

На правах рукописи



Деревянка Екатерина Евгеньевна

**МЕТОДЫ РАСЧЁТА РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ СТАТИЧЕСКИ
НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ
В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

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

Официальные оппоненты: **Келлер Илья Эрнстович**
доктор физико-математических наук, доцент,
«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН) — филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, г. Пермь, заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела

Фомин Леонид Викторович
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
государственное учебно-научное учреждение научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова), г. Москва, и.о. заведующего лабораторией проектирования и прикладных методов расчета композитных конструкций

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Защита состоится «28» ноября 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 99.2.059.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92 (12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте: https://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-999-191-02/Derevyanka_EE.

Автореферат разослан «3» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Глаголев Вадим Вадимович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Прочностные свойства деталей во многом определяются состоянием поверхности, которая изначально является ослабленной по сравнению с характеристиками материала с глубинной областью. Поэтому нарушение целостности детали, как правило, начинается с поверхности и распространяется далее по объему.

В связи с этим разрабатываются технологические методы повышения характеристик материала поверхностного слоя. Одним из самых распространенных является метод поверхностного пластического деформирования (ППД). Этот метод является штатной технологической операцией в различных отраслях промышленности, и его применение приводит к созданию в тонком приповерхностном слое изделия сжимающих остаточных напряжений (ОН), с которыми связывают увеличение ресурса для различных показателей надежности. В процессе эксплуатации упрочненных элементов конструкций в условиях высокотемпературной ползучести происходит релаксация ОН (уменьшение их значений по модулю). Поэтому возникает задача разработки методов оценки скорости релаксации ОН для оценки эффективности ППД.

В настоящее время решен ряд краевых задач в этом направлении применительно к призматическим изделиям, балкам, полым и сплошным цилиндрическим деталям при различных сложных комбинациях внешних нагрузок. Однако потребности инженерной практики и внутреннего развития механики деформированного твердого тела требуют развития методов решения задач ползучести механики упрочненных конструкций с жесткими кинематическими ограничениями, например, на угловые и осевые линейные перемещения в элементах стержневых систем. Такого рода исследования отсутствуют в научной литературе, что и определяет актуальность тематики диссертационной работы.

Объектом исследования являются статически неопределимые стержневые системы с поверхностно упрочненными элементами, сплошные и полые поверхностно упрочненные цилиндрические образцы и тонкостенные продуктопроводы в условиях высокотемпературной ползучести.

Предметом исследования являются методы и математическое обеспечение для решения краевых задач релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях и цилиндрических образцах в условиях высокотемпературного реологического деформирования при сложных напряженных состояниях.

Целью диссертационной работы является разработка методов расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых конструкций в условиях высокотемпературной ползучести при сложных программах нагружения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Разработка и реализация метода расчета ползучести и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении.
2. Исследование напряженно-деформированного состояния в упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем с различной степенью статической

неопределенности под действием температурно-силового нагружения.

3. Разработка и реализация метода решения краевой задачи ползучести и релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых поверхностно упрочненных цилиндрических образцах при сложных режимах нагружения (термоэкспозиция, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации) и жестких кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные перемещения.
4. Разработка и реализация методики расчета релаксации остаточных напряжений на внешней и внутренней поверхностях упрочненных тонкостенных трубок в условиях ползучести при заданных внешних нагрузках и кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные перемещения.
5. Создание алгоритмов, математического и программного обеспечения для автоматизации численных расчетов разработанных методов решения краевых задач механики упрочненных статически неопределимых конструкций (стержневых систем, полых и сплошных упрочненных цилиндров) в условиях ползучести.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан и реализован метод решения задачи для оценки кинетики напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении, позволяющий учитывать анизотропию пластической деформации и характер распределения остаточных напряжений после упрочнения, использовать любой вариант модели реологического деформирования материала.
2. Разработан не имеющий аналогов метод расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных сплошных и полых цилиндрических образцах в условиях высокотемпературной ползучести для сложных режимов нагружения, включающих термоэкспозицию, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации, и жестких кинематических ограничений на угловые и осевые линейные перемещения.
3. Получены новые результаты влияния вида напряженного состояния, кинематических ограничений на угловые и осевые линейные перемещения и температуры на кинетику остаточных напряжений в поверхностно упрочненных сплошных и двухсторонне упрочненных полых цилиндрах, показавшие, что наличие кинематических ограничений замедляет скорость релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести по сравнению с отсутствием кинематических ограничений, а увеличение температуры инициирует процесс релаксации остаточных напряжений.
4. Разработан не имеющий аналогов комплекс алгоритмов и программного обеспечения для численного решения краевых задач релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем, полых и сплошных цилиндрических образцах и продуктопроводах в условиях ползучести при сложных видах напряженного состояния и наличии жестких кинематических ограничений на угловые и осевые деформации.

Теоретическая значимость работы состоит в постановке новых краевых задач и разработке методов их решения для расчета кинетики напряженно-деформированного состояния при высокотемпературной ползучести в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых систем, полых и сплошных цилиндрических телах для сложных режимов нагружения, включающих термоэкспозицию, осевое растяжение, кручение,

внутреннее давление и их комбинации, и жестко заданных кинематических ограничений на угловые и осевые линейные перемещения. Теоретически исследовано влияние режимов нагружения и кинематических ограничений на характер и кинетику релаксации остаточных напряжений.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что в различных отраслях промышленности (авиадвигателестроение, энергомашиностроение, нефтехимическая отрасль и другие) процедура поверхностного пластического деформирования является штатной технологической процедурой, требующей оценки кинетики напряженно-деформированного состояния упрочненных элементов конструкции в процессе высокотемпературной ползучести при эксплуатации. Поэтому разработанные методы и результаты исследований могут быть использованы для оценки эффективности поверхностно упрочненных деталей в условиях реологического деформирования при сложных режимах нагружения и жестко заданных кинематических ограничениях и расчета остаточного ресурса по параметрическим критериям отказа (по величине остаточных напряжений).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты диссертационной работы соответствуют следующим пунктам направлений исследований специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела»:

- Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости (пункт 3);
- Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях (пункт 11);
- Вычислительная механика деформируемого твердого тела (пункт 12).

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод решения задачи расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых систем в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении.
2. Метод расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных сплошных и полых цилиндрических образцах в условиях ползучести при сложных видах внешнего нагружения, впервые позволяющий учитывать комплексное воздействие термоэкспозиции, осевого растяжения, кручения, внутреннего давления и их комбинаций, жесткие кинематические ограничения на угловые и осевые линейные перемещения и различные постоянные температуры.
3. Результаты исследования влияния геометрической конфигурации стержневой системы, внешних нагрузок и режимов температурно-силового нагружения на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах системы в условиях ползучести.
4. Результаты исследования влияния вида внешнего нагружения, кинематических ограничений на угловые и осевые линейные перемещения, анизотропии пластических деформаций и характера распределения остаточных напряжений после упрочнения, температуры испытаний на релаксацию остаточных напряжений в сплошных и полых поверхностно упрочненных цилиндрических деталях и продуктопроводах в условиях ползучести.
5. Математические модели, алгоритмы и программное обеспечение для численной реализации разработанных методов решения краевых задач релаксации остаточных

напряжений в поверхностно упрочненных элементах стержневых систем, полых и сплошных цилиндрах, тонкостенных продуктопроводах с жесткими кинематическими ограничениями в условиях высокотемпературной ползучести и сложных видах внешнего нагружения.

Степень достоверности и обоснованности выносимых на защиту положений, выводов и рекомендаций подтверждается адекватностью модельных представлений реальному физико-механическому поведению материала в упрочненном слое рассмотренных элементов конструкций при температурно-силовых нагрузках и кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные деформации; корректностью использования математического аппарата, законов и постулатов механики деформируемого твердого тела; сравнением результатов расчетов характеристик напряженно-деформированного состояния с известными экспериментальными данными после процедуры упрочнения; сравнением результатов расчета полей напряжений при больших временах с асимптотическими полями напряжений, соответствующих стадии установившейся ползучести.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях: X Всероссийская научная конференция по механике деформируемого твердого тела (г. Самара, 2017 г.); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018» (г. Москва, 2018 г.); XI Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2019 г.); XXI Зимняя школа по механике сплошных сред (г. Пермь, 2019 г.); XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Уфа, 2019 г.); Международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 2022 г.); VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (г. Тольятти, 2023 г.); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023» (г. Москва, 2023 г.). Результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета (г. Самара, 2021–2023 гг., руководитель д. ф.-м. н., проф. Радченко В. П.) и научном семинаре кафедры «Сопротивление материалов» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва (г. Самара, 2023 г., руководитель д. т. н., проф. Павлов В. Ф.).

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 19-01-00550-а и № 16-01-00249-а).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах из перечня Web of Science и Scopus, которые также входят в перечень ВАК, 5 статей в сборниках трудов конференций и 4 тезиса докладов.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук В. П. Радченко за постановки задач и поддержку работы и кандидату физико-математических наук М. Н. Саушкину за консультации и внимание к работе.

Внедрение. Результаты диссертационной работы частично внедрены в учебный процесс Самарского государственного технического университета в лекционные курсы для магистров направления 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» по дисципли-

нам «Нелинейное моделирование деформируемых материалов и механических систем» и «Непрерывные и дискретные математические модели» и аспирантов направления 01.06.01 «Математика и механика» по дисциплинам «Механика деформируемого твердого тела» и «Математические основы механики поверхностного пластического упрочнения», а также в расчетную практику профильных отделов ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара).

Личный вклад автора. Работы [7, 8, 12–14] выполнены автором самостоятельно. Постановка задач, разработка методов их решения, а также подготовка к публикации полученных результатов в работах [1–6, 9–11] диссертантом проводилась совместно с соавторами. Разработка методов расчета релаксации остаточных напряжений в элементах статически неопределимых стержневых конструкций (стержневые системы, сплошные и полые цилиндрические образцы с кинематическими ограничениями на угловые и осевые перемещения) в условиях высокотемпературной ползучести, теоретическое исследование полей остаточных напряжений и деформаций после упрочнения и в процессе ползучести при сложных температурно-силовых режимах нагружения и кинематических ограничениях на угловые и осевые деформации, разработка алгоритмов и программного обеспечения, численное решение задач, анализ и систематизация полученных результатов, формулировка основных научных положений и выводов выполнено автором диссертационной работы самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 201 страницу, включая 43 рисунка, 10 таблиц, 2 приложения. Список литературы включает 169 наименований на 22 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая и теоретическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

Глава 1. Аналитический обзор и постановка задач исследования.

В пункте 1.1 дана характеристика плоских статически неопределимых стержневых систем, обсуждаются вопросы их исследования с точки зрения теории упругости и пластичности (И. А. Биргер, В. З. Власов, А. А. Ильюшин, Н. И. Мусхелишвили, Ю. Н. Работнов и др.), строительной механики (П. А. Велихов, Б. Н. Жемочкин, В. А. Киселев, И. П. Прокофьев, И. М. Рабинович, Н. К. Снитко и др.), численных и матричных методов (В. В. Болотин, Л. А. Розин, А. Ф. Смирнов и др.). Приводится обзор классических и современных методик решения задач стержневых систем с привлечением программных комплексов.

В пункте 1.2 проведен анализ известных экспериментальных, расчетно-экспериментальных, феноменологических подходов к определению ОН в поверхностно упрочненных методами ППД цилиндрических и плоских деталях, представленных в работах А. Н. Архипова, И. А. Биргера, С. А. Бордакова, А. С. Букатого, В. С. Вакулюка, Д. М. Васильева, М. А. Гребенникова, И. Г. Гринченко, С. И. Иванова, В. А. Кирпичева, Б. А. Кра-

вченко, Н. Д. Кузнецова, В. Ф. Павлова, А. А. Поздеева, В. П. Радченко, В. П. Сазанова, Ю. П. Самарина, М. Н. Саушкина, Ю. М. Темиса, П. В. Трусова, В. И. Цейтлина, А. О. Чернявского, П. А. Чепы, R. A. Brockman, G. H. Majzoobi, K. A. Soady и других исследователей. Рассмотрены механизмы формирования ОН, оказывающих существенное влияние на прочностные характеристики конструкционных элементов. Изложен научно-обоснованный феноменологический метод реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций в полых и сплошных цилиндрических образцах, разработанный В. П. Радченко и М. Н. Саушкиным¹. Данный метод, основанный на частично известной экспериментальной информации о распределении компонент тензора ОН, использовался в расчетных методиках настоящей диссертационной работы.

В пункте 1.3 рассмотрены методы исследования релаксации ОН в упрочненных элементах конструкций (цилиндрические и призматические образцы) в условиях ползучести. Обозначены проблемы и возможности теоретических, расчетных и экспериментальных методик оценки остаточного ресурса упрочненных изделий. Среди немногочисленных исследований теоретической направленности отмечены работы В. И. Цейтлина, О. В. Колотниковой, В. П. Радченко, В. Ф. Павлова, М. Н. Саушкина, В. В. Цветкова, Т. И. Бербасовой, которые стимулировали развитие научного направления исследований оценки ОН в поверхностно упрочненных изделиях в условиях ползучести при квазистатических нагрузках. С использованием идей этих исследований развивалась тематика исследований настоящей диссертационной работы. Отмечено, что в отношении сложных комбинированных режимов нагружения упрочненных цилиндрических образцов в условиях ползучести при жестких кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные перемещения исследования настоящей диссертационной работы носят принципиально новый характер.

В пункте 1.4 выполнено обоснование выбора реологической модели деформирования материалов, дана характеристика современному состоянию развития теорий ползучести и длительной прочности металлов. Отмечен значительный вклад в развитие теорий реологического деформирования И. А. Волкова, Б. В. Горева, Ю. А. Еремина, Л. А. Игумнова, Я. М. Клебанова, Ю. Г. Коротких, Н. Н. Малинина, А. Ф. Никитенко, Ю. Н. Работнова, В. П. Радченко, Ю. П. Самарина, О. В. Соснина, Д. Н. Шишулина, J. A. Betten и других отечественных и зарубежных исследователей. Рассмотрен энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности², базирующийся на теории неполной обратимости деформаций ползучести, на котором основывались расчетные методики настоящей диссертационной работы.

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

Глава 2. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых конструкций.

Глава 2 посвящена разработке метода решения краевой задачи ползучести и релаксации остаточных напряжений в статически неопределимых стержневых системах с различной степенью статической неопределимости.

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

² Радченко В. П., Еремин Ю. А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 265 с.

В пункте 2.1 приводится общая постановка задачи исследования главы 2.

В пункте 2.2 общая постановка задачи формализована на случай статически неопределимой системы с поверхностно упрочненными стержневыми элементами. Задача решается в цилиндрической системе координат (r, θ, z) , стержни моделируются в виде сплошных цилиндрических образцов радиуса R_s ($s = \overline{1, n}$, n — количество стержней). Приводится феноменологическая методика формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) в элементах системы после поверхностного упрочнения ($t = 0 - 0$) и температурно-силового нагружения ($t = 0 + 0$). При «мгновенном» температурно-силовом нагружении системы с «комнатной» температуры упрочнения T_0 до температуры эксплуатации T_1 ($T_0 < T_1$, модуль Юнга соответственно равен E_{0s} и E_{1s} , $E_{0s} > E_{1s}$) продольной растягивающей силой P в элементах системы происходит перераспределение «рабочих» напряжений $\sigma_s(0 + 0) = \sigma_s^0$. НДС для каждого из s стержней системы в момент времени $t = 0 + 0$ определяется тензором напряжений $\sigma_{ijs}(r, 0 + 0)$, диагональные компоненты которого равны

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta s}(r, 0 + 0) &= \frac{E_{1s}}{E_{0s}} \sigma_{\theta s}^{\text{res}}(r); & \sigma_{rs}(r, 0 + 0) &= \frac{E_{1s}}{E_{0s}} \sigma_{rs}^{\text{res}}(r); \\ \sigma_{zs}(r, 0 + 0) &= \frac{E_{1s}}{E_{0s}} \sigma_{zs}^{\text{res}}(r) + \sigma_s^0,\end{aligned}\tag{1}$$

где $\sigma_{ls}^{\text{res}}(r)$ ($l = r, \theta, z$) — компоненты тензора ОН, сформированные после ППД.

Тензоры напряжений $\sigma_{ijs}(r, 0 + 0)$ и соответствующие им пластические деформации задают начальное НДС в каждом поверхностно упрочненном элементе s рассматриваемой системы и являются исходными данными для решения краевой задачи релаксации ОН в условиях ползучести стержневой конструкции.

Рассмотрено решение краевой задачи релаксации ОН в упрочненном слое сплошных цилиндрических стержней системы на фоне ползучести всей конструкции при температурно-силовом режиме нагружения. Постановка краевой задачи для каждого из $s = \overline{1, n}$ стержней системы в себя включает уравнения равновесия, уравнение совместности деформаций, гипотезу плоских сечений и краевые условия. Отметим, что полная деформация представима в виде аддитивной составляющей упругой, остаточной пластической, температурной деформаций и деформации ползучести.

Применяя ряд математических преобразований, данная краевая задача сводится к решению дифференциального уравнения второго порядка относительно радиальной компоненты $\sigma_{rs}(r, t)$:

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_{rs}(r, t)}{dr^2} + 3r \frac{d\sigma_{rs}(r, t)}{dr} = g_s(r, t),\tag{2}$$

$$\begin{aligned}g_s(r, t) &= \frac{E_{1s}}{1 - \mu_s^2} \left[\frac{2 + \alpha_s}{1 + \alpha_s} q_{rs}(r) + p_{rs}(r, t) - p_{\theta s}(r, t) - \right. \\ &\quad \left. - r \left(\frac{dp_{\theta s}(r, t)}{dr} + \mu_s \frac{dp_{zs}(r, t)}{dr} \right) + \frac{r(1 + \alpha_s \mu_s)}{1 + \alpha_s} \frac{dq_{rs}(r)}{dr} \right].\end{aligned}\tag{3}$$

Решение (2) с граничными условиями для сплошного цилиндрического образца имеет вид:

$$\sigma_{rs}(r, t) = - \int_r^{R_s} \frac{1}{\xi^3} \left(\int_0^\xi g_s(\eta, t) \eta d\eta \right) d\xi.\tag{4}$$

Используя $\sigma_{rs} = \sigma_{rs}(r, t)$, получим выражения для остальных компонент тензора напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta s}(r, t) &= \sigma_{rs}(r, t) + r \frac{d\sigma_{rs}(r, t)}{dr}; \quad \varepsilon_{zs}^0(t) = \frac{\sigma_s(t)}{E_{1s}} + p_s(t); \\ p_s(t) &= \frac{2}{R_s^2} \int_0^{R_s} \left[q_{zs}(r) + p_{zs}(r, t) + \varepsilon_s^T - \frac{\mu_s}{E_{1s}} (\sigma_{rs}(r, t) + \sigma_{\theta s}(r, t)) \right] r dr; \\ \sigma_{zs}(r, t) &= [\varepsilon_{zs}^0(t) - q_{zs}(r) - p_{zs}(r, t) - \varepsilon_s^T] E_{1s} + \mu_s [\sigma_{rs}(r, t) + \sigma_{\theta s}(r, t)],\end{aligned}\quad (5)$$

где $p_s(t)$ — интегральная величина осевой деформации в каждом из s стержней статически неопределимой системы; для расчета кинетики переменных напряжений $\sigma_s = \sigma_s(t)$ ($s = \overline{1, n}$) и направления вектора ее перемещения используется решение системы уравнений статики и совместности деформаций, составленной для конкретной геометрической конфигурации конструкции.

Пусть в момент времени $t = t^* + 0$ осуществляется «мгновенная» температурно-силовая разгрузка системы с температуры T_1 до первоначальной T_0 . Полагая, что при температурной разгрузке изменений пластических деформаций и накопленных компонент деформаций ползучести не происходит, для определения ОН в момент разгрузки $t = t^* + 0$ достаточно из полученных финишных расчетных значений напряжений при ползучести $t = t^*$ вычесть «рабочие» напряжения $\sigma_s^0 = \sigma_s(0+0)$ и затем умножить на коэффициент E_{0s}/E_{1s} (обратный коэффициенту при температурном нагружении):

$$\sigma_{rs}(r, t^* + 0) = \frac{E_{0s}}{E_{1s}} \sigma_{rs}(r, t^*); \quad \sigma_{\theta s}(r, t^* + 0) = \frac{E_{0s}}{E_{1s}} \sigma_{\theta s}(r, t^*); \quad (6)$$

$$\sigma_{zs}(r, t^* + 0) = \frac{E_{0s}}{E_{1s}} [\sigma_{zs}(r, t^*) - \sigma_s^0]. \quad (7)$$

В результате получаем полную картину кинетики остаточных напряжений в каждом упрочненном сплошном цилиндрическом элементе рассматриваемой системы с течением времени при заданных режимах нагружения за цикл «температурно-силовая нагрузка»–«ползучесть»–«температурно-силовая разгрузка».

Отметим, что в дальнейших расчетах использовался вариант теории ползучести энергетического типа², параметры которой для всех использованных материалов представлены в диссертационной работе.

В пункте 2.3 для иллюстрации метода рассматривается трехэлементная геометрически несимметричная стержневая система (рис. 1), стержни которой моделируются идентичными сплошными цилиндрическими образцами одинакового круглого поперечного сечения площадью F ($P_* = P/F$, P — растягивающая нагрузка).

Напряжения σ_s в элементах данной дважды статически неопределимой системы и направление вектора φ ее перемещения находятся из системы уравнений

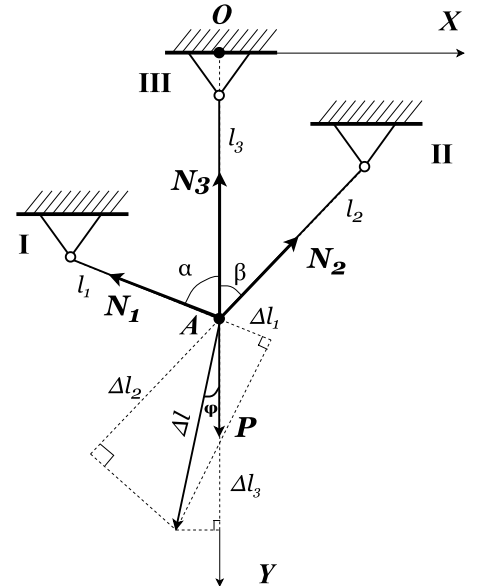


Рис. 1. Схема статически неопределимой стержневой системы

$$\begin{cases} -\sigma_1 \sin \alpha + \sigma_2 \sin \beta = 0, \\ \sigma_1 \cos \alpha + \sigma_2 \cos \beta + \sigma_3 = P_*, \\ \Delta l_1 \cos (\beta - \varphi) = \Delta l_2 \cos (\alpha + \varphi), \\ \Delta l_2 \cos \varphi = \Delta l_3 \cos (\beta - \varphi). \end{cases} \quad (8)$$

Выполнена частичная проверка адекватности разработанной математической модели и расчетной методики путем сравнения расчетных значений напряжений в стержнях системы за большое расчетное время ползучести t^* с асимптотическими значениями этих же величин при $t \rightarrow \infty$, которые можно получить, не прибегая к численному методу «шагов по времени».

В качестве модельного примера приводятся результаты расчетов стержневой системы из сплава Д16Т с параметрами: длины стержней $l_1 = 1000$ мм, $l_2 = 2l_1$, $l_3 = 1.5l_1$, углы между стержнями $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 15^\circ$, радиус цилиндрического стержневого элемента $R = 7.5$ мм. Система подвергается температурно-силовой нагрузке с температуры упрочнения $T_0 = 20^\circ\text{C}$ (модуль Юнга $E_0 = 0.72 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$) до $T_1 = 125^\circ\text{C}$ ($E_1 = 0.65 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент линейного теплового расширения материала $\alpha^T = 22.9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) и растягивается осевой силой $P = 180$ кН.

Выполнены модельные расчеты для одноосного напряженного состояния (без упрочнения элементов) и сложного напряженного состояния (с упрочнением), произведен сравнительный анализ скоростей релаксации ОН во всех стержнях системы. Задача реологического деформирования решалась в пределах первых двух стадий ползучести численным методом «шагов по времени» с использованием дискретизации по времени и радиусу. В качестве примера на рис. 2 приведена кинетика компоненты $\sigma_{\theta s} = \sigma_{\theta s}(r, t)$ ($s = \overline{1, 2, 3}$) в различные моменты времени. Отмечается, что в более нагруженных стержнях релаксация протекает с большей интенсивностью. Получено хорошее согласование расчетных (на больших временных интервалах $t = 500$ ч) и предельных (асимптотических) значений напряжений в стержнях системы, соответствующих стадии установившейся ползучести, что свидетельствует об адекватности модели.

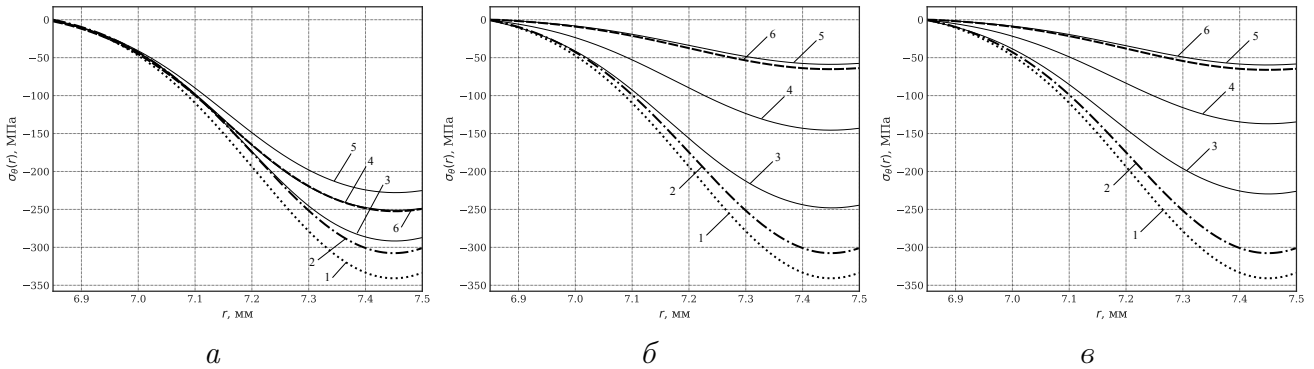


Рис. 2. Расчетные эпюры окружной $\sigma_{\theta}(r, t)$ компоненты тензора остаточных напряжений в приповерхностном упрочненном слое в первом (а), втором (б) и третьем (в) стержнях системы из сплава Д16Т в различные моменты времени: 1 — $t = 0 - 0$ после процедуры ППД при $T_0 = 20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 0 + 0$ температурно-силовая нагрузка при $T_1 = 125^\circ\text{C}$ и силе $P = 180$ кН; 3–5 — в процессе ползучести стержневой системы за время $t = \{0.1; 1; 100\}$ ч соответственно; 6 — «мгновенная» температурно-силовая разгрузка

В пункте 2.4 рассмотрена аналогичная задача на примере трехэлементной геометрически симметричной стержневой системы, являющаяся частным случаем (рис. 1) при $l_1 = l_2$ и $\alpha = \beta$, подробно рассмотренным в пункте 2.3. Произведены расчеты в условиях ползучести без упрочнения и с упрочненными элементами системы из сплава Д16Т со следующими параметрами: длины стержней $l_1 = l_2 = l_3 / \cos \alpha$, $l_3 = 1000$ мм, углы между боковыми стержнями с центральным стержнем равны $\alpha = 30^\circ$, радиус цилиндрического стержневого элемента $R = 7.5$ мм. Выполнена проверка адекватности методики, показавшая хорошую согласованность с предельными (асимптотическими) значениями.

В пункте 2.5 приведены выводы по главе 2.

Глава 3. Релаксация остаточных напряжений в упрочненных сплошных и полых цилиндрах в условиях ползучести при жестких кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные перемещения.

В главе 3 разработан метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных сплошных, полых цилиндрических образцах и тонкостенных двухсторонне упрочненных трубках в условиях ползучести при различных видах сложного температурно-силового нагружения (термоэкспозиция, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации) и жестких кинематических ограничений на угловые и осевые линейные перемещения. Приводятся результаты теоретического исследования различных режимов нагружения и параметрического анализа влияния внешних нагрузок и кинематических ограничений на перемещения на процесс релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых цилиндрических образцах.

В пункте 3.1 приводится общая постановка задачи главы 3.

В пункте 3.2 детализирована процедура формирования начального НДС (остаточных напряжений $\sigma_l^{\text{res}}(r)$ и пластических деформаций $q_l(r)$ ($l = r, \theta, z$)) в цилиндрических поверхностно упрочненных сплошных и полых (внешнее и двухстороннее упрочнение) образцах после ППД, основанная на феноменологической методике В. П. Радченко и М. Н. Саушкина, где все компоненты НДС выражаются из частично известной экспериментальной зависимости $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$.

В пункте 3.3 описана процедура определения характеристик НДС в поверхностно упрочненном цилиндре при «мгновенном» температурно-силовом нагружении осевой силой F_0 , крутящим моментом M_0 и внутренним давлением q , где в момент времени $t = 0+0$ наблюдается ступенчатое изменение компонент тензора напряжений на величину «рабочих» напряжений, соответствующих упругому решению краевой задачи:

$$\begin{aligned}\sigma_z(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_z^{\text{res}}(r) + \frac{F_0}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}; \\ \sigma_\theta(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_\theta^{\text{res}}(r) + \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right]; \\ \sigma_r(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_r^{\text{res}}(r) + \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right]; \\ \tau(r, 0+0) &= \frac{M_0}{J} r, \quad J = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r^3 dr = \frac{\pi(R_2^4 - R_1^4)}{2},\end{aligned}\tag{9}$$

где J — момент инерции сечения относительно оси цилиндрического образца; $\tau(r, t) = \sigma_{\theta z}(r, t)$ — касательное напряжение; R_1 и R_2 — внутренний и внешний радиусы цилиндра ($R_1 \leq r \leq R_2$).

В пункте 3.4 представлено описание методики решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений, осевой силы и крутящего момента в условиях ползучести поверхностно упрочненного цилиндрического образца при температурно-силовом нагружении осевой растягивающей силой, крутящим моментом и внутренним давлением и введенных жестких кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные деформации.

Постановка краевой задачи в момент времени t состоит из:

– уравнений равновесия:

$$\begin{aligned} r \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} + \sigma_r(r, t) &= \sigma_\theta(r, t); \\ 2\pi \int_{R_1}^{R_2} \sigma_z(r, t) r dr &= F(t); \quad 2\pi \int_{R_1}^{R_2} \tau(r, t) r^2 dr = M(t); \end{aligned} \quad (10)$$

– уравнения совместности деформаций:

$$r \frac{d\varepsilon_\theta(r, t)}{dr} + \varepsilon_\theta(r, t) = \varepsilon_r(r, t); \quad (11)$$

– гипотезы плоских сечений:

$$\varepsilon_z(r, t) = \varepsilon_z(t), \quad (12)$$

где $\varepsilon_z(r, t)$ — осевая компонента тензора полных деформаций (при наличии жестких кинематических ограничений $\varepsilon_z(t) = \varepsilon_z(r, 0 + 0) = \varepsilon_z^* = \text{const}$);

– гипотезы прямых радиусов:

$$\gamma(r, t) = r\varphi(t), \quad (13)$$

где $\gamma(r, t)$ — полная деформация сдвига, $\varphi(t)$ — относительный угол закручивания (при наличии жестких кинематических ограничений $\varphi(t) = \varphi(0 + 0) = \gamma(r, 0 + 0)/r = \varphi^* = \text{const}$);

– краевых условий:

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

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

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

$$\forall t \geq 0 \quad \left. \sigma_r(r, t) \right|_{r=R_1} = -q; \quad \left. \sigma_r(r, t) \right|_{r=R_2} = 0. \quad (15)$$

Задача сводится к решению дифференциального уравнения относительно $\sigma_r(r, t)$:

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_r(r, t)}{dr^2} + 3r \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} = g(r, t), \quad (16)$$

$$\begin{aligned} g(r, t) = \frac{E_1}{1 - \mu^2} \left[\frac{2 + \alpha}{1 + \alpha} q_r(r) + p_r(r, t) - p_\theta(r, t) - \right. \\ \left. - r \left(\frac{dp_\theta(r, t)}{dr} + \mu \frac{dp_z(r, t)}{dr} \right) + \frac{r(1 + \alpha\mu)}{1 + \alpha} \frac{dq_r(r)}{dr} \right], \end{aligned} \quad (17)$$

решение которого следующее:

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

$$\sigma_r(r, t) = - \int_r^{R_2} \frac{1}{\xi^3} \int_0^\xi g(\eta, t) \eta d\eta d\xi; \quad (18)$$

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

$$\begin{aligned} \sigma_r(r, t) = & \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right] + \frac{1}{2} \int_{R_1}^r \frac{g(\xi, t)}{\xi} d\xi + \\ & + \frac{1}{2r^2} \left[\frac{r^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\int_{R_1}^{R_2} g(\xi, t) \xi d\xi - R_2^2 \int_{R_1}^{R_2} \frac{g(\xi, t)}{\xi} d\xi \right) - \int_{R_1}^r g(\xi, t) \xi d\xi \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Используя выражения для $\sigma_r(r, t)$, получим остальные компоненты:

$$\sigma_\theta(r, t) = \frac{d}{dr} [r\sigma_r(r, t)]; \quad (20)$$

$$\sigma_z(r, t) = E_1 [\varepsilon_z(t) - q_z(r) - p_z(r, t)] + \mu [\sigma_r(r, t) + \sigma_\theta(r, t)], \quad (21)$$

где при наличии кинематических ограничений $\varepsilon_z(t) = \varepsilon_z(r, 0+0) = \varepsilon_z^*$, а при отсутствии ограничений $\varepsilon_z(t)$ рассчитывается как

$$\varepsilon_z(t) = \frac{F_0}{\pi(R_2^2 - R_1^2)E_1} + \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r \left[q_z(r) + p_z(r, t) - \frac{\mu}{E_1} (\sigma_r(r, t) + \sigma_\theta(r, t)) \right] dr; \quad (22)$$

$$\tau(r, t) = G_1 [r\varphi(t) - \gamma^p(r, t)], \quad G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \mu)}, \quad (23)$$

где G_1 — модуль сдвига материала; при наличии кинематических ограничений на угловые перемещения $\varphi(t) = \varphi(0+0) = \varphi^*$, а без ограничений $\varphi(t)$ определяется после подстановки (23) в $M(t)$ из (10):

$$\varphi(t) = \frac{M_0}{G_1 J} + \frac{2\pi}{J} \int_{R_1}^{R_2} \gamma^p(r, t) r^2 dr. \quad (24)$$

Для нахождения значений реологических компонент деформаций ползучести p_r , p_θ , p_z , γ^p можно использовать любую теорию ползучести, адекватно описывающую экспериментальные данные. В диссертационном исследовании для этого используется энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности.

В пунктах 3.5 и 3.6 выполнено исследование влияния температуры, растягивающей силы, крутящего момента и внутреннего давления на релаксацию ОН в сплошных и полых цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП (внутренний и внешний радиусы — $R_1 = 2$ мм, $R_2 = 3.76$ мм) после пневмодробеструйной поверхностной обработки при вариации значений нагрузок $F_0 = \{0; 4441.5; 8882.9\}$ Н, $M_0 = \{0; 8350; 16700\}$ Н·мм и температуры эксплуатации $T_1 = \{800; 900; 950; 1000\}$ °С и кинематических ограничениях на перемещения. С использованием экспериментальной информации для осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ получены расчетные зависимости полей ОН после упрочнения и распределений напряжений и усилий в образцах с течением времени в условиях высокотемпературной ползучести. Выполнен параметрический сравнительный анализ режимов сложного нагружения и влияния кинематических ограничений на перемещения, в результате которого сделан вывод: наличие кинематических ограничений замедляет процесс релаксации ОН по сравнению с их отсутствием, а увеличение «рабочей» температуры интенсифицирует процесс релаксации ОН.

В пункте 3.7 выполнен анализ влияния кинематических ограничений на кинетику ОН при различных режимах нагружения (растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации) на модельном примере тонких цилиндрических трубок $\varnothing 12 \times 1$ мм из нержавеющей стали 08X18H9 (ранний аналог X18H10T) при $T_1 = 600^\circ\text{C}$ после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения. Показано, что при всех рассмотренных режимах нагружения ($F_0 = \{0; 3455.75\}$ Н, $M_0 = \{0; 4391.68\}$ Н·мм, $q = \{0; 20\}$ МПа) происходит практически полная релаксация ОН в течение 50 часов, а наличие кинематических ограничений сказывается на процессе релаксации — наблюдается уменьшение ее скорости. В качестве примера на рис. 3 представлены характерные распределения эпюр радиальной $\sigma_r(r, t)$, окружной $\sigma_\theta(r, t)$ и осевой $\sigma_z(r, t)$ компонент тензора остаточных напряжений в различные временные сечения при сложном нагружении и кинематических ограничениях на перемещения.

В пункте 3.8 приведены выводы по главе 3.

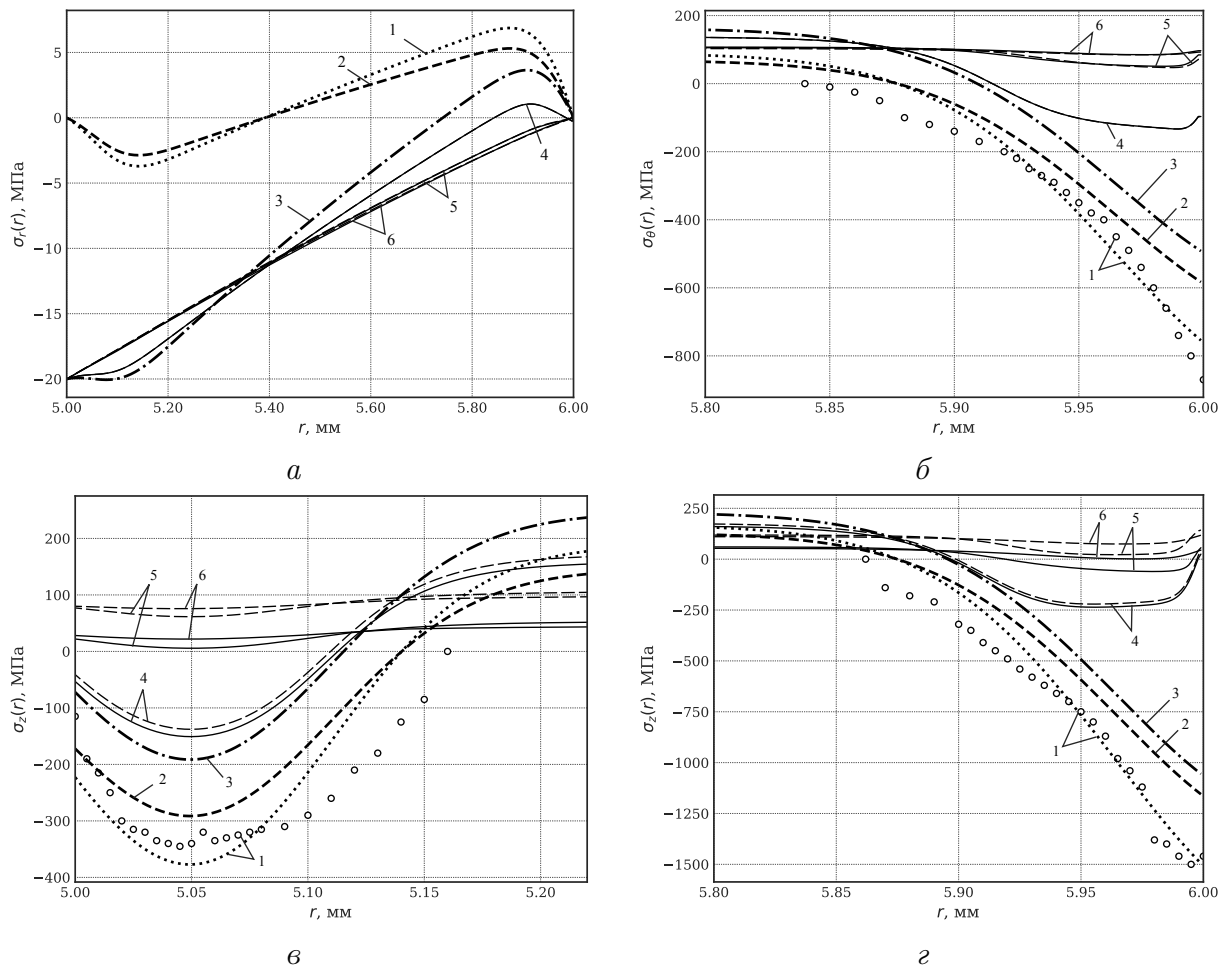


Рис. 3. Расчетные эпюры остаточных напряжений $\sigma_r(r, t)$ (а), $\sigma_\theta(r, t)$ (б), $\sigma_z(r, t)$ (в, г) под действием растяжения, кручения и внутреннего давления в тонкостенных трубках 08X18H9 (X18H10T) при ползучести: а — по всей толщине образца; б, г — со стороны внешней поверхности; в — со стороны внутренней поверхности. Обозначения: 1 — после упрочнения при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ($t = 0-0$); 2 и 3 — температурная и силовая нагрузка при $T_1 = 600^\circ\text{C}$ осевой растягивающей силой $F_0 = 3455.75$ Н, крутящим моментом $M_0 = 4391.68$ Н·мм и внутренним давлением $q = 20$ МПа ($t = 0+0$); 4–6 — в процессе ползучести при $t = \{0.1; 1; 50\}$ ч (сплошные линии — с кинематическими ограничениями на угловые и осевые линейные перемещения, штриховые — без ограничений); маркеры — экспериментальные данные

Глава 4. Программное обеспечение, реализация алгоритмов и численных методов.

В главе 4 приводится описание алгоритмической реализации, используемых численных методов и программного обеспечения для решения краевых задач ползучести и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях.

В пункте 4.1 изложены алгоритмы численного расчета кинетики остаточных напряжений в статически неопределимой стержневой системе и в упрочненном цилиндрическом образце в условиях ползучести при заданных нагрузках и кинематических ограничениях на перемещения, а **в пункте 4.2** приводятся численные методы, используемые в реализации расчетных методик.

В пункте 4.3 описано разработанное программное обеспечение, приводятся общая расчетная схема и объектная модель программного комплекса, даны характеристики программных модулей, описан формат входных и выходных данных для выполнения расчетов.

В пункте 4.4 приведены выводы по главе 4.

В заключении перечислены основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты и выводы

1. Разработан и реализован метод численного решения задачи расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении, позволяющий учитывать анизотропию пластической деформации и характер начального поля напряжений после упрочнения.
2. Исследовано напряженно-деформированное состояние в упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем с одной и двумя степенями свободы (геометрически симметричная и несимметричная системы) под действием температурно-силового нагружения на модельных примерах плоских трехэлементных систем из сплава Д16Т при «рабочей» температуре $T = 125^\circ\text{C}$. Выполнена частичная проверка адекватности разработанного математического метода для стержневых систем с упрочненными и неупрочненными элементами в условиях установившейся ползучести. Для апостериорной оценки сходимости и устойчивости численного метода произведено сравнение расчетных (численных) и предельных (асимптотических) значений характеристик напряженно-деформированного состояния, соответствующих стадии установившейся ползучести, полученных аналитически. Получено хорошее соответствие расчетных (на больших временных интервалах) и предельных асимптотических значений.
3. Разработан метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых поверхностно упрочненных цилиндрических образцах в условиях высокотемпературной ползучести, позволяющий впервые учитывать комплексное воздействие сложных режимов нагружения (осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации) и кинематических ограничений на угловые и осевые линейные перемещения.

4. Выполнены модельные расчеты и детальное исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных сплошных и полых цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП после пневмодробеструйной обработки при различных режимах сложного нагружения и температурах эксплуатации $T = \{800; 900; 950; 1000\}^{\circ}\text{C}$. Получено, что наличие кинематических ограничений на угловые и осевые линейные перемещения замедляет процесс релаксации остаточных напряжений по сравнению с их отсутствием, а увеличение «рабочей» температуры интенсифицирует процесс релаксации остаточных напряжений.
5. Разработана и реализована методика расчета релаксации остаточных напряжений на внешней и внутренней поверхностях упрочненных тонкостенных трубок в условиях ползучести при заданных внешних нагрузках и кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные перемещения. Выполнен анализ влияния кинематических ограничений на кинетику остаточных напряжений при различных режимах сложного нагружения (осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации) на модельном примере тонких цилиндрических трубок $\varnothing 12 \times 1$ мм из нержавеющей стали 08X18H9 (ранний аналог стали X18H10T) при температуре $T = 600^{\circ}\text{C}$ после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью. Показано, что при всех рассмотренных режимах нагружения происходит практически полная релаксация остаточных напряжений в течение 50 часов, а наличие кинематических ограничений приводит к замедлению скорости релаксации по отношению к трубкам без кинематических ограничений.
6. Разработаны алгоритмы, математическое и программное обеспечение для решения краевых задач релаксации остаточных напряжений в упрочненных элементах стержневых конструкций, полых и сплошных упрочненных цилиндрах в условиях ползучести при кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные перемещения при сложных режимах температурно-силового нагружения.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах Scopus и Web of Science

1. Radchenko V. P., Derevyanka E. E. Mathematical modeling of creep and residual stresses relaxation in surface hardened elements of statically indefinable rod systems // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.] — 2018. — Vol. 22, no. 4. — P. 647–668. — DOI: 10.14498/vsgtu1631.
2. Radchenko V. P., Derevyanka E. E. The effect of elevated temperature and tensile force loading on the relaxation of residual stresses in surface-hardened elements of the rod structure under creep conditions // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.] — 2019. — Vol. 23, no. 3. — P. 497–524. — DOI: 10.14498/vsgtu1688.

3. Radchenko V. P., Tsvetkov V. V., Derevyanka E. E. Relaxation of Residual Stresses in a Surface-Hardened Cylinder under Creep Conditions and Rigid Restrictions on Linear and Angular Deformations // *Mechanics of Solids*. — 2020. — Vol. 55, no. 6. — P. 898–906. — DOI: 10.3103/S0025654420660024.
4. Radchenko V. P., Derevyanka E. E. Kinetics of residual stresses in thin-walled cylindrical specimens after bilateral surface hardening under creep conditions with rigid constraints on angular and axial linear displacements // *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. — 2023. — Vol. 23, no. 2. — P. 227–240. — DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-2-227-240.

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК

5. Деревянка Е. Е., Радченко В. П., Цветков В. В. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном цилиндре в условиях ползучести при жестких ограничениях на линейные и угловые деформации // *Известия РАН: Механика твердого тела*. — 2021. — № 3. — С. 118–127. — DOI: 10.31857/S057232992103003X.

Публикации в прочих изданиях

6. Деревянка Е. Е., Радченко В. П. Кинетика напряженно-деформированного состояния в упрочненных статически неопределимых стержневых системах в условиях ползучести // *Материалы X Всероссийской научной конференции по механике деформируемого твердого тела (18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия)*. Т. 1. — Самара: СамГТУ, 2017. — С. 201–205.
7. Деревянка Е. Е. Математическое моделирование ползучести и релаксации остаточных напряжений в упрочненных стержневых элементах статически неопределимой системы // *Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018»*. — М.: МАКС Пресс, 2018.
8. Деревянка Е. Е. Разработка метода решения задачи оценки релаксации остаточных напряжений в цилиндрических упрочненных стержневых элементах статически неопределимых ферм // *XXI Зимняя школа по механике сплошных сред (18–22 февраля 2019 г., Пермь, Россия)*. Тезисы докладов. — Пермь: ИМСС, 2019. — С. 98.
9. Деревянка Е. Е., Радченко В. П. Исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем в условиях ползучести // *Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (27–30 мая 2019 г., Самара, Россия)*. Т. 1. — Самара: СамГТУ, 2019. — С. 43–46.
10. Деревянка Е. Е., Радченко В. П. Моделирование и алгоритмизация процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых систем в условиях ползучести // *XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (19–24 августа 2019 г., Уфа)*. Аннотации докладов. — Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. — С. 201.

11. Деревянка Е. Е., Радченко В. П. Моделирование и алгоритмизация процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых систем в условиях ползучести // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов в 4-х томах. Т. 3: Механика деформируемого твердого тела. — Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. — С. 298—300.
12. Деревянка Е. Е. Влияние жесткого защемления на релаксацию остаточных напряжений в упрочненном полом цилиндре в условиях ползучести при сложном нагружении // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: VI Всероссийская научная конференция с международным участием: Тольятти, 18–20 апреля 2023 г. Сборник материалов. — Тольятти: ТГУ, 2023. — С. 71—78.
13. Деревянка Е. Е. Исследование влияния температуры, крутящего момента и растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочненном цилиндре на фоне ползучести при жестком защемлении // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 12–14 декабря 2022 г. — Воронеж: Изд-во «Научно-исследовательские публикации», 2023. — С. 1017—1024.
14. Деревянка Е. Е. Математическое моделирование кинетики остаточных напряжений в тонкостенных двухсторонне упрочненных трубопроводах в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении и жестком защемлении // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2023». — М.: МАКС Пресс, 2023.

Научное издание

Деревянка Екатерина Евгеньевна

АВТОРЕФЕРАТ

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

Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых
статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести

Подписано в печать 25.09.2023 г.

Формат 60 × 84 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 425.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,

Отдел типографии и оперативной печати.

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