

На правах рукописи



Бербасова Татьяна Игоревна

**Методы расчета формирования и релаксации остаточных
напряжений в поверхностно упрочненных
призматических и тонкостенных цилиндрических
элементах конструкций при ползучести**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2021

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», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

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

Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», г. Самара

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится «24» июня 2021 г. в 14:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.122.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»:

http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/berbasova_diss.pdf

Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу:

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

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.т.н., доцент



А. Р. Луц

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Вопрос повышения ресурса элементов конструкций и деталей при температурно-силовом нагружении является основным практически во всех отраслях промышленности. Разрушение металлических деталей обычно начинается с поверхности, поэтому для повышения, например предела выносливости, износостойкости, микротвердости деталей применяют методы поверхностного пластического деформирования, в результате которых наводятся сжимающие («благоприятные») остаточные напряжения в тонком приповерхностном слое, замедляющие деградиационные процессы. В процессе эксплуатации детали при температурно-силовом нагружении при появлении деформации ползучести происходит релаксация остаточных напряжений (уменьшение их значений по модулю). Поэтому возникает актуальная комплексная задача реконструкции остаточных напряжений после процедуры упрочнения, а также их релаксации в условиях ползучести. На данный момент методы реконструкции начального напряженно-деформированного состояния после упрочнения и релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести разработаны лишь для сплошных и полых толстостенных цилиндрических изделий с односторонним упрочнением внешней поверхности. Однако в широком ассортименте деталей в конструкциях авиадвигателестроения, энергомашиностроения, аэрокосмической промышленности и других отраслях имеются изделия призматического типа, тонкостенные продуктопроводы (например, элементы пневмогидросистем газотурбинных двигателей), которые также эксплуатируются при повышенных температурах. Если технологический цикл не предусматривает упрочняющие поверхностные технологии, то необходимо учитывать и остаточные напряжения в деталях в состоянии поставки, поскольку в процессе эксплуатации они «накладываются» на «рабочие» напряжения. В случае использования специализированных технологий упрочнения поверхностей, как правило, применяют одностороннее упрочнение, например, внешней поверхности цилиндрических полых деталей, хотя для продуктопроводов важную роль играет и внутренняя поверхность. В связи с этим естественным образом возникает необходимость разработки методов реконструкции остаточных напряжений в упрочненных призматических образцах и тонких цилиндрических деталях (продуктопроводах) после двухстороннего поверхностного пластического деформирования и их релаксации вследствие ползучести в процессе эксплуатации. Такого рода исследования отсутствуют в научной литературе.

Вышеизложенное и определяет актуальность тематики диссертационной работы.

Объектом исследования являются поверхностно упрочненные призматические детали и тонкостенные цилиндрические оболочки в условиях высокотемпературной ползучести.

Предметом исследования являются методы и математический инструментарий для решения задач реконструкции и релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести в поверхностно упрочненных тонкостенных и плоских элементах конструкций.

Целью диссертационной работы является разработка методов реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния после поверхностного пластического деформирования призматических образцов и двухстороннего упрочнения тонкостенных

цилиндрических продуктопроводов и методов расчета релаксации остаточных напряжений в этих элементах конструкций в условиях ползучести при сложных программах нагружения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были поставлены следующие задачи.

1. Разработка метода реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненных плоских деталях (призматические образцы, балки) и его экспериментальная проверка.
2. Исследование влияния анизотропии пластической деформации в приповерхностном упрочненном слое на распределение остаточных напряжений в призматических образцах.
3. Разработка метода расчета релаксации остаточных напряжений в призматическом образце при ползучести в условиях термоэкспозиции и его экспериментальная проверка.
4. Исследование влияния вида напряженного состояния на процесс релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце при ползучести в условиях двухосного нагружения.
5. Разработка метода реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных цилиндрических образцах в состоянии поставки и после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью и его экспериментальная проверка.
6. Разработка метода расчета релаксации остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного упрочнения при ползучести в условиях сложного температурно-силового нагружения (термоэкспозиция, осевое растяжение, внутреннее давление, комбинированное осевое растяжение и внутреннее давление).

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан не имеющий аналогов феноменологический метод реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненных призматических деталях, позволяющий учитывать анизотропию пластической деформации, и выполнена его экспериментальная проверка для образцов из сплава ЭП742 после ультразвукового виброударного упрочнения.
2. Разработан не имеющий аналогов метод расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце и выполнена его экспериментальная проверка для образцов из сплава ЭП742 при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях термоэкспозиции.
3. Получены новые результаты влияния вида напряженного состояния на процесс релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце при ползучести в условиях двухосного нагружения.
4. Разработан новый метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных цилиндрических трубках, позволяющий, в отличие от существующих методов, решать задачу для образцов в состоянии поставки и после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью.

5. Модифицирован метод расчета релаксации остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических трубках в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного упрочнения при ползучести на основе обобщения известного метода для одностороннего упрочнения внешней поверхности полого цилиндра.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых методов решения задач реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния в упрочненных призматических деталях и в тонкостенных цилиндрических трубках после двухстороннего поверхностного пластического деформирования и расчета релаксации остаточных напряжений в этих элементах конструкций в условиях ползучести, на основании которых исследовано влияние анизотропии упрочнения, геометрических параметров деталей, вида напряженного состояния, температурно-силового нагружения на характер и кинетику остаточных напряжений.

Практическая значимость работы связана с тем, что в различных отраслях промышленности (авиадвигателестроение, энергомашиностроение, нефтехимическая отрасль и другие) процедура поверхностно пластического деформирования является обязательной штатной технологией, требующей оценки напряженно-деформированного состояния упрочненных деталей как после процедуры упрочнения, так и в процессе высокотемпературной ползучести. В этом плане разработанные методы формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических деталях и тонкостенных продуктопроводах могут быть использованы для параметрического анализа влияния реологических свойств материала, геометрии элементов конструкций, температурно-силовых факторов внешнего нагружения, параметров технологического процесса упрочнения на процесс релаксации остаточных напряжений при ползучести в условиях эксплуатации изделий и оценки остаточного ресурса по параметрическим критериям отказа (по величине остаточных напряжений).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Исследование соответствует следующим пунктам области исследований специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»:

1. Теория моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой.
2. Теория упругости, пластичности и ползучести.
3. Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники.
4. Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненных призматических деталях, позволяющий учитывать анизотропию пластической деформации в приповерхностном слое, изменение механических характеристик материала от температуры, геометрические параметры образца.
2. Результаты исследования влияния анизотропии пластической деформации в приповерхностном упрочненном слое и геометрических параметров на распределение остаточных напряжений в призматических образцах.

3. Метод расчета релаксации остаточных напряжений в призматическом образце в условиях ползучести при сложных термомеханических условиях нагружения.
4. Результаты исследования влияния вида напряженного состояния на процесс релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце при ползучести в условиях высокотемпературного двухосного нагружения.
5. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных цилиндрических трубках, позволяющий, в отличие от существующих методов, решать задачу для образцов в состоянии поставки и после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью.
6. Модифицированный метод расчета релаксации остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного упрочнения при ползучести, позволяющий эффективно решать задачи этого класса и изучать свойства реологических деформационных процессов в упрочненных тонкостенных цилиндрических оболочках, и новые результаты исследований, полученные для условий термоэкспозиции, осевого растяжения, внутреннего давления и их комбинаций.
7. Математическое и программное обеспечение для численной реализации разработанных методов решения задач реконструкции и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций.

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; корректностью использования математического аппарата, законов и постулатов механики деформируемого твердого тела; сравнением результатов расчётов характеристик напряжённо-деформированного состояния с известными экспериментальными данными после процедуры упрочнения и в процессе ползучести.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: IX, X и XI Международная молодёжная научная конференция по естественно-научным и техническим дисциплинам, Йошкар-Ола, 2014–2016; XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения–2016», Москва, 2016; X Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела, Самара, 2017; IX международная конференция «Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред», Горис, Армения, 2018; V международная научно-техническая конференция «Динамика и виброакустика машин», Самара, 2020; XIV Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 2020. Результаты работы докладывались на научном семинаре «Прикладная математика и механика» Самарского государственного технического университета (руководитель профессор Радченко В. П., 2019–2021 гг.), на научном семинаре кафедры «Соппротивление материалов» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева (руководитель профессор Павлов В. Ф., 2021 г.).

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №19-01-00550-а, №16-01-00249-а) и Российского научного фонда (№19-19-00062).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах из перечня Web of Science и Scopus, 7 статей в сборниках трудов конференций и 2 тезисов докладов.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук В. П. Радченко за постановки задач и поддержку работы.

Внедрение. Результаты диссертационной работы частично внедрены в учебный процесс Самарского государственного технического университета в лекционные курсы для студентов направления 01.03.02 «Прикладная математика и информатика» по дисциплине «Численные методы решения краевых задач» 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 «Кузнецов» (г. Самара).

Личный вклад автора.

Работы [6–9, 14] выполнены автором самостоятельно. Постановка задач, разработка математических моделей реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния после упрочнения в рассмотренных элементах конструкций и методов расчета релаксации остаточных напряжений в процессе ползучести и подготовка к публикации полученных результатов в работах [1–5, 10–13] диссертантом проводилась совместно с соавторами. Разработка методов идентификации параметров всех моделей, исследование полей остаточных напряжений и деформаций после упрочнения и в процессе ползучести при сложных температурно-силовых режимах нагружений, разработка алгоритмического и программного обеспечения, численное решение всех задач, анализ полученных результатов, формулировка основных научных положений и выводов выполнено автором диссертационной работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 170 страниц, из них 149 страниц текста, включая 53 рисунка, 2 приложения. Список литературы включает 166 наименований на 19 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Глава 1. Аналитический обзор и постановка задач исследования

В пункте 1.1 приведён обзор литературных источников, посвящённых существующим методам определения остаточных напряжений в цилиндрических и плоских образцах после процедуры поверхностного пластического упрочнения. Проанализированы представленные в работах А. А. Антонова, В. П. Багмутова, И. А. Биргера, А. С. Букатого, В. С. Вакулюка, Д. М. Васильева, М. А. Гребенникова, С. И. Иванова, Б. И. Капранова, И. Э. Келлера, В. А. Кирпичева, Е. П. Кочерова, Б. А. Кравченко, Ю. Ф. Кудрявцева, Н. Д. Кузнецова,

Р. Р. Мавлютова, В. Ф. Павлова, В. П. Радченко, Ю. П. Самарина, М. Н. Саушкина, А. М. Сулимы, В. И. Цейтлина и других ученых различные экспериментальные, расчетно-экспериментальные, феноменологические методы определения остаточных напряжений. Отмечено, что рассмотренные экспериментальные способы исследования остаточных напряжений не позволяют определить поля остаточных пластических деформаций, а только лишь одну или две компоненты тензора остаточных напряжений. Аналитические же решения в задаче реконструкции напряженно-деформированного состояния упрочненных конструкций получить очень сложно и имеются лишь единичные работы в данном направлении. Изложен феноменологический метод, основанный на частично известной экспериментальной информации, разработанный В. П. Радченко и М. Н. Саушкиным, основа которого была использована при построении моделей реконструкции остаточных напряжений автором данной работы.

В пункте 1.2 выполнен анализ экспериментальных и теоретических исследований релаксации остаточных напряжений в упрочненных деталях в условиях ползучести. Показано, что существуют серьезные трудности для экспериментального исследования релаксации остаточных напряжений даже при одноосном растяжении поверхностно упрочненных образцов в условиях высокотемпературной ползучести. Среди немногочисленных работ теоретического характера, касающихся методов расчета релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести, выделены работы О. В. Колотниковой, В. П. Радченко, М. Н. Саушкина, В. В. Цветкова, В. И. Цейтлина. Изложена методика решения задачи релаксации остаточных напряжений при одностороннем упрочнении при действии внутреннего давления, растяжения и кручения согласно работам В. П. Радченко, М. Н. Саушкина и В. В. Цветкова, на основе которых развивалась тематика настоящей диссертационной работы.

В пункте 1.3 среди теорий ползучести, представленных работами Б. В. Горева, Я. М. Клебанова, А. М. Локощенко, Н. Н. Малинина, А. Ф. Никитенко, Ю. Н. Работнова, В. П. Радченко, Ю. П. Самарина, О. В. Соснина, J. Betten и других ученых, выделен и описан энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности, который в дальнейших исследованиях диссертант использовал как основной.

В пункте 1.4 на основе аналитического обзора сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Глава 2. Методы реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненных призматических образцах

В пункте 2.1 приведена постановка задачи главы 2.

В пункте 2.2 приведен метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненном полупространстве. Задача решается в декартовой системе координат, в которой плоскость XOY совмещена с упрочненной поверхностью, а ось OZ перпендикулярна ей. С использованием экспериментально известной компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z)$ в тонком упрочненном слое остальные компоненты остаточных напряжений и пластических деформаций определяются по формулам

$$\sigma_y = \frac{1 + \alpha \nu}{\alpha + \nu} \sigma_x, \quad (1)$$

$$q_x = -\frac{\alpha(1-\nu^2)}{E(\alpha+\nu)}\sigma_x; \quad q_y = -\frac{1-\nu^2}{E(\alpha+\nu)}\sigma_x; \quad q_z = \frac{(1+\alpha)(1-\nu^2)}{E(\alpha+\nu)}\sigma_x, \quad (2)$$

где α – параметр анизотропии, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

В пункте 2.3 описана идентификация параметров математической модели реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния. Аппроксимация зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ выбрана в следующем виде:

$$\sigma_x(z) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{(z-z^*)^2}{l^2}\right) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z-z^*)^2}{b^2}\right), \quad (3)$$

где σ_0, σ_1, l, b – параметры, для нахождения которых использованы характерные экспериментальные значения эпюры ($\sigma_x(0) = \sigma^*$, $\sigma_x(z^*) = \sigma_{\min}$, $\sigma_x(z_0) = 0$) и условие самоуравновешенности остаточных напряжений:

$$\int_0^{+\infty} \sigma_x(z) dz = 0. \quad (4)$$

В пункте 2.4 произведена проверка методики расчета напряженно-деформированного состояния в упрочненном полупространстве после процедуры упрочнения с помощью экспериментальных данных для плоских призматических образцов с квадратным сечением 10×10 мм и длиной 100 мм из сплава ЭП742 после четырех режимов ультразвукового виброударного упрочнения дробью (УЗУ) длительностью 20 с, 40 с, 60 с, 80 с. Для примера на рис. 1,а штриховой линией приведены расчетные значения зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$, а сплошными линиями приведены результаты экспериментального определения остаточных напряжений в образцах после процедуры УЗУ для первого режима обработки поверхности.

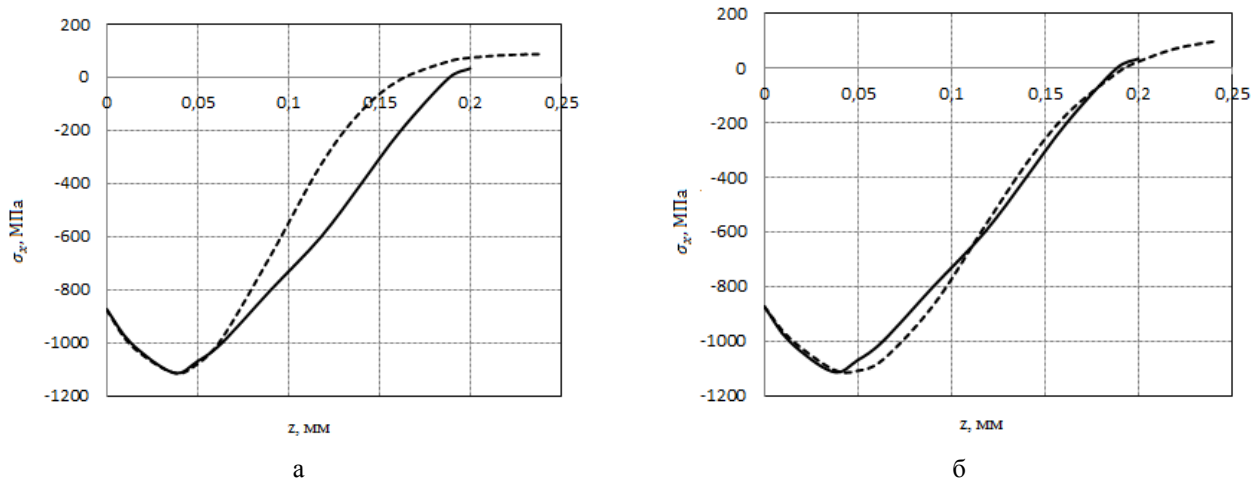


Рис. 1. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) эпюры остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$ в поверхностном слое полупространства (сплав ЭП742) для первого режима обработки поверхности в случае полупространства (а) и призматического образца (б)

В целом наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

В пункте 2.5 описан метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненном призматическом образце и произведена

идентификация параметров модели. Аппроксимация зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ выбрана в следующем виде:

$$\sigma_x(z) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z - z^*)^2}{b^2}\right), \quad (5)$$

где σ_0, σ_1, b – параметры, для нахождения которых вновь использованы характерные экспериментальные значения эпюры $(\sigma_x(0) = \sigma^*, \sigma_x(z^*) = \sigma_{\min}, \sigma_x(z_0) = 0)$ и условие самоуравновешенности

$$\int_0^H \sigma_x(z) dz = 0. \quad (6)$$

В пункте 2.6 произведена экспериментальная проверка модели расчета остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце. Для этого снова были использованы экспериментальные данные для бруса $10 \times 10 \times 100$ мм из сплава ЭП742 после УЗУ (см. рис. 1,а). В качестве примера на рис. 1,б штриховой линией приведены расчетные значения зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$, а сплошными линиями приведены результаты экспериментального определения этой компоненты в образцах после процедуры УЗУ для первого режима обработки поверхности.

Сравнивая модели упрочненного полупространства и упрочненного призматического образца с помощью рис. 1,а и рис. 1,б, предпочтение отдано модели для призматического образца. Поэтому в дальнейших исследованиях в области построения математической модели релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести была использована схема для упрочненного призматического образца.

В пункте 2.7 исследовано влияние параметра анизотропии упрочнения α в формулах (1), (2) на распределение остаточных напряжений в призматическом образце. Сделан вывод, что влияние параметра анизотропии α на напряженно-деформированное состояние существенно. При значении $0 < \alpha < 1$ величина $\sigma_y = \sigma_y(z)$ по модулю больше величины $\sigma_x = \sigma_x(z)$, а при $\alpha > 1$ – меньше, причем значения $\sigma_y = \sigma_y(z)$ в области сжатия материала в зависимости от величины α могут отличаться от значений $\sigma_x = \sigma_x(z)$ при $\alpha = 1$ более чем в 1,5 раза, как в одну, так и в другую сторону.

В пункте 2.8 сформулированы выводы по главе 2.

Глава 3. Математическая модель релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце в условиях ползучести

В пункте 3.1 приведена постановка задачи главы 3.

В пункте 3.2 приведена методика расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце в условиях термоэкспозиции (чисто температурная выдержка) при ползучести. В качестве начальных условий краевой задачи ползучести используется остаточное напряженно-деформированное состояние, возникающее после процедуры упрочнения, которое сформировано в начальный момент времени при $t = 0 - 0$ и температуре T_0 . В момент времени при $t = 0$ происходит мгновенное прогревание

призматического образца с температуры T_0 до температуры T_1 ($T_1 > T_0$), при которой возникает процесс ползучести в материале образца. Обозначим модуль Юнга при температуре T_0 через E_0 , а при температуре T_1 через E_1 (очевидно $E_0 > E_1$).

На первом этапе в момент времени $t = 0 + 0$ «прикладывается» температурная нагрузка (прогревание образца происходит мгновенно) и пересчитываются остаточные напряжения по формулам

$$\sigma_x(z, 0+0) = -\frac{E_1(\alpha + \nu)}{\alpha(1 - \nu^2)} q_x(z), \quad \sigma_y(z, 0+0) = \frac{1 + \alpha\nu}{\alpha + \nu} \sigma_x(z, 0+0). \quad (7)$$

В течение времени $t \in [0, t^*]$ образец выдерживается при температуре $T = T_1$, при которой в материале образца возникают деформации ползучести. Под действием самоуравновешенных остаточных напряжений, сформировавшихся при $t = 0 + 0$, в образце накапливается деформация ползучести, компоненты которой обозначены через $p_j = p_j(z, t)$ ($j = x, y, z$). Используя гипотезу аддитивности для упругой, пластической деформации и деформации ползучести, для компонент полной деформации для любых $t \in [0, t^*]$, при сохранении гипотезы плоских сечений и условия стесненности (нулевой деформации $\varepsilon_x(z, t) = \varepsilon_y(z, t) = 0$, $0 \leq z \leq H$, имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(z, t) &= \frac{1}{E_1} [\sigma_x(z, t) - \nu \sigma_y(z, t)] + q_x(z) + p_x(z, t) = 0, \\ \varepsilon_y(z, t) &= \frac{1}{E_1} [\sigma_y(z, t) - \nu \sigma_x(z, t)] + q_y(z) + p_y(z, t) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Компонента $\varepsilon_z(z, t)$ является «пассивной» и не влияет на перераспределение остаточных напряжений в процессе ползучести.

Решая систему уравнений (8) относительно $\sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y(z, t)$, получаем соотношения, описывающие кинетику этих напряжений во времени вследствие ползучести:

$$\begin{aligned} \sigma_x(z, t) &= \frac{E_1}{\nu^2 - 1} [q_x(z) + p_x(z, t) + \nu(q_y(z) + p_y(z, t))], \\ \sigma_y(z, t) &= \frac{E_1}{\nu^2 - 1} [q_y(z) + p_y(z, t) + \nu(q_x(z) + p_x(z, t))]. \end{aligned} \quad (9)$$

Деформации ползучести вычисляются с использованием выбранной теории ползучести. В качестве основного «рабочего» инструмента в дальнейшем будет использоваться теория ползучести Ю. П. Самарина¹. Тогда, ограничиваясь только первой и второй стадиями ползучести и считая, что вязкоупругая компонента на первой стадии отсутствует, реологическая модель принимает следующий вид:

$$p_x(t) = v_x(t) + w_x(t);$$

¹ Самарин Ю. П. Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами. Куйбышев: Куйбышевский госуниверситет, 1979. 84 с.

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{aligned} v_x(t) &= (1 + \mu'') \beta_x(t) - \mu'' (\beta_x(t) + \beta_y(t)); \\ \dot{\beta}_x(t) &= \begin{cases} \lambda B_x(t), & B_x(t) \sigma_x(t) > 0, \\ 0, & B_x(t) \sigma_x(t) \leq 0; \end{cases} \\ B_x(t) &= a \left(S(t) / \sigma^{**} \right)^{n-1} (\sigma_x(t) / \sigma^{**}) - \beta_x(t); \end{aligned} \right. \\
& \dot{w}_x(t) = c \left(\frac{S(t)}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_x(t) - \frac{1}{2} \sigma_y(t)}{\sigma^{**}} \right); \\
& p_y(t) = v_y(t) + w_y(t); \\
& \left[\begin{aligned} v_y(t) &= (1 + \mu'') \beta_y(t) - \mu'' (\beta_y(t) + \beta_x(t)); \\ \dot{\beta}_y(t) &= \begin{cases} \lambda B_y(t), & B_y(t) \sigma_y(t) > 0, \\ 0, & B_y(t) \sigma_y(t) \leq 0; \end{cases} \\ B_y(t) &= a \left(S(t) / \sigma^{**} \right)^{n-1} (\sigma_y(t) / \sigma^{**}) - \beta_y(t); \end{aligned} \right. \\
& \dot{w}_y(t) = c \left(\frac{S(t)}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_y(t) - \frac{1}{2} \sigma_x(t)}{\sigma^{**}} \right),
\end{aligned} \tag{10}$$

где $p_x(t), p_y(t)$ – деформации ползучести; $v_i(t), w_i(t), i = x, y$, – вязкопластические (необратимые) компоненты деформаций и деформации вязкого течения; $S(t)$ – интенсивность напряжений; μ'' – аналог коэффициента Пуассона для вязкопластической компоненты; $\sigma^{**}, \lambda, a, n, c, m$ – параметры модели.

Если в момент времени $t = t^*$ происходит температурная разгрузка от $T = T_1$ до $T = T_0$, то модуль Юнга мгновенно изменяется с E_1 на E_0 . Тогда формулы (9) при $T = T_0$ принимают вид

$$\begin{aligned}
\sigma_x(z, t^* + 0) &= \frac{E_0}{\nu^2 - 1} \left[q_x(z) + p_x(z, t^* + 0) + \nu (q_y(z) + p_y(z, t^* + 0)) \right], \\
\sigma_y(z, t^* + 0) &= \frac{E_0}{\nu^2 - 1} \left[q_y(z) + p_y(z, t^* + 0) + \nu (q_x(z) + p_x(z, t^* + 0)) \right].
\end{aligned} \tag{11}$$

Соотношения (11) и задают окончательные выражения для остаточных напряжений после ползучести (для случая термоэкспозиции) в момент времени $t = t^* + 0$.

В пункте 3.3 проведена проверка адекватности расчетных данных по релаксации остаточных напряжений экспериментальным данным в условиях термоэкспозиции для призматического образца $10 \times 10 \times 100$ мм из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С. Решение системы уравнений (11) осуществлялось численно хорошо известным в теории ползучести методом «шагов» по времени.

В качестве примера на рис. 2 приведены экспериментальные и расчетные зависимости для первого режима упрочнения в процессе ползучести.

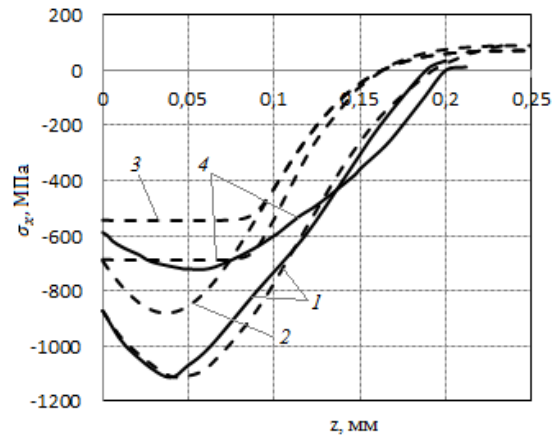


Рис. 2. Кинетика зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ в процессе ползучести (режим 1, сплав ЭП742; $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$):

- 1 – расчетная (штриховая линия) и экспериментальная (сплошная линия) эпюры после упрочнения ($t = 0 - 0$);
 2 – расчетная эпюра после температурной нагрузки; 3 – расчетная эпюра после ползучести в течение 100 часов;
 4 – расчетная (штриховая линия) и экспериментальная (сплошная линия) эпюры после ползучести и температурной разгрузки

Анализ приведенных на рис. 2 зависимостей показал, что в процессе ползучести остаточные напряжения $\sigma_x = \sigma_x(z)$ по модулю уменьшились в 1,54 раза по сравнению с первоначальными значениями.

В пункте 3.4 исследовано влияние вида напряженного состояния на релаксацию остаточных напряжений в призматическом бруске при двухосном растяжении. Методика расчета основана на использовании гипотезы плоских сечений

$$\varepsilon_x(z, t) = \varepsilon_x^0(t), \quad \varepsilon_y(z, t) = \varepsilon_y^0(t) \quad (12)$$

и обобщении расчетной схемы пункта 3.2 введением дополнительных слагаемых от действия внешних сил σ_x^0 и σ_y^0 . Модельные расчеты выполнялись при значениях интенсивности напряжений $S = 300\text{ МПа}$ и $S = 450\text{ МПа}$ в различном сочетании напряжений σ_x^0 и σ_y^0 . Время расчетов – 100 часов. Результаты расчетов показали существенную зависимость скорости релаксации остаточных напряжений от вида напряженного состояния. А основным вывод состоит в том, что для растягивающих нагрузок происходит существенное замедление процесса релаксации по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции, а в частном случае всестороннего растяжения процесс релаксации остаточных напряжений практически отсутствует. При сжимающих нагрузках процесс релаксации остаточных напряжений, наоборот, происходит наиболее интенсивно, а в частном случае всестороннего сжатия происходит практически полная релаксация остаточных напряжений за 100 часов.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчетов для двух «альтернативных» случаев, когда $\sigma_x^0 \cdot \sigma_y^0 > 0$.

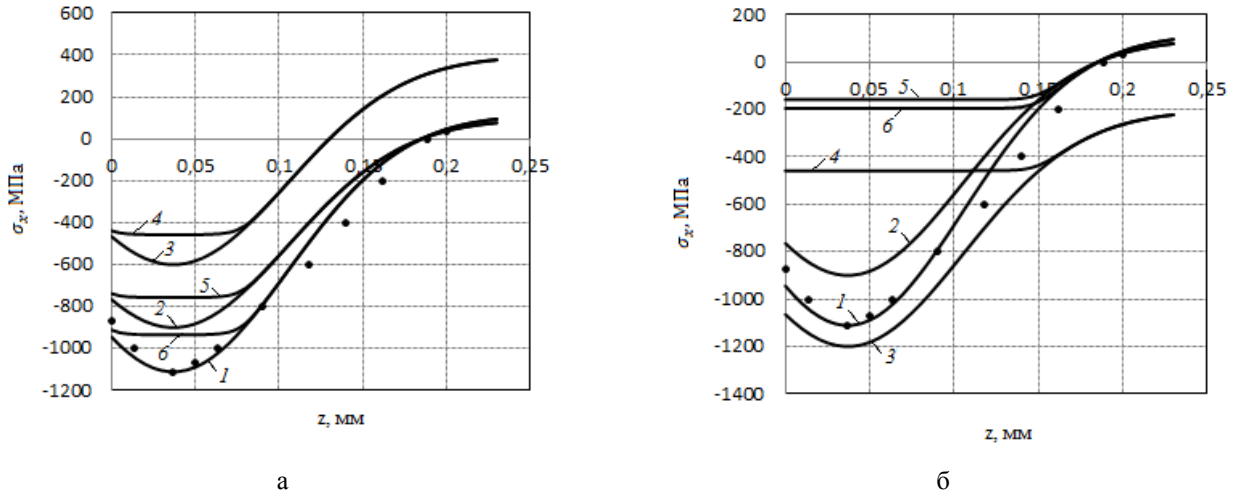


Рис. 3. Зависимости остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$ при двухосном нагружении образца: а – при

$\sigma_x^0 = 300$ МПа, $\sigma_y^0 = 300$ МПа, б – при $\sigma_x^0 = -300$ МПа, $\sigma_y^0 = -300$ МПа. Маркеры (точки) –

экспериментальные данные после упрочнения; 1 – расчетная эпюра после упрочнения ($t = 0 - 0$); 2 – расчетная эпюра после температурной нагрузки; 3 – расчетная эпюра после силовой нагрузки; 4 – расчетная эпюра после ползучести в течение 100 часов; 5 – расчетная эпюра после силовой разгрузки; 6 – расчетная эпюра после температурной разгрузки

В пункте 3.5 сформулированы выводы по главе 3.

Глава 4. Математические модели реконструкции и релаксации остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного упрочнения

В пункте 4.1 приведена постановка задачи главы 4.

В пункте 4.2 поставлена задача разработки метода реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций, возникающих на внутренней и внешней поверхностях тонкостенных цилиндрических трубок (моделирующих элементы трубопроводов пневмогидросистем авиационных двигателей) либо после механической обработки в образцах в состоянии поставки, либо после двухстороннего поверхностного пластического деформирования. Решение задачи осуществлено на основе обобщения разработанной В. П. Радченко, М. Н. Саушкиным и В. Ф. Павловым методики для одностороннего упрочнения полых цилиндрических образцов. Основные расчетные формулы в цилиндрической системе координат в этом случае имеют вид

$$\begin{aligned}
 \sigma_r(r) &= \frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta(\xi) d\xi, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \\
 q_\theta(r) &= \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E_0(1+\alpha\nu)^2} r^{\frac{2+\alpha}{1+\alpha\nu}} \int_{R_1}^r \xi^{\frac{1+\alpha-\alpha\nu}{1+\alpha\nu}} [\sigma_r(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta(\xi)] d\xi + \\
 &\quad + \frac{1+\nu}{E_0(1+\alpha\nu)} [\nu\sigma_r(r) - (1-\nu)\sigma_\theta(r)], \\
 q_z(r) &= \alpha q_\theta(r), \quad q_r(r) = -(1+\alpha)q_\theta(r),
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \xi \left[q_z(\xi) - \frac{\nu}{E_0} (\sigma_r(\xi) + \sigma_\theta(\xi)) \right] d\xi,$$

$$\sigma_z(r) = E_0 [\varepsilon_z^0 - q_z(r)] + \nu [\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)],$$

где R_1 , R_2 – внутренний и внешний радиусы цилиндра соответственно; σ_r , σ_θ , σ_z – радиальное, окружное и осевое остаточные напряжения соответственно; q_r , q_θ , q_z – соответствующие компоненты тензора пластических деформаций; E_0 – модуль Юнга при температуре упрочнения T_0 ; ν – коэффициент Пуассона; α – феноменологический параметр анизотропии упрочнения.

Исходной информацией для реализации схемы (13) является экспериментальная зависимость $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ в тонких приповерхностных слоях, для аппроксимации которой используется функциональная зависимость:

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp \left[-\frac{(r - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2} \right] - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2} \right], \quad (14)$$

где σ_0 , σ_1 , σ_2 , b_1 , b_2 , h_1^* и h_2^* – параметры, подлежащие процедуре идентификации.

В пункте 4.3 разработана и реализована методика идентификации параметров моделей реконструкции остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения, а также выполнена проверка их адекватности экспериментальным данным для трубок $\varnothing 12 \times 1$ мм из стали X18H10T. Так, для цилиндрических образцов в состоянии поставки на рис. 4 экспериментальные значения отмечены маркерами, расчетные значения для зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ приведены сплошными линиями, а для $\sigma_z = \sigma_z(r)$ – штриховыми линиями. Аналогичные результаты представлены для цилиндрических образцов из этой же стали после двухстороннего виброударного упрочнения (УЗУ) на рис. 5.

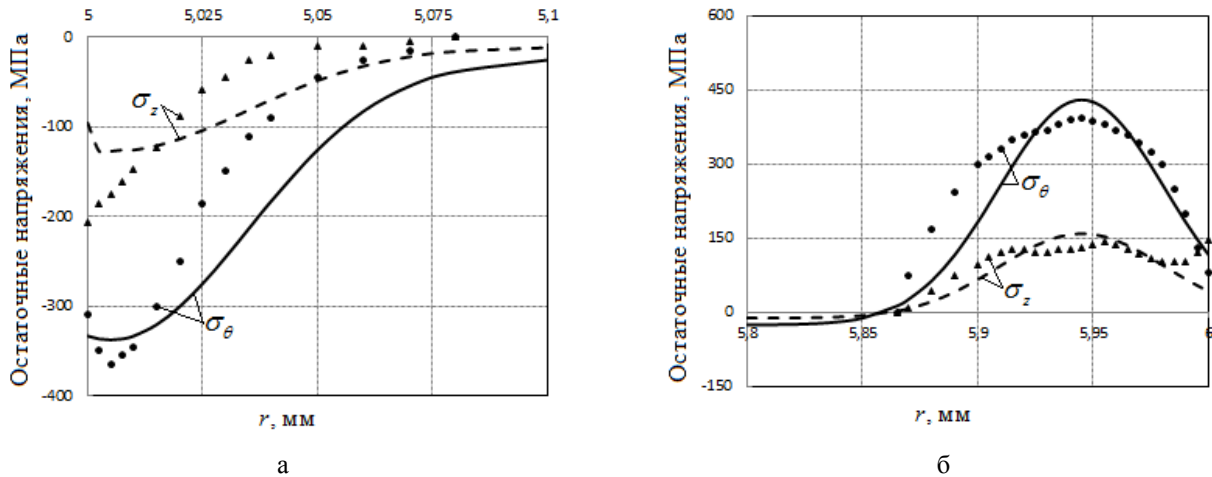


Рис. 4. Экспериментальные (маркеры) и расчетные зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ (сплошные линии) и $\sigma_z = \sigma_z(r)$ (штриховые линии) в областях, прилегающих к внутренней (а) и внешней (б) поверхности трубок в состоянии поставки

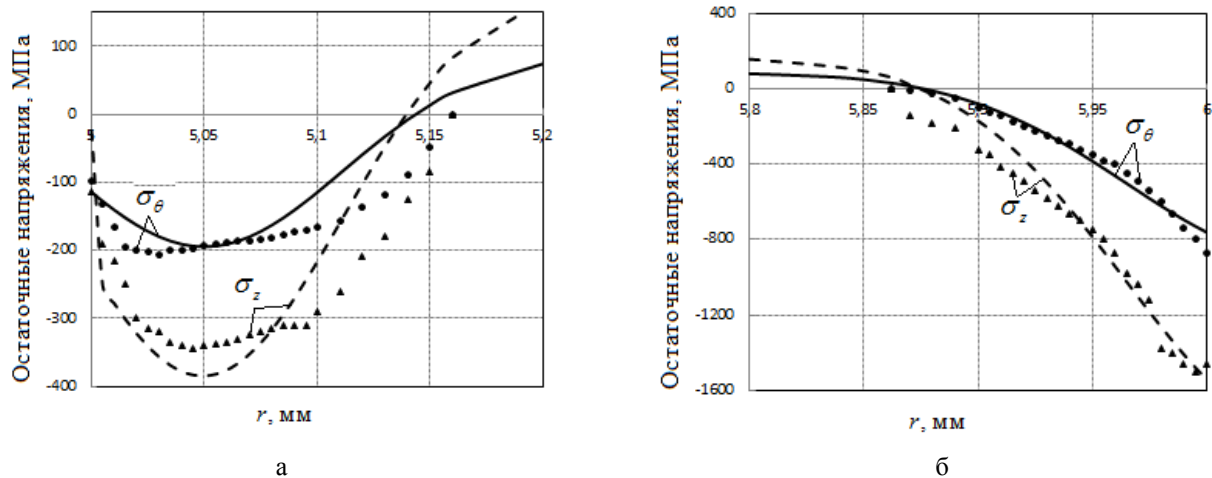


Рис. 5. Экспериментальные (маркеры) и расчетные зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ (сплошные линии) и $\sigma_z = \sigma_z(r)$ (штриховые линии) в областях, прилегающих к внутренней (а) и внешней (б) поверхности трубок после двухстороннего упрочнения

В пункте 4.4 выполнено исследование релаксации остаточных напряжений в тонкостенных трубках в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения. Расчеты выполнены для трубок из модельного материала 08X18H9 (ранний аналог стали X18H10T) при температуре $T = 600^\circ\text{C}$. На первом этапе построена модель ползучести этой стали по экспериментальным данным работы². Для задания начального остаточного напряженно-деформированного состояния использовались данные для трубок из сплава X18H10T, модель реконструкции которых разработана в пунктах 4.2 и 4.3 (см. также рис. 4 и 5). Для расчета релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести модифицирована и обобщена методика для решения такого рода задачи для одностороннего упрочнения внешней поверхности полых цилиндров³, в которую введен новый модуль для расчета начального напряженно-деформированного состояния при наличии полей остаточных напряжений на внешней и внутренней поверхности трубок. Модельные расчеты выполнены для следующих расчетов температурно-силового нагружения: термоэкспозиция, осевое растяжение, внутреннее давление, совместное действие осевого растяжения и внутреннего давления. В качестве примера на рис. 6 приведены типичные зависимости для кинетики осевых и радиальных компонент тензора остаточных напряжений для трубок в состоянии поставки.

Результаты расчетов показали, что в этих условиях (см. рис. 6) происходит практически полная релаксация остаточных технологических напряжений как в образцах в состоянии поставки, так и после двухстороннего поверхностного пластического деформирования в течение 50 часов. Даны некоторые рекомендации по использованию полученных результатов в прикладных задачах расчета трубопроводов авиационных пневмогидросистем.

² Можаровская Т. Н., Можаровский В. Н., Штефан Н. И. О зависимости времени до разрушения и установившейся скорости деформаций ползучести конструкционных материалов // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. 2010. № 59. С. 37–40.

³ Радченко В. П., Цветков В. В., Саушкин М. Н. Релаксация остаточных напряжений в упрочненном цилиндре в условиях ползучести при нагружении осевой силой, крутящим моментом и внутренним давлением // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 4. С. 96–107.

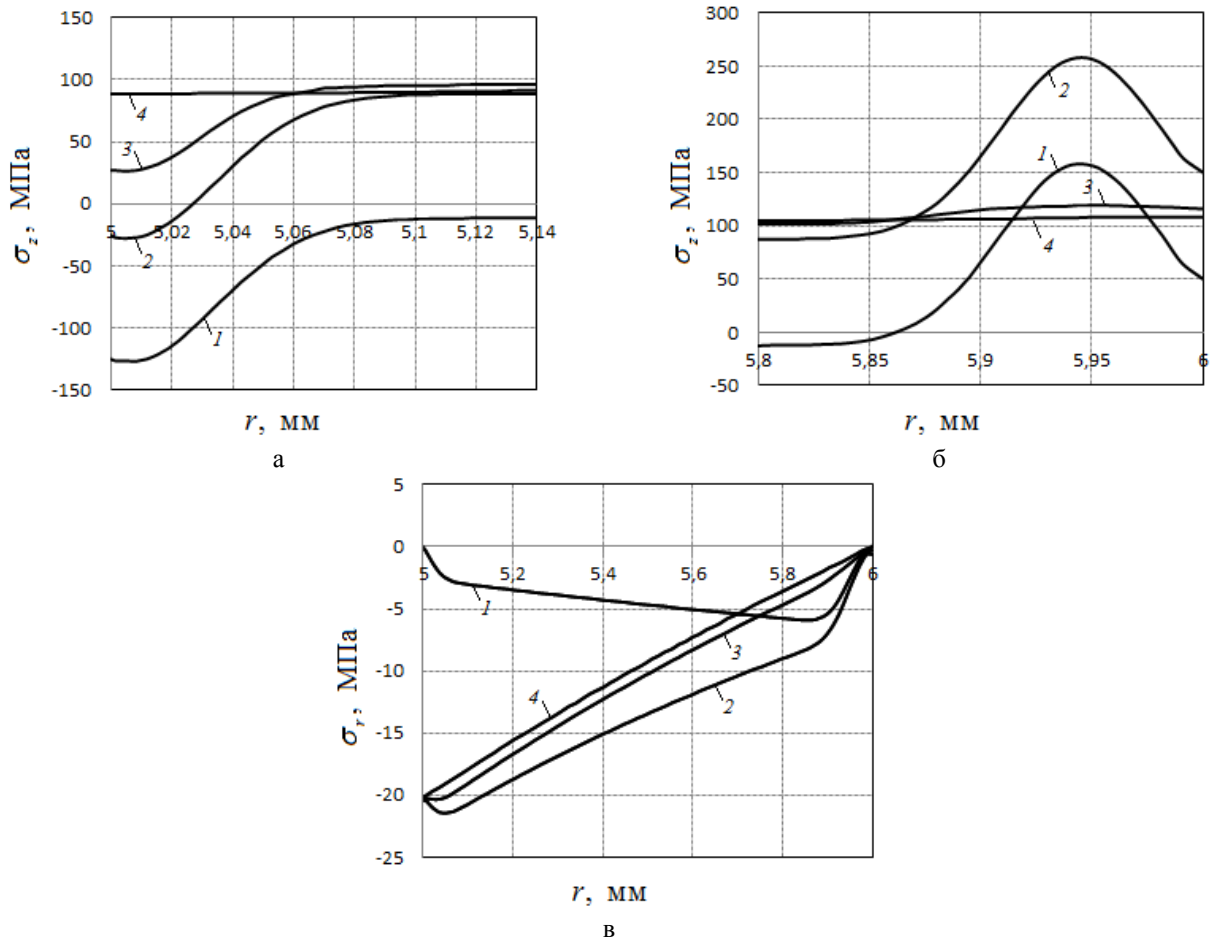


Рис. 6. Зависимость остаточных напряжений: а – $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ на внутренней поверхности; б – $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ на внешней поверхности; в – $\sigma_r = \sigma_r(r, t)$ при действии осевого растяжения при напряжении $\sigma_0 = 100$ МПа и внутреннего давления $q = 20$ МПа в различные моменты времени при ползучести. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 50$ часов.

В пункте 4.5 сформулированы выводы по главе 4.

В главе 5 кратко изложены алгоритмы решения задач идентификации параметров моделей реконструкций остаточного напряженно-деформированного состояния в призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций после процедуры упрочнения и расчета релаксации остаточных напряжений в этих элементах вследствие ползучести, используемые подходы численной реализации всех рассмотренных задач, а также соответствующее программное обеспечение. Описаны разработанные программные продукты, описан формат входных и выходных данных при выполнении расчетов.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Разработан не имеющий аналогов феноменологический метод реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций для призматических элементов конструкций с учетом эффектов деформационной анизотропии при поверхностном пластическом деформировании, предложена методика идентификации параметров для

реализации предложенного метода при различных закономерностях распределения остаточных напряжений в приповерхностном слое.

2. Выполнена проверка адекватности метода расчета остаточного напряженно-деформированного состояния для призматического образца из сплава ЭП742 экспериментальным данным после ультразвукового виброударного упрочнения дробью одной из граней при четырех режимах обработки поверхности. Наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных.
3. Разработана не имеющая аналогов методика расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении и выполнена проверка адекватности данных расчета по разработанной методике экспериментальным данным для призматического образца после ультразвукового виброударного упрочнения дробью из сплава ЭП742 при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ в частном случае термоэкспозиции. Наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных для четырех режимов поверхностного упрочнения.
4. Исследовано влияние двухосного нагружения плоского поверхностно упрочненного образца на релаксацию остаточных напряжений в условиях ползучести для различных видов напряженного состояния при постоянной интенсивности напряжений. В модельных расчетах из сплава ЭП742 для образцов из сплава ЭП742 при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ при величине интенсивности напряжений (для внешних нагрузок), составляющей 30 – 50% от максимальной (по модулю) величины остаточных напряжений после упрочнения, установлено, что для растягивающих нагрузок происходит существенное уменьшение скорости релаксации остаточных напряжений в процессе ползучести, а при сжимающих нагрузках, наоборот, процесс релаксации интенсифицируется по сравнению со случаем термоэкспозиции.
5. Разработан метод реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных цилиндрических трубках в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного пластического деформирования, предложена методика идентификации параметров для реализации разработанного метода.
6. Выполнена экспериментальная проверка предложенного метода реконструкции остаточных напряжений для тонкостенных трубок из стали X18H10T в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного пластического упрочнения внешней и внутренней поверхностей в режиме ультразвукового виброударного упрочнения дробью.
7. Разработана методика расчета релаксации остаточных напряжений на внешней и внутренней поверхностях тонкостенных трубок в условиях ползучести на основе обобщения соответствующей методики при одностороннем упрочнении. Исследован процесс релаксации в тонкостенных трубках из стали 08X18H9 (ранний аналог стали X18H10T) в условиях термоэкспозиции, осевого растяжения (100 МПа), внутреннего давления (20 МПа) и совместного действия осевого растяжения и внутреннего давления при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Показано, что в этих условиях происходит практически

полная релаксация остаточных технологических напряжений как в образцах в состоянии поставки, так и после двухстороннего поверхностного пластического деформирования в течение 50 часов.

8. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для реализации разработанных методов.
9. Даны рекомендации по использованию полученных теоретических результатов и данных расчетов в прикладных задачах механики упрочненных конструкций.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях из перечня ВАК, входящих в базы Scopus и Web of Science

1. Радченко В. П., Бочкова Т. И. (Бербасова Т. И.), Цветков В. В. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом полупространстве в условиях ползучести // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2015. Т. 19, № 3. С. 504–522.
2. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Бочкова Т. И. Математическое моделирование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести // Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 1. С. 93–112.
3. Radchenko V. P., Saushkin M. N., Bochkova T. I. Mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after ultrasonic hardening under high-temperature creep conditions // PNRPU MECHANICS BULLETIN. 2018. №3-4. Pp. 88–98. (перевод на английский язык оригинальной статьи Радченко В. П., Саушкин М. Н., Бочкова Т. И. Математическое моделирование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести // Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 1. С. 93–112.)
4. Радченко В. П., Павлов В. Ф., Бербасова Т. И., Саушкин М. Н. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных трубопроводах в состоянии поставки и после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью // Вестник ПНИПУ. Механика. 2020. № 2. С. 123–133.
5. Radchenko V. P., Pavlov V. F., Berbasova T. I. Modeling the formation of residual stresses in thin-walled cylindrical samples after plastic surface hardening of inner and outer surfaces // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2020) AIP Conf. Proc. 2315. 2020. Pp. 020038-1–020038-4.

Публикации в других изданиях (остальные)

6. Бочкова Т. И. Формирование напряженно-деформированного состояния в полупространстве после процедуры поверхностного пластического деформирования // Научному прогрессу – творчество молодых. Сборник материалов IX Международной молодежной научной конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам. Ч. 1. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. С. 89.
7. Бочкова Т. И. Феноменологический метод расчета остаточных напряжений в плоских образцах после процедуры анизотропного поверхностного пластического упрочнения // Научному прогрессу – творчество молодых. Сборник материалов X Международной молодежной научной конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам. Ч. 1. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. С. 7–8.
8. Бочкова Т. И. Метод расчета остаточных напряжений в плоских образцах после ультразвукового упрочнения // 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. 75–77.
9. Бочкова Т. И. Модель релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце в условиях ползучести // Сборник тезисов докладов XLII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения –2016» Т. 1. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. С. 97–98.
 10. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Бербасова Т. И. Кинетика напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных призматических образцах в условиях ползучести // Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела. Т. 2. Самара: СамГТУ, 2017. С. 173–176.
 11. Саушкин М. Н., Радченко В. П., Бербасова Т. И. Моделирование процесса релаксации остаточных напряжений в плоских поверхностно упрочнённых деталях в условиях ползучести // Труды IX международной конференции «Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред». Горис, Армения. Ер.: НУАСА, 2018. С. 278–282.
 12. Радченко В. П., Павлов В. Ф., Бербасова Т. И. Математическое моделирование технологических остаточных напряжений и деформации в тонкостенных трубопроводах в состоянии поставки // Тезисы докладов пятой международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин». Самара: Самарский университет, 2020. С. 58–59.
 13. Радченко В. П., Павлов В. Ф., Бербасова Т. И. Моделирование формирования остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах после поверхностно пластического упрочнения внутренней и внешней поверхности // Сборник материалов XIV Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2020. С. 351–352.
 14. Бербасова Т. И. Исследование влияния силового нагружения на релаксацию остаточных напряжений в упрочненных плоских деталях в условиях ползучести // Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции (школа-семинар) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук». Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2021.

Научное издание

Бербасова Татьяна Игоревна

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук на тему:

Методы расчета формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций при ползучести

Подписано в печать 22.04.2021. Формат 60×84 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № 250. Отпечатано на ризографе. ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Отдел типографии и оперативной печати 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.