из сплава ЖС6УВИ после упрочнения (при  $t = 0 - 0$ ), после температурной нагрузки (при  $t = 0 + 0$ ) и после ползучести в течение различного времени ( $t^* = \{50, 150, 300\}$  ч) и последующей разгрузки (при  $t = t^* + 0$ ).

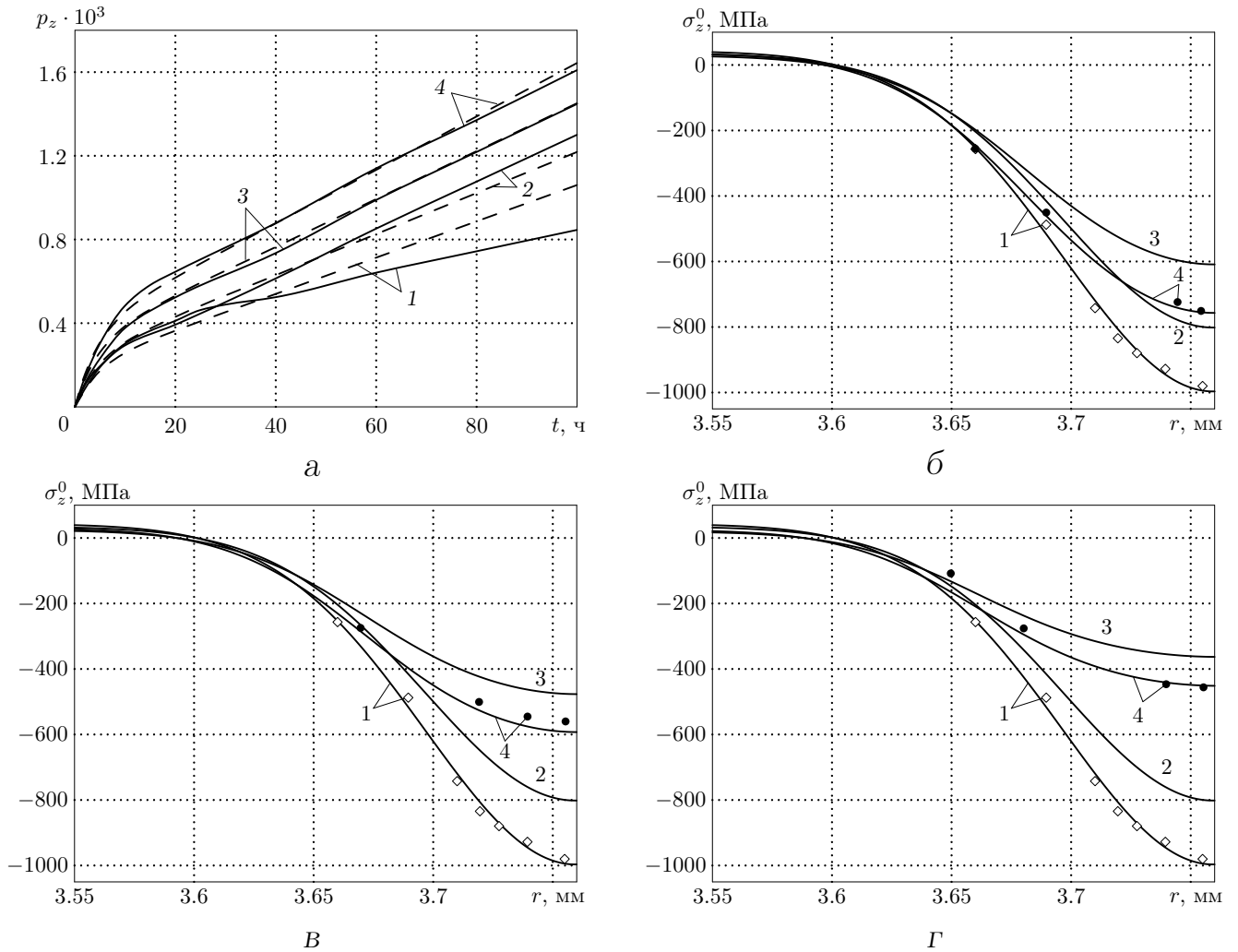


Рис. 1. Экспериментальные (сплошные линии) и расчётные (штриховые линии) кривые одноосной ползучести сплава ЖС6УВИ ( $T = 675^\circ\text{C}$ ): 1 —  $\sigma_z^0 = 500$  МПа; 2 —  $\sigma_z^0 = 530$  МПа; 3 —  $\sigma_z^0 = 570$  МПа; 4 —  $\sigma_z^0 = 600$  МПа (а); распределения остаточных напряжений  $\sigma_z^0 = \sigma_z^0(r, t)$  в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического образца из сплава ЖС6УВИ в различные моменты времени: 1 — после процедуры упрочнения при  $t = 0 - 0$ ; 2 — после температурного нагружения от значения  $T = 20^\circ\text{C}$  до значения  $T = 675^\circ\text{C}$  при  $t = 0 + 0$ ; 3 — после окончания процесса ползучести в условиях термоэкспозиции при  $T = 675^\circ\text{C}$  в течение различного времени (б —  $t = 50 - 0$  ч, в —  $t = 150 - 0$  ч, г —  $t = 300 - 0$  ч); 4 — финишные значения после температурной разгрузки от значения  $T = 675^\circ\text{C}$  до значения  $T = 20^\circ\text{C}$  (б —  $t = 50 + 0$  ч, в —  $t = 150 + 0$  ч, г —  $t = 300 + 0$  ч); линии — расчётные кривые;  $\diamond$  — экспериментальные значения после упрочнения;  $\bullet$  — финишные значения после температурной разгрузки

Анализ расчётных данных, представленных на рис. 1, показал, что за время  $t = 50$  ч максимальные (по модулю) напряжения  $\sigma_z^0$  в процессе релаксации снизились на 24%, за  $t = 150$  ч — на 41%, а при  $t = 300$  ч — на 55%. Для экспериментальных данных эти значения составили 23%, 43% и 54% соответственно.

В целом, для данного сплава наблюдается соответствие данных расчёта остаточных напряжений после упрочнения и после ползучести с последующей

разгрузкой экспериментальным данным. Погрешность отклонения расчётных значений  $\sigma_z^p$  от экспериментальных данных  $\sigma_z^э$  вычислялась по формуле

$$\Delta_z(t) = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N [\sigma_z^э(r_k, t) - \sigma_z^p(r_k, t)]^2}{\sum_{k=1}^N [\sigma_z^э(r_k, t)]^2} \right]^{1/2}, \quad (24)$$

где  $N$  — число точек дискретизации радиуса  $r_k$  в упрочнённом слое, и составила 2.5% после процедуры упрочнения (при  $t = 0 - 0$ ), для финишных эпюр напряжений после ползучести в течение  $t = 50, 150$  и  $300$  часов и последующей температурной разгрузки — 2%, 5.3% и 8.7% соответственно.

**В пункте 3.6** приведены выводы по главе 3.

**Глава 4. Исследование влияния вида температурно-силового нагружения на релаксацию остаточных напряжений в полых и сплошных поверхностно упрочнённых цилиндрических образцах.**

**Глава 4** посвящена теоретическому исследованию влияния различных видов температурно-силового нагружения (растяжение, кручение, внутреннее давление в различных комбинациях) на релаксацию остаточных напряжений в сплошных и полых поверхностно упрочнённых цилиндрических образцах. Исследование выполнено на модельных примерах для образцов из сплава ЖС6КП в условиях ползучести при  $T = 900^\circ\text{C}$ .

**В пункте 4.1** проведено исследование влияния осевого растяжения и крутящего момента на релаксацию остаточных напряжений в сплошном цилиндре радиусом  $R_2 = 3.76$  мм. С использованием экспериментальной информации для осевой компоненты тензора остаточных напряжений  $\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(r)$  в упрочнённом слое  $r \in [3.6, 3.76]$  мм получены расчётные зависимости для полей остаточных напряжений  $\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ ,  $\sigma_r^{\text{res}} = \sigma_r^{\text{res}}(r)$ ,  $\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(r)$  и полей пластических деформаций  $q_\theta = q_\theta(r)$ ,  $q_r = q_r(r)$ ,  $q_z = q_z(r)$  во всем объёме образца  $r \in [0, 3.76]$  мм после процедуры упрочнения. Далее выполнен сравнительный анализ расчётных эпюр релаксации остаточных напряжений в процессе установившейся ползучести в течение времени  $t = 100$  ч при различных сочетаниях растягивающей нагрузки  $F$  и крутящего момента  $M$ . Показано, что при одном и том же значении крутящего момента приложение растягивающей нагрузки интенсифицирует процесс релаксации напряжений. При этом на стадии установившейся ползучести при  $t \rightarrow +\infty$  напряжения  $\sigma_\theta^0 = \sigma_\theta^0(r, t)$  и  $\sigma_r^0 = \sigma_r^0(r, t)$  релаксируют практически до нуля, в то время как распределение компоненты  $\sigma_z^0 = \sigma_z^0(r, t)$  близко к стационарному (асимптотическому) состоянию, определяемому соотношением  $\sigma_z^0 = F/(\pi R_2^2)$ .

**В пункте 4.2** проведено исследование влияния внутреннего давления (в том числе при комбинации с растяжением и кручением) на релаксацию остаточных напряжений в толстостенном цилиндре с радиусами  $R_1 = 2$  мм и  $R_2 = 3.76$  мм. Сначала определялось напряжённо-деформированное состояние цилиндрического образца после процедуры упрочнения. С использованием экспериментальной информации для компоненты  $\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(r)$  в упрочнённом слое  $r \in [3.6, 3.76]$  мм для сплошного цилиндра получены расчётные зависимости для остаточных напряжений  $\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ ,  $\sigma_r^{\text{res}} = \sigma_r^{\text{res}}(r)$ ,  $\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(r)$  и пластических деформаций  $q_\theta = q_\theta(r)$ ,  $q_r = q_r(r)$ ,  $q_z = q_z(r)$  во всем объёме полого образца  $r \in [2, 3.76]$  мм.

С использованием энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности частного вида (без учёта третьей стадии ползучести) получены расчётные эпюры релаксации напряжений при нагружении упрочнённого и неупрочнённого цилиндров внутренним давлением  $q = 150$  МПа. Наблюдается перераспределение напряжений  $\sigma_r^0 = \sigma_r^0(r, t)$ ,  $\sigma_\theta^0 = \sigma_\theta^0(r, t)$ ,  $\sigma_z^0 = \sigma_z^0(r, t)$  как в тонком упрочнённом слое, так и в глубинных объёмах образца. Показано, что в асимптотическом случае при  $t \rightarrow +\infty$  на стадии установившейся ползучести все компоненты тензора напряжений  $\sigma_r^0$ ,  $\sigma_\theta^0$ ,  $\sigma_z^0$  практически неотличимы от соответствующих напряжений, возникающих в процессе ползучести неупрочнённых образцов. Это позволяет судить об адекватности метода расчёта кинетики напряжённо-деформированного состояния упрочнённых цилиндров на стадии установившейся ползучести.

Получены расчётные эпюры релаксации остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах вследствие ползучести в условиях комбинированного нагружения (внутреннее давление + растяжение, внутреннее давление + кручение). Показано, что приложение добавочных нагрузок (осевой силы, крутящего момента) к образцу, нагруженному внутренним давлением, интенсифицирует процесс ползучести и как следствие — релаксацию всех компонент тензора напряжений в упрочнённом слое. В качестве примера на рис. 2 приведены теоретические распределения напряжений  $\sigma_\theta^0$ ,  $\sigma_r^0$ ,  $\sigma_z^0$  вследствие установившейся ползучести в условиях совместного действия осевой силы  $F = 3184.8$  Н и внутреннего давления  $q = 150$  МПа. Из информации, представленной на рис. 2, следует, что при указанных значениях внешних силовых факторов к моменту времени  $t = 300 - 0$  ч остаточные напряжения в поверхностном слое практически полностью релаксировали, и эпюры соответствуют стационарным распределениям напряжений на стадии установившейся ползучести (при  $t \rightarrow +\infty$ ), что также свидетельствует об адекватности методики расчёта и при этих видах напряжённого состояния.

На модельном примере упрочнённых цилиндрических образцов из сплава ЖС6КП при  $T = 900$  °С проведено исследование влияния третьей стадии ползучести на процесс релаксации остаточных напряжений. Показано, что качественно картина релаксации напряжений при введении в расчёт третьей стадии ползучести не меняется, никаких принципиально новых эффектов не наблюдается, если не считать увеличение скорости релаксации остаточных напряжений при учёте третьей стадии ползучести, что вполне естественно.

## **Глава 5. Численные методы, алгоритмы и программное обеспечение для реализации методик ползучести упрочнённых цилиндрических образцов.**

В главе 5 изложены алгоритмы численного решения краевых задач ползучести и релаксации остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических деталях, используемые численные методы, а также соответствующее программное обеспечение.

При численной реализации алгоритма расчёта производится дискретизация по пространственно-временным координатам. Изложен алгоритм численного метода для определения напряжённо-деформированного состояния после упрочнения сплошного и полого цилиндров. Приведены расчётные формулы для описания кинетики компонент тензора напряжений в условиях ползучести



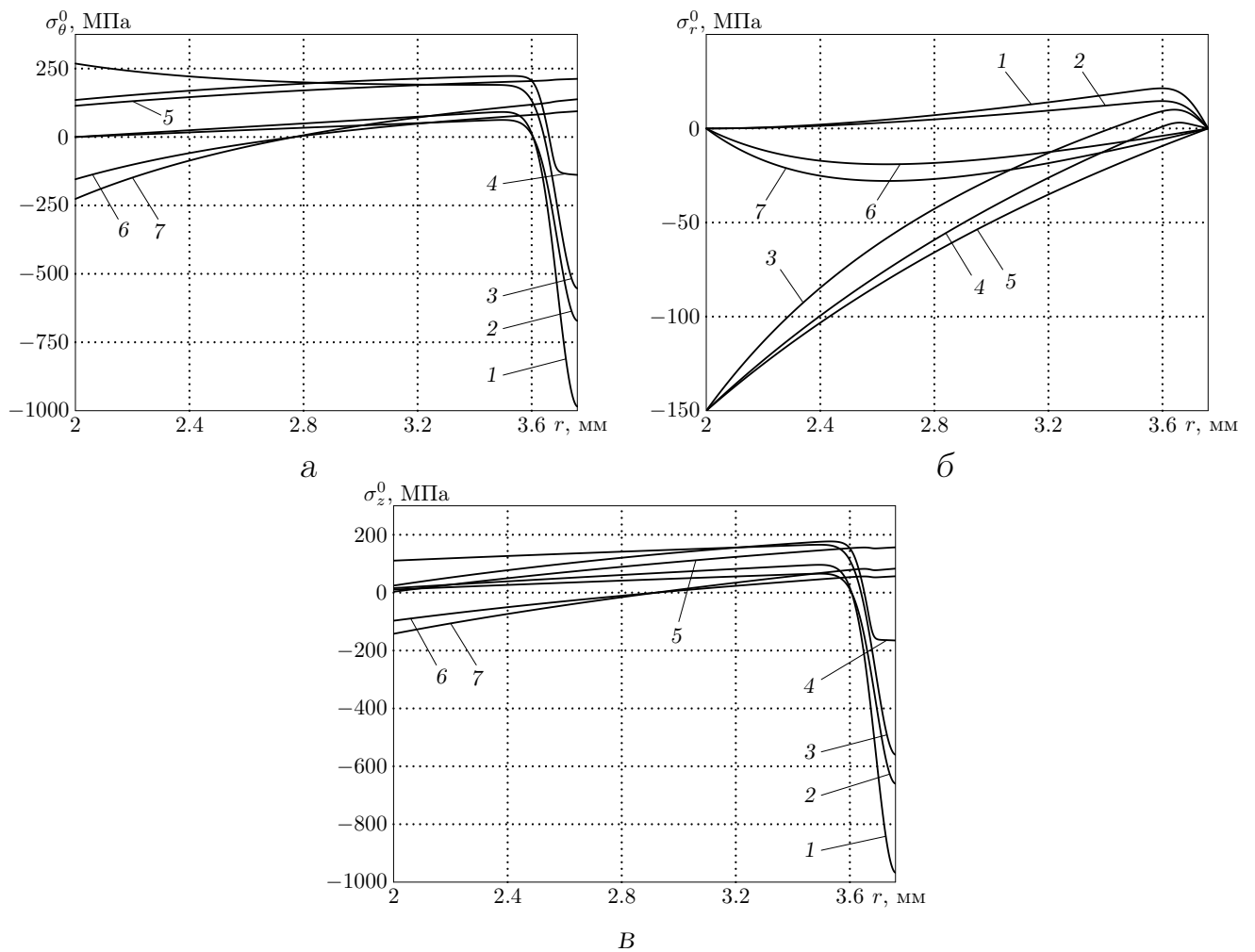


Рис. 2. Расчётные эпюры релаксации напряжений  $\sigma_\theta^0$ ,  $\sigma_r^0$ ,  $\sigma_z^0$  в полном поверхностно упрочнённом цилиндрическом образце из сплава ЖС6КП: а —  $\sigma_\theta^0 = \sigma_\theta^0(r, t)$ ; б —  $\sigma_r^0 = \sigma_r^0(r, t)$ ; в —  $\sigma_z^0 = \sigma_z^0(r, t)$ . Метки: 1 — после процедуры упрочнения при  $t = 0 - 0$ ; 2 — после температурного нагружения от значения  $T = 26^\circ\text{C}$  до значения  $T = 900^\circ\text{C}$  при  $t = 0 + 0$ ; 3 — после приложения в момент времени  $t = 0 + 0$  внутреннего давления  $q = 150$  МПа и осевой силы  $F = 3184.8$  Н; 4 — в процессе ползучести в момент времени  $t = 20$  ч; 5 — после окончания процесса ползучести при  $T = 900^\circ\text{C}$  в течение  $t = 300 - 0$  ч; 6 — после силовой разгрузки в момент времени  $t = 300 + 0$  ч; 7 — финишные значения после температурной разгрузки от значения  $T = 900^\circ\text{C}$  до значения  $T = 26^\circ\text{C}$  в момент времени  $t = 300 + 0$  ч

при температурно-силовом нагружении и последующей температурно-силовой разгрузки.

Описан разработанный программный комплекс «ComplexStressRelax» [20], позволяющий автоматизировать алгоритмы решения рассматриваемых краевых задач. Представлена объектная модель, заложенная в программе. Описан формат входных и выходных данных для выполнения расчётов.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Разработан метод решения краевой задачи о реологическом деформировании и разрушении цилиндрических элементов конструкций в условиях совместного действия растягивающей силы, крутящего момента и внутреннего давления.
2. С использованием энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности выполнена проверка адекватности предложенного метода

решения краевых задач экспериментальным данным по ползучести и длительной прочности сплошных и полых цилиндрических образцов из стали 45 ( $T = 725^\circ\text{C}$ ,  $T = 740^\circ\text{C}$ ), сплава АМГ-6М ( $T = 450^\circ\text{C}$ ), стали 20 ( $T = 500^\circ\text{C}$ ), стали ЭИ694 ( $T = 700^\circ\text{C}$ ), стали 12Х18Н10Т ( $T = 850^\circ\text{C}$ ), сплава ЭИ698ВД ( $T = 750^\circ\text{C}$ ) при различных видах напряжённого состояния (осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации). Выполнен сравнительный анализ данных расчёта длительной прочности на основе решения краевых задач с данными расчёта при использовании концепции эквивалентных напряжённых состояний при разных видах напряжённого состояния.

3. Предложен вариант обобщения модели ползучести и длительной прочности энергетического типа на случай материалов, проявляющих анизотропию свойств ползучести при чистом растяжении и чистом сдвиге. Изложена методика идентификации параметров предложенной реологической модели и выполнена проверка её адекватности экспериментальным данным по ползучести и длительной прочности сплошных и полых цилиндрических образцов из сплава Д16Т ( $T = 250^\circ\text{C}$ ) и сплава РА6 ( $T = 150^\circ\text{C}$ ). Результаты расчётов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и данными расчётов других авторов из независимых источников.
4. Разработан метод решения краевых задач для оценки кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённых цилиндрических изделиях в условиях ползучести при сложном напряжённом состоянии (термоэкспозиция, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации). Выполнена экспериментальная проверка метода решения краевой задачи экспериментальным данным по релаксации остаточных напряжений для сплошных цилиндрических образцов из сплава ЖС6УВИ ( $T = 675^\circ\text{C}$ ) в условиях термоэкспозиции и сплава ЖС6КП ( $T = 800^\circ\text{C}$ ) в условиях действия растягивающей нагрузки. Наблюдается соответствие расчётных и экспериментальных данных.
5. Проведено теоретическое исследование влияния вида напряжённого состояния на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых полых и сплошных цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП ( $T = 900^\circ\text{C}$ ) на модельных примерах. Показано, что на стадии установившейся ползучести остаточные напряжения в поверхностном слое релаксируют практически до стационарного (асимптотического) состояния при  $t \rightarrow +\infty$ , что свидетельствует об адекватности методики расчёта при рассматриваемых видах напряжённого состояния. На модельном примере упрочнённых цилиндрических образцов из сплава ЖС6КП ( $T = 900^\circ\text{C}$ ) показано, что введение в расчёт третьей стадии ползучести слабо влияет на увеличение скорости релаксации остаточных напряжений, поскольку к началу стадии ускоренной ползучести происходит практически их полная релаксация.
6. Разработан программный комплекс, реализующий все разработанные методики и позволяющий автоматизировать алгоритмы численного решения рассматриваемых краевых задач.

## Основные публикации по теме диссертации

### В изданиях, входящих в базу Web of Science

1. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Цветков В. В. Влияние термоэкспозиции на релаксацию остаточных напряжений в упрочнённом цилиндрическом образце в условиях ползучести // *ПМТФ*. 2016. Т. 57, № 3(337). С. 196–207. (переводная версия: *Radchenko V. P., Saushkin M. N., Tsvetkov V. V. Effect of thermal exposure on the residual stress relaxation in a hardened cylindrical sample under creep conditions // J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2016. Vol. 57, no. 3. Pp. 559–568.).
2. Цветков В. В. Решение краевой задачи о кручении сплошных и полых цилиндрических образцов из стали 45 и сплава АМГ-6М в условиях кратковременной установившейся ползучести // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2017. Т. 21, № 3. С. 507–523.

### В изданиях из перечня ВАК

3. Радченко В. П., Бочкова Т. И., Цветков В. В. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом полупространстве в условиях ползучести // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2015. Т. 19, № 3(40). С. 504–522.
4. Радченко В. П., Цветков В. В. Напряжённо-деформированное состояние цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения и кручения при ползучести // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2013. № 3(32). С. 77–86.
5. Радченко В. П., Цветков В. В. Кинетика напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом цилиндрическом образце при сложном напряжённом состоянии в условиях ползучести // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2014. № 1(34). С. 93–108.
6. Радченко В. П., Шершнева М. В., Цветков В. В. Обобщённая стохастическая модель ползучести и длительной прочности балки в условиях чистого изгиба и её применение к оценке показателей надёжности // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2012. № 4(29). С. 72–86.

### В других изданиях

7. Радченко В. П., Цветков В. В. Расчётное и экспериментальное исследование процесса релаксации остаточных напряжений в сплошном цилиндрическом образце при высокотемпературной выдержке // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2015. С. 255.
8. Радченко В. П., Цветков В. В. Ползучесть и длительная прочность толстостенной трубы в условиях растяжения, кручения и внутреннего давления // XX Зимняя школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2017. С. 276.
9. Радченко В. П., Шершнева М. В., Цветков В. В. Аналитические методы оценки показателей надёжности элементов конструкций при ползучести в условиях однопараметрического нагружения // Материалы Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы математики и механики». Самара: Изд-во «Самарский университет», 2013. С. 123–124.
10. Цветков В. В. Расчёт напряжённо-деформированного состояния при кручении вала на основе энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности // Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Ч. 1. Самара: СамГТУ, 2013. С. 240–248.
11. Цветков В. В. Исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых сплошных цилиндрических образцах в условиях растяжения и кручения при ползучести // Научные труды Международной молодёжной научной конференции «XL Гагаринские чтения». Т. 5. М.: МАТИ, 2014. С. 189–191.
12. Цветков В. В. Ползучесть поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов при различных видах напряжённого состояния // Научному прогрессу — творчество молодых.

- Сборник материалов IX Международной молодёжной научной конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам. Ч. 1. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. С. 116–117.
13. *Цветков В. В.* Построение математической модели ползучести вала при совместном кручении и растяжении // *Материалы Международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики».* Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2014. С. 313–316.
  14. *Цветков В. В.* Моделирование длительной прочности цилиндрических образцов из стали ЭИ694 на основе энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности // *Труды десятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи».* Ч. 1. Самара: СамГТУ, 2016. С. 239–243.
  15. *Цветков В. В.* Разработка метода расчёта длительной прочности толстостенной трубы при сложном напряжённом состоянии // *Международная молодёжная научная конференция «XLII Гагаринские чтения».* Материалы секции № 4, Механика и моделирование материалов и технологий. М.: ИПМех РАН, 2016. С. 89–90.
  16. *Цветков В. В.* Реологическая модель для оценки длительной прочности цилиндрических образцов при различных видах напряжённого состояния // *Научному прогрессу — творчество молодых.* Сборник материалов XI Международной молодёжной научной конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам. Ч. 1. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2016. С. 116–118.
  17. *Цветков В. В.* Решение краевых задач ползучести и длительной прочности для сплошных и полых цилиндрических образцов при различных видах напряжённого состояния // *Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твёрдого тела.* Т. 2. Самара: СамГТУ, 2017. С. 277–279.
  18. *Цветков В. В.* Сравнительный анализ расчётов по моделям изотропной и анизотропной ползучести толстостенных труб при совместном кручении и растяжении // *Научному прогрессу — творчество молодых.* Сборник материалов XII Международной молодёжной научной конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам. Ч. 1. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. С. 78–80.
  19. *Цветков В. В.* Численный метод решения краевой задачи ползучести и длительной прочности толстостенной трубы при сложном напряжённом состоянии // *Материалы Международной научной конференции «Дифференциальные уравнения и смежные проблемы».* Самара: СГПУ, 2017. С. 206–208.
  20. ComplexStressRelax // Свид. о регистрации программы для ЭВМ № 2015613229 / Цветков В. В.; правообладатель Цветков В. В. — заявка № 2014663033; заявл. 12.12.2014; зарегистр. 10.03.2015.

*Научное издание*

Цветков Виталий Владимирович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук на тему:

Краевые задачи ползучести поверхностно упрочнённых цилиндров при различных видах квазистатического нагружения

Подписано в печать 20.04.2018.

Формат 60 × 90 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 224.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.