

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., проф.

Радченко Владимир Павлович

Самара – 2021

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Аналитический обзор и постановка задач исследования	12
1.1. Реконструкция напряженно-деформированного состояния цилиндрических и плоских образцов после процедуры поверхностного пластического упрочнения	17
1.2. Экспериментальные и теоретические исследования релаксации остаточных напряжений в упрочненных элементах конструкций в условиях ползучести	28
1.3. Выбор реологической модели деформирования материалов	41
1.4. Выводы по главе 1	47
Глава 2. Методы реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненных призматических образцах	48
2.1. Постановка задачи	48
2.2. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненном полупространстве	49
2.3. Идентификация параметров математической модели реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния в упрочненном полупространстве.....	52
2.4. Экспериментальная проверка математической модели расчета остаточных напряжений в полупространстве для режима изотропного упрочнения	56
2.5. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненном призматическом образце и идентификация параметров модели	62
2.6. Экспериментальная проверка математической модели расчета остаточных напряжений в призматическом образце для режима изотропного упрочнения .	67
2.7. Исследование влияния параметра анизотропии упрочнения на распределение остаточных напряжений в призматическом образце	69
2.8. Выводы по главе 2	74
Глава 3. Математическая модель релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце в условиях ползучести	75
3.1. Постановка задачи	75
3.2. Методика расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце в условиях термоэкспозиции при ползучести	76
3.3. Проверка адекватности метода расчета релаксации остаточных напряжений в призматическом образце в условиях ползучести	82

3.4. Исследование влияния вида напряженного состояния на релаксацию остаточных напряжений в призматическом брусе при двухосном растяжении .	88
3.5. Выводы по главе 3	104
Глава 4. Математические модели реконструкции и релаксации остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного упрочнения.....	105
4.1. Постановка задачи	105
4.2. Математическая модель реконструкции остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения	107
4.3. Идентификация параметров моделей и проверка их адекватности экспериментальным данным	114
4.4. Исследование релаксации остаточных напряжений в тонкостенных трубках в состоянии поставки и после упрочнения в условиях ползучести	124
4.5. Выводы по главе 4	138
Глава 5. Алгоритмы расчета и программное обеспечение для идентификации параметров моделей для призматических образцов и трубок и реализации методик ползучести упрочненных образцов.....	139
Заключение.....	147
Список литературы.....	150
Приложение А.....	169
Приложение Б	170

Введение

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 которого наводятся сжимающие («благоприятные») остаточные напряжения в тонком приповерхностном слое, замедляющие деградационные 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 $T = 650$ °С 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 г.), на научном семинаре кафедры «Сопротивление 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 [9–12] 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 [78, 88, 89, 90, 93, 94, 112, 154, 155] 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.

Глава 1. Аналитический обзор и постановка задач исследования

В инженерной практике используются различные способы повышения ресурса элементов конструкций и деталей: создание новых сверхпрочных материалов, а также улучшение свойств и характеристик уже используемых сплавов; конструкторские решения на стадии проектирования; отделочные операции поверхности после изготовления деталей. К типовым промышленным упрочняющим технологиям можно отнести шлифование, полирование, притирку, суперфиниширование, гидро- и дробеструйную обработку поверхности, упрочнение микрошариками, обкатку роликом и другие. В качестве заключительной операции часто используют полирование под давлением, которое благоприятно воздействует на структуру поверхностного слоя. В частности, происходит смыкание кристаллитов, разобобщенных под действием предшествующей механической обработки, поверхностный слой уплотняется, острые кромки микронеровностей сглаживаются, а впадины и микротрещины затягиваются [65]. Но при любой отделочной технологии, во-первых, всегда остаются дефекты поверхности, во-вторых, в приповерхностном слое возникают технологические остаточные напряжения, которые в подавляющем числе случаев играют отрицательную роль и снижают ресурс деталей. Поэтому их нужно учитывать в расчетной практике, поскольку они «накладываются» на «рабочие» напряжения в процессе эксплуатации, либо использовать «контртехнологии», которые нивелируют эти напряжения, например, методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

При применении ППД упрочнение поверхностного слоя детали осуществляется инструментом, деформирующие элементы (шарики, ролики) которого взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по одной из схем: качения, скольжения или внедрения [97].

При ППД по схеме качения ролик или шарик прижимается к упрочняемой поверхности с фиксированной силой и перемещается относительно нее, совершая вращение вокруг своей оси. В месте контакта деформирующего элемента и поверхностью детали возникает очаг пластической деформации, который

перемещается вместе с инструментом, вследствие чего поверхностный слой детали деформируется на определенную глубину. Размеры очага деформации зависят от формы и размера деформирующего элемента, силы, с которой он прижимается к поверхности, твердости обрабатываемого материала.

Деформирующие элементы работают по схеме скольжения при методах выглаживания и дорнования. Деформирующие элементы в таком случае должны изготавливаться из материалов, обладающих высокой твердостью (например, алмаза), а также несклонных к адгезионному схватыванию с материалом обрабатываемой поверхности.

Алмазное выглаживание используется для обработки закаленных и маложестких сплавов.

Дорнование применяется для обработки отверстий. Дорнование сочетает в себе возможности разных форм обработки: чистовой, упрочняющей, калибрующей и формообразующей. Последняя применяется для получения рифлений на поверхности детали.

Описанные выше способы – методы статического поверхностного деформирования.

К другим методам ППД относятся методы, основанные на динамическом (ударном) воздействии инструмента на упрочняемую поверхность. В этом случае перпендикулярно поверхности или под некоторым углом к ней в поверхностный слой внедряется инструмент. Его многочисленные удары, упорядоченные или хаотичные, оставляют на поверхности локальные пластические отпечатки, покрывающие всю поверхность. К таким методам относятся чеканка, обработка дробью, виброударная, ультразвуковая, центробежно-ударная обработка.

При использовании ППД происходит сглаживание шероховатостей, смятие гребешков, уменьшение глубины и остроты входящих углов рисок, и самое существенное, в приповерхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, которые повышают усталостную прочность, что проиллюстрировано в огромном количестве работ за более чем семидесятилетнюю историю развития этого научного направления. Эффективность этих методов для повышения

сопротивления усталости и микротвердости поверхностных слоев при нормальных температурах была отмечена и отечественными [6, 45, 57, 67, 117] и зарубежными [131, 134, 145, 150, 159, 161] исследователями.

Методы ППД относятся к классическим методам поверхностного упрочнения, которые используются в течение более полувека. В настоящее время разрабатываются новые технологии упрочнения поверхности, спектр которых достаточно широк [63]. Чаще всего совмещают одновременно, например, высокотемпературную и механическую обработки, электромеханическую и ультразвуковую технологии и т.д. Использование той или иной технологии зависит от конечной цели. Если исследователи ориентируются на повышение износостойкости, твердости, адгезионную и когезионную прочность плазменных покрытий, то в этих случаях перспективными технологиями являются лазерная обработка, ионная имплантация, электроискровое легирование, электромеханическое упрочнение при импульсной термосиловой обработке изделий [5, 27, 28, 41]. Однако возникающее при этих технологиях интенсивное тепловое воздействие приводит к формированию растягивающих остаточных напряжений, которые провоцируют хрупкое разрушение, коррозионное растрескивание и в целом оказывают негативное влияние на усталостную долговечность готового изделия. Поэтому для этих технологий важную роль играет выбор технологических режимов упрочнения, которые сохраняют достаточно высокую твердость поверхностного слоя материала после обработки и одновременно снижают отрицательные последствия наведенных растягивающих напряжений, хотя «избавиться» от них теоретически невозможно.

В настоящей диссертационной работе будут рассмотрены задачи в рамках классических технологий ППД, в результате которых наводятся сжимающие остаточные напряжения, благоприятно влияющие, например, на повышение предела выносливости упрочненных деталей по сравнению с неупрочненными.

Особую роль упрочняющие обработки поверхности играют для авиационных элементов конструкции, где наряду с требованиями высокой надежности ключевым является требование снижения веса и материалоемкости.

Одним из таких путей (в совокупности с увеличением прочности) и являются методы поверхностного пластического деформирования, которые существенно увеличивают ресурс упрочненных деталей (как гладких, так и с концентраторами напряжений) в условиях многоциклового нагружения при нормальных («комнатных») температурах, в частности увеличение предела выносливости упрочненных деталей по отношению к неупрочненным может составлять до 30 – 70%, что убедительно показано в большом числе работ [32, 44, 46, 57, 58, 63, 66, 67, 69 и многих других]. Однако в процессе эксплуатации упрочненных элементов конструкций при повышенных температурах, например в газотурбинных двигателях (ГТД), в материале возникают деформации ползучести, которые приводят к кинетике напряженно-деформированного состояния по объему детали. При этом наиболее существенно происходит перераспределение напряжений в тонком упрочненном слое, что приводит к релаксации (уменьшению по модулю) остаточных напряжений в упрочненном слое, с величиной которых и связывается положительное влияние остаточных напряжений на ресурс упрочненных изделий. Поскольку по величине остаточных напряжений можно судить о степени истощения ресурса материала, то возникает математическая проблема оценки скорости релаксации остаточных напряжений на фоне ползучести конструктивного элемента. В этой задаче поля остаточных напряжений и пластических деформаций, наведенных после процедуры упрочнения, играют роль начального напряженно-деформированного состояния. Решение задачи ползучести упрочненного элемента конструкций включает в себя этапы разработки модели реконструкции напряженно-деформированного состояния после упрочнения, выбора модели ползучести и разрушения материала и собственно решение краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочненном слое вследствие ползучести.

Важными конструктивными элементами в авиационной промышленности, авиадвигателестроении, машиностроении, нефтехимии являются трубопроводы, валы, плоские детали, при этом методы упрочнения поверхности, заложенные в соответствующие регламентные и нормативные документы, являются штатными

технологическими операциями. Например, в авиадвигателестроении до 70% деталей ГТД подвергаются поверхностному пластическому деформированию. В связи с этим проанализируем имеющиеся в настоящее время методы и средства для решения задач реконструкции и релаксации остаточных напряжений поверхностно упрочненных сплошных и полых цилиндров, тонкостенных трубопроводов и плоских деталей, которые и являются объектами дальнейшего исследования.

В настоящей диссертационной работе преследуются несколько целей. Во-первых, разрабатывается методика расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций на основе экспериментальных исследований для плоских образцов из сплава ЭП742, упрочненных ультразвуковым упрочнением (УЗУ), в условиях высокотемпературной выдержки при температуре $T = 650$ °С длительностью 100 часов, а также при одноосном и двухосном растяжении образца. Во-вторых, расчет полей остаточных напряжений и пластических деформаций как при двухстороннем упрочнении микрошариками внешней и внутренней поверхности тонкостенных трубок $\varnothing 12 \times 1$ мм из стали X18H10T, так и в состоянии поставки.

Глубокая теоретическая проработка задачи оценки напряженно-деформированного состояния в упрочненных цилиндрических деталях после процедуры упрочнения выполнена в работах [95, 97], а в публикациях [91, 96] исследуется математическая модель расчета остаточных напряжений, учитывающая влияние анизотропии поверхностного пластического упрочнения. Потребности авиадвигателестроения и энергомашиностроения стимулировали экспериментальные исследования [40, 81, 121, 124, 132, 147, 164], хотя отсутствие методов расчета начального напряженно-деформированного состояния являлось сдерживающим фактором теоретического решения задачи релаксации остаточных напряжений в условиях высокотемпературной ползучести. Поэтому сначала рассмотрим имеющиеся подходы и методы реконструкции напряженно-деформированного состояния в деталях после процедуры упрочнения.

1.1. Реконструкция напряженно-деформированного состояния цилиндрических и плоских образцов после процедуры поверхностного пластического упрочнения

Проблема реконструкции напряженно-деформированного состояния (НДС) в деталях после упрочнения является частной задачей в более общей проблеме оценки предварительного напряженного состояния, являющегося одним из важнейших факторов в расчетах на прочность, устойчивость, колебания элементов конструкций. Кроме указанных процессов упрочнения, первоначальные НДС возникают и в ряде технологических процессов: литье, сварка, термообработка, жестком соединении материалов с различными физико-механическими свойствами, сочленении втулок с натягом и других. Предварительное НДС имеется также в различных искусственных и природных материалах: биологических тканях и органах, композитных материалах после их изготовления, природных грунтах и т.д.

С одной стороны, методы расчета предварительного напряженно-деформированного состояния являются важным фактором в задачах параметрической надежности и определения остаточного ресурса элементов конструкций, с другой стороны, знание об остаточных напряжениях являются основой для создания и совершенствования методик неразрушающего контроля в различных прикладных областях и идентификации параметров в сложных композиционных материалах, медицинской диагностике и т.д. [20, 26, 123]. С точки зрения математики такого рода задачи принадлежат к классу обратных краевых задач. Для некоторых типов задач такого рода разработаны соответствующие методы, которые в частности приведены в [19, 109, 118]. Простейшие модели учета предварительного напряженного состояния, как правило, приводят к решению краевых задач (в некоторых случаях – к системам алгебраических уравнений) с измененными, но постоянными коэффициентами, но они хорошо «работают» в линейных моделях (линейной теории упругости) в условиях однородного напряженного состояния [17, 18]. Однако в большинстве случаев предварительное напряженное состояние чаще всего является

неоднородным, например, при наличии поверхностных или объемных дефектов типа трещин, включений, вмятин, полостей.

Существенно неоднородными являются поля остаточных напряжений после применения технологий поверхностного пластического деформирования [6, 21, 32, 45, 47, 65, 67, 71, 77, 81, 91, 92, 94–97, 99, 101, 102 и многие другие работы].

В случае неоднородности остаточного напряженного состояния проблема сводится к обратной (в общем случае – некорректной) задаче определения (идентификации) коэффициентов дифференциальных операторов математической модели, зависящих от компонентов тензора предварительно напряженного состояния, а если точнее – от интегральных характеристик перемещений для статических задач (ускорений – для динамических задач), которые связаны с напряжениями. Здесь возникает необходимость решения коэффициентных обратных задач, как правило, для дифференциальных операторов с привлечением вычислительных технологий таких, как метод конечных элементов, сеточные методы, методы регуляризации и другие [17, 19, 144]. Одна из самых сложных задач – определение структуры неоднородного предварительно напряженно-деформированного состояния – даже в упругой области исследована фрагментарно, в частных случаях, а для упругопластических или реономных сред эта задача не решена, да и вряд ли будет решена аналитически или численно в строгой постановке. Поэтому необходим какой-то минимум экспериментальной (корректирующей) информации, например, для задач поверхностного пластического деформирования, на основании которой можно построить соответствующую феноменологическую модель.

Перейдем теперь от анализа общей проблемы к соответствующему анализу рассматриваемой в диссертации задачи реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций после технологий поверхностного пластического деформирования.

Подходов к решению данной задачи три: экспериментальный, расчетный и расчетно-экспериментальный.

Экспериментальные методы определения остаточных напряжений условно можно разделить на механические и физические. Но термин «экспериментальные методы» не совсем верный, поскольку экспериментально определить напряжения в упрочненном слое невозможно, поскольку измерениям доступны лишь перемещения, прогибы, углы поворота, т.е. деформационные характеристики, а уже по ним из связей «напряжения – деформации» в упругой или упругопластической области можно рассчитать напряжения. Но, тем не менее, в дальнейшем будем пользоваться этим термином. Исторически наибольшее число работ посвящено экспериментальным методам. Работ в этом направлении необозримое количество, но полную картину по этому направлению исследований дают публикации [6, 29, 30, 32, 63, 66, 67, 69]. В большинстве экспериментальных методов используются разрушающие механические методы, основанные на измерении перемещений и других деформационных характеристик при снятии части поверхности, разрезке детали, высверливании и т.д. Широко используемым в прикладных и теоретических исследованиях является разрушающий метод колец и полосок, предложенный в работах С. И. Иванова [29, 30] еще в 70-х годах прошлого века. Он до сих пор является одним из основных инструментов при экспериментальном исследовании цилиндрических упрочненных деталей [66–68, 91, 92 и другие работы]. К недостаткам этого (и других) метода относится, во-первых, послойное разрушение упрочненной детали, во-вторых, он требует серьезных технических решений и временных затрат, поскольку используется электрохимическое снятие поверхностных слоев детали толщиной 5 – 10 мкм с соответствующими замерами прогиба полосок или раскрытия разрезанного кольца и последующим пересчетом напряжений в данном слое. С другой стороны, его преимуществом является возможность достаточно точного определения распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя, в зависимости от технологии упрочнения от 100 мкм до 1 мм и более. При этом определяются не только нормальные компоненты тензора остаточных напряжений (осевое и тангенциальное), но и распределение касательных напряжений [92], но определить компоненты тензора остаточных

пластических деформаций этим методом невозможно. Отметим, что методом полосок можно определить распределение двух взаимно ортогональных остаточных напряжений и в гладких деталях [30].

К другому направлению экспериментального исследования остаточных напряжений относятся неразрушающие физические методы, такие как оптические, радиополяризационные, голографические [2], акустические [35, 61], рентгеновские [16, 148], электростатические [3] и другие. Наиболее употребительным является рентгеновский метод, на основании которого разработан ряд диагностических приборов. Он основан на измерении степени деформации кристаллической решетки, однако рентгеновским методом можно определить лишь осредненные остаточные напряжения и для технологий поверхностного пластического деформирования (ППД) лишь в приповерхностном слое до 30 мкм при однородном напряженном состоянии. Учитывая, что при ППД наблюдается огромный градиент напряжений (на толщине 100 мкм он составляет 3 порядка), его применение в этом случае затруднительно. Еще одним его недостатком, как и других выше перечисленных физических методов, является относительно невысокая точность.

Суммируя вышеизложенное можно утверждать, что для построения и раскрытия связи «технологическая операция – упрочненный слой – остаточные напряжения» только чисто экспериментальных способов исследования оказывается недостаточно, хотя бы в силу того, что они позволяют определить лишь одну или две компоненты тензора остаточных напряжений, но не позволяют определить поля остаточных пластических деформаций. В результате возникает новый класс актуальных прикладных и теоретических задач, требующих использования современных методов математического моделирования с привлечением положений механики деформируемого твердого тела, дифференциальных уравнений, вычислительной механики сплошных сред и современных средств и возможностей информационных технологий уже на стадии реконструкции напряженно-деформированного состояния после процедуры упрочнения, не говоря уже о моделировании процесса релаксации

остаточных напряжений, где без информации о начальном напряженно-деформированном состоянии (после упрочнения) невозможно строго и корректно поставить краевую задачу ползучести упрочненных элементов конструкций.

Аналитические решения в задаче реконструкции НДС упрочненных конструкций даже для гладких деталей получить очень сложно и имеются лишь единичные работы в этом направлении. Так, в работе И. А. Биргера [6] для простейших конструктивных элементов и задании однородного поля остаточных деформаций в упрочненном слое фиксированной толщины удалось получить ряд модельных аналитических решений для распределения остаточных напряжений. Строгое аналитическое решение при плоском напряженном состоянии для тонкой пластины с полуэллиптическим надрезом после опережающего поверхностного пластического деформирования получено в [33] на основе аппарата теории функций комплексного переменного. Однако применение этого подхода в прикладных задачах крайне ограничено, поскольку в упрочненном слое деталей наблюдается объемное напряженное состояние. В работе [37] авторами также построено аналитическое решение для тонкой упрочненной пластины при заданном неоднородном распределении остаточных пластических деформаций. Чаще всего используются комбинированные подходы на основе аналитических и численных методов. Существенные успехи здесь достигнуты при моделировании термопластического упрочнения, где задачи сводятся либо к краевым задачам термоупругопластичности, либо к задачам термоупругости [45, 51, 72, 129]. Отметим, что в работе [129] расчетным путем установлены законы распределения остаточных (внутренних) напряжений в цилиндрических образцах из стали SAE4140 ($42CrMo_4$) и выполнена проверка их адекватности экспериментальным данным, полученных рентгеновским методом.

В связи с существенно возросшими возможностями современных информационных средств и специализированных вычислительных пакетов сформировалось направление в прямом моделировании остаточного НДС на основе численных методов с использованием МКЭ [4, 7, 8, 13, 43, 45, 76, 77, 104, 113, 122, 123, 140, 141 и многие другие работы]. Однако смоделировать в полном

объеме все параметры технологического процесса при виброударном взаимодействии дроби с деталью или при квазистатическом взаимодействии упрочняющего элемента с деталью при обкатке роликом или алмазном выглаживании практически невозможно. Поэтому полученные результаты в большинстве случаев носят качественный характер. Практически единственная попытка определения напряженно-деформированного состояния расчетным путем с учетом реальных технологических факторов реализована в диссертационной работе [43], в которой с использованием программного комплекса ANSYS/LS – DYNA [125], предназначенного для моделирования быстропротекающих нелинейных динамических процессов, смоделированы процессы обкатки роликом, алмазного выглаживания и обработки поверхности дробию. Для деталей из сплава ВТ6 в частности, например, при обработке дробию учитывался материал и диаметр микрошариков, давление воздуха, угол атаки дробию, расстояние от торца сопла до образца и другие, при этом численные значения для всех параметров соответствовали параметрам при экспериментальном определении остаточных напряжений в плоских образцах. В результате получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных, а погрешность расчетной максимальной величины сжимающих остаточных напряжений по отношению к экспериментальным составляла не более 12%, что следует признать хорошим результатом.

Отдельно отметим другой теоретический подход расчета по первоначальным деформациям, основы которого заложены в работе [6], в которой на качественном уровне при а priori заданных законах распределения остаточных пластических деформаций в приповерхностных слоях решены задачи распределения остаточных напряжений для простейших элементов конструкций (балок и пластин). Идеи работы [6] были развиты в работах [32, 67–69, 76, 77, 104–106, 111], в которых исходная задача реконструкции полей остаточных напряжений сведена к задаче фиктивной термоупругости. Суть метода состоит в замене исходных остаточных пластических деформаций на температурные в неоднородном температурном поле. Для этого задается фиктивное температурное

поле в объеме детали, температурные деформации приравняются остаточным пластическим деформациям и вычисляются коэффициенты температурного расширения, которые и являются исходными данными для задачи термоупругости. Поскольку заранее распределение остаточных пластических деформаций неизвестно, то в большинстве работ [32, 67–69, 105, 106] задают однородное поле деформаций и задача решается итерационным методом (варьируются параметры – коэффициенты температурного расширения) до минимизации среднеквадратического отклонения расчетных эпюр распределения остаточных напряжений от экспериментально измеренных. Основным недостатком указанных работ является рассмотрение изотропной теплопроводности, что дает возможность моделировать ограниченный круг технологий упрочнения (термопластическое упрочнение, гидро- и пневмодробеструйная обработка поверхности, азотирование). Если же создается неоднородное напряженное состояние по всем трем пространственным координатам (обкатка роликом, алмазное выглаживание), то решить задачу моделирования остаточного НДС этим методом проблематично.

Рассмотрим теперь феноменологические (расчетно-экспериментальные) методы, основанные на частично известной экспериментальной информации (для цилиндрических или плоских деталей одна или две компоненты тензора остаточных напряжений). В этом случае задача реконструкции остаточного НДС сводится к обратной задаче упругопластичности, решение которой без дополнительных корректирующих условий получить нельзя (о них речь пойдет далее). В случае решения этой обратной задачи мы получаем полную картину остаточных напряжений и деформаций после процедуры упрочнения.

В связи с изложенным в настоящей работе будут использованы идеи феноменологического метода, разработанного для сплошных и полых цилиндрических упрочненных образцов в работах М. Н. Саушкина и В. П. Радченко [91, 95–97, 99]. Поскольку идеи этого метода будут использованы для его обобщения на упрочненные плоские и тонкостенные цилиндрические образцы при их двустороннем упрочнении, то изложим суть метода [91, 95–97,

99] подробно. Задача рассматривается в цилиндрической системе координат (r, θ, z) . В этом подходе исходной информацией являются одна или две компоненты тензора остаточных напряжений, определяемых экспериментально. Введем обозначения: σ_θ^{res} , σ_z^{res} , σ_r^{res} – окружная, осевая и радиальная компоненты остаточных напряжений, q_θ , q_z , q_r – соответствующие компоненты остаточных деформаций. Недиagonalными компонентами тензоров остаточных напряжений и деформаций в данном методе пренебрегают в силу их незначительной величины, в работе [92] экспериментально установлено, что величина касательной компоненты в 4 ÷ 6 раз меньше, чем значение нормальных компонент в упрочненных втулках.

В предположении, что известна экспериментальная эпюра остаточных напряжений $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$ в полем цилиндрическом образце с упрочненной внешней поверхностью, в работе [99] для остальных компонент тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций полого упрочненного образца с радиусами R_1 и R_2 ($R_1 \leq r \leq R_2$) получены следующие зависимости:

$$\sigma_\theta^{res}(r) = \frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta^{res}(\xi) d\xi; \quad (1.1)$$

$$q_\theta(r) = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1+\alpha\nu)^2} r^{-\mu} \int_{R_1}^r \xi^{\mu-1} [\sigma_r^{res}(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta^{res}(\xi)] d\xi - \quad (1.2)$$

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

$$q_z(r) = \alpha q_\theta(r), \quad q_r(r) = -(1+\alpha)q_\theta(r); \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r \left\{ q_z(r) - \frac{\nu}{E} [\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)] \right\} dr; \quad (1.4)$$

$$\sigma_z^{res}(r) = E [\varepsilon_z^0 - q_z(r)] + \nu [\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)], \quad (1.5)$$

где E – модуль Юнга при температуре упрочнения; ν – коэффициент Пуассона; α – феноменологический параметр анизотропии упрочнения, методика

идентификации которого изложена в [91, 96]. При этом в случае изотропного упрочнения поверхности при $\alpha = 1$ (пневмодробеструйная обработка поверхности) эпюры напряжений σ_θ^{res} и σ_z^{res} практически совпадают [99], а в случае анизотропного упрочнения (например, при обкатке роликом) величина α может изменяться от 4 до 20 [91].

Таким образом, схема расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом образце после упрочнения его поверхности имеет следующий вид:

$$\sigma_\theta^{res}(r), \alpha \xrightarrow{(1.1)} \sigma_r^{res}(r) \xrightarrow{(1.2)} q_\theta(r) \xrightarrow{(1.3)} q_r(r), q_z(r) \xrightarrow{(1.4)} \varepsilon_z^0 \xrightarrow{(1.5)} \sigma_z^{res}(r), \quad (1.6)$$

обозначения над стрелками – номер формулы, по которым вычисляется соответствующая величина.

Из схемы (1.6) следует, что в конечном итоге компоненты σ_z^{res} , σ_r^{res} , q_θ , q_z , q_r определяются через компоненту σ_θ^{res} и параметр анизотропии упрочнения α . Однако экспериментально определить зависимость $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$ возможно лишь в тонком упрочненном слое (области сжатия), поэтому для реализации схемы (1.6) ее необходимо экстраполировать на всю область $r \in [R_1, R_2]$. В работах [91, 95, 97, 99] даны следующие рекомендации по выбору соответствующей аппроксимации для различных типов цилиндрических тел:

- случай упрочнения поверхности сплошного цилиндра ($R_1 = 0$):

$$\sigma_\theta^{res}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(R_2 - h^* - r)^2}{b^2}\right); \quad (1.7)$$

- случай упрочнения внешней поверхности полого цилиндра ($R_2 < \infty$):

$$\sigma_\theta^{res}(r) = \left[\sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(R_2 - h^* - r)^2}{b^2}\right) \right] \frac{r - R_1}{l}; \quad (1.8)$$

- случай упрочнения кругового концентратора плиты ($R_2 \gg R_1$):

$$\sigma_{\theta}^{res}(r) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{(R_1 - r)^2}{l^2}\right) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(R_2 - r)^2}{b^2}\right), \quad (1.9)$$

где σ_0 , σ_1 , h^* , b – параметры, процедура идентификации которых изложена в [91, 97, 99]; $l=1$ – масштабный коэффициент, имеющий размерность линейного размера.

В формулах (1.7), (1.8) параметры σ_0 , σ_1 , h^* , b определяются из условия самоуравновешенности эпюры $\sigma_{\theta}^{res} = \sigma_{\theta}^{res}(r)$:

$$\int_{R_1}^{R_2} \sigma_{\theta}^{res}(r) dr = 0 \quad (1.10)$$

и значений этой функции в характерных точках $h=0$, $h=h^*$, $h=h_0$, где $h=R_2-r$ – глубина упрочненного слоя (см. рис.1.1). Отметим, что при $h^*=0$ локальный экстремум зависимости $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(h)$ находится на упрочненной поверхности цилиндра.

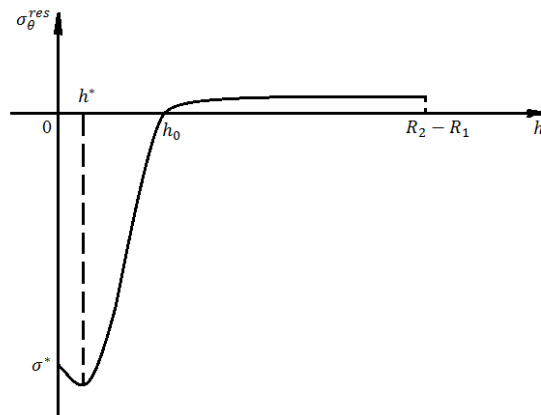


Рис. 1.1. Схематический график экспериментальной эпюры $\sigma_{\theta}^{res} = \sigma_{\theta}^{res}(r)$ в цилиндрическом изделии

В случае изотропного упрочнения поверхности $\alpha=1$ и схема (1.6) реализуется в явном виде. В случае же анизотропного упрочнения при $\alpha \neq 1$ в качестве исходных данных требуется две экспериментально полученные эпюры: $\sigma_{\theta}^{res} = \sigma_{\theta}^{res}(r)$ и $\sigma_z^{res} = \sigma_z^{res}(r)$. Тогда для определения параметра анизотропии производится вариация значения α и повторение схемы расчета (1.6) вплоть до

достижения минимальной величины Δ_z отклонения расчетных значений осевой компоненты тензора остаточных напряжений $\sigma_z^{res}(r_k)$ от экспериментальных значений $\sigma_z^{res*}(r_k)$:

$$\Delta_z = \left[\frac{\sum_{k=1}^N [\sigma_z^{res}(r_k) - \sigma_z^{res*}(r_k)]^2}{\sum_{k=1}^N [\sigma_z^{res*}(r_k)]^2} \right]^{1/2}$$

(N – число точек дискретизации радиуса r_k в упрочненном слое).

Выполненный анализ методов реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций позволяет констатировать, что наиболее приемлемыми являются феноменологические модели типа (1.1) – (1.10), поскольку они непосредственно привязаны к реальным экспериментальным данным для одной или двух компонент тензора остаточных напряжений.

Однако эти методы разработаны лишь для сплошных и полых цилиндрических изделий с односторонним упрочнением внешней поверхности. Поэтому требуется их модификация для цилиндрических полых образцов при одновременном упрочнении внутренней и внешней поверхности. Также представляет интерес определение и реконструкция технологических остаточных напряжений цилиндрических изделий в состоянии поставки, поскольку они существенно влияют на ресурс изделий в процессе эксплуатации в поле внешних температурно-силовых нагрузок. Что же касается проблемы реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния для упрочненных гладких плоских деталей, то феноменологические модели типа (1.1) – (1.10) для них полностью отсутствуют. Перечисленные выше задачи и составляют часть тематики настоящей диссертационной работы.

Отдельно отметим еще следующий факт необходимости решения задачи реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния с построением аналитических решений типа (1.1) – (1.9) для компонент тензоров остаточных напряжений. Как уже отмечалось выше, теоретическими и экспериментальными исследованиями в ранних работах [6, 33, 38, 44–49, 80, 117]

установлено, что поверхностное пластическое деформирование существенно увеличивает предел выносливости деталей в условиях многоциклового нагружения (наряду с увеличением характеристик микротвердости и износостойкости [84, 85]), что в первую очередь связано с наведенными сжимающими напряжениями. Данный вопрос поднимался и в современных публикациях в последнее десятилетие как в работах отечественных ученых [14, 32, 39, 67, 69, 151], так и в работах зарубежных исследователей [124, 131, 134, 145, 150, 151, 159, 161], в которых также утверждается, что основную роль в повышении сопротивления усталости играют как раз сжимающие остаточные напряжения. Кроме того, в существующих феноменологических теориях для описания повышения сопротивления усталости упрочненных деталей по отношению к неупрочненным в соответствующие критериальные зависимости [32, 67, 66, 69] входит интегральная величина от остаточных напряжений по глубине слоя, что еще раз подчеркивает необходимость в построении математических моделей реконструкции остаточного напряженного состояния типа (1.1) – (1.9).

1.2. Экспериментальные и теоретические исследования релаксации остаточных напряжений в упрочненных элементах конструкций в условиях ползучести

Как указывалось в пункте 1.1, поверхностное упрочнение деталей повышает характеристики усталостной прочности, микротвердости, шероховатости. Но когда речь идет о многоцикловой усталости, то в основном подразумеваются условия эксплуатации при нормальных (не повышенных) температурах. Однако при эксплуатации элементов конструкций энергетического оборудования, газотурбинных двигателей в материале изделий возникают деформации ползучести, которые приводят к перераспределению напряжений по объему, в том числе и в упрочненном слое, что вызывает релаксацию остаточных напряжений (уменьшение их величины по модулю), а именно с их величиной и связывается благоприятное воздействие упрочнения на многие показатели надежности.

Поскольку большинство элементов конструкций в машиностроительном, аэрокосмическом, энергетическом и других промышленных комплексах подвергаются значительным температурно-силовым нагрузкам, приводящим к ползучести материала, то возникает актуальная и востребованная задача расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое деталей. По их величине можно судить об их эффективности на данный момент и сделать определенный вывод относительно остаточного ресурса по параметрическому критерию отказа (величине остаточных напряжений).

Сложность данной задачи в математическом плане обусловлена существенной нелинейностью уравнений состояния ползучести материалов, связывающих скорости деформаций с напряжениями, а с прикладной точки зрения отметим кратное усложнение экспериментальных исследований по определению остаточных напряжений в условиях ползучести в заданные временные сечения. Тем более, что здесь нужно учитывать нелинейное «суммирование» остаточного напряженного состояния с «рабочими» напряжениями от внешних температурно-силовых воздействий.

В научной практике в настоящее время в основном имеются лишь экспериментальные работы по исследованию релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных деталях в условиях ползучести, но они представлены в крайне ограниченном количестве и в основном в условиях термоэкспозиции (чисто температурная выдержка без механических нагрузок) либо при одноосном нагружении при высоких температурах.

Вопрос о релаксации остаточных напряжений поднимался в экспериментальных исследованиях Л. Б. Гецова [22], И. Г. Гринченко [25], Б. А. Кравченко [45], И. В. Кудрявцева [46, 47], А. А. Маталина [58], В. П. Радченко с соавторами [80, 81], В. И. Цейтлиным и О. В. Колотниковой [40, 121], D. J. Buchanan и R. John [132], В. J. Foss с соавторами [137], J. Hoffmann с соавторами [142], M. Khadraoui с соавторами [147], O. Vohringer [163], L. Xie с соавторами [165] и другие. Приведем типичные результаты, полученные в экспериментальных исследованиях в условиях чистой термоэкспозиции.

Так, в образцах из стали 2Х13 при нагревании до температуры $T = 430$ °С [58] сжимающие остаточные напряжения снижаются по модулю на 78% уже через 20 часов. А релаксация остаточных напряжений сплава ХН77ТЮР при $T = 700$ °С через 8 часов составила 54%, причем особо интенсивное снижение остаточных напряжений по модулю происходило в первые 2 часа [25]. Та же ситуация описывается в [25] для сплава ХН70ВМТЮ (ЭИ617) при $T = 700$ °С, где остаточные напряжения релаксировали на 90%.

О. В. Колотникова в работе [40] описывает, что при упрочнении цилиндрических деталей из сплава ЖС6КП микрошариками на поверхности упрочненного слоя сформировались сжимающие остаточные напряжения величиной -1000 МПа, которые при выдержке при температуре $T = 650$ °С снизились на 59%, а при $T = 800$ °С релаксация составила 85%. Б. А. Кравченко, В. Г. Круцило [44] при исследовании упрочненного микрошариками сплава ЖС6Ф обнаружили, что сформированные остаточные напряжения сжатия величиной -1100 МПа через 2 часа в атмосфере аргона при $T = 950$ °С релаксировали до -750 МПа, а через 50 часов практически полностью исчезают. Аналогичные результаты описаны в других публикациях [23, 25, 48, 71, 127, 143, 147, 152].

Интересные результаты получены в экспериментальных работах [80, 85, 87], в которых выполнен комплекс исследований влияния термоэкспозиции на релаксацию остаточных напряжений, микротвердость, шероховатость и размер зерна в нормальном сечении для цилиндрических образцов из сплавов Д16Т и В95. Основные выводы в этих работах следующие: при испытаниях упрочненных образцов на усталость и ползучесть ($T = 125$ °С) при термоэкспозиции наблюдается снижение микротвердости вплоть до состояния неупрочненных образцов и падение величин приращения предела выносливости, что связывается авторами с релаксацией остаточных напряжений в поверхностном слое при термоэкспозиции. Это еще раз подтверждает выдвинутую в [86, 87] гипотезу о том, что ключевую роль в повышении характеристик поверхностного слоя

(микротвердости) играют остаточные напряжения, поскольку их релаксация в процессе ползучести приводит к значениям микротвердости неупрочненных образцов. Также отмечается, что пневмодробеструйная обработка повышает значения параметров шероховатости поверхностного слоя, при этом термоэкспозиция и ползучесть под действием самоуравновешенных остаточных напряжений не оказывают влияния на данные параметры.

Решение проблемы экспериментального исследования релаксации остаточных напряжений даже при одноосном растяжении (не говоря о других видах напряженного состояния) поверхностно упрочненных образцов в условиях высокотемпературной ползучести сталкивается с серьезными трудностями.

Во-первых, трудоемкость процедуры, поскольку необходимо «измерять» остаточные напряжения в заранее заданное время, а надежные результаты дают лишь разрушающие экспериментальные методы. Использование же, например, неразрушающего метода – рентгеновского метода затруднительно, поскольку данный метод (как и другие методы этого типа) дают лишь усредненные значения остаточных напряжений по небольшой глубине упрочненного слоя (до 30 – 40 мкм).

Вторая причина более серьезная и связана с наличием естественного разброса деформации ползучести по пространственной и временной координатам и его влиянием на процесс релаксации остаточных напряжений в локальных областях по длине упрочненного образца. Детальный анализ этой проблемы выполнен в работе [83], в которой исследовано влияние стохастической неоднородности деформации ползучести на процесс релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полом цилиндрическом образце из сплава Д16Т при $T = 125$ °С после дробеструйной обработки в условиях одноосного растяжения. Основным результатом состоит в том, что получены не имеющие аналогов экспериментальные данные распределения локальной деформации ползучести для упрочненного полого цилиндра по пространственной координате с базой около 6 мм при длине рабочей части 65 мм. Установлено, что деформации локальных участков в пределах одного образца отличаются в 3–4

раза, поэтому применение даже разрушающих методов определения остаточных напряжений вызывает определенные трудности. Например, при использовании метода колец и полосок [29, 31, 66–68] из образца вырезаются полоски вдоль образующей и кольца, в которых делается разрез, и при послойном электрохимическом травлении упрочненного слоя по прогибу полоски (элементарной балки) и углу раскрытия кольца находятся расчетным путем окружная и осевая компоненты остаточных напряжений, а затем результаты осредняются по всем партиям полосок и колец. И если в упругопластической области вследствие малого разброса неупругой деформации (в сравнении с деформаций ползучести) вдоль образца метод колец и полосок дает устойчивые результаты, то в условиях ползучести при разбросе деформации ползучести в 300–400% по пространственной координате результаты будут зависеть от места вырезки кольца. К тому же и деформация полоски по ее длине будет крайне неоднородной, что сказывается на ее прогибе. Поэтому результаты осреднения по всем партиям колец и полосок могут приводить к противоречивым результатам по определению остаточных напряжений, что и получено в работе [86]. По всей видимости, в условиях ползучести необходимо модифицировать и разрушающие методы определения остаточных напряжений, считаясь с фактором существенного разброса реологической деформации по длине образце.

Сделаем краткий обзор работ теоретического характера, касающихся методов расчета релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести. В мировой научной практике существуют единичные работы в этом направлении, а систематические исследования ведутся в течение более трех десятков лет лишь в Самарском государственном техническом университете. Одна из первых работ принадлежит В. И. Цейтлину и О. В. Колотниковой [121], в которой исходная задача для поверхностно упрочненного цилиндра сведена к одномерной задаче для осевого остаточного напряжения. Здесь сплошной цилиндрический образец разбивался на вложенные друг в друга (кроме центрального) полые цилиндрические тела, соединенные с идеальной адгезией, и далее, используя начальное распределение осевой компоненты напряжений по радиусу, решалась

задача ползучести для составного статически неопределенного стержня. Недостатком является не учет остальных компонент: окружной и радиальной.

Глубокий теоретический анализ задачи оценки напряжённо-деформированного состояния упрочнённых цилиндрических изделий в условиях термоэкспозиции либо осевого растяжения выполнен в работах [95, 97], в которых разработан приближённый метод решения краевой задачи о релаксации остаточных напряжений в упрочнённом цилиндрическом образце, основанный на декомпозиции конструкции на тонкий упрочнённый слой и «тело» конструкции. При этом предполагалось, что упрочнённый слой «наклеен» на поверхность цилиндра и деформируется вместе с ним в режиме «жёсткого» нагружения при заданных значениях деформации на поверхности цилиндра.

Прямой метод решения краевой задачи о релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести для упрочнённого цилиндрического образца при растяжении представлен в работе [98]. Выполнена экспериментальная проверка предложенной методики для упрочнённых образцов из сплава ЭИ691 при температуре 400 °С в условиях термоэкспозиции. Применение метода [98] позволило в работе [82] теоретически описать процесс релаксации в цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП при $T = 800$ °С после пневмодробеструйной обработки при двух значениях растягивающей нагрузки (150 МПа и 250 МПа), а также в условиях термоэкспозиции. Получены зависимости для окружной, осевой и радиальной компонент тензора остаточных напряжений на интервале времени [0; 200] час. Выполнена проверка адекватности метода экспериментальным данным для осевой компоненты. Аналогичные исследования для четырех уровней растягивающей нагрузки выполнены для сплава Д16Т при $T = 250$ °С выполнены в работе [86], при этом использована не детерминированная, а стохастическая модель реологического деформирования этого сплава.

Задача существенно усложняется для оценки релаксации остаточных напряжений для других, более сложных видов напряженного состояния.

Используя подход, разработанный для случая растяжения упрочненного образца, в работах В. П. Радченко и В. В. Цветкова [100, 156, 157] построены решения для поверхностно упрочненных полых и сплошных цилиндрических образцов при действии осевого растяжения, крутящего момента и внутреннего давления при различных их комбинациях, при этом для решения задачи ползучести при этих видах напряженного состояния использовалась методика работ [101, 120]. В этих работах показано, что процессы релаксации остаточных напряжений существенно зависят от вида напряженного состояния, но исследованы эти процессы только для одностороннего упрочнения (внешней поверхности) цилиндрического полого образца.

Поскольку одной из целей настоящей работы является описание процесса релаксации остаточных напряжений в тонких цилиндрических оболочках при одновременном упрочнении внешней и внутренней поверхностей образцов, то подробно изложим методику решения аналогичной задачи при одностороннем упрочнении при действии внутреннего давления, растяжения и кручения согласно [157], поскольку дальнейшие исследования связаны будут с обобщением этой методики на двухстороннее упрочнение.

Нижеследующее изложение выполнено в соответствии с работой [157], в которой задача решается в цилиндрической системе координат для полого образца с радиусами R_1 и R_2 ($R_1 < R_2$). На первом этапе выполняется реконструкция полей остаточных напряжений и пластических деформаций после процедуры упрочнения. Обозначим через σ_r^{res} , σ_θ^{res} , σ_z^{res} радиальное, окружное и осевое остаточные напряжения, а через q_r , q_θ , q_z – соответствующие компоненты тензора остаточных пластических деформаций. Недиagonalными компонентами тензоров остаточных напряжений и деформаций в [157] пренебрегают в силу их малости по сравнению с нормальными.

Соответствующая модель реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния после упрочнения согласно [99, 157] приведена выше и задается формулами (1.1) – (1.10), а схема ее релаксации – формулой (1.6).

Рассмотрим теперь предложенный в [157] метод решения задачи ползучести в общем виде для односторонне упрочненного полого цилиндра при действии осевой силы F , крутящего момента M и внутреннего давления q . Постановка задачи включает следующие соотношения:

– уравнения равновесия:

$$r \frac{d\sigma_r^0(r,t)}{dr} + \sigma_r^0(r,t) = \sigma_\theta^0(r,t); \quad (1.11)$$

$$2\pi \int_{R_1}^{R_2} \sigma_z^0(r,t) r dr = F; \quad (1.12)$$

$$2\pi \int_{R_1}^{R_2} \tau_0(r,t) r^2 dr = M, \quad (1.13)$$

где σ_r^0 , σ_θ^0 , σ_z^0 , и τ_0 – радиальная, окружная, осевая и касательная компоненты тензора напряжений соответственно для данных видов нагружения;

– уравнения совместности деформаций:

$$r \frac{d\varepsilon_\theta(r,t)}{dr} + \varepsilon_\theta(r,t) = \varepsilon_r(r,t), \quad (1.14)$$

где ε_θ , ε_r – окружная и радиальная компоненты тензора полных деформаций соответственно;

– гипотеза плоских сечений:

$$\varepsilon_z(r,t) = \varepsilon_z(t), \quad (1.15)$$

где ε_z – осевая компонента тензора полных деформаций;

– гипотеза прямых радиусов:

$$\gamma(r,t) = r\theta(t), \quad (1.16)$$

где γ – полная деформация сдвига, θ – относительный угол закручивания;

– краевые условия:

$$\forall t \geq 0 \quad \sigma_r^0(r,t) \Big|_{r=R_1} = -q; \quad \sigma_r^0(r,t) \Big|_{r=R_2} = 0. \quad (1.17)$$

После проведения процедуры упрочнения в момент времени $t = 0 - 0$ напряженно-деформированное состояние упрочненного образца будет определяться тензором остаточных напряжений

$$\sigma_{ij}^0(r, 0 - 0) = \begin{pmatrix} \sigma_z^{res}(r) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^{res}(r) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_r^{res}(r) \end{pmatrix},$$

компоненты которого определяются по схеме (1.6), и тензором полных деформаций

$$\varepsilon_{ij}(r, 0 - 0) = \begin{pmatrix} \varepsilon_z(r, 0 - 0) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\theta(r, 0 - 0) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_r(r, 0 - 0) \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_z(r, 0 - 0) &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z^{res}(r) - \nu (\sigma_\theta^{res}(r) + \sigma_r^{res}(r)) \right] + q_z(r); \\ \varepsilon_\theta(r, 0 - 0) &= \frac{1}{E} \left[\sigma_\theta^{res}(r) - \nu (\sigma_z^{res}(r) + \sigma_r^{res}(r)) \right] + q_\theta(r); \\ \varepsilon_r(r, 0 - 0) &= \frac{1}{E} \left[\sigma_r^{res}(r) - \nu (\sigma_\theta^{res}(r) + \sigma_z^{res}(r)) \right] + q_r(r). \end{aligned}$$

Рассмотрим сначала режим температурной нагрузки с температуры $T = T_0$ (для которой модуль Юнга материала $E = E_0$) до температуры $T = T_1$ (для которой $E = E_1$). Полагая, что при температурном нагружении не возникает дополнительных пластических деформаций, к моменту полного прогрева цилиндрического образца (условно считаем, что он произошел мгновенно) соотношение (1.2) при $T = T_1$ можно записать в виде

$$\begin{aligned} q_\theta(r) &= \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E_1(1+\alpha\nu)^2} r^{-\mu} \int_{R_1}^r \xi^{\mu-1} \frac{E_1}{E_0} \left[\sigma_r^{res}(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta^{res}(\xi) \right] d\xi - \\ &- \frac{1+\nu}{E_1(1+\alpha\nu)} \frac{E_1}{E_0} \left[(1-\nu)\sigma_\theta^{res}(r) - \nu\sigma_r^{res}(r) \right], \quad \mu = \frac{2+\alpha}{1+\alpha\nu}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

поскольку величина $q_\theta = q_\theta(r)$ не зависит от температуры. Формально соотношение (1.2) выполняется при модуле Юнга E_1 , если все эпюры остаточных

напряжений после процедуры упрочнения умножить на коэффициент E_1/E_0 . Таким образом, из (1.18) получаем распределение остаточных напряжений при $T = T_1$. Отметим, что температурные деформации не учитываются, поскольку предполагается, что прогрев образца произошел мгновенно, а однородное температурное поле приводит лишь к объемному изменению геометрии образца, не влияя на напряженное состояние.

Далее, пусть в момент времени $t = 0 + 0$ образец подвергается действию осевой силы F , крутящего момента M и внутреннего давления q , которые не вызывают дополнительных пластических деформаций. Вследствие действия внешних нагрузок в образце возникают «рабочие» напряжения, соответствующие упругому решению краевой задачи. При этом происходит ступенчатое изменение компонент тензора напряжений на величину «рабочих» напряжений:

$$\sigma_{ij}^0(r, 0+0) = \begin{pmatrix} \sigma_z^0(r, 0+0) & \tau_0(r, 0+0) & 0 \\ \tau_0(r, 0+0) & \sigma_\theta^0(r, 0+0) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_r^0(r, 0+0) \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_z^0(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_z^{res}(r) + \frac{F}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}; \\ \sigma_\theta^0(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_\theta^{res}(r) + \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right]; \\ \sigma_r^0(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_r^{res}(r) + \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right]; \\ \tau_0(r, 0+0) &= \frac{M}{J} r, \quad J = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r^3 dr = \frac{\pi(R_2^4 - R_1^4)}{2}, \end{aligned} \quad (1.19)$$

и аналогичное изменение компонент тензора полных деформаций:

$$\varepsilon_{ij}(r, 0+0) = \begin{pmatrix} \varepsilon_z(r, 0+0) & \frac{1}{2}\gamma(r, 0+0) & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma(r, 0+0) & \varepsilon_\theta(r, 0+0) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_r(r, 0+0) \end{pmatrix}, \quad (1.20)$$

где

$$\varepsilon_z(r, 0+0) = \frac{1}{E_1} \left[\sigma_z^0(r, 0+0) - \nu (\sigma_\theta^0(r, 0+0) + \sigma_r^0(r, 0+0)) \right] + q_z(r);$$

$$\varepsilon_\theta(r, 0+0) = \frac{1}{E_1} \left[\sigma_\theta^0(r, 0+0) - \nu (\sigma_z^0(r, 0+0) + \sigma_r^0(r, 0+0)) \right] + q_\theta(r);$$

$$\varepsilon_r(r, 0+0) = \frac{1}{E_1} \left[\sigma_r^0(r, 0+0) - \nu (\sigma_\theta^0(r, 0+0) + \sigma_z^0(r, 0+0)) \right] + q_r(r);$$

$$\gamma(r, 0+0) = \frac{\tau_0(r, 0+0)}{G_1}, \quad G_1 = \frac{E_1}{2(1+\nu)}.$$

Здесь J – момент инерции сечения относительно оси стержня, G_1 – модуль сдвига материала при температуре $T = T_1$.

Тензоры напряжений (1.19) и деформаций (1.20), задающие исходное напряженно-деформированное состояние после упрочнения в момент приложения нагрузки $t = 0 + 0$, являются начальными данными для краевой задачи релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести.

Опишем теперь процесс релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести при температуре $T = T_1$. Компоненты тензора деформаций в любой момент времени t с учетом (1.15), (1.16) можно представить в виде

$$\varepsilon_z(t) = e_z(r, t) + q_z(r) + p_z(r, t);$$

$$\varepsilon_\theta(t) = e_\theta(r, t) + q_\theta(r) + p_\theta(r, t);$$

$$\varepsilon_r(t) = e_r(r, t) + q_r(r) + p_r(r, t);$$

(1.21)

$$r\theta(t) = \gamma^e(r, t) + \gamma^p(r, t),$$

где $e_z, e_\theta, e_r, \gamma^e$ – упругие деформации; $p_z, p_\theta, p_r, \gamma^p$ – компоненты тензора деформации ползучести.

Реологические компоненты в начальный момент времени во всех точках конструкции $r \in [R_1, R_2]$ равны нулю:

$$p_z(r, 0) = 0; \quad p_\theta(r, 0) = 0; \quad p_r(r, 0) = 0; \quad \gamma^p(r, 0) = 0. \quad (1.22)$$

Для описания процесса релаксации напряжений систему (1.21) необходимо разрешить относительно напряжений σ_z^0 , σ_θ^0 , σ_r^0 , τ_0 , что и является целью дальнейшего исследования.

Запишем закон Гука для упругих деформаций:

$$\begin{aligned} e_z(r, t) &= \frac{1}{E_1} \left[\sigma_z^0(r, t) - \nu (\sigma_\theta^0(r, t) + \sigma_r^0(r, t)) \right]; \\ e_\theta(r, t) &= \frac{1}{E_1} \left[\sigma_\theta^0(r, t) - \nu (\sigma_z^0(r, t) + \sigma_r^0(r, t)) \right]; \\ e_r(r, t) &= \frac{1}{E_1} \left[\sigma_r^0(r, t) - \nu (\sigma_\theta^0(r, t) + \sigma_z^0(r, t)) \right]; \end{aligned} \quad (1.23)$$

$$\gamma^e(r, t) = \frac{\tau_0(r, t)}{G_1}.$$

Используя (1.23), (1.21), (1.11) и (1.14), в работе [157] получено дифференциальное уравнение для компоненты σ_r^0 :

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_r^0(r, t)}{dr^2} + 3r \frac{d\sigma_r^0(r, t)}{dr} = g(r, t), \quad (1.24)$$

решение которого имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_r^0(r, t) &= \frac{qR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right] + \frac{1}{2} \int_{R_1}^r \frac{g(\xi, t)}{\xi} d\xi + \\ &+ \frac{1}{2r^2} \left[\frac{r^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\int_{R_1}^{R_2} g(\xi, t) \xi d\xi - R_2^2 \int_{R_1}^{R_2} \frac{g(\xi, t)}{\xi} d\xi \right) - \int_{R_1}^r g(\xi, t) \xi d\xi \right], \end{aligned} \quad (1.25)$$

где

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

С учетом (1.25) получены выражения и для остальных компонент тензор напряжений угла поворота θ [157]:

$$\sigma_{\theta}^0(r,t) = \frac{d}{dr} \left[r \sigma_r^0(r,t) \right], \quad (1.26)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_z(t) = & \frac{F}{\pi(R_2^2 - R_1^2)E_1} + \\ & + \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r \left\{ q_z(r) + p_z(r,t) - \frac{\nu}{E_1} \left[\sigma_r^0(r,t) + \sigma_{\theta}^0(r,t) \right] \right\} dr, \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$\sigma_z^0(r,t) = E_1 \left[\varepsilon_z(t) - q_z(r) - p_z(r,t) \right] + \nu \left[\sigma_{\theta}^0(r,t) + \sigma_r^0(r,t) \right]. \quad (1.28)$$

$$\theta(t) = \frac{M}{GJ} + \frac{2\pi}{J} \int_{R_1}^{R_2} \gamma^p(r,t) r^2 dr. \quad (1.29)$$

$$\tau_0(r,t) = G_1 \left[r \theta(t) - \gamma^p(r,t) \right]. \quad (1.30)$$

Для реализации расчетных формул (1.25) – (1.30) необходимо знать компоненты тензора деформации p_r , p_{θ} , p_z и γ^p , вычисление которых производится на основании использования соответствующей теории ползучести, обоснование выбора которой будет дано далее.

Пусть теперь в момент времени $t = t^* + 0$ после ползучести производится (мгновенно) температурная разгрузка образца с температуры $T = T_1$ до $T = T_0$. Поскольку полагается, что за время температурной разгрузки пластические деформации и накопленные компоненты деформации ползучести не изменяются, для того чтобы получить остаточные напряжения в момент времени $t = t^* + 0$, достаточно полученные к моменту времени $t = t^* - 0$ компоненты тензора напряжений умножить на коэффициент E_0/E_1 (обратный к коэффициенту при температурной нагрузке), а при последующей полной силовой разгрузке ($F = M = q = 0$) из полученных компонент тензоров напряжений вычесть упругие составляющие, задаваемые вторыми слагаемыми в (1.19). В итоге получим остаточное напряженное состояние после полной температурно-силовой разгрузки упрочненного образца.

Весь изложенный выше материал относился к обзору работ, посвященных цилиндрическим упрочненным образцам. В связи с тем, что вопросы релаксации остаточных напряжений при ползучести практически не разрабатывались, теоретические исследования по данной проблеме находятся на невысоком уровне. По-видимому, это является основной причиной отсутствия блока релаксации (собственно, как и блока реконструкции после упрочнения) остаточных напряжений упрочненных элементов конструкций в современных мощных вычислительных комплексах. В связи с этим для численной реализации методик решения задач реконструкции и релаксации остаточных напряжений приходится разрабатывать авторское программное обеспечение. Здесь можно отметить программный комплекс Strelax [160], автоматизирующий процесс реконструкции напряженно-деформированного состояния в упрочненных цилиндрах с последующей возможностью расчета кинетики остаточных напряжений в условиях ползучести при чистой термоэкспозиции и в случае осевого растяжения, а в работе [162] разработан программный комплекс T-jump для учета изменения полей остаточных напряжений при ступенчатом изменении температуры. Заслуживает внимания и программный комплекс ComplexStressRelax [133], позволяющий реализовывать все указанные ранее в [160, 162] функции, но при более сложных видах напряженного состояния (термоэкспозиция, осевое растяжение, кручение и их комбинации).

Что касается исследования упрочненных призматических образцов, пластин, то здесь методы реконструкции и релаксации остаточных напряжений, аналогичные рассмотренным для цилиндрических образцов, просто отсутствуют. Разрешение этой проблемы является одной из основных задач в настоящей диссертационной работе.

1.3. Выбор реологической модели деформирования материалов

Как следует из обзора в пунктах 1.1 и 1.2, важным элементом реализации методов расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненных деталях при высоких температурах является выбор теории ползучести.

В настоящее время выбор определяющих соотношений для описания реологических свойств и разрушения материала достаточно широк. В частности, их широкий спектр представлен в монографиях Б. В. Горева и А. Ф. Никитенко [133], А. М. Локощенко [52], Н. Н. Малинина [56], А. Ф. Никитенко [62], Ю. Н. Работнова [74, 75], В. П. Радченко и Ю. А. Еремина [79], Ю. П. Самарина и Я. М. Клебанова [107], Ю. П. Самарина [108], О. В. Соснина, J. Betten [130] и многих других.

В решении задач ползучести механики упрочненных конструкций можно использовать любую реологическую модель, адекватно описывающую поведение конкретного материала. Не выполняя детального анализа приведенных теорий ползучести, отметим, что в настоящей диссертационном исследовании в качестве базовой реологической модели используется теория неполной обратимости деформации ползучести Ю. П. Самарина [108], разработанная для первой и второй стадий и обобщенная на случай третьей стадии ползучести и разрушения материала в работе В. П. Радченко и Ю. А. Еремина [79].

Данная теория основывается на принципе суперпозиции упругой, пластической деформации и деформации ползучести и введении скалярного параметра поврежденности энергетического типа. Для описания стадии разупрочнения материала в условиях одноосного нагружения принимается гипотеза, согласно которой параметр поврежденности материала полагается пропорциональным линейной комбинации работы истинного напряжения (напряжения, отнесённого к площади поперечного сечения образца с учётом микроповреждений) на деформации ползучести. Уравнения состояния энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности (без учёта упругой и пластических деформаций) в условиях одноосного напряжённого состояния имеют вид [79, 108]:

$$p = u + v + w; \quad (1.31)$$

$$\begin{cases} u = \sum_{k=1}^s u_k, \\ \dot{u}_k = \lambda_k [a_k \sigma^n - u_k]; \end{cases} \quad (1.32)$$

$$\begin{cases} v = \sum_{k=1}^s v_k, \\ \dot{v}_k = \begin{cases} \lambda_k [b_k \sigma^n - v_k], & b_k \sigma^n > v_k, \\ 0, & b_k \sigma^n \leq v_k; \end{cases} \end{cases} \quad (1.33)$$

$$\dot{w} = c \sigma^m; \quad (1.34)$$

$$\sigma = \sigma_0 (1 + \omega); \quad (1.35)$$

$$\dot{\omega} = \beta \sigma \dot{p}. \quad (1.36)$$

Здесь p – деформация ползучести; u , v , w – вязкоупругая, вязкопластическая и вязкая составляющие деформации ползучести соответственно; ω – параметр поврежденности; σ_0 , σ – номинальное и истинное напряжения соответственно; β – параметр модели, который позволяет описать процесс разупрочнения материала на деформации ползучести и задается степенной аппроксимацией вида

$$\beta = \alpha_1 (\sigma_0)^{m_\alpha}; \quad (1.37)$$

s , λ_k , a_k , b_k , c , m , α_1 , m_α – константы модели, при помощи которых описываются первая, вторая и третья стадии ползучести и ее обратимая часть после полной или частичной разгрузки.

В качестве критерия разрушения принимается величина

$$\Omega(t^*) = \int_0^{t^*} \frac{\sigma dp}{A_*} = 1, \quad (1.38)$$

где $A_* = A(t^*)$ – критическая величина работы истинного напряжения на деформации ползучести, по достижению которой в момент времени $t = t^*$ происходит разрушение материала (феноменологический параметр). Материал находится в неразрушенном состоянии при $\Omega < 1$ и разрушается при выполнении (1.38). Для критической величины работы, вообще говоря, справедлива степенная аппроксимация

$$A_* = A_1 (\sigma_0)^{m_A}, \quad (1.39)$$

где A_1 , m_A – параметры. В частных случаях возможно выполнение $m_A = 0$ и $A_* = A_1 = \text{const}$.

Значения материальных констант λ_k , a_k , b_k , c , m , α_1 , m_α , A_1 , m_A модели (1.31) – (1.39) определяются согласно работе [79] по серии одноосных стационарных кривых ползучести при $\sigma_0 = \text{const}$ вплоть до разрушения.

Отметим некоторые частные случаи для соотношений (1.31) – (1.37) при постоянном напряжении $\sigma_0 = \text{const}$. В случае отсутствия третьей стадии ползучести ($\omega = 0$) имеем следующую аналитическую зависимость для деформации ползучести:

$$p(t) = \sum_{k=1}^s (a_k + b_k) (1 - e^{-\lambda_k t}) (\sigma_0)^n + c (\sigma_0)^m t. \quad (1.40)$$

В случае отсутствия первой стадии ползучести ($u = 0$, $v = 0$), но наличия третьей стадии, интегрирование соотношений (1.31) – (1.37) при $\sigma_0 = \text{const}$ дает следующие зависимости для деформации ползучести

$$p(t) = -\frac{1}{m\alpha\sigma_0} \ln \left| 1 - \alpha mc (\sigma_0)^{m+1} t \right| \quad (1.41)$$

и работы

$$A(t) = \int_0^t \sigma(t) dp(t) = \frac{1}{\alpha} \left[\left(1 - \alpha mc (\sigma_0)^{m+1} t \right)^{-1/m} - 1 \right]. \quad (1.42)$$

Как известно, большинство реальных деталей машин и механизмов в условиях эксплуатации подвержено действию сложного напряженного состояния. Поэтому в общем случае необходимо иметь реологические модели, которые позволяют описывать ползучесть материалов при сложном напряженном состоянии.

Согласно [79], уравнения состояния модели (1.31) – (1.37) при введении скалярного параметра поврежденности на случай сложного напряженного состояния для изотропной ползучести обобщаются следующим образом:

$$p_{ij} = u_{ij} + v_{ij} + w_{ij}; \quad (1.43)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{ij} = \sum_{k=1}^s u_{ij}^k, \\ \dot{u}_{ij}^k = \lambda_k \left[a_k S^{n-1} \left[(1 + \mu_k') \sigma_{ij} - \mu_k' \delta_{ij} \sigma_{kk} \right] - u_{ij}^k \right]; \end{array} \right. \quad (1.44)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{vv} = \sum_{k=1}^s v_{vv}^k, \\ v_{vv}^k = (1 + \mu_k'') \beta_{vv}^k - \mu_k'' (\beta_{11}^k + \beta_{22}^k + \beta_{33}^k), \\ \dot{\beta}_{vv}^k = \begin{cases} \lambda_k [b_k S^{n-1} \sigma_{vv} - \beta_{vv}^k], & [b_k S^{n-1} \sigma_{vv} - \beta_{vv}^k] \sigma_{vv} > 0, \\ 0, & [b_k S^{n-1} \sigma_{vv} - \beta_{vv}^k] \sigma_{vv} \leq 0; \end{cases} \end{array} \right. \quad (1.45)$$

$$\dot{w}_{ij} = \frac{3}{2} c S^{m-1} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right); \quad (1.46)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 (1 + \omega); \quad (1.47)$$

$$\dot{\omega} = \beta \sigma_{ij} \dot{p}_{ij}. \quad (1.48)$$

Здесь p_{ij} – тензор деформации ползучести; u_{ij} , v_{ij} , w_{ij} – вязкоупругая, вязкопластическая и вязкая составляющие деформации ползучести соответственно; σ_{ij}^0 , σ_{ij} – тензоры номинальных и истинных напряжений соответственно; S_0 , S – соответственно интенсивности тензоров номинальных и истинных напряжений; μ_k' и μ_k'' – аналоги коэффициентов Пуассона для обратимой и необратимой компонент деформации ползучести (по рекомендации [108] можно использовать $\mu_k'' = 0,42$); β_{ij}^k – активные вязкопластические деформации, которые можно было бы наблюдать при отсутствии пуассоновского сужения материала; ω – скалярный параметр поврежденности; параметр β задается степенной аппроксимацией вида

$$\beta = \alpha_1 (S_0)^{m_\alpha}. \quad (1.49)$$

В формулах (1.44) – (1.46) принято обозначение

$$\sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}.$$

Расчет вязкопластической деформации v_{ij} осуществляется в главных осях, поэтому суммирование по индексу ν не выполняется.

Для прогнозирования времени разрушения материала t^* используется критерий разрушения энергетического типа

$$\Omega(t^*) = \int_0^{t^*} \frac{\sigma_{ij} dp_{ij}}{A_*} = 1, \quad (1.50)$$

где для критической величины работы $A_* = A(t^*)$ справедлива степенная аппроксимация

$$A_* = A_1 (S_0)^{m_A}. \quad (1.51)$$

При этом полагается, что материал находится в неразрушенном состоянии при $\Omega < 1$ и разрушается при выполнении (1.50) хотя бы в одной точке конструкции.

Очевидно, что при одноосном растяжении модель (1.31) – (1.36) является частным случаем модели (1.43) – (1.51), поскольку интенсивность напряжений для одноосного нагружения совпадает с растягивающим осевым напряжением.

Важно отметить, что построение модели (1.43) – (1.51) не требует дополнительных экспериментальных затрат, поскольку все параметры $s, \lambda_k, a_k, b_k, c, n, m, \alpha_1, m_\alpha, A_1, m_A$ соответствуют параметрам одноосной модели (1.31) – (1.37), т.е. определяются по результатам одноосных испытаний.

1.4. Выводы по главе 1

Из изложенного краткого обзора экспериментальных и теоретических работ (и их анализа) в области развития методов реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния поверхностно упрочненных деталей и методов оценки релаксации остаточных напряжений в условиях высокотемпературной ползучести можно сформулировать основные задачи и направления научных исследований настоящей диссертационной работы, которые не представлены в научном сообществе и требуют своего решения.

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 после двухстороннего поверхностного упрочнения при ползучести.

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

Материалы данной главы излагаются в соответствии с опубликованными автором данного диссертационного исследования работами [9–12, 78, 93, 94, 112].

2.1. Постановка задачи

В главе 1 отмечалось, что методы реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций после процедуры поверхностного пластического упрочнения плоских деталей практически отсутствуют.

На решение данной задачи и направлены исследования данной главы, проиллюстрированные на примере поверхностно упрочненного призматического бруса прямоугольного сечения. При поверхностном пластическом деформировании толщина упрочненного слоя незначительна и составляет от 100 мкм (гидро- и пневмодробеструйная обработка) до 400 – 600 мкм (обкатка роликом, алмазное выглаживание, термопластическое упрочнение). В связи с этим в данной главе рассмотрены два подхода к математическому моделированию упрочненного плоского элемента конструкции: упрочненное полупространство и брус прямоугольного сечения. На основе разработанного метода реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния, методики идентификации параметров моделей, сравнительного анализа результатов расчета и их соответствия экспериментальным данным для обоих случаев принимается обоснованное решение выбора одной из этих моделей для дальнейших исследований в области релаксации остаточных напряжений при ползучести материала призматического бруса в условиях термоэкспозиции и двухосного растяжения.

2.2. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненном полупространстве

Рассматривается полупространство, упрочненное с помощью метода поверхностного пластического деформирования. Вводится декартова система координат таким образом, что плоскость XOY совмещена с упрочненной поверхностью (заштрихована на рис. 2.1), а ось OZ направлена вглубь упрочненного слоя (см. рис. 2.1).

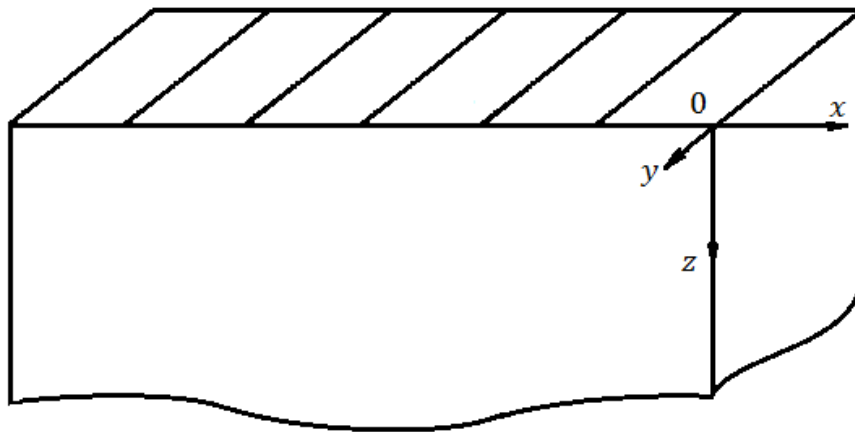


Рис. 2.1. Схематическое изображение упрочненного полупространства

Изучение полей остаточных напряжений в исследуемом объекте (см. рис. 2.1) необходимо начать с определения типа напряженного состояния. В большинстве практических случаев неоднородная пластическая деформация или другая необратимая деформация, приводящая к возникновению остаточных напряжений, изменяется лишь в зависимости от координаты z . В качестве примера можно указать на напряжения после упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием, азотирования, термопластического упрочнения, после фрезерования, шлифования и т.д. В этом случае остаточные напряжения изменяются только по толщине детали, то есть $\sigma_x = \sigma_x(z)$, $\sigma_y = \sigma_y(z)$, $\sigma_z = \sigma_z(z)$, $\tau_{xy} = \tau_{xy}(z)$, $\tau_{yz} = \tau_{yz}(z)$, $\tau_{xz} = \tau_{xz}(z)$.

Рассмотрим уравнения равновесия:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (2.1)$$

В нашем случае они существенно упрощаются:

$$\frac{d\tau_{xz}(z)}{dz} = 0, \quad \frac{d\tau_{yz}(z)}{dz} = 0, \quad \frac{d\sigma_z(z)}{dz} = 0. \quad (2.2)$$

На упрочненной грани и при $z \rightarrow +\infty$ τ_{xz} , τ_{yz} и $\sigma_z(z)$ равны нулю, так как рассматривается напряженное состояние полупространства при отсутствии внешних сил. Приводя в соответствие с этим результаты интегрирования уравнений (2.2), получим

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = \sigma_z = 0. \quad (2.3)$$

Следовательно, полупространство находится в условиях плоского напряженного состояния, компонентами которого являются $\sigma_x(z)$, $\sigma_y(z)$, $\tau_{xy}(z)$. Будем в дальнейшем считать, что направления OX и OY являются главными, поэтому $\tau_{xy}(z) = 0$. В противном случае при наличии ненулевой компоненты $\tau_{xy}(z)$ в экспериментальной работе [64] показано, что касательная компонента напряжений много меньше нормальных компонент и ей можно пренебречь. Таким образом, ненулевыми компонентами являются $\sigma_x(z)$, $\sigma_y(z)$. Обозначим через q_x , q_y , q_z – диагональные компоненты тензора пластических деформаций после процедуры упрочнения. Недиагональные компоненты равны нулю в силу вышеизложенных предположений относительно напряженного состояния. В дальнейшем для краткости будем опускать переменную z , считая при этом, что $0 \leq z < +\infty$.

Упрочненный слой несоизмеримо тоньше, чем остальная неупрочненная часть полупространства, что дает нам возможность использовать гипотезу плоских сечений для полных деформаций:

$$\varepsilon_x(z) = 0, \quad \varepsilon_y(z) = 0, \quad 0 \leq z < +\infty, \quad (2.4)$$

где $\varepsilon_x(z)$, $\varepsilon_y(z)$ – компоненты тензора полных деформаций.

Введем в рассмотрение (по аналогии с задачами для цилиндрических тел) гипотезу анизотропного упрочнения в виде [63]

$$q_x = \alpha q_y, \quad (2.5)$$

где α – параметр анизотропии упрочнения (феноменологический коэффициент).

Отметим, что при процедуре изотропного упрочнения (пневмо- и гидродробеструйная обработка поверхности микрошариками, ультразвуковое упрочнение, азотирование и т.д.) значение $\alpha = 1$, а значение $\alpha \neq 1$ соответствует анизотропному упрочнению (обкатка роликом, алмазное выглаживание и т.д.).

Из условия пластической несжимаемости $q_x + q_y + q_z = 0$ и (2.5) получаем:

$$q_z = -(1 + \alpha)q_y. \quad (2.6)$$

В развернутой форме соотношения (2.4) имеют вид:

$$\frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + q_x = 0, \quad \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + q_y = 0, \quad (2.7)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Поскольку $\sigma_z \equiv 0$, то из (2.5) и (2.7) имеем

$$\sigma_y = \frac{1 + \alpha\nu}{\alpha + \nu} \sigma_x. \quad (2.8)$$

Теперь из формул (2.5) – (2.8) следует:

$$q_x = -\frac{\alpha(1 - \nu^2)}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x; \quad q_y = -\frac{1 - \nu^2}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x; \quad q_z = \frac{(1 + \alpha)(1 - \nu^2)}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x. \quad (2.9)$$

Таким образом, если известна компонента тензора остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$, $0 \leq z < +\infty$, и коэффициент анизотропии α , то из формул (2.8) и (2.9) можно найти все компоненты тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций. В частном случае изотропного упрочнения при $\alpha = 1$ формулы (2.8) и (2.9) упрощаются:

$$\sigma_x = \sigma_y, \quad q_x = q_y = -\frac{1 - \nu}{E} \sigma_x; \quad q_z = -\frac{2(1 - \nu)}{E} \sigma_x. \quad (2.10)$$

2.3. Идентификация параметров математической модели реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния в упрочненном полупространстве

Так как основной характеристикой для реализации модели реконструкции остаточных напряжений является $\sigma_x = \sigma_x(z)$, то в дальнейшем будем исходить из того, что экспериментальная диаграмма для этой функции (по крайней мере, в области сжатия материала) известна, поскольку для ее определения имеются надежные и апробированные экспериментальные методы [30].

Типичные виды диаграммы $\sigma_x = \sigma_x(z)$ с учетом естественного условия $\lim_{z \rightarrow \infty} \sigma_x(z) = 0$ после процедуры поверхностного пластического упрочнения представлены на рис. 2.2. Экспериментальные методы позволяют определить эпюру $\sigma_x = \sigma_x(z)$ только в области сжатия материала ($0 \leq z \leq z_0$), но для решения задачи релаксации остаточных напряжений при ползучести этого недостаточно, т.к. необходимо иметь непрерывные поля остаточных напряжений и пластических деформаций во всем полупространстве. Следовательно, необходимо решить задачу аппроксимации эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$ для $0 \leq z < +\infty$, т.е. выполнить экстраполяцию из области $0 \leq z \leq z_0$ на область $z_0 < z < +\infty$.

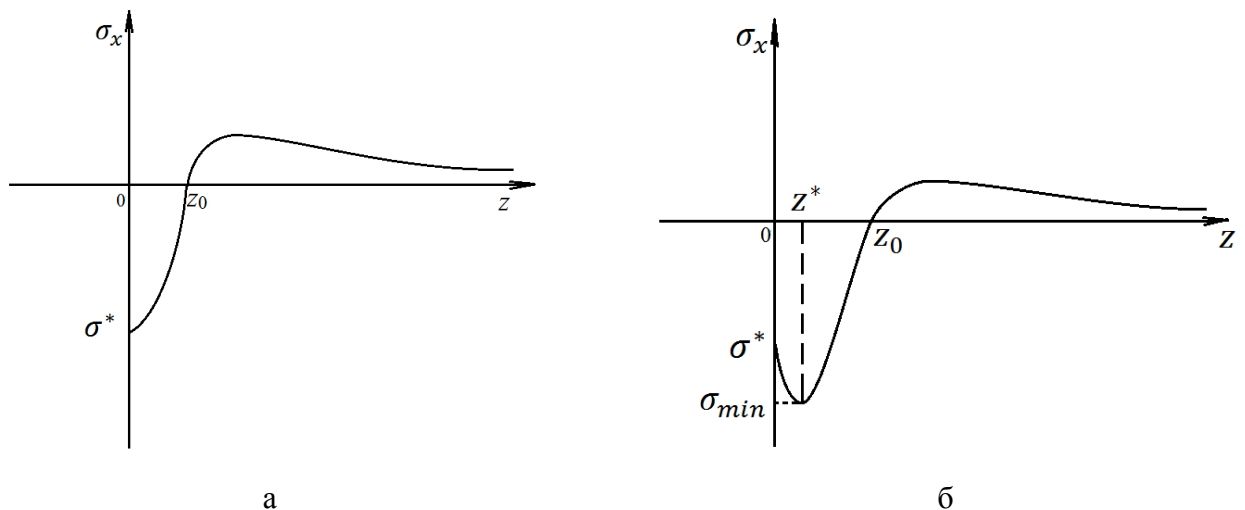


Рис. 2.2 Схематический вид зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$

Рассмотрим случай, представленный на рис. 2.2,а, когда максимальное (по модулю) сжимающее напряжение находится на упрочнённой поверхности.

Поскольку к полупространству не приложены внешние силы, то должно выполняться условие самоуравновешенности напряжений

$$\int_0^{+\infty} \sigma_x(z) dz = 0. \quad (2.11)$$

Исходя из вида графика (рис. 2.2,а) и рекомендаций [91, 95, 97, 99], выберем аппроксимацию зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ в следующем виде:

$$\sigma_x(z) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{z^2}{l^2}\right) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{z^2}{b^2}\right), \quad (2.12)$$

где σ_0, σ_1, b – параметры, подлежащие идентификации, $l=1$ – масштабный коэффициент, имеющий размерность линейного размера.

Для нахождения параметров σ_0, σ_1 и b будем использовать характерные точки эпюры и условие самоуравновешенности (2.11):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 - \sigma_1 = \sigma^*, \\ \sigma_0 \exp(-z_0^2) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{z_0^2}{b^2}\right) = 0, \\ \int_0^{+\infty} \sigma_x(z) dz = 0, \end{array} \right. \quad (2.13)$$

где $\sigma^* = \sigma_x(0)$, $z = z_0$ – точка, в которой $\sigma_x(z_0) = 0$.

Третье соотношение системы (2.13) преобразуем с учетом аппроксимации (2.12):

$$\sigma_0 \int_0^{+\infty} \exp(-z^2) dz - \sigma_1 \int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{b^2}\right) dz = 0.$$

Учитывая, что $\int_0^{+\infty} \exp(-z^2) dz = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$, получаем

$$\sigma_0 = \sigma_1 b. \quad (2.14)$$

Подстановка (2.14) в первое соотношение (2.13) дает

$$\sigma_1 = \frac{\sigma^*}{b-1}, \quad (2.15)$$

а подстановка во второе уравнение (2.13) дает уравнение

$$b \exp(-z_0^2) - \exp\left(-\frac{z_0^2}{b^2}\right) = 0,$$

которое решается численно относительно величины b . Далее из соотношений (2.14) и (2.15) находятся значения параметров σ_0 и σ_1 .

В случае, когда максимальное сжимающее напряжение находится в подповерхностном слое (см. рис. 2.2,б), аппроксимацию $\sigma_x = \sigma_x(z)$ можно выбрать в виде:

$$\sigma_x(z) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{(z - z^*)^2}{l^2}\right) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z - z^*)^2}{b^2}\right), \quad (2.16)$$

где σ_0 , σ_1 , l , b – параметры, подлежащие идентификации. Для их определения воспользуемся условием (2.11), а также значениями эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$ в характерных точках: $\sigma_x(0) = \sigma^*$, $\sigma_x(z^*) = \sigma_{\min}$, $\sigma_x(z_0) = 0$. Тогда получаем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 \exp\left(-\frac{z^{*2}}{l^2}\right) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{z^{*2}}{b^2}\right) = \sigma^*, \\ \sigma_0 - \sigma_1 = \sigma_{\min}, \\ \sigma_0 \exp\left(-\frac{(z_0 - z^*)^2}{l^2}\right) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z_0 - z^*)^2}{b^2}\right) = 0, \\ \int_0^{+\infty} \sigma_x(z) dz = 0. \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Система уравнений (2.17) из-за выбора зависимости (2.16) должна быть симметрична относительно точки $z = z^*$. Это не всегда может быть реализовано для экспериментальных данных, поэтому система уравнений (2.17) может быть несовместной. Чтобы устранить этот недостаток, положим $l = 1$. В таком случае система (2.17) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 \exp(-z^{*2}) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{z^{*2}}{b^2}\right) = \sigma^*, \\ \sigma_0 - \sigma_1 = \sigma_{\min}, \\ \sigma_0 \exp\left(-\left(z_0 - z^*\right)^2\right) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{\left(z_0 - z^*\right)^2}{b^2}\right) = 0, \\ \int_0^{+\infty} \sigma_x(z) dz = 0. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Так как в системе (2.18) три неизвестных и четыре уравнения, она переопределена. Для устранения этого недостатка откажемся от строгого выполнения одного из условий для эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$: от ее прохождения через точку $(z_0, 0)$. В таком случае получаем систему трех уравнений относительно трех неизвестных:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 \exp(-z^{*2}) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{z^{*2}}{b^2}\right) = \sigma^*, \\ \sigma_0 - \sigma_1 = \sigma_{\min}, \\ \int_0^{+\infty} \sigma_x(z) dz = 0. \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Аналогично предыдущему случаю, преобразовав систему (2.19), получим

$$\sigma_0 = \sigma_1 b, \quad \sigma_1 = \frac{\sigma_{\min}}{b-1}, \quad (2.20)$$

где величина b определяется из уравнения

$$b \exp(-z^{*2}) - \exp\left(-\frac{z^{*2}}{b^2}\right) = \sigma^*. \quad (2.21)$$

В связи с тем, что при построении системы уравнений (2.19) для определения параметров σ_0 , σ_1 , b была допущена определенная «вольность», связываемая с отбрасыванием одного из уравнений в переопределенной системе (2.18), то решение системы уравнений (2.18) можно считать первым приближением параметров σ_0 , σ_1 , b .

Уточнение значений параметров σ_0 , σ_1 , b (второе приближение) производится в результате минимизации отклонения расчетных данных $\sigma_x(z_i)$ от экспериментальных $\sigma_x^{\text{э}}(z_i)$ в следующей норме:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\sigma_x(z_i) - \sigma_x^{\text{э}}(z_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [\sigma_x^{\text{э}}(z_i)]^2}}, \quad (2.22)$$

где z_i – точки дискретизации; n – количество точек дискретизации зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$. Для этой цели, начиная с первого приближения, варьируются величины σ_0 , σ_1 (но так, чтобы выполнялось второе соотношение (2.20)), а величина b определяется из (2.21) до достижения минимума функционалом (2.22). По этой же формуле вычисляется значение отклонения расчетных данных от экспериментальных (погрешность аппроксимации) при найденных финишных значениях параметров.

После идентификации параметров аппроксимаций (2.12) или (2.16) по формулам (2.14) и (2.15) или (2.20) и (2.21) соответственно (с учетом реализации процедуры уточнения параметров) величина $\sigma_x = \sigma_x(z)$ будет иметь аналитическое представление для всего полупространства $0 \leq z < +\infty$, после чего можно найти аналитическое представление и для всех остальных компонент тензора остаточных напряжений и пластических деформаций по формулам (2.8), (2.9) при $\alpha \neq 1$ или (2.10) при $\alpha = 1$.

2.4. Экспериментальная проверка математической модели расчета остаточных напряжений в полупространстве для режима изотропного упрочнения

Для экспериментальной проверки методики расчета напряженно-деформированного состояния в упрочненном полупространстве после процедуры упрочнения воспользуемся экспериментальными данными, полученными на кафедре «Сопротивление материалов» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева и

опубликованными в работе [81], где исследованы поля остаточных напряжений в плоских призматических образцах с квадратным сечением 10×10 мм и длиной 100 мм из сплава ЭП742 после ультразвукового механического упрочнения (УЗУ). Обработка упрочняемой грани образца осуществлялась в специальном контейнере, наполненном микрошариками, которому через акустический трансформатор скорости (концентратор упругих колебаний) сообщаются колебания с малой амплитудой и высокой частотой (16–30 кГц). В результате хаотических соударений шариков с обрабатываемой поверхностью происходит ее упрочнение. Режимы УЗУ: расстояние от образца до концентратора (наконечника установки) – 7 мм; диаметр шариков – 1 мм; материал шариков – сталь ШХ 15; масса шариков – 4,6 г; амплитуда колебаний 50 мкм; частота – 20 кГц; длительность обработки – 20 с (режим № 1), 40 с (режим № 2), 60 с (режим № 3), 80 с (режим № 4). После УЗУ часть упрочненных образцов (для всех режимов) использовалась для определения остаточных напряжений, другая часть подвергалась термоэкспозиции (температурной выдержке) при температуре 650 °С в течение 100 часов, и после температурной разгрузки также определялись остаточные напряжения, результаты для второй партии образцов будут приведены ниже в соответствующей главе. Методика определения остаточных напряжений в упрочненных образцах после упрочнения и после термоэкспозиции одна и та же и базируется на расчетно-экспериментальном методе полосок [81]. Диссертант не принимал участия в проведении экспериментальных работ, а участвовал в обработке экспериментальных данных и использовал их для проверки разработанных теоретических моделей. Но для лучшего понимания метода полосок изложим его суть. Согласно [30] сначала учитывают остаточные напряжения за счет измерения прогиба $f(0)$ по базовой длине l (см. рис. 2.3). После измерения прогиба в пределах базовой длины l электрохимическим травлением удаляются слои материала толщиной a со стороны исследуемой поверхности полоски и замеряются возникающие при этом прогибы $f(a)$ (рис.

2.4). Измеренные прогибы $f(0)$ и $f(a)$ используются при вычислении остаточных напряжений [81]:

$$\sigma_y(a) - \nu\sigma_x(a) = \frac{8E}{l^2} f(0) \left(\frac{h}{2} - a \right) + \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right], \quad (2.23)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, h – толщина полоски до травления, $0 \leq \xi \leq a$. Состав раствора для травления и технология травления приведены в работе [81].

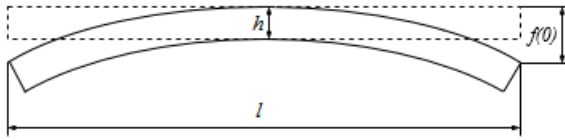


Рис. 2.3. Схема замера прогиба $f(0)$

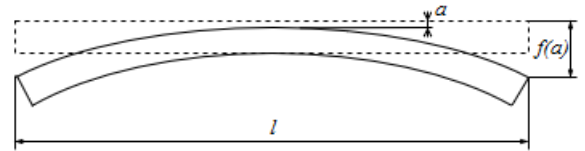


Рис. 2.4. Схема замера прогиба $f(a)$

В случае УЗУ $\sigma_y(a) = \sigma_x(a)$ и формула (2.25) принимает вид

$$\sigma_y(a) = \sigma_x(a) = \frac{1}{1-\nu} \left\{ -\frac{8E}{l^2} f(0) \left(\frac{h}{2} - a \right) + \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right] \right\}. \quad (2.24)$$

Для увеличения разрешающей способности описанного метода при удалении слоев полоски травлением использовалась схема замера перемещений, основанная на консольном креплении образца (рис. 2.5). Связь между измеренными перемещениями полоски с удлинителем $f(a)_{\text{изм}}$ и прогибами $f(a)$, используемыми в формулах (2.25) и (2.26), записывается в следующем виде:

$$f(a) = \frac{f(a)_{\text{изм}}}{4(1+2c/l)},$$

где c – длина удлинителя; l – базовая длина полоски.

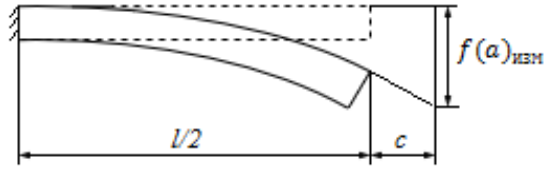


Рис. 2.5. Схема замера перемещений $f(a)_{изм}$

На рис. 2.6 сплошными линиями приведены результаты экспериментального определения остаточных напряжений в образцах после процедуры УЗУ для всех четырех режимов обработки поверхности [81]. Анализ этих данных свидетельствует, что сжимающие напряжения могут достигать величины минус 1100 МПа (режим № 1). Смена знака напряжений происходит на расстоянии $a \approx 0,2$ мм от поверхности. При всех режимах УЗУ наблюдается спад остаточных напряжений к поверхности образца. Увеличение времени обработки от 20 до 80 с приводит к уменьшению максимума сжимающих остаточных напряжений с повышением глубины его залегания и незначительным увеличением толщины упрочненного слоя.

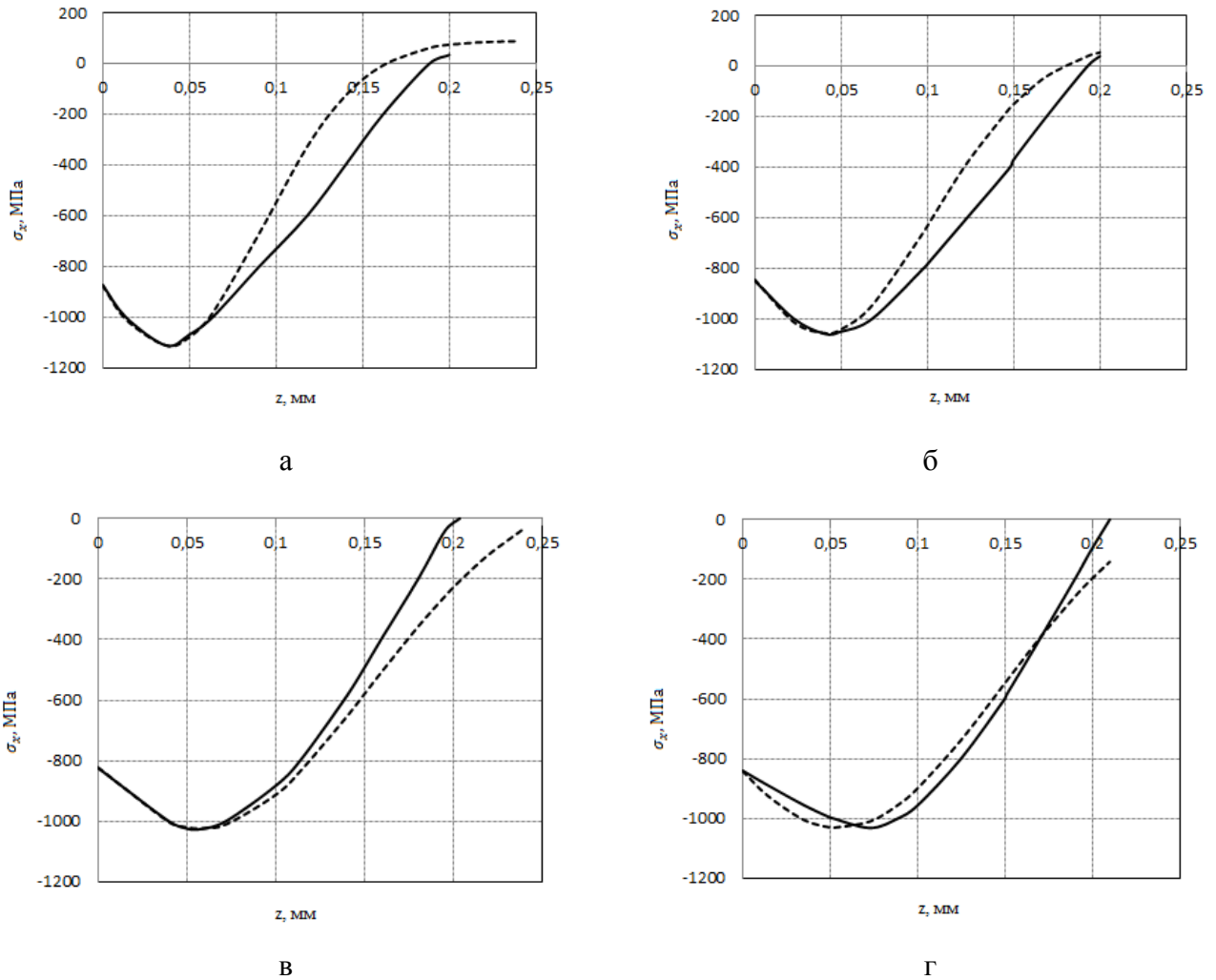


Рис. 2.6. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое полупространства (сплав ЭП742) при различных режимах УЗУ (см. табл. 2.1): а – режим 1, б – режим 2, в – режим 3, г – режим 4.

Для экспериментальной проверки методики расчета напряженно-деформированного состояния в упрочненном плоском образце (модельное представление – упрочненное полупространство) после процедуры УЗУ воспользуемся экспериментальными данными для четырех режимов упрочнения, представленных на рис. 2.6. Как уже отмечалось выше, обработка УЗУ относится к изотропному процессу поверхностного пластического упрочнения, поэтому в данном случае в соотношении (2.6) коэффициент анизотропии $\alpha = 1$ и в дальнейшем для оценки остаточных напряжений и пластических деформаций используются формулы (2.8) и (2.9). Поскольку упрочнение УЗУ происходит при нормальной температуре 20 °С, в (2.9) для сплава ЭП742 использовались

справочные значения $E = 2,21 \cdot 10^5$ МПа и $\nu = 0,3$. Используя экспериментальные данные для $\sigma_x = \sigma_x(z)$ на рис. 2.6, по методике, изложенной в п. 2.3, определялись все параметры аппроксимации (2.16). Для оценки первого приближения величин σ_0 , σ_1 , b в (2.16) использовались значения характерных точек для графиков z_0 , z^* , σ^* , σ_{\min} , приведенные в таблице 2.1. Расчетные значения зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ для всех четырех режимов упрочнения приведены на рис. 2.6 штриховыми линиями. В последней строке таблицы 2.1 приведены значения отклонения расчетных данных от экспериментальных, вычисленные на основании (2.22), в процентах. В целом наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 2.1

Режимы УЗУ, характерные точки эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и параметры аппроксимации (2.16) для модели полупространства из сплава ЭП742

	Время обработки, с (режим УЗУ)			
	20 (1)	40 (2)	60 (3)	80 (4)
Значения координат характерных точек эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$				
z_0 , мм	0,189	0,193	0,204	0,210
z^* , мм	0,037	0,040	0,058	0,073
σ^* , МПа	-872,0	-848,5	-840,4	-840,0
σ_{\min} , МПа	-1111,5	-1058,6	-1024,3	-1032,3
Значения параметров аппроксимации (2.16)				
σ_0 , МПа	94,9	103,1	158,8	155,2
σ_1 , МПа	1206,5	1159,1	1182,8	1187,5
b	0,079	0,089	0,134	0,131
Значения погрешностей аппроксимации, вычисленные на основании (2.16)				
Δ , %	18,75	17,78	14,07	7,73

В качестве примера на рис. 2.7 приведены расчетные зависимости для распределения компоненты тензоров остаточных пластических деформаций для первого режима упрочнения в области сжатия материала в упрочненном слое для полупространства.

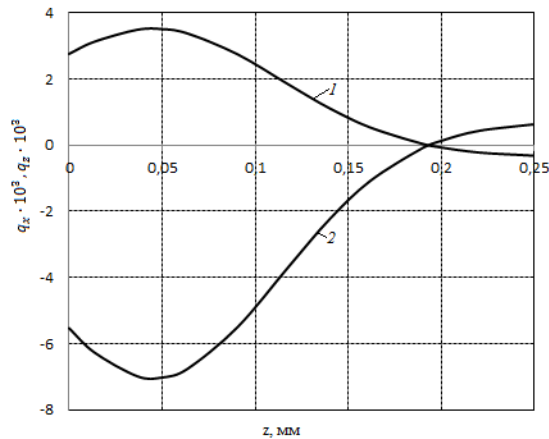


Рис. 2.7. Графики зависимостей $q_x = q_x(z)$ (линия 1) и $q_z = q_z(z)$ (линия 2) для первого режима УЗУ (сплав ЭП742)

2.5. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненном призматическом образце и идентификация параметров модели

Рассмотрим призматический образец прямоугольного сечения с размерами $a \times H \times l$ (см. рис. 2.8), верхняя грань которого упрочнена одним из методов поверхностного пластического деформирования (заштрихована на рис. 2.8). Вводится декартова система координат $OXYZ$ (см. рис. 2.8) аналогично случаю полупространства.

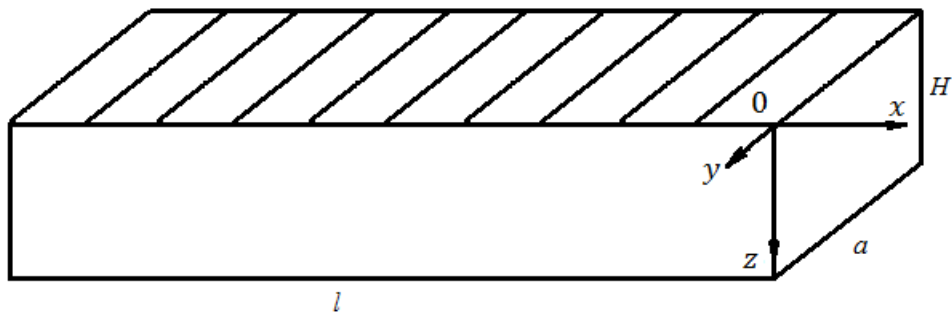


Рис. 2.8. Схематическое изображение упрочненного призматического образца

При образовании остаточных напряжений в области, примыкающей к боковым граням, нарушается закон прямых нормалей (гипотеза плоских сечений), что является причиной того, что напряжения могут стать функцией трех координат. В результате краевая зона образца испытывает объемное, а не одномерное напряженное состояние. Однако с учетом малой толщины упрочненного слоя можно считать, что эта область невелика и поэтому при реконструкции остаточных напряжений не рассматривается. Поэтому в дальнейшем рассматриваются области призматического образца без этих краевых эффектов. Тогда справедлива гипотеза плоских сечений для всех плоскостей, параллельных координатным плоскостям (см. рис. 2.8), а это, в свою очередь, означает, что вся методика, изложенная для полупространства, будет справедливой и для призматического образца. Изменения касаются лишь координаты z : $0 \leq z \leq H$ и условия самоуравновешенности компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z)$, которое принимает вид

$$\int_0^H \sigma_x(z) dz = 0. \quad (2.25)$$

Таким образом, полученные в пункте 2.2 формулы (2.8), (2.9) при $\alpha \neq 1$ и (2.10) при $\alpha = 1$ для оценки остаточного напряженно-деформированного состояния для полупространства будут справедливы и в рассматриваемом случае.

Аналогично случаю полупространства считаем, что известна экспериментальная зависимость $\sigma_x = \sigma_x(z)$ в упрочненном приповерхностном слое. Типичные экспериментальные диаграммы $\sigma_x = \sigma_x(z)$, $0 \leq z \leq H$, представлены на рис. 2.9. Анализ графиков на рис. 2.9 позволяет сделать вывод, что аппроксимация зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ должна быть выбрана в другом виде по сравнению со случаем полупространства.

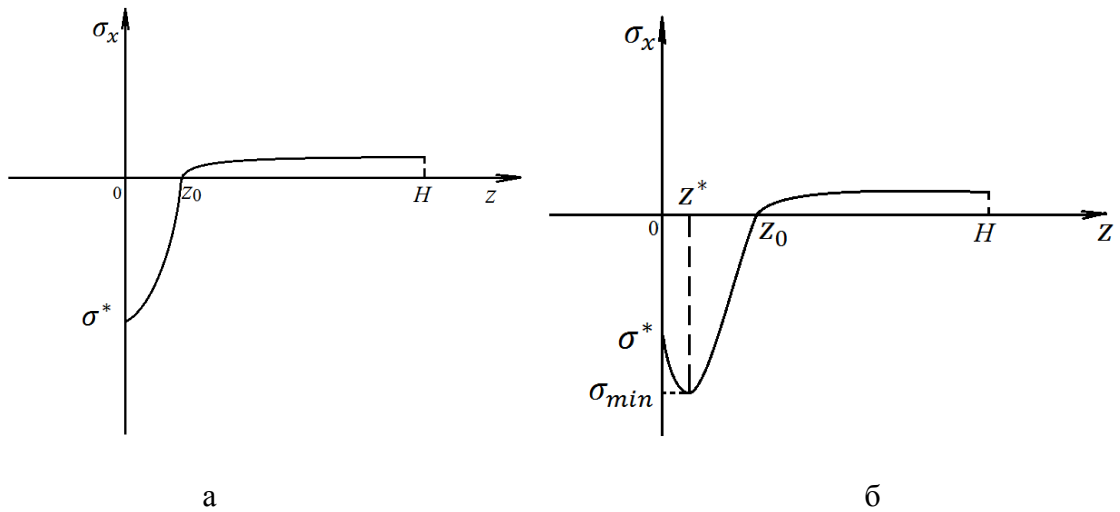


Рис. 2.9. Схематический вид зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$

В случае, изображенном на рис 2.9,а, максимум (по модулю) величины $\sigma_x = \sigma_x(z)$ находится на упрочненной поверхности. Исходя из характера этого графика и рекомендаций [91, 95, 97, 99], выберем аппроксимацию зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ в следующем виде:

$$\sigma_x(z) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{z^2}{b^2}\right), \quad (2.26)$$

где σ_0 , σ_1 , b – параметры, подлежащие идентификации.

Используя значения зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ в характерных точках $z=0$, $z=z_0$ и условие самоуравновешенности (2.25), параметры σ_0 , σ_1 и b находим из решения системы:

$$\begin{cases} \sigma_0 - \sigma_1 = \sigma^*, \\ \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{z_0^2}{b^2}\right) = 0, \\ \int_0^H \sigma_x(z) dz = 0. \end{cases} \quad (2.27)$$

С помощью преобразований третьего уравнения системы (2.27) получаем следующую систему уравнений для нахождения параметров:

$$\left\{ \begin{array}{l} \exp\left(-\frac{z_0^2}{b^2}\right) = b \frac{\sqrt{\pi}}{2H} \operatorname{erf}\left(\frac{H}{b}\right), \\ \sigma_1 = \frac{\sigma^*}{\exp\left(-\frac{z_0^2}{b^2}\right) - 1}, \\ \sigma_0 = \sigma_1 + \sigma^*. \end{array} \right. \quad (2.28)$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$.

Значение величины b находится численно из первого уравнения системы (2.28). Далее находится величина σ_1 , а после этого – σ_0 .

Если экспериментальная диаграмма имеет вид, представленный на рис. 2.9,б, то есть максимум (по модулю) величины $\sigma_x = \sigma_x(z)$ находится в подповерхностном слое, то аппроксимацию зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ можно выбрать в виде:

$$\sigma_x(z) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z - z^*)^2}{b^2}\right), \quad (2.29)$$

где σ_0 , σ_1 , b – параметры, подлежащие идентификации. Для их определения воспользуемся условием (2.25), а также значениями эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$ в характерных точках ($z = 0$, $z = z_0$, $z = z^*$, см. рис. 2.9): $\sigma_x(0) = \sigma^*$, $\sigma_x(z^*) = \sigma_{\min}$, $\sigma_x(z_0) = 0$.

В этом случае параметры σ_0 , σ_1 , b находим из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{z^{*2}}{b^2}\right) = \sigma^*, \\ \sigma_0 - \sigma_1 = \sigma_{\min}, \\ \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z_0 - z^*)^2}{b^2}\right) = 0, \\ \int_0^H \sigma_x(z) dz = 0. \end{array} \right. \quad (2.30)$$

Система уравнений (2.30) является переопределенной (три неизвестных, четыре уравнения). Для устранения переопределенности системы, откажемся от строгого выполнения условия прохождения эпюры через точку $(0, \sigma^*)$. В таком случае система (2.30) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 - \sigma_1 = \sigma_{\min}, \\ \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z_0 - z^*)^2}{b^2}\right) = 0, \\ \int_0^H \sigma_x(z) dz = 0. \end{array} \right. \quad (2.31)$$

После преобразований третьего уравнения системы (2.31) система уравнений для нахождения параметров имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} b \frac{\sqrt{\pi}}{2H} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{H - z^*}{b}\right) - \operatorname{erf}\left(-\frac{z^*}{b}\right) \right] = \exp\left(-\frac{(z_0 - z^*)^2}{b^2}\right), \\ \sigma_1 = \frac{\sigma_{\min}}{\exp\left(-\frac{(z_0 - z^*)^2}{b^2}\right) - 1}, \\ \sigma_0 = \sigma_1 + \sigma_{\min}. \end{array} \right. \quad (2.32)$$

Значение величины b находится из первого уравнения системы (2.32) численно. Далее из второго уравнения находится величина σ_1 , а следом – σ_0 из третьего уравнения.

Таким образом, после идентификации параметров аппроксимаций (2.26) или (2.29) по формулам (2.28) или (2.32) соответственно величина $\sigma_x = \sigma_x(z)$ будет иметь аналитическое представление. Зная величину $\sigma_x = \sigma_x(z)$, можно найти значения остальных компонент тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций также в аналитическом виде.

2.6. Экспериментальная проверка математической модели расчета остаточных напряжений в призматическом образце для режима изотропного упрочнения

Для экспериментальной проверки модели расчета остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце вновь используем экспериментальные данные для бруса $10 \times 10 \times 100$ мм из сплава ЭП742 после УЗУ, которые описаны в пункте 2.4, а графики экспериментальных зависимостей для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z)$ представлены на рис. 2.6. В этом случае аппроксимация зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ задается формулой (2.29), поскольку локальный экстремум этой функции находится не на поверхности образца, а в подповерхностном слое (см. рис. 2.9). Несмотря на то, что система уравнений (2.31) относительно параметров зависимости (2.29) σ_0, σ_1, b является совместной, здесь также используется итерационная процедура для вычисления их оценок. На первом этапе решается система (2.31) и определяется первое приближение для этих параметров. Если использовать их как окончательный вариант, то график $\sigma_x = \sigma_x(z)$ будет проходить через заданные три точки, но тогда остальные экспериментальные значения $0 \leq z \leq z_0$ не будут задействованы в построении аппроксимации (2.29). Поэтому здесь также следует отказаться от прохождения графика через заданные характерные точки, а во втором приближении за счет варьирования параметров σ_0, σ_1, b в окрестности начального приближения определить их, исходя из минимизации функционала (2.22). Применяя изложенную итерационную процедуру, получены финишные оценки параметров σ_0, σ_1, b , значения которых приведены в таблице 2.2. Расчетные значения зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ с

найденными значениями параметров приведены на рис. 2.9 штриховыми линиями, экспериментальные данные – сплошными линиями.

Таблица 2.2

Режимы УЗУ, характерные точки эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и параметры аппроксимации (2.29) для призматических образцов из сплава ЭП742

	Время обработки, с (режим УЗУ)			
	20 (1)	40 (2)	60 (3)	80 (4)
Значения координат характерных точек эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$				
z_0 , мм	0,189	0,193	0,204	0,210
z^* , мм	0,037	0,040	0,058	0,073
σ^* , МПа	-872,0	-848,5	-840,4	-840,0
σ_{\min} , МПа	-1111,5	-1058,6	-1024,3	-1032,3
Значения параметров аппроксимации (2.29)				
σ_0 , МПа	119,2	103,1	140,9	155,2
σ_1 , МПа	1230,7	1159,1	1167,3	1187,5
b	0,097	0,101	0,121	0,131
Значения погрешностей аппроксимации, вычисленные на основании (2.29)				
Δ , %	4,93	4,02	6,47	7,73

Анализ погрешностей в этом случае (см. последнюю строку в табл. 2.2) свидетельствует о хорошей коррелированности расчетных и экспериментальных зависимостей для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z)$, что можно наблюдать и визуально на рис. 2.10.

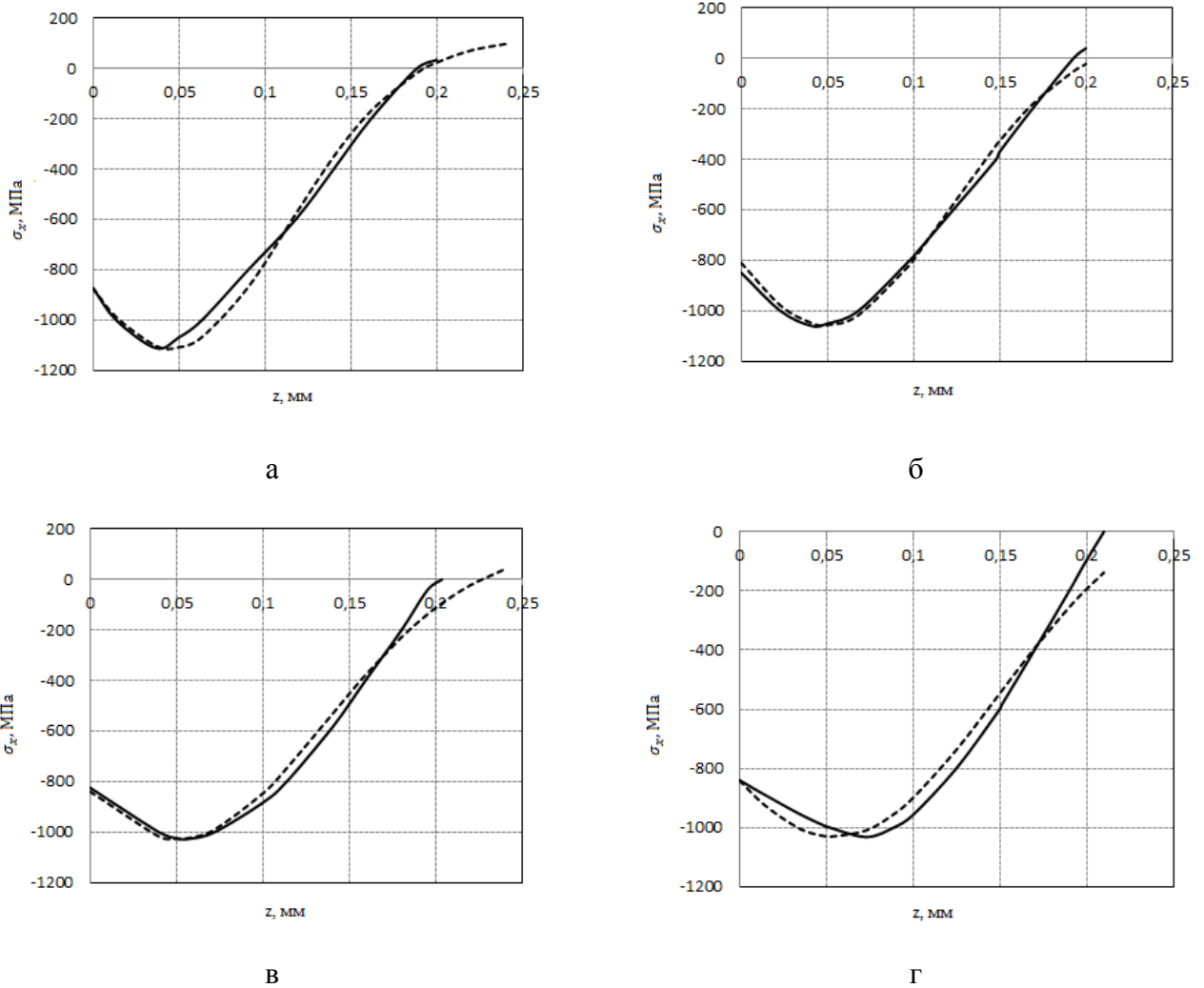


Рис. 2.10. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое призматического образца (сплав ЭП742) при различных режимах УЗУ (см. табл. 2.2): а – режим 1, б – режим 2, в – режим 3, г – режим 4.

Сравнивая модели упрочненного полупространства и упрочненного призматического образца с помощью таблиц 2.1 и 2.2 и графиков на рис. 2.6 и рис. 2.10, следует отдать предпочтение модели для призматического образца. Поэтому в дальнейших исследованиях в области построения математической модели релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести будем использовать схему для упрочненного призматического образца.

2.7. Исследование влияния параметра анизотропии упрочнения на распределение остаточных напряжений в призматическом образце

Известно, что ряд технологий упрочнения (обкатка роликом, алмазное выглаживание, дорнование, обработка поверхности дробью под определенным

углом или при вращении детали и другие) приводит к деформационной анизотропии материала в приповерхностном слое. В этом случае в рамках развиваемого в данной работе направления в математической модели при использовании гипотезы (2.5)

$$q_x(z) = \alpha q_y(z)$$

параметр $\alpha \neq 1$. При использовании этой гипотезы для цилиндрических образцов в соответствующей математической модели реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния в работах [91, 96] при обработке экспериментальных данных после обкатки роликом цилиндрических изделий из стали 45 значение параметра α изменяется от 4 до 20, а для образцов из стали 40Х – от 4 до 7, т.е. в материале действительно наблюдается существенная деформационная анизотропия. В данном пункте выполнены аналогичные исследования влияния параметра анизотропии α на распределение остаточных напряжений в плоском призматическом образце из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения. В модельных расчетах использовалась связь (2.8) между компонентами $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z)$:

$$\sigma_y = \frac{1 + \nu\alpha}{\alpha + \nu} \sigma_x.$$

На рисунке 2.11 представлены график зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ (обозначен цифрой 3), а также графики зависимости $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при различных значениях параметра анизотропии: при $\alpha = 0,3$ (обозначен цифрой 1), при $\alpha = 0,7$ (обозначен цифрой 2), при $\alpha = 4$ (обозначен цифрой 4), при $\alpha = 8$ (обозначен цифрой 5) для первого режима упрочнения поверхности.

Аналогичные графики приведены на рис. 2.12 – 2.14 для остальных трех режимов обработки поверхности призматического образца соответственно.

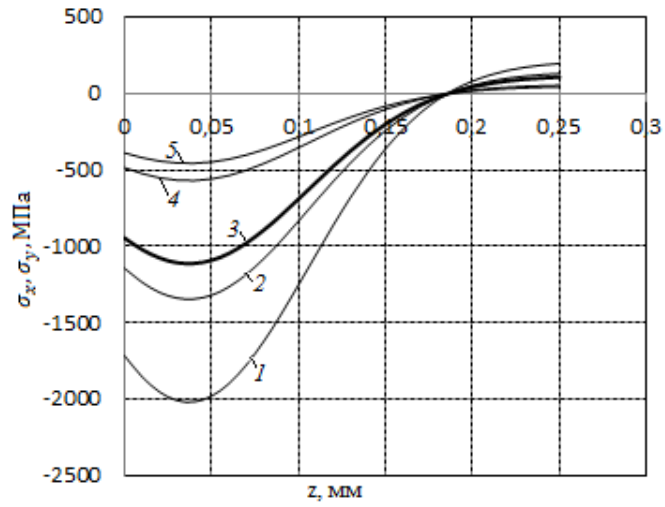


Рис. 2.11. Графики зависимости: 1 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 0,3$; 2 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 0,7$; 3 – $\sigma_x = \sigma_x(z)$; 4 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 4$; 5 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 8$ для первого режима обработки.

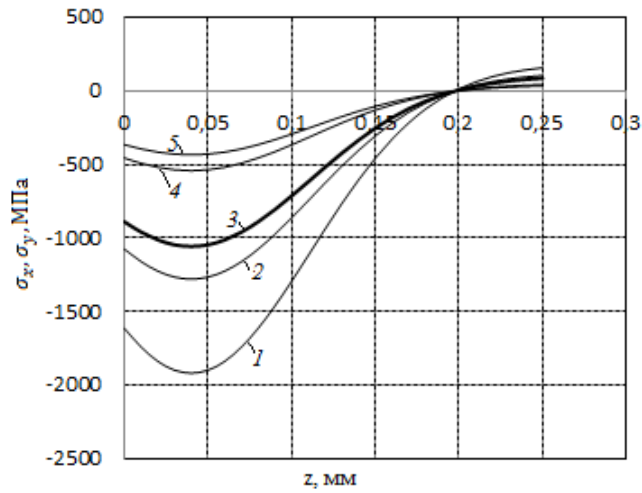


Рис. 2.12. Графики зависимости: 1 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 0,3$; 2 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 0,7$; 3 – $\sigma_x = \sigma_x(z)$; 4 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 4$; 5 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 8$ для второго режима обработки.

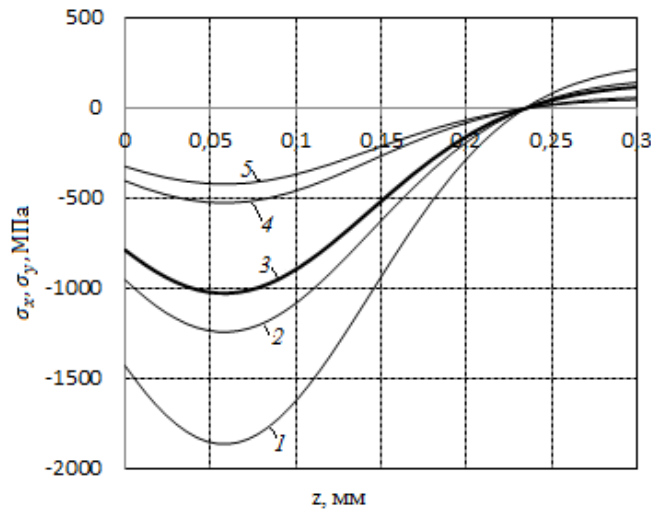


Рис. 2.13. Графики зависимости: 1 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 0,3$; 2 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 0,7$; 3 – $\sigma_x = \sigma_x(z)$; 4 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 4$; 5 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 8$ для третьего режима обработки.

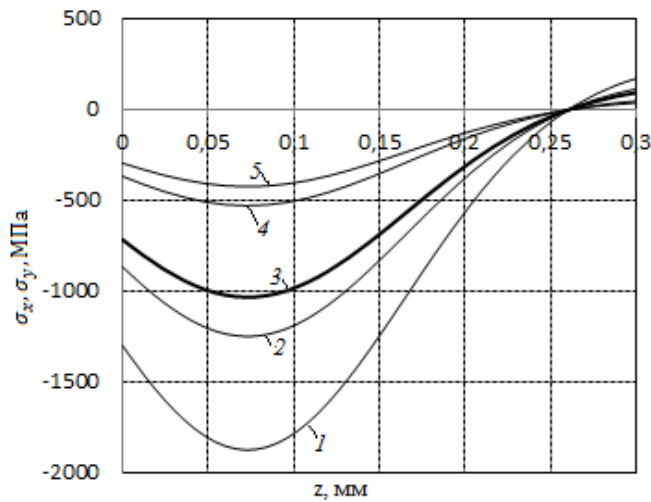


Рис. 2.14. Графики зависимости: 1 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 0,3$; 2 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 0,7$; 3 – $\sigma_x = \sigma_x(z)$; 4 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 4$; 5 – $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $\alpha = 8$ для четвертого режима обработки.

Проанализировав вышеуказанные графики, можно сделать 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 отличаются от значений $\sigma_x = \sigma_x(z)$ более чем в 1,5 раза.

Таким образом, выполненное исследование влияния параметра деформационной анизотропии в материале упрочненного слоя на характер и величины остаточных напряжений в призматических образцах играют важную роль в технологических прикладных задачах, в частности полученные результаты могут служить обоснованием выбора технологии упрочнения для формирования полей остаточных напряжений требуемой структуры с целью повышения ресурса изделий. Например, в задачах многоциклового усталости в условиях изгиба призматических образцов важную роль играет компонента $\sigma_x = \sigma_x(z)$, поскольку она входит в критериальные зависимости для оценки предела выносливости. Поэтому, зная характер той или иной технологии упрочнения и связывая его с параметром анизотропии упрочнения α , можно прогнозировать поля остаточных напряжений.

2.8. Выводы по главе 2

1. Разработаны феноменологические методы реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций для плоских деталей на примере полупространства и призматического образца с учетом эффектов деформационной анизотропии при поверхностном пластическом деформировании.
2. Разработана методика идентификации параметров разработанных математических моделей реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния в упрочненных плоских деталях при различных закономерностях распределения остаточных напряжений в приповерхностном слое.
3. Выполнена проверка адекватности методов расчета остаточного напряженно-деформированного состояния для полупространства и призматического образца из сплава ЭП742 экспериментальным данным после ультразвукового упрочнения при четырех режимах обработки поверхности. Наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных.
4. Показано, что модель для призматического образца дает существенно меньшую погрешность отклонения расчетных данных от экспериментальных по сравнению с моделью для упрочненного полупространства, что послужило основанием в качестве объекта для дальнейших исследований использовать модель призматического образца.
5. Выполнено исследование влияния параметра анизотропии упрочнения на характер распределения полей остаточных напряжений в призматическом образце, результаты которого могут служить обоснованием выбора технологии упрочнения для формирования полей остаточных напряжений требуемой структуры с целью повышения ресурса изделий.

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

Материалы данной главы излагаются в соответствии с публикациями автора данной диссертации [9, 10, 78, 93, 94, 112].

3.1. Постановка задачи

Условия эксплуатации элементов конструкций энергетического оборудования, авиадвигателестроения при повышенных температурах оказывают существенное влияние на состояние поверхностного упрочненного слоя, что интегрально приводит к релаксации остаточных напряжений (их уменьшению по модулю). Но поскольку положительное влияние упрочнения связывают с величиной сжимающих остаточных напряжений, то и возникает важная и актуальная задача разработки методов расчета релаксации остаточных напряжений. Проблема эта комплексная, и процесс релаксации объясняют с разных позиций. Так, специалисты в области металлофизики и материаловедения процесс релаксации остаточных напряжений связывают с тем, что в пластическом состоянии материала в приповерхностном слое деталей при высоких температурах возрастает скорость диффузионных процессов, увеличиваются частота и энергия колебаний атомов и их подвижность. К тому же диффузия вызывает разрыхление граничных слоев (зерен) металла, что снижает его прочность. Такая точка зрения может существовать, с ней можно согласиться, но при таком подходе трудно построить математическую модель на уровне механики сплошных сред, с помощью которой можно было бы решать краевые задачи. Описанные эффекты на уровне материаловедения или металлофизики, по всей видимости, на макроуровне приводят к деформации ползучести, развивающейся во времени (как и различного рода диффузионные процессы).

Поэтому в настоящей работе на уровне механики деформируемого твердого тела релаксация остаточных напряжений рассматривается как явление, вызванное ползучестью материала при высоких температурах.

Как отмечалось в главе 1, в настоящее время с этих позиций построены математические модели релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых цилиндрических изделиях, но отсутствуют аналогичные модели для поверхностно упрочненных плоских деталей. Поэтому основными задачами данной главы являются разработка математической модели релаксации остаточных напряжений для упрочненных призматических образцов при ползучести в условиях термоэкспозиции (температурной выдержки без механических нагрузок) и ее экспериментальная проверка, а также исследование вида напряженного состояния на релаксацию остаточных напряжений, в частности – при двухосном нагружении призматического образца.

3.2. Методика расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце в условиях термоэкспозиции при ползучести

Рассмотрим методику расчета кинетики остаточных напряжений, наведенных в процессе поверхностного пластического упрочнения призматического образца, в условиях высокотемпературной ползучести материала при отсутствии внешних сил (режим термоэкспозиции). 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 . Пусть 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 $E_0 > E_1$).

В дальнейшем будем рассматривать общий случай анизотропного упрочнения, т. е. предполагаем справедливость гипотезы (2.5) при $\alpha \neq 1$. Тогда начальное напряженно-деформированное состояние после упрочнения задается формулами (2.8), (2.9), а аппроксимация компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z)$ – формулой

(2.26). Полагаем также, что новых пластических деформаций при температурном нагреве не возникает, и они задаются соотношениями (2.9). Обобщаем справедливость гипотезы плоских сечений в виде (2.4) и на случай ползучести материала. Температурные деформации в дальнейшем не учитываются, поскольку они дают просто равномерное увеличение объема и не приводят к изменению остаточных напряжений в силу равномерного прогрева тела.

Найдем распределение напряжений для компоненты $\sigma'_x = \sigma'_x(z)$ при температуре $T = T_1$. Из (2.9) следует структура соотношения вида

$$q_x(z) = -\frac{\alpha(1-\nu^2)}{E_1(\alpha+\nu)}\sigma'_x(z).$$

При $T = T_0$ для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z)$ из (2.9) имеем

$$q_x(z) = -\frac{\alpha(1-\nu^2)}{E_0(\alpha+\nu)}\sigma_x(z).$$

Но в силу предположения, что новых пластических деформаций не возникает, из двух последних равенств имеем

$$\frac{\sigma'_x(z)}{E_1} = \frac{\sigma_x(z)}{E_0} \Rightarrow \sigma'_x(z) = \frac{E_1}{E_0}\sigma_x(z). \quad (3.1)$$

Другими словами, распределение остаточного напряжения $\sigma'_x(z)$ при температуре $T = T_1$ можно получить из распределения этой же компоненты при $T = T_0$ умножением ее на коэффициент $\frac{E_1}{E_0} < 1$, т. е. при мгновенном прогревании при $t = 0+0$ происходит скачок всех компонент тензора остаточных напряжений (в соответствии с формулами (3.1) и (2.8)).

Рассмотрим теперь методику решения задачи релаксации остаточных напряжений при термоэкспозиции в условиях ползучести по этапам.

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

$$\sigma_x(z, 0+0) = -\frac{E_1(\alpha + \nu)}{\alpha(1 - \nu^2)} q_x(z), \quad \sigma_y(z, 0+0) = \frac{1 + \alpha\nu}{\alpha + \nu} \sigma_x(z, 0+0), \quad (3.2)$$

при этом величина $q_x(z)$ (так же как и величины $q_y(z)$ и $q_z(z)$) определяется из решения задачи реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния после процедуры упрочнения при температуре $T = T_0$ и компоненты остаточных пластических деформаций не изменяются и в дальнейшем (в задаче ползучести образца).

Пусть теперь 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 будет накапливаться деформация ползучести, компоненты которой обозначим 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

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(z, t) &= \frac{1}{E_1} [\sigma_x(z, t) - \nu\sigma_y(z, t)] + q_x(z) + p_x(z, t) = 0, \\ \varepsilon_y(z, t) &= \frac{1}{E_1} [\sigma_y(z, t) - \nu\sigma_x(z, t)] + q_y(z) + p_y(z, t) = 0. \end{aligned} \quad (3.3)$$

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

Решая систему уравнений (3.3) относительно $\sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y(z, t)$, получаем соотношения, описывающие кинетику этих напряжений во времени вследствие ползучести:

$$\begin{aligned}\sigma_x(z,t) &= \frac{E_1}{\nu^2 - 1} \left[q_x(z) + p_x(z,t) + \nu (q_y(z) + p_y(z,t)) \right], \\ \sigma_y(z,t) &= \frac{E_1}{\nu^2 - 1} \left[q_y(z) + p_y(z,t) + \nu (q_x(z) + p_x(z,t)) \right].\end{aligned}\quad (3.4)$$

Таким образом, если известны значения компонент тензора деформаций ползучести $p_x(z,t)$ и $p_y(z,t)$, то величины $\sigma_x(z,t)$ и $\sigma_y(z,t)$ определяются из (3.4).

Деформации ползучести вычисляются с использованием теории ползучести. Как отмечено в главе 1, в качестве основного «рабочего» инструмента в дальнейшем будет использоваться теория ползучести энергетического типа, которая при сложном напряженном состоянии задана кинетическими уравнениями (1.43) – (1.51). Для высокопрочных жароустойчивых сплавов, которые используются в энергетических установках, как правило, пренебрегают вязкоупругой компонентой u_{ij} в соотношениях (1.43), (1.44), поскольку деформация ползучести этих сплавов существенно необратима. Кроме этого, первая стадия деформации ползучести может быть описана одним слагаемым для вязкопластической компоненты $v_{\omega\omega}^k$ в (1.45), поэтому величина $s=1$. Вязкопластическая компонента в (1.45) рассчитывается в главных осях. В рассматриваемой задаче для призматического образца оси координат введенной системы координат $OXYZ$ и являются главными осями. Ограничиваясь только первой и второй стадиями ползучести и учитывая наложенные ограничения на компоненты деформаций ползучести, реологическая модель (1.43) – (1.49) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}p_{ij}(t) &= v_{ij}(t) + w_{ij}(t); \\ \left[\begin{aligned} v_{\omega\omega}(t) &= (1 + \mu'') \beta_{\omega\omega}(t) - \mu'' (\beta_{11}(t) + \beta_{22}(t) + \beta_{33}(t)); \\ \dot{\beta}_{\omega\omega}(t) &= \begin{cases} \lambda B_{\omega\omega}(t), & B_{\omega\omega}(t) \sigma_{\omega\omega}(t) > 0, \\ 0, & B_{\omega\omega}(t) \sigma_{\omega\omega}(t) \leq 0; \end{cases} \\ B_{\omega\omega}(t) &= a \left(S(t) / \sigma^{**} \right)^{n-1} \left(\sigma_{\omega\omega}(t) / \sigma^{**} \right) - \beta_{\omega\omega}(t); \end{aligned} \right. \quad (3.5) \\ \dot{w}_{ij}(t) &= \frac{3c}{2\sigma^{**}} \left(\frac{S(t)}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\sigma_{ij}(t) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_0(t) \right); \end{aligned}$$

$$\sigma_0(t) = \sigma_{11}(t) + \sigma_{22}(t) + \sigma_{33}(t),$$

где $p_{ij}(t)$ – тензор деформации ползучести; $v_{ij}(t), w_{ij}(t)$ – тензоры вязкопластической (необратимой) компоненты деформаций и деформации вязкого течения; $S(t)$ – интенсивность напряжений; μ'' – аналог коэффициента Пуассона для компоненты $v_{\omega\omega}$ (по рекомендации [108] можно использовать $\mu'' = 0,42$); $\sigma^{**}, \lambda, a, n, c, m$ – параметры модели, методика идентификации которых хорошо известна и изложена в [79, 108].

Перейдем от индексных обозначений в (3.5) к обозначениям, принятым в (3.4). Для этого обозначим $p_{11} = p_x, p_{22} = p_y, p_{33} = p_z, \sigma_{11} = \sigma_x, \sigma_{22} = \sigma_y, \sigma_{33} = \sigma_z, v_{11} = v_x, v_{22} = v_y, v_{33} = v_z, \beta_{11} = \beta_x, \beta_{22} = \beta_y, \beta_{33} = \beta_z$ и учтем, что по повторяющемуся индексу ω суммирование в (3.5) не производится.

Тогда (3.5) для компонент $p_x(t), p_y(t)$ запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} p_x(t) &= v_x(t) + w_x(t); \\ \left[\begin{aligned} v_x(t) &= (1 + \mu'')\beta_x(t) - \mu''(\beta_x(t) + \beta_y(t)); \\ \dot{\beta}_x(t) &= \begin{cases} \lambda B_x(t), & B_x(t)\sigma_x(t) > 0, \\ 0, & B_x(t)\sigma_x(t) \leq 0; \end{cases} \\ B_x(t) &= a(S(t)/\sigma^{**})^{n-1}(\sigma_x(t)/\sigma^{**}) - \beta_x(t); \end{aligned} \right. \\ \dot{w}_x(t) &= c \left(\frac{S(t)}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_x(t) - \frac{1}{2}\sigma_y(t)}{\sigma^{**}} \right); \\ p_y(t) &= v_y(t) + w_y(t); \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\left[\begin{aligned} v_y(t) &= (1 + \mu'')\beta_y(t) - \mu''(\beta_y(t) + \beta_x(t)); \\ \dot{\beta}_y(t) &= \begin{cases} \lambda B_y(t), & B_y(t)\sigma_y(t) > 0, \\ 0, & B_y(t)\sigma_y(t) \leq 0; \end{cases} \\ B_y(t) &= a(S(t)/\sigma^{**})^{n-1}(\sigma_y(t)/\sigma^{**}) - \beta_y(t); \end{aligned} \right.$$

$$\dot{w}_y(t) = c \left(\frac{S(t)}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_y(t) - \frac{1}{2}\sigma_x(t)}{\sigma^{**}} \right).$$

Начальные условия для уравнений (3.6) имеют следующий вид:

$$p_x(t) = p_y(t) = v_x(t) = v_y(t) = w_x(t) = w_y(t) = 0, \quad \beta_x(t) = \beta_y(t) = 0. \quad (3.7)$$

Интенсивность напряжений в декартовой системе координат имеет представление

$$S(t) = \sqrt{\sigma_x^2(t) + \sigma_y^2(t) - \sigma_x(t)\sigma_y(t)}. \quad (3.8)$$

С использованием теории ползучести (3.6) рассчитываются значения $p_x(z, t)$, $p_y(z, t)$, входящие в формулу (3.4). Эти величины вычисляются численно «шагами» по времени. Суть метода состоит в следующем. Сначала осуществляется дискретизация по временной координате $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N = t^*$ с шагом $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ ($i = 0, 1, \dots, N-1$) и по пространственной переменной $0 = z_0 < z_1 < \dots < z_M = H$ (H – толщина образца, см. рис. 2.8). Пусть нам известны значения всех функций, входящих в (3.6), в каждой точке $(t = t_i, z = z_j)$, а значит, известны и значения $p_x(z_j, t_i)$, $p_y(z_j, t_i)$. Тогда на основании (3.6) вычисляются приращения компонент деформации ползучести $\Delta p_x(z_j, t_i)$, $\Delta p_y(z_j, t_i)$ за шаг времени Δt_i , при этом приращения соответствующих величин, входящих в дифференциальное соотношение (3.6) вычисляются по методу Эйлера. Например,

$$\Delta w_x(z_j, t_i) = c \left[\frac{S(z_j, t_i)}{\sigma^{**}} \right]^{m-1} \left(\frac{\sigma_x(z_j, t_i) - \frac{1}{2}\sigma_y(z_j, t_i)}{\sigma^{**}} \right) \Delta t_i.$$

Далее находятся значения

$$\begin{aligned} p_x(z_j, t_{i+1}) &= p_x(z_j, t_i) + \Delta p_x(z_j, t_i), \\ p_y(z_j, t_{i+1}) &= p_y(z_j, t_i) + \Delta p_y(z_j, t_i), \end{aligned}$$

а затем по формулам (3.4) определяются $\sigma_x(z_j, t_{i+1})$, $\sigma_y(z_j, t_{i+1})$, и процесс итерационно продолжается до достижения значением времени $t = t_N = t^*$. На первом шаге при $\Delta t_0 = t_1 - t_0$, $t_0 = 0$, используются начальные условия (3.7) и значения напряжений $\sigma_x(z, 0+0)$, $\sigma_y(z, 0+0)$.

Пусть теперь в момент времени $t = t^*$ происходит температурная разгрузка от $T = T_1$ до $T = T_0$, при этом модуль Юнга мгновенно изменяется с E_1 на E_0 . Тогда формулы (3.4) при $T = T_0$ принимают вид

$$\begin{aligned}\sigma_x(z, t^* + 0) &= \frac{E_0}{\nu^2 - 1} \left[q_x(z) + p_x(z, t^* + 0) + \nu (q_y(z) + p_y(z, t^* + 0)) \right], \\ \sigma_y(z, t^* + 0) &= \frac{E_0}{\nu^2 - 1} \left[q_y(z) + p_y(z, t^* + 0) + \nu (q_x(z) + p_x(z, t^* + 0)) \right].\end{aligned}\quad (3.9)$$

Соотношения (3.9) и задают окончательные выражения для остаточных напряжений после ползучести (для случая термоэкспозиции) в момент времени $t = t^* + 0$.

3.3. Проверка адекватности метода расчета релаксации остаточных напряжений в призматическом образце в условиях ползучести

Для проверки адекватности расчетных данных по релаксации остаточных напряжений экспериментальным данным в условиях термоэкспозиции использовали опытные данные для призматического образца $10 \times 10 \times 100$ мм из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С, приведенные в работе [81]. Методика реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций после ультразвукового упрочнения реализована в главе 2 и там же указано, что вторая часть образцов для всех четырех режимов упрочнения длительностью обработки 20 с (1 режим), 40 с (2 режим), 60 с (3 режим) и 80 с (4 режим) использовалась для исследования влияния термоэкспозиции (температурной выдержки) при температуре 650 °С в течение 100 часов на кинетику остаточных напряжений, а после температурной разгрузки экспериментально методом полосок [30] определялись остаточные напряжения. Выбор образцов из сплава ЭП742

обусловлен двумя причинами. Во-первых, наличием соответствующих экспериментальных данных для полей остаточных напряжений после упрочнения и после термоэкспозиции, а также наличием теории ползучести для этого сплава (3.5) или (3.6), поскольку в работе [79] для него приведены все значения параметров реологической модели (3.6) при температуре $T = 650$ °С. Во-вторых, сплав ЭП742 (или его модификация ЭП742–ИД) в настоящее время имеет широкое использование в авиадвигателестроении и энергетическом машиностроении. В таблице 3.1 приведен химический состав этого сплава.

Таблица 3.1

Химический состав жаропрочного сплава ЭП742 (ХН62БМКТЮ), %

С	Cr	Ti	Al	Nb	Mo	Co	Ni
0,04 – 0,08	13 – 15	2,4 – 2,8	2,4 – 2,8	2,4 – 2,8	1,5 – 5,5	9 – 11	основа

Сплав ЭП742 применяется для изготовления дисков турбин и компрессоров, валов, силовых колец, крепежных и других деталей, работающих при очень высоких температурах и высоких напряжениях. Одно из преимуществ этого сплава (кроме хороших прочностных характеристик) является удовлетворительная коррозионная стойкость во всеклиматических условиях. Этот сплав также применяется для производства дисков газотурбинных авиационных двигателей (ГТД) и двигателей наземного базирования (газоперекачивающие агрегаты, газотурбинные приводы энергетических установок и др.), работающих до 750 °С. Используемая в данной диссертации температура термоэкспозиции $T = 650$ °С вполне укладывается в диапазон «рабочих» температур элементов конструкций, например, дисков турбин ГТД. Несмотря на то, что этот жаропрочный сплав разработан более трех десятков лет назад, исследование его реологических параметров является актуальной задачей и в настоящее время. Так, в работе [64] изучены реологические свойства этого сплава при высокотемпературных испытаниях на сжатие цилиндрических образцов с различным отношением сходственных начальных размеров диаметра и высоты в

температурном диапазоне $1000 \div 1150$ °С, установлено повышение пластического течения при всех температурах и скоростях деформирования. Последний факт важен и для упрочненных конструкций, поскольку основную роль здесь играют именно напряжения сжатия в приповерхностном слое. Развиваются и новые технологии штамповки заготовок дисков турбины малогабаритных ГТД из сплава ЭП742–ИД [73]. В этой работе показана принципиальная возможность получения качественных заготовок дисков турбины малогабаритных ГТД с использованием метода изотермической деформации на воздухе, которая отличается от серийной технологии производства крупногабаритных штамповок дисков ГТД на мощных гидравлических прессах.

Несмотря на широкое техническое и технологическое использование деталей из сплава ЭП742, исследования по релаксации остаточных напряжений в плоских упрочненных образцах в научной литературе практически отсутствуют.

Вернемся к основной задаче данного пункта: проверке адекватности методики релаксации остаточных напряжений в брусе из сплава ЭП742. Экспериментальные данные для остаточных напряжений поверхностно упрочненного образца после ползучести под действием самоуравновешенных напряжений в условиях термоэкспозиции в течение 100 часов при $T = 650$ °С приведены на рис. 3.1 для режима упрочнения №1 (сплошная линия с маркером 4), а на рис. 3.2 – для режимов №2–4 (сплошные линии). Ультразвуковое механическое упрочнение относится к изотропному процессу упрочнения, поэтому в формулах (3.2) величина $\alpha = 1$ и начальное напряженно-деформированное состояние при $t = 0 - 0$ (после упрочнения) определяется соотношениями

$$\sigma_x(z, 0 - 0) = \frac{E_0}{1 - \nu} q_x(z), \quad \sigma_y(z, 0 - 0) = \sigma_x(z, 0 - 0),$$

где $\nu = 0,3$, а $E_0 = 2,21 \cdot 10^5$ МПа [79] – модуль Юнга при температуре упрочнения $T = 20$ °С. Исходные (начальные) эпюры остаточных напряжений после процедуры упрочнения ($T = 20$ °С) приведены на рис. 2.9. После температурного

прогрева до $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ величина $E_1 = 1,79 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ [79], а коэффициент Пуассона ν полагался не зависящим от температуры. После изменения температуры до $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ напряжения $\sigma'_x(z, 0+0)$ и $\sigma'_y(z, 0+0)$ рассчитывались по (3.1). Далее реализовывался блок расчета ползучести с начальным напряженно-деформированным состоянием, задаваемым напряжениями $\sigma'_x(z, 0+0)$ и $\sigma'_y(z, 0+0)$ на основе теории ползучести (3.6), параметры которой приведены в [79]: $s = 1$; $\sigma^{**} = 500 \text{ МПа}$; $\lambda_1 = \lambda = 0,022 \left(\frac{1}{\text{ч}}\right)$; $a_1 = a = 6,1 \cdot 10^{-3}$; $n = 3,29$; $c = 0,722 \cdot 10^{-6}$; $m = 14,3$. Как уже отмечалось выше, расчет релаксации остаточных напряжений $\sigma_x(z, t)$, $\sigma_y(z, t)$ в условиях ползучести осуществлялся на основании формул (3.4), при этом компоненты тензора деформации ползучести $p_x(z, t)$, $p_y(z, t)$ рассчитывались численно «шагами по времени» на основании методики, приведенной в пункте 3.2.

Подробно проанализируем результаты расчетов для первого режима упрочнения. На рис. 3.1 экспериментальная (сплошная линия) и расчетная (штриховая линия) зависимости, обозначенные маркером (цифрой) 1, соответствуют напряжению $\sigma_x = \sigma_x(z)$ после упрочнения при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t = 0 - 0$); маркером 2 отмечена эта же расчетная зависимость при ступенчатом изменении температуры с $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t = 0 + 0$); маркер 3 соответствует расчетной зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t^* - 0)$ после ползучести под действием самоуравновешенных остаточных напряжений в течение $t^* = 100$ часов при температуре $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$; маркером 4 обозначено распределение остаточных напряжений после температурной разгрузки с $T_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ в момент времени $t = t^* + 0$ (сплошная линия – экспериментальные данные [81], штриховая – расчетная эпюра). Предполагается, что температурная разгрузка также произошла «мгновенно». Для финишных остаточных напряжений (кривые с маркером 4) после «эксплуатации» в условиях термоэкспозиции отклонение расчетных данных от экспериментальных в норме (2.22) составляет величину

$\Delta = 27\%$. Из приведенных зависимостей следует, что в процессе ползучести остаточные напряжения $\sigma_x = \sigma_x(z, t^*)$ по модулю уменьшились в 1,54 раза по сравнению с первоначальными значениями, но их величина (по модулю) остается существенной в области сжатия: при $0 \leq z \leq 0,1$ (мм) – более 600 МПа. Еще одна особенность состоит в том, что экспериментальная эпюра имеет приповерхностный минимум, а расчетная зависимость экстремума не имеет (см. кривые с маркером 4 на рис. 3.1). На рис. 3.2 приведены финишные расчетные (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные линии) зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t^* + 0)$ после ползучести в течение 100 часов при $T = 650^\circ\text{C}$ с последующей температурной разгрузкой для режимов №2–4. Здесь также произошла релаксация остаточных напряжений, при этом их значения по модулю уменьшились в $1,4 \div 1,55$ раз. Как и для режима №1 имеется приповерхностный локальный экстремум для экспериментальной зависимости, а для расчетных кривых он отсутствует. Величина отклонения расчетных данных от экспериментальных в норме (2.22) составляет 27,4% для режима №2; 20,9% - для режима №3 и 37% - для режима №4.

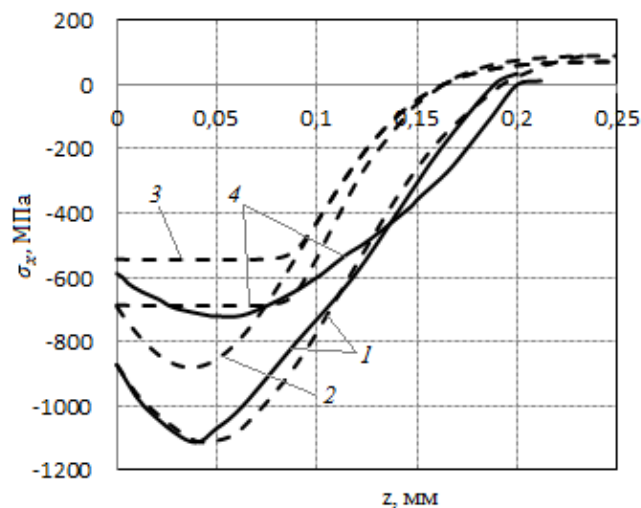


Рис. 3.1. Кинетика зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ в процессе ползучести (режим 1, сплав ЭП742):

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

Следует отметить, что, как отмечал Ю. Н. Работнов, «разница в 20% по деформациям между кривыми ползучести, снятыми при одном и том же напряжении для данной температуры на образцах из материала одной плавки, не считается чрезмерно большой» [75, §44, стр. 172–173], а в нашей работе специальные эксперименты на ползучесть сплава ЭП742 для исследуемых образцов не проводились, а использовались справочные данные для модели ползучести (3.6) из монографии [79]. Поэтому, несмотря на полученные отклонения расчетных данных от экспериментальных, результаты расчета релаксации остаточных напряжений следует признать удовлетворительными.

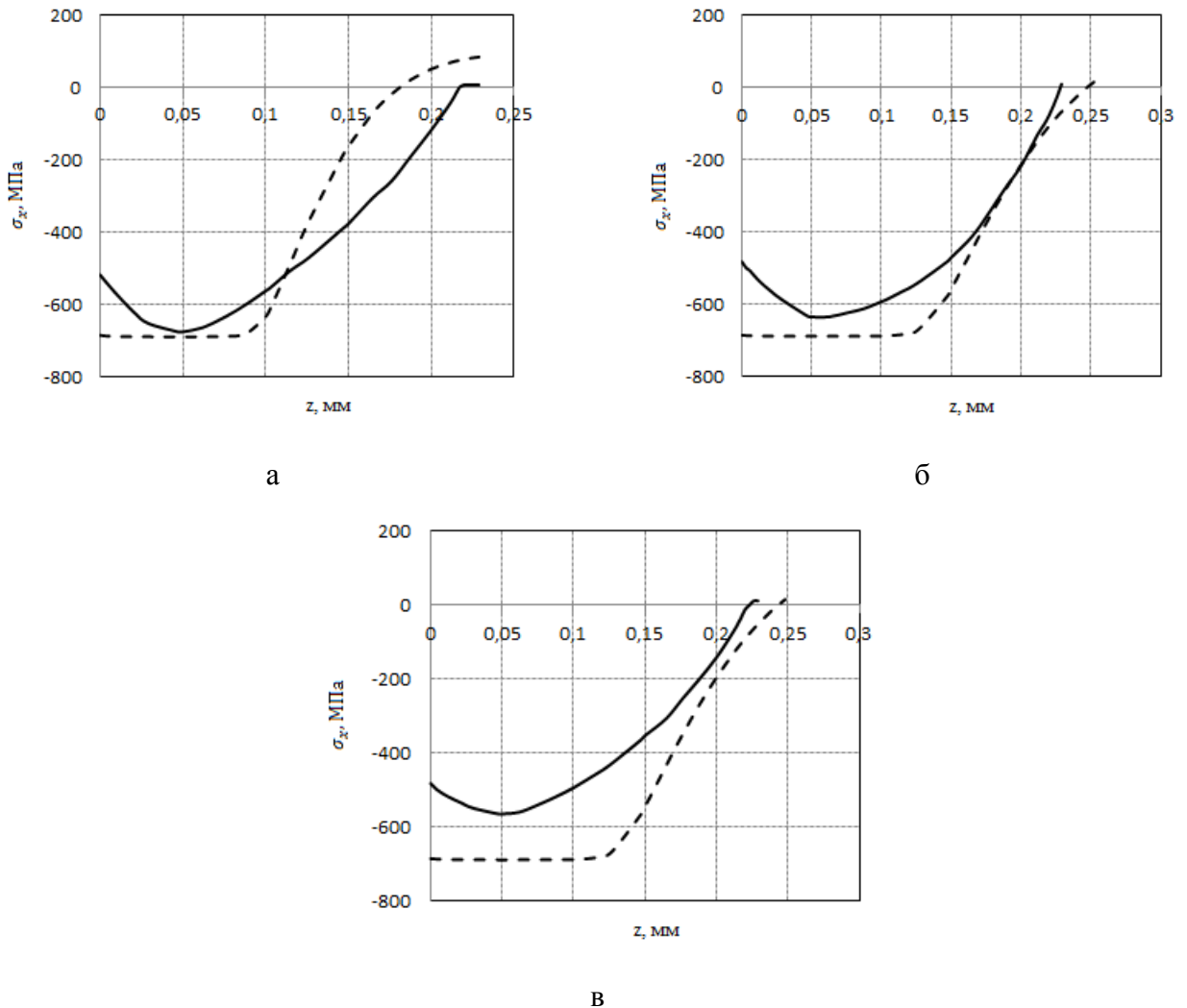


Рис. 3.2. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ в момент времени $t = 100$ ч после ползучести и температурной разгрузки:

а – режим 2; б – режим 3; в – режим 4

3.4. Исследование влияния вида напряженного состояния на релаксацию остаточных напряжений в призматическом брусе при двухосном растяжении

В предыдущем пункте исследовано влияние термоэкспозиции на релаксацию остаточных напряжений в упрочненной балке в условиях ползучести материала. Однако в реальных условиях эксплуатации термоэкспозиция реализуется крайне редко, основные режимы нагружения – силовые нагрузки. Поэтому в данном пункте рассматривается односторонне упрочненная пластина (брус) в условиях двухосного нагружения равномерно распределенными напряжениями $\sigma_x^0 = \text{const}$ и $\sigma_y^0 = \text{const}$, действующих ортогонально сечениям DCKL и ABCD соответственно, схема нагружения приведена на рис. 3.3, где заштрихована упрочненная грань. Задача рассматривается в декартовой системе координат, центр которой совмещен с точкой В (см. рис. 3.3).

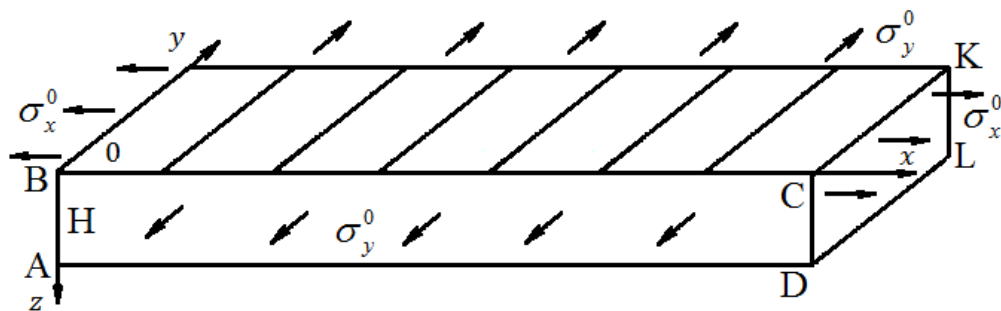


Рис. 3.3. Схема нагружения упрочненного призматического бруса

Сохраняя все обозначения, использованные в п. 3.3 и ранее, вводится гипотеза плоских сечений в виде

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

Другими словами сечения DCKL и ABCD (и им параллельные) остаются плоскими и в процессе деформирования и их смещения в направлении осей OX и OY зависят только от времени. Тогда в любой момент времени справедливы следующие равенства:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(z, t) &= e_x(z, t) + q_x(z) + p_x(z, t) = \varepsilon_x^0(t), \\ \varepsilon_y(z, t) &= e_y(z, t) + q_y(z) + p_y(z, t) = \varepsilon_y^0(t). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Величины $\varepsilon_x^0(t)$ и $\varepsilon_y^0(t)$ имеют представления

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^0(t) &= e_x^0(t) + p_x^0(t) = \frac{\sigma_x^0 - \nu\sigma_y^0}{E_1} + p_x^0(t), \\ \varepsilon_y^0(t) &= e_y^0(t) + p_y^0(t) = \frac{\sigma_y^0 - \nu\sigma_x^0}{E_1} + p_y^0(t).\end{aligned}\tag{3.11}$$

Тогда (3.10) с учетом (3.11) преобразуется к виду

$$\begin{aligned}\frac{1}{E_1}[\sigma_x(z,t) - \nu\sigma_y(z,t)] + q_x(z) + p_x(z,t) &= \frac{\sigma_x^0 - \nu\sigma_y^0}{E_1} + p_x^0(t), \\ \frac{1}{E_1}[\sigma_y(z,t) - \nu\sigma_x(z,t)] + q_y(z) + p_y(z,t) &= \frac{\sigma_y^0 - \nu\sigma_x^0}{E_1} + p_y^0(t).\end{aligned}\tag{3.12}$$

Преобразуем (3.12):

$$\begin{aligned}\sigma_x(z,t) - \nu\sigma_y(z,t) &= (\sigma_x^0 - \nu\sigma_y^0) + E_1[p_x^0(t) - q_x(z) - p_x(z,t)], \\ \sigma_y(z,t) - \nu\sigma_x(z,t) &= (\sigma_y^0 - \nu\sigma_x^0) + E_1[p_y^0(t) - q_y(z) - p_y(z,t)].\end{aligned}\tag{3.13}$$

Решая (3.13) относительно $\sigma_x(z,t)$ и $\sigma_y(z,t)$, получим

$$\begin{aligned}\sigma_x(z,t) &= \sigma_x^0 + \frac{E_1}{1-\nu^2} \left[(p_x^0(t) + \nu p_y^0(t)) - (q_x(z) + \nu q_y(z)) - (p_x(z,t) + \nu p_y(z,t)) \right], \\ \sigma_y(z,t) &= \sigma_y^0 + \frac{E_1}{1-\nu^2} \left[(p_y^0(t) + \nu p_x^0(t)) - (q_y(z) + \nu q_x(z)) - (p_y(z,t) + \nu p_x(z,t)) \right].\end{aligned}\tag{3.14}$$

Однако для реализации расчетов напряжений $\sigma_x(z,t)$ и $\sigma_y(z,t)$ на основании (3.14) необходимо знать величины $p_x^0(t)$ и $p_y^0(t)$, которые пока неизвестны. Для их определения запишем условие равенства внутренних и внешних сил, действующих в любом сечении, параллельном координатным плоскостям XOZ и YOZ :

$$\begin{aligned}\int_0^H \sigma_x(z,t) dz &= \int_0^H \sigma_x^0 dz, \\ \int_0^H \sigma_y(z,t) dz &= \int_0^H \sigma_y^0 dz.\end{aligned}$$

Учитывая, что $\sigma_x^0 = \text{const}$ и $\sigma_y^0 = \text{const}$, последние равенства принимают вид

$$\int_0^H \sigma_x(z,t) dz = \sigma_x^0 \cdot H, \quad (3.15)$$

$$\int_0^H \sigma_y(z,t) dz = \sigma_y^0 \cdot H.$$

Подставляя (3.14) в (3.15), получим:

$$\int_0^H [p_x^0(t) + \nu p_y^0(t)] dz - \int_0^H [q_x(z) + \nu q_y(z)] dz - \int_0^H [p_x(z,t) + \nu p_y(z,t)] dz = 0,$$

$$\int_0^H [p_y^0(t) + \nu p_x^0(t)] dz - \int_0^H [q_y(z) + \nu q_x(z)] dz - \int_0^H [p_y(z,t) + \nu p_x(z,t)] dz = 0.$$

Выполняя операцию интегрирования, получаем систему уравнений относительно $p_x^0(t)$ и $p_y^0(t)$:

$$p_x^0(t) + \nu p_y^0(t) = \frac{1}{H} \left\{ \int_0^H [q_x(z) + \nu q_y(z)] dz + \int_0^H [p_x(z,t) + \nu p_y(z,t)] dz \right\},$$

$$p_y^0(t) + \nu p_x^0(t) = \frac{1}{H} \left\{ \int_0^H [q_y(z) + \nu q_x(z)] dz + \int_0^H [p_y(z,t) + \nu p_x(z,t)] dz \right\}.$$

Решение этой системы имеет вид

$$p_x^0(t) = \int_0^H [q_x(z) + p_x(z,t)] dz, \quad (3.16)$$

$$p_y^0(t) = \int_0^H [q_y(z) + p_y(z,t)] dz.$$

Объединяя теперь (3.14) и (3.16), получаем систему для расчета кинетики остаточных напряжений $\sigma_x(z,t)$ и $\sigma_y(z,t)$ в процессе ползучести упрочненного образца. Начальные условия для этой системы следующие: $p_x^0(0) = 0$, $p_y^0(0) = 0$, $p_x(z,0) = 0$, $p_y(z,0) = 0$.

Рассмотрим второй (приближенный) прием вычисления величин $p_x^0(t)$, $p_y^0(t)$. Исходя из справедливости введенной гипотезы плоских сечений и в процессе ползучести, считаем, что тонкий упрочненный слой слабо влияет на осевые перемещения сечений ABCD и DCKL (и им параллельных) (см. рис. 3.3) в направлении осей OX и OY соответственно. Другими словами, предполагается,

что упрочненный слой деформируется в режиме «жесткого» нагружения при заданных законах перемещений (деформаций) боковых граней под действием внешних напряжений $\sigma_x^0 = \text{const}$ и $\sigma_y^0 = \text{const}$. Тогда величины p_x^0 и p_y^0 можно рассчитать по теории ползучести (3.6) в условиях сложного напряженного состояния при действии постоянных напряжений σ_x^0 и σ_y^0 . В этом случае уравнения состояния (3.6) можно проинтегрировать и получить аналитические зависимости для $p_x^0(t)$ и $p_y^0(t)$ в виде:

$$p_x^0(t) = c \left(\frac{S}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_x^0 - \frac{1}{2} \sigma_y^0}{\sigma^{**}} \right) t + a \left(\frac{S}{\sigma^{**}} \right)^{n-1} \left(\frac{\sigma_x^0 - \mu'' \sigma_y^0}{\sigma^{**}} \right) (1 - e^{-\lambda t}),$$

$$p_y^0(t) = c \left(\frac{S}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_y^0 - \frac{1}{2} \sigma_x^0}{\sigma^{**}} \right) t + a \left(\frac{S}{\sigma^{**}} \right)^{n-1} \left(\frac{\sigma_y^0 - \mu'' \sigma_x^0}{\sigma^{**}} \right) (1 - e^{-\lambda t}),$$
(3.17)

где $S = \sqrt{(\sigma_x^0)^2 + (\sigma_y^0)^2 - \sigma_x^0 \sigma_y^0} = \text{const}$.

В этом варианте расчета величины $p_x^0(t)$ и $p_y^0(t)$ можно рассчитать в любой момент времени, используя только значения $\sigma_x^0 = \text{const}$ и $\sigma_y^0 = \text{const}$, не привлекая неоднородное напряженное состояние вследствие поверхностного упрочнения, как в более общей методике (3.14) и (3.16).

Рассмотрим подробно алгоритм решения задачи расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце. На первом этапе ($t = 0 - 0$) выполняется реконструкция остаточных напряжений после упрочнения: определяется величина $\sigma_x = \sigma_x(z)$ (формула (2.9)) и рассчитываются величины $q_x = q_x(z)$ и $q_y = q_y(z)$ по формулам (3.2) при $\alpha = 1$ (в дальнейшем рассматривается изотропный характер упрочнения при $\alpha = 1$, к которому относится и УЗУ) с модулем Юнга E_0 для материала при нормальной («комнатной») температуре. На втором этапе ($t = 0$) осуществляется

температурная нагрузка с температуры T_0 до температуры «эксплуатации» T_1 ($T_1 > T_0$) с модулем Юнга E_1 :

$$\sigma_y(z,0) = \sigma_x(z,0) = -\frac{E_1}{1-\nu} q_x(z),$$

где учтено, что при $\alpha = 1$ $q_x(z) = q_y(z)$.

На третьем этапе ($t = 0 + 0$) выполняется силовая нагрузка напряжениями $\sigma_x^0 = \text{const}$ и $\sigma_y^0 = \text{const}$:

$$\sigma_x(z,0+0) = \sigma_x^0 - \frac{E_1}{1-\nu} q_x,$$

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

На четвертом этапе реализуется расчет релаксации остаточных напряжений в процессе ползучести при $t \in [0, t^*]$, где t^* – время «эксплуатации» при температуре T_1 . Здесь расчет осуществляется по формулам (3.14), (3.16) или (3.14), (3.17) с учетом, что $q_x(z) = q_y(z)$. Реализация той и другой схемы может быть осуществлена только численно с использованием уравнений состояния (3.6). Для этого вновь используется метод «шагов по времени». Осуществляется дискретизация временной координаты $t_i = t_0 + ih$ ($i = 0, 1, 2, \dots; t_0 = 0$); предполагается, что известны значения $\sigma_j(z, t_i)$, $p_j^0(t_i)$, $p_j(z, t_i)$ ($j = x, y$) в момент времени $t = t_i$; находятся приращения деформации ползучести $\Delta p_j(z, t_{i+1})$ интегрированием уравнений (3.6) методом Эйлера с шагом $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, а затем определяется деформация $p_j(z, t_{i+1}) = p_j(z, t_i) + \Delta p_j(z, t_{i+1})$. Следующим шагом является вычисление $p_x^0(t_{i+1})$ и $p_y^0(t_{i+1})$ на основании (3.16) или (3.17) и подстановка этих значений в (3.14) для вычисления $\sigma_x(z, t_{i+1})$ и $\sigma_y(z, t_{i+1})$. В конечном итоге, к моменту времени $t = t^*$ получим значения $\sigma_x(z, t^*)$, $\sigma_y(z, t^*)$, $p_x^0(t^*)$, $p_y^0(t^*)$, $p_x(z, t^*)$, $p_y(z, t^*)$.

На пятом этапе при $t = t^*$ осуществляется силовая разгрузка, тогда получаем следующие значения для остаточных напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_x(z, t^*) &= \frac{E_1}{1-\nu^2} \left\{ \left[p_x^0(t^*) + \nu p_y^0(t^*) \right] - (1+\nu) q_x(z) - \left[p_x(z, t^*) + \nu p_y(z, t^*) \right] \right\}, \\ \sigma_y(z, t^*) &= \frac{E_1}{1-\nu^2} \left\{ \left[p_y^0(t^*) + \nu p_x^0(t^*) \right] - (1+\nu) q_x(z) - \left[p_y(z, t^*) + \nu p_x(z, t^*) \right] \right\}.\end{aligned}\quad (3.18)$$

На последнем шестом этапе производится температурная разгрузка с температуры T_1 до температуры T_0 , и получаем финишные поля остаточных напряжений по формулам (3.18) с заменой модуля Юнга E_1 на E_0 .

Для исследования влияния вида напряженного состояния на кинетику остаточных напряжений в качестве модельных расчетов использована пластина толщиной $H = 10$ мм из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С. В качестве начального напряженно-деформированного состояния после упрочнения (УЗУ) использовалось НДС, полученное в главе 2 для упрочненного бруса (см. рис. 2.6). Для детального анализа использовалась первоначальная эпюра остаточных напряжений для режима №1. Напряжения σ_x^0 и σ_y^0 варьировались таким образом, что они удовлетворяли условию

$$\left(\sigma_x^0\right)^2 + \left(\sigma_y^0\right)^2 - \sigma_x^0 \sigma_y^0 = S_*^2, \quad (3.19)$$

где $S_*^2 = \text{const}$, т.е. пары точек (σ_x^0, σ_y^0) принадлежат эллипсу (3.19) (см. рис. 3.4).

В расчетах использовались величины $S_* = 300$ МПа и $S_* = 450$ МПа.

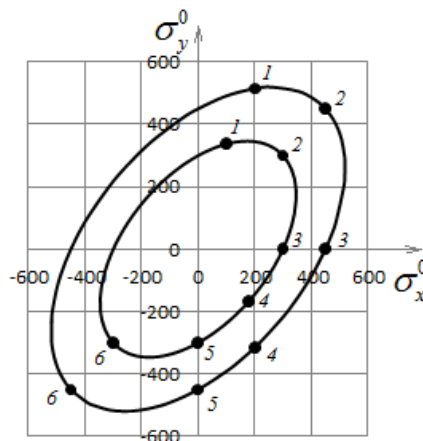


Рис. 3.4. Распределение значений σ_x^0 , σ_y^0

В таблице 3.2 представлены случаи нагружения образца, рассматриваемые в данной диссертации, соответствующие постоянным значениям интенсивности напряжений $S_* = 300$ МПа и $S_* = 450$ МПа.

Таблица 3.2

Значения напряжений σ_x^0 и σ_y^0 , используемых в расчетах

$S_* = 300$ МПа						
Точки на графике (рис. 3.4)	1	2	3	4	5	6
σ_x^0 , МПа	100	300	300	180	0	-300
σ_y^0 , МПа	337,2	300	0	-166,3	-300	-300
$S_* = 450$ МПа						
Точки на графике (рис. 3.4)	1	2	3	4	5	6
σ_x^0 , МПа	200	450	450	200	0	-450
σ_y^0 , МПа	515,3	450	0	-315,3	-450	-450

В качестве примера на рисунках 3.5 – 3.10 представлены зависимости остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $S_* = 300$ МПа с данными для σ_x^0 , σ_y^0 из таблицы 3.2. На графиках цифра 1 соответствует зависимостям после упрочнения при температуре $T_0 = 20$ °С; цифрами 2, 3 обозначено распределение остаточных напряжений после температурной и силовой нагрузки соответственно; цифрой 4 – зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t_*)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z, t_*)$ после ползучести в течение $t_* = 100$ часов при температуре $T_1 = 650$ °С; цифрами 5 и 6 – распределение остаточных напряжений после силовой и температурной разгрузки с $T_1 = 650$ °С до $T_0 = 20$ °С соответственно.

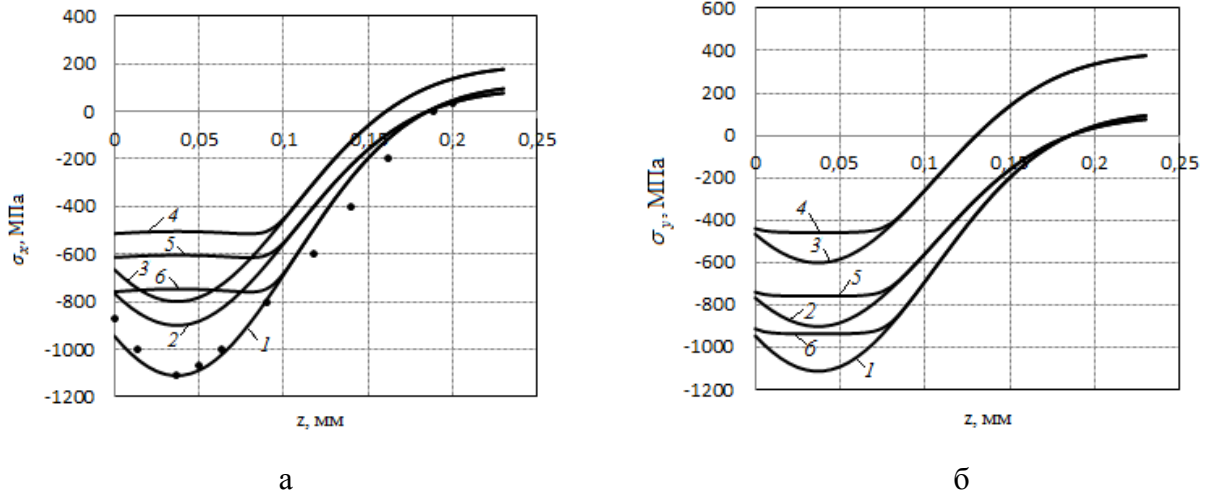


Рис. 3.5. Зависимости остаточных напряжений при двухосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = 100$ МПа, $\sigma_y^0 = 337,2$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

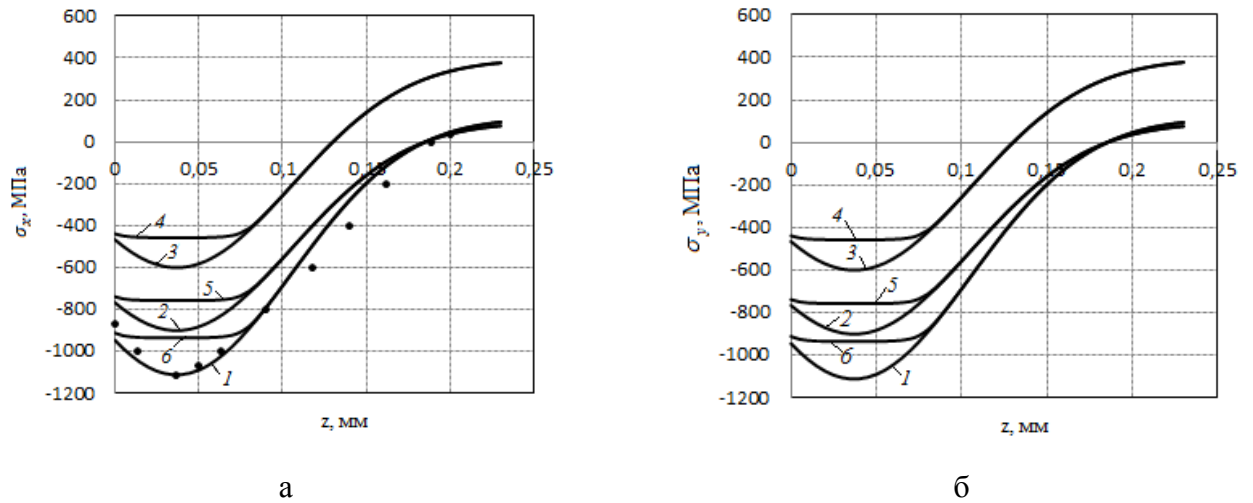


Рис. 3.6. Зависимости остаточных напряжений при двухосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = 300$ МПа, $\sigma_y^0 = 300$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

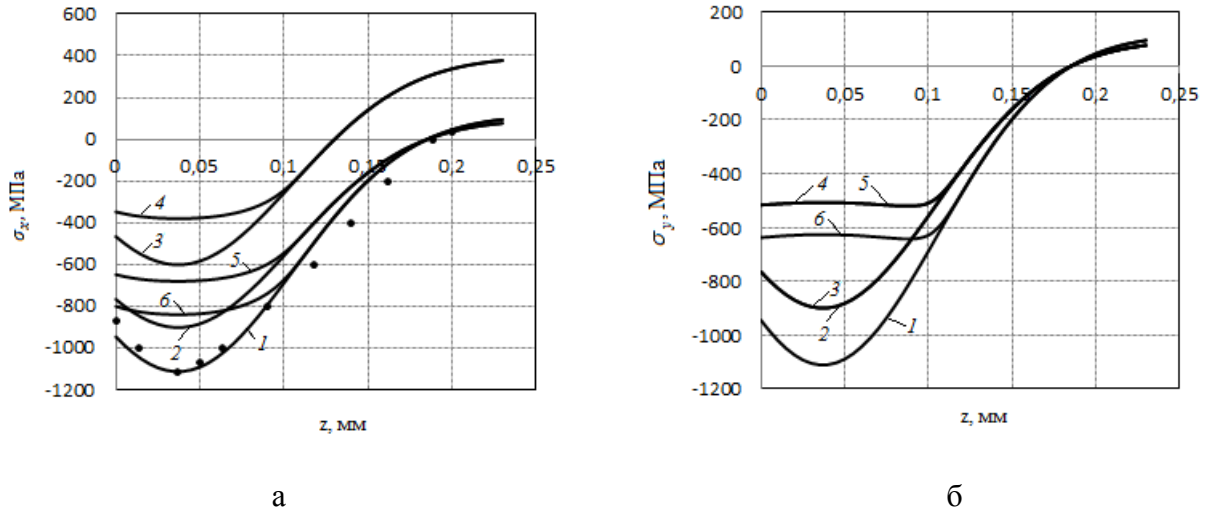


Рис. 3.7. Зависимости остаточных напряжений при одноосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = 300$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

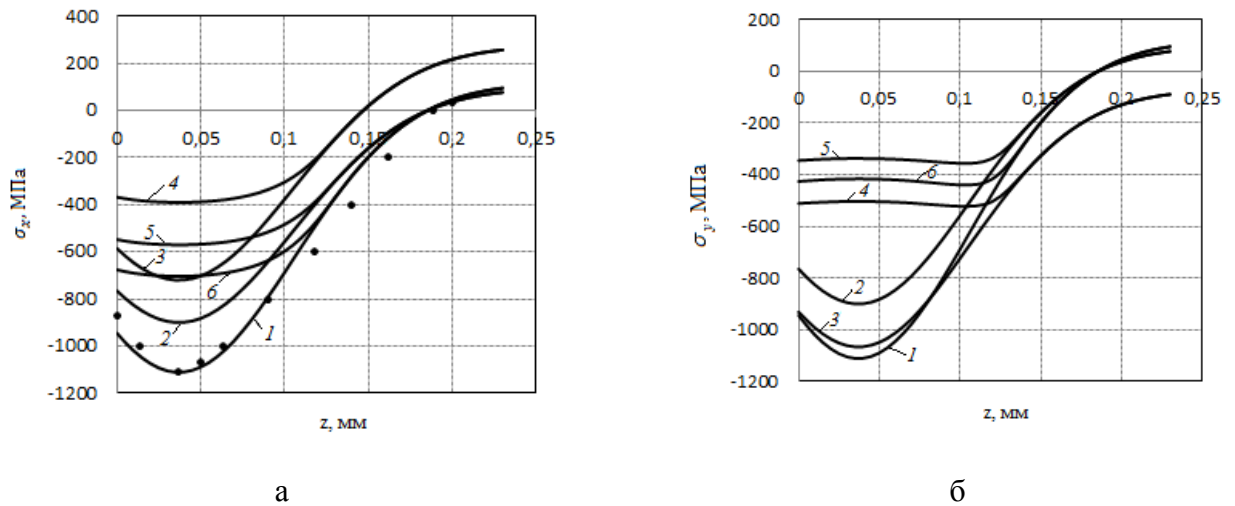


Рис. 3.8. Зависимости остаточных напряжений при двухосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = 180$ МПа, $\sigma_y^0 = -166,3$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

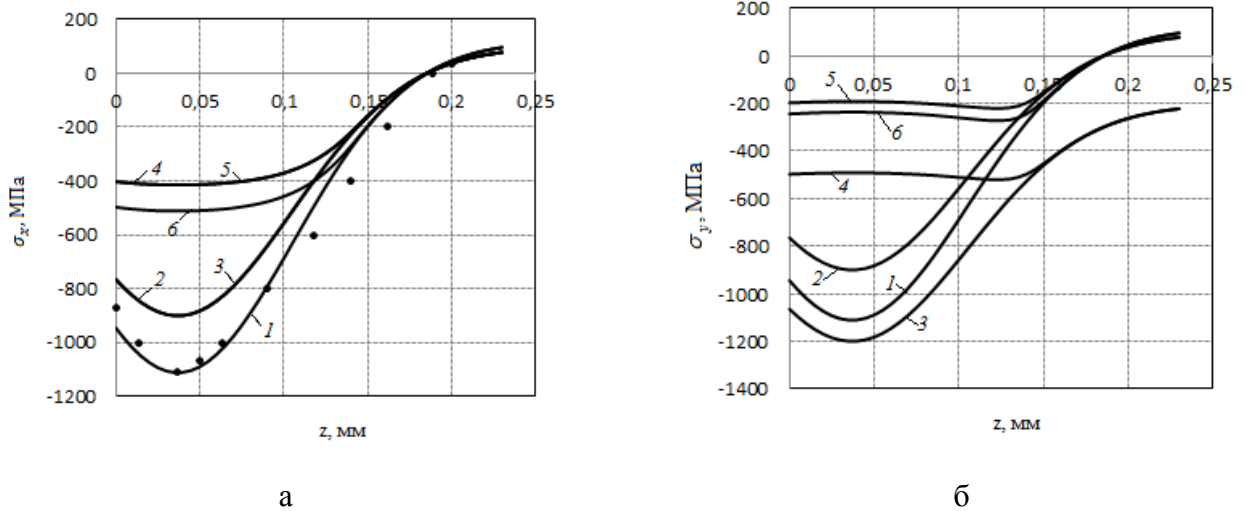


Рис. 3.9. Зависимости остаточных напряжений при одноосном нагружении образца при $\sigma_y^0 = -300$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

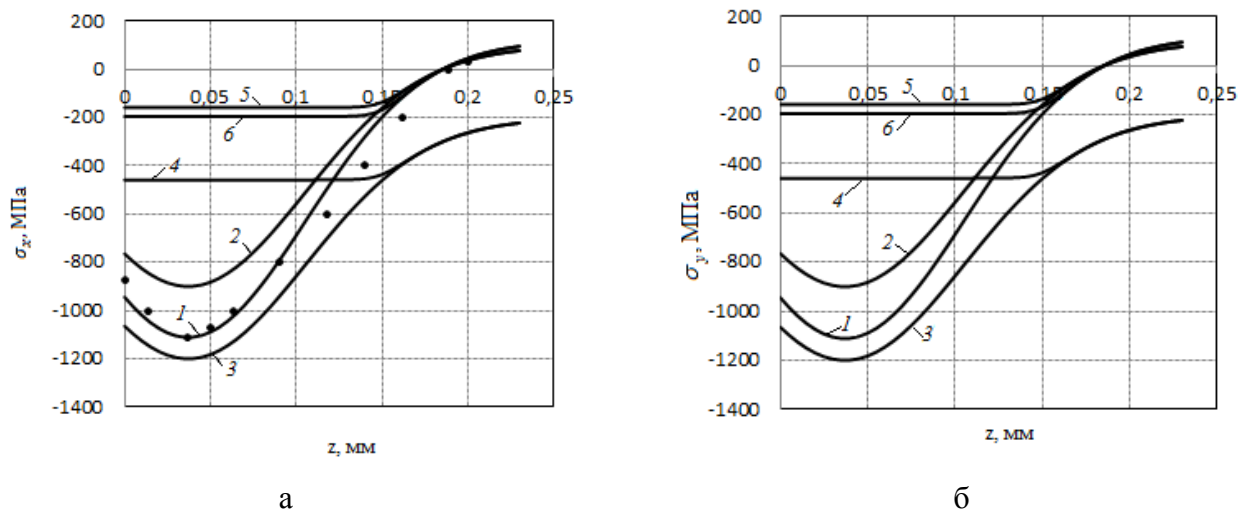


Рис. 3.10. Зависимости остаточных напряжений при двухосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = -300$ МПа, $\sigma_y^0 = -300$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

Аналогично описанному выше случаю нагружения образца, соответствующему постоянному значению интенсивности напряжений $S_* = 300$ МПа, на рисунках 3.11 – 3.16 представлены зависимости остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z)$ при $S_* = 450$ МПа с данными для σ_x^0 , σ_y^0 из таблицы 3.2. На графиках цифра 1 соответствует зависимостям после упрочнения

при температуре $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; цифрами 2, 3 обозначено распределение остаточных напряжений после температурной и силовой нагрузки соответственно; цифрой 4 – зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t_*)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z, t_*)$ после ползучести в течение $t_* = 100$ часов при температуре $T_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$; цифрами 5 и 6 – распределение остаточных напряжений после силовой и температурной разгрузки с $T_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

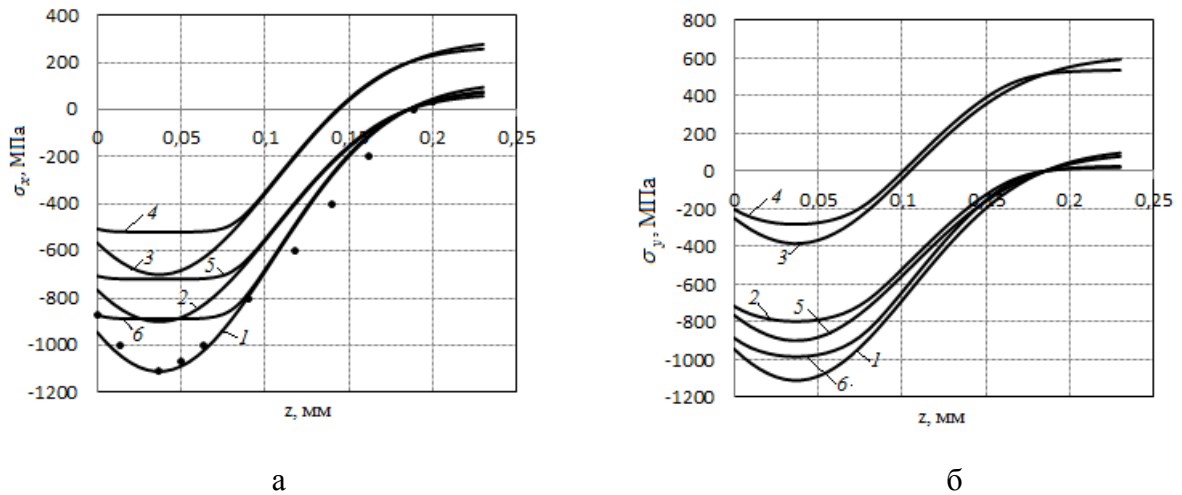


Рис. 3.11. Зависимости остаточных напряжений при двухосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = 200 \text{ МПа}$, $\sigma_y^0 = 515,3 \text{ МПа}$: а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

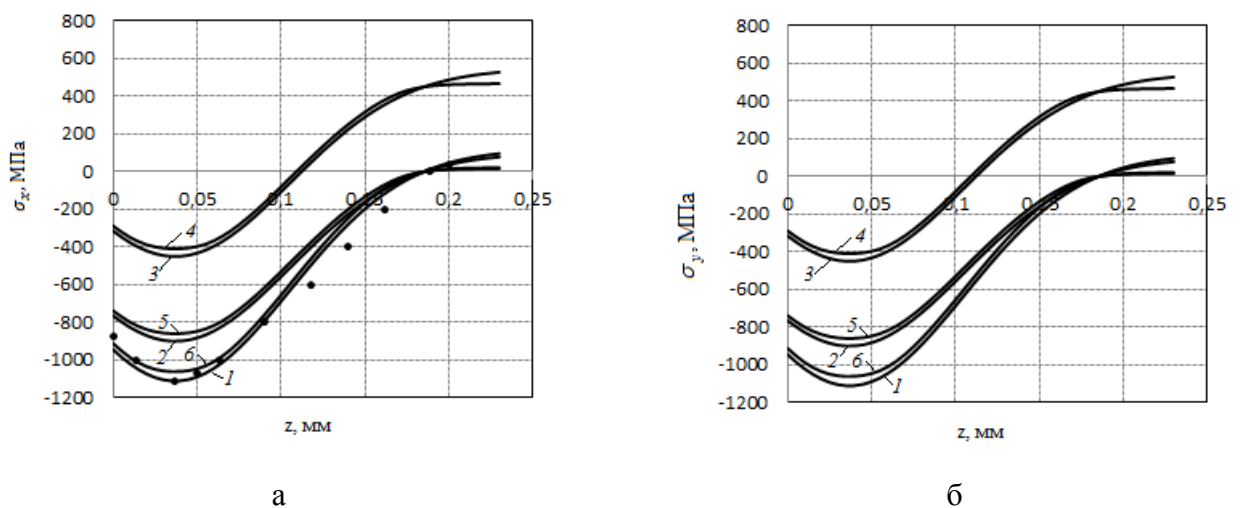


Рис. 3.12. Зависимости остаточных напряжений при двухосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = 450 \text{ МПа}$, $\sigma_y^0 = 450 \text{ МПа}$: а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

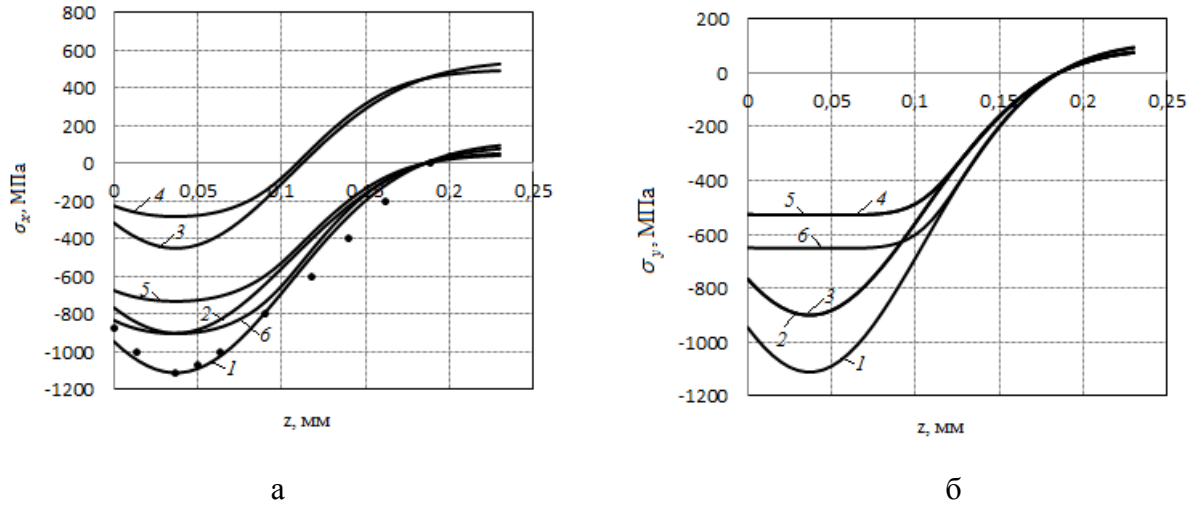


Рис. 3.13. Зависимости остаточных напряжений при одноосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = 450$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

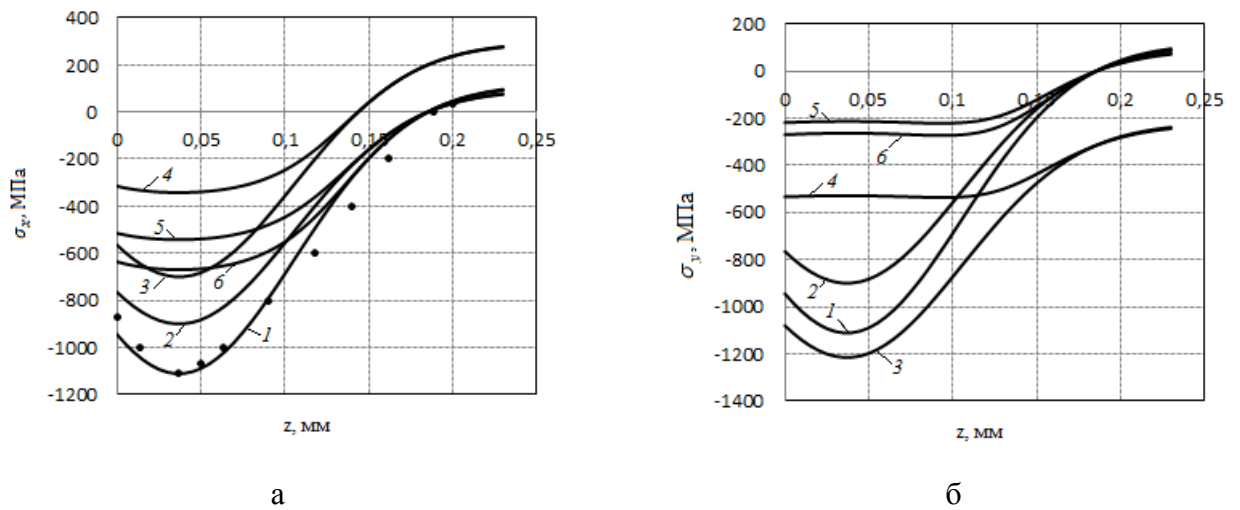


Рис. 3.14. Зависимости остаточных напряжений при двухосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = 200$ МПа, $\sigma_y^0 = -315,3$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

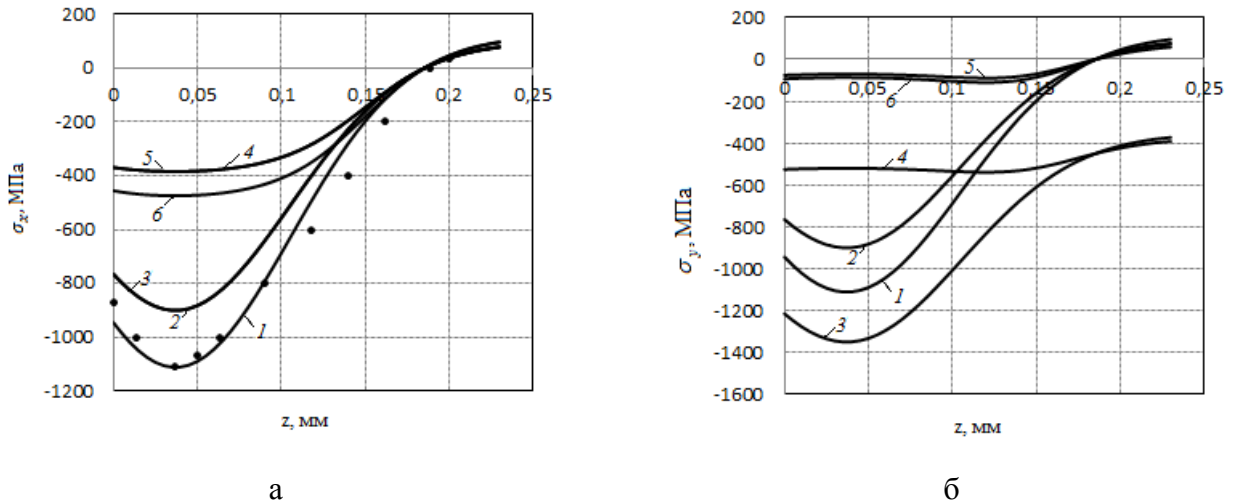


Рис. 3.15. Зависимости остаточных напряжений при одноосном нагружении образца при $\sigma_y^0 = -450$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

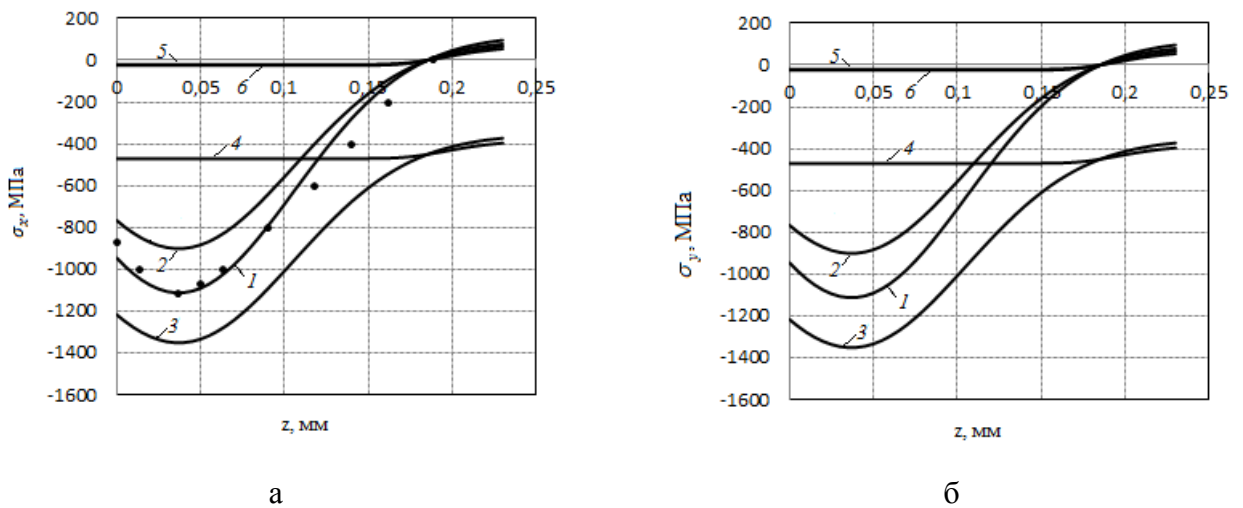


Рис. 3.16. Зависимости остаточных напряжений при двухосном нагружении образца при $\sigma_x^0 = -450$ МПа, $\sigma_y^0 = -450$ МПа : а – $\sigma_x = \sigma_x(z)$, б – $\sigma_y = \sigma_y(z)$; маркеры (точки) – экспериментальные данные после упрочнения

Проанализируем результаты расчетов, представленные на рис. 3.5 – 3.16. Отметим главную особенность: процессы релаксации компонент остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z)$ существенно зависят от вида напряженного состояния, определяемого приложенными внешними напряжениями σ_x^0 и σ_y^0 . При положительных значениях σ_x^0 и σ_y^0 наблюдается замедление процесса релаксации по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции ($\sigma_x^0 = 0$, $\sigma_y^0 = 0$),

что с точки зрения теории ползучести выглядит нелогично, поскольку общепринятая точка зрения – чем выше внешние нагрузки, тем интенсивнее идет процесс ползучести и, как следствие этого, интенсивнее происходит перераспределение внутренних напряжений. Но в упрочненных конструкциях ситуация другая. В дальнейшем будем сравнивать эпюры остаточных напряжений после упрочнения (на всех рисунках они обозначены цифрой 1) и финишную эпюру после ползучести и температурно-силовой разгрузки (на всех рисунках она соответствует цифре 6).

При $\sigma_x^0 > 0$ и $\sigma_y^0 > 0$ более медленно релаксация происходит для той компоненты остаточных напряжений, для которой больше соответствующая внешняя нагрузка (см. рис. 3.5, рис. 3.7, рис. 3.11, рис. 3.13). В случае $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 > 0$ процесс релаксации остаточных напряжений практически отсутствует (см. рис. 3.6, рис. 3.12). Объяснение этого неожиданного результата состоит в следующем. При положительных значениях σ_x^0 и σ_y^0 процесс ползучести в упрочненном слое осуществляется при напряжениях $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z)$, которые задаются графиками с цифрой 3, а при термоэкспозиции – при зависимостях, соответствующих маркеру 2. Из сравнения этих графиков следует, что по модулю остаточные напряжения при нагрузках σ_x^0 и σ_y^0 значительно меньше, чем при термоэкспозиции. Поэтому и интенсивность остаточных напряжений при нагрузках значительно меньше, чем при их отсутствии, а она играет важную роль в расчетах скорости ползучести (см. определяющие соотношения (3.6)), причем, учитывая большое значение показателя нелинейности для сплава ЭП742 ($m = 14,3$), скорость ползучести в каждой точке по координате z в области сжатия материала может отличаться для зависимостей, отмеченных маркерами 2 и 3, на несколько порядков. Это и приводит к существенному уменьшению скорости релаксации остаточных напряжений в поле внешних сил при $\sigma_x^0 > 0$ и $\sigma_y^0 > 0$.

В случае $\sigma_x^0 > 0$ и $\sigma_y^0 < 0$ релаксация остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z, t)$ протекает совершенно различно, при этом для компоненты $\sigma_y = \sigma_y(z, t)$ она весьма существенна. Из анализа графиков, представленных, например, на рис. 3.8, рис. 3.14, следует, что после ползучести и температурно-силовой разгрузки для этой компоненты ее значения (кривая б) почти в 3 раза меньше, чем после упрочнения (кривая 1), в то время как для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ эта величина составляет $\approx 1,6$ раза.

Когда $\sigma_x^0 < 0$ и $\sigma_y^0 < 0$ процесс релаксации обеих компонент тензора остаточных напряжений происходит наиболее интенсивно. Типичная ситуация представлена на рис. 3.10, рис. 3.16. Здесь практически произошла полная релаксация остаточных напряжений, ее скорость намного выше, чем в условиях термоэкспозиции. Как следует из рис. 3.10, рис. 3.16, в начальный момент времени при $t = 0 + 0$ после температурно-силового нагружения эпюра остаточных напряжений для обоих компонент (кривая 3) даже ниже, чем после процедуры упрочнения (кривая 1), т.е. интенсивность напряжений, вычисленная для компонент $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z, t)$ в области сжатия, в этом случае много больше, чем в случае термоэкспозиции и варианта нагружения $\sigma_x^0 > 0$ и $\sigma_y^0 > 0$. Поэтому скорость ползучести (с учетом высокого значения величины $m = 14,3$) для случая $\sigma_x^0 < 0$ и $\sigma_y^0 < 0$ на несколько порядков выше, чем, например, при термоэкспозиции.

Таким образом, при растягивающих нагрузках в упрочненном плоском образце наблюдается существенное замедление процесса релаксации остаточных напряжений, вплоть до ее прекращения (при $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 > 0$), а при сжимающих нагрузках наблюдается интенсификация процесса релаксации, вплоть до практически полной релаксации остаточных напряжений (при $\sigma_x^0 < 0$ и $\sigma_y^0 < 0$) по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции.

Сделаем несколько замечаний относительно возникающих ситуаций в прикладных задачах. Как уже указывалось ранее, сплав ЭП742 широко используется в авиадвигателестроении, например, при изготовлении дисков газотурбинных двигателей. В процессе эксплуатации в материале диска вследствие массовых сил от вращения возникают в основном только растягивающие напряжения. С этой точки зрения, полученные выше результаты играют важную роль в технических задачах, поскольку в процессе эксплуатации скорость релаксации остаточных напряжений в нагруженном состоянии будет существенно замедляться по сравнению даже с ненагруженным состоянием, т.е. остаточные напряжения будут более длительное время сохраняться в материале упрочненного диска. А, как известно, «благоприятное» воздействие упрочнения связывают именно с наличием отрицательных остаточных напряжений. Аналогичная ситуация будет наблюдаться, например, и для упрочненных вращающихся лопаток (разумеется изготовленных из других («лопаточных») материалов).

3.5. Выводы по главе 3

1. Разработана не имеющая аналогов методика расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении.
2. Выполнена проверка адекватности данных расчета релаксации остаточных напряжений по разработанной методике экспериментальным данным для призматического образца после ультразвукового поверхностного упрочнения из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С в частном случае термоэкспозиции. Наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных для четырех режимов поверхностного упрочнения.
3. 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 для образцов из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С 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 в течение 100 часов по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции, а в частном случае всестороннего растяжения процесс релаксации остаточных напряжений практически отсутствует. При сжимающих нагрузках, наоборот, процесс релаксации интенсифицируется по сравнению с термоэкспозицией, и в частном случае всестороннего сжатия происходит практически полная релаксация остаточных напряжений.
4. Даны рекомендации по использованию полученных теоретических результатов в прикладных задачах механики упрочненных конструкций в поле массовых сил при вращении.

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

Материалы данной главы излагаются в соответствии с публикациями автора данной диссертации [88–90, 154].

4.1. Постановка задачи

Тонкостенные цилиндрические оболочки – широко распространенный технический элемент в различных конструкциях машиностроения, нефтехимии, нефтепереработке, авиадвигателестроении, энергетическом машиностроении и других промышленных комплексах. Как уже отмечалось многократно выше, во многих областях промышленности в качестве технологической операции, повышающий ресурс цилиндрических изделий, используют поверхностное пластическое упрочнение. Для тонкостенных полых и сплошных цилиндров разработаны методики как реконструкции остаточных напряжений после упрочнения, так и их релаксации в процессе высокотемпературной ползучести материала конструкции, но лишь при одностороннем упрочнении поверхности цилиндров [82, 92, 97–101 и другие]. Хотя вопросам упрочняющих технологий в отечественных и зарубежных исследованиях посвящена обширная литература, в ней можно найти единичные (в основном экспериментальные) работы, в которых содержатся сведения о двухстороннем упрочнении ППД тонкостенных трубопроводов малого диаметра, а теоретические методы реконструкции остаточных напряжений для этого типа конструкций просто отсутствуют, не говоря уже о методах оценки релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести.

В связи с изложенным целью настоящей главы является разработка феноменологических методов реконструкции полей остаточных напряжений (и пластических деформаций) и их релаксации в процессе ползучести как при двухстороннем упрочнении внешней и внутренней поверхности тонкостенных

трубок $\varnothing 12 \times 1$ мм из стали X18H10T (и ее многочисленных аналогов), так и в состоянии поставки. Выбор этого объекта исследования обусловлен следующими причинами.

Во-первых, сталь X18H10T (и ее аналоги) – это один из наиболее популярных и востребованных в инженерной практике сплавов в России, Северной Америке, странах Евросоюза, Японии, Китая, Южной Кореи и других странах. Материал устойчив к коррозии и воздействию химически активных соединений, обладает большой механической прочностью и легко обрабатывается. Эти эксплуатационные качества позволяют исследовать этот нержавеющий сплав в различных отраслях. Его химический состав (в процентах) приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Химический состав стали X18H10T, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
до 0,12	до 0,8	до 2	9 – 11	до 0,02	до 0,035	17 – 19	до 0,3	0,4 – 1,5	~ 67

Химический состав сплава непосредственно влияет на физические и технические свойства X18H10T, в частности, наличие большого количества хрома (Cr) придает материалу высокую стойкость к коррозии. Никель (Ni) в составе стали существенно повышает ее стойкость к кислотам и другим химически активным соединениям. Наличие титана (Ti) придает материалу дополнительную механическую прочность. Так, ее используют для нужд химической промышленности, из этого сплава изготавливают емкости и трубопроводы для хранения и транспортировки различных агрессивных веществ (азотной, уксусной, фосфорной кислоты и их соединений). Широкое применение она имеет в нефтепереработке (трубопроводы, элементы оборудования), машиностроении (выхлопные коллекторы, различные комплектующие), криогенной технике (теплообменники, трубопроводы высокого давления), авиадвигателестроении (пневмогидросистемы, различные комплектующие), пищевой промышленности.

Температурный диапазон промышленного использования стали X18H10T составляет до 600 °С при обычных условиях и до 350 °С в агрессивных средах.

Во-вторых, прямолинейные трубки $\varnothing 12 \times 1$ мм являются частью трубопроводов авиационных пневмогидросистем и для таких объектов имеются экспериментальные данные по распределению полей остаточных напряжений для осевой и окружной компонент по глубине слоя на внутренней и внешней поверхностях трубок как в состоянии поставки, так и после двухстороннего упрочнения, которые в дальнейшем и были использованы для построения соответствующих математических моделей.

4.2. Математическая модель реконструкции остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения

После изготовления деталей используют широкий арсенал отделочных операций поверхности – шлифование, полирование, притирка, суперфиниширование и другие. В качестве заключительной операции часто используют полирование под давлением, которое благоприятно воздействует на структуру поверхностного слоя. В частности, происходит смыкание кристаллитов, разобщенных под действием предшествующей механической обработки, поверхностный слой уплотняется, острые кромки микронеровностей сглаживаются, а впадины и микротрещины затягиваются [65]. Но при любой отделочной технологии, во-первых, всегда остаются дефекты поверхности, во-вторых, в приповерхностном слое возникают технологические остаточные напряжения, которые в подавляющем числе случаев играют отрицательную роль и снижают ресурс деталей. Поэтому их нужно учитывать в расчетной практике, поскольку они «накладываются» на «рабочие» напряжения в процессе эксплуатации, либо использовать «контртеhnологии», которые нивелируют эти напряжения, например, методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

При использовании ППД происходит сглаживание шероховатостей, смятие гребешков, уменьшение глубины и остроты входящих углов рисок, и самое существенное, в приповерхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, которые повышают усталостную прочность, что проиллюстрировано в огромном количестве работ за более чем семидесятилетнюю историю развития этого научного направления.

Особую роль упрочняющие обработки поверхности играют для авиационных элементов конструкции, где наряду с требованиями высокой надежности ключевым является требование снижения веса и материалоемкости. Одним из таких путей (в совокупности с увеличением прочности) и являются методы поверхностного пластического деформирования.

Одним из важных элементов летательных аппаратов являются трубопроводы авиационных пневмогидросистем и другого технологического назначения. Надежность трубопроводов зависит не только от совокупности эксплуатационных нагрузок, но и от технологии их изготовления и последующих технологических операций «упрочнения» поверхностного слоя [110, 116]. Отметим, в частности, что опыт эксплуатации тонкостенных авиационных трубопроводов свидетельствует, что усталостные трещины образуются как на наружной, так и на внутренней поверхностях [110, 116]. Отсюда следует, что в подобного рода деталях оправданным является поверхностно пластическое упрочнение обеих поверхностей, внутренней и внешней, на которых тем самым создаются «благоприятные» зоны со сжимающими остаточными напряжениями, препятствующие возникновению и развитию трещин.

В связи с вышеизложенным в настоящей главе и поставлена задача экспериментального и теоретического исследования остаточных напряжений в прямолинейных трубках как в состоянии поставки, так и после двухстороннего упрочнения. При изложении материала автор диссертации ориентировался на соответствующие экспериментальные данные для трубок из стали X18H10T, полученные на кафедре «Сопротивление материалов» Самарского национального исследовательского университета имени С. П. Королева методом колец и полосок

[29–31] и опубликованные в работе [90] авторов Радченко В. П., Павлова В. Ф., Саушкина М. Н., Бербасовой Т. И.

Задача рассматривается в цилиндрической системе координат. Сначала проанализируем экспериментальные данные на внешней и внутренней поверхностях для образцов в состоянии поставки. На рис. 4.1 маркерами приведены экспериментальные значения остаточных напряжений $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ (точки) и $\sigma_z = \sigma_z(r)$ (треугольники) для трубок из стали X18H10T, где $R_1 \leq r \leq R_2$, $R_1 = 5$ мм, $R_2 = 6$ мм.

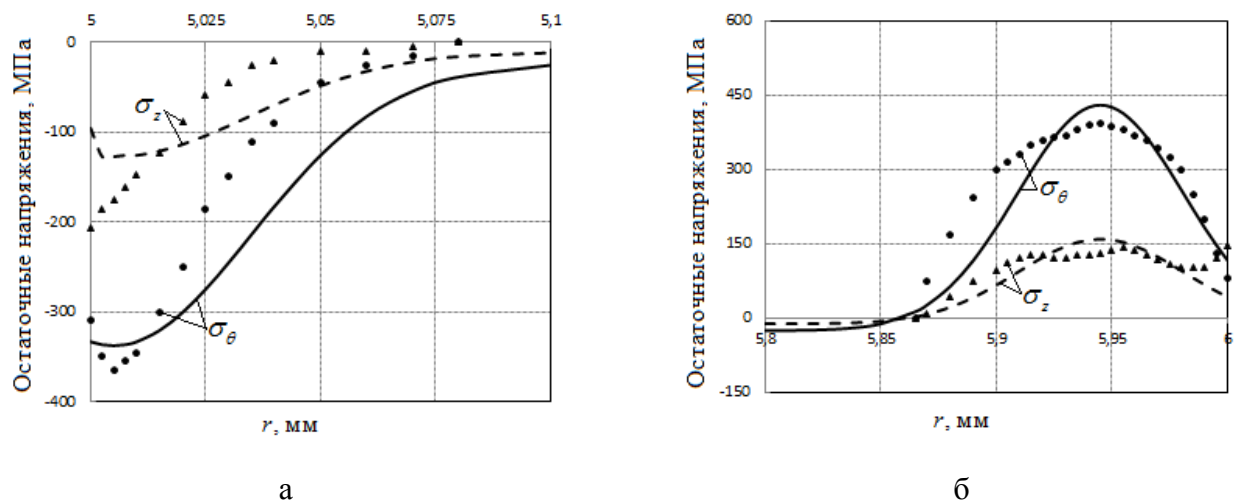


Рис. 4.1. Экспериментальные (маркеры) и расчетные зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ (сплошные линии) и $\sigma_z = \sigma_z(r)$ (штриховые линии) в областях, прилегающих к внутренней (а) и внешней (б) поверхности трубок в состоянии поставки

Анализ представленных экспериментальных данных свидетельствует о достаточно больших значениях остаточных напряжений в приповерхностных слоях толщиной от 100 мкм до 160 мкм в трубках, причем во внутреннем и внешнем слоях они противоположного знака. В частности, на внешнем контуре наблюдаются растягивающие остаточные напряжения, что приводит к «раскрытию» всех вакансий и способствует разрушению материала и, в конечном итоге, приводит к ускоренному зарождению и раскрытию микротрещин, например, в условиях многоциклового нагружения.

Кроме этого, если никаких «компенсирующих» технологических операций для трубок в состоянии поставки не проводится, то при оценке ресурса этого

конструктивного элемента остаточные напряжения нужно учитывать в расчетной практике в совокупности с эксплуатационными нагрузками. Отсюда возникает потребность в разработке математических моделей реконструкции остаточных напряжений для образцов в состоянии поставки. Для этой цели в настоящей работе разработан феноменологический метод расчета остаточных напряжений и необратимых деформаций при одновременном моделировании напряженно-деформированного состояния во внутреннем и внешнем приповерхностных слоях тонкостенных образцов в состоянии поставки (ниже он будет обобщен и на двухстороннее поверхностно пластическое упрочнение трубок).

Методика реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций разработана для одностороннего упрочнения цилиндрических полых образцов в работах [91, 92, 96, 99], а в работе [90] она обобщена на двухстороннее упрочнение. Основные расчетные формулы в этом случае совпадают с (1.1) – (1.6). Для удобства изложения приведем их еще один раз:

$$\begin{aligned}\sigma_r(r) &= \frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta(\xi) d\xi, \quad R_1 \leq r \leq R_2 \quad (R_1 = 5 \text{ мм}, \quad R_2 = 6 \text{ мм}), \\ q_\theta(r) &= \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1+\alpha\nu)^2} r^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha\nu}} \int_{R_1}^r \xi^{\frac{1+\alpha-\alpha\nu}{1+\alpha\nu}} [\sigma_r(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta(\xi)] d\xi + \\ &\quad + \frac{1+\nu}{E(1+\alpha\nu)} [v\sigma_r(r) - (1-\nu)\sigma_\theta(r)], \\ q_z(r) &= \alpha q_\theta(r), \quad q_r(r) = -(1+\alpha)q_\theta(r), \\ \varepsilon_z^0 &= \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \xi \left[q_z(\xi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_r(\xi) + \sigma_\theta(\xi)) \right] d\xi, \\ \sigma_z(r) &= E [\varepsilon_z^0 - q_z(r)] + \nu [\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)].\end{aligned}\tag{4.1}$$

Единственное изменение касается лишь выбора аппроксимации зависимости для $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ ($R_1 \leq r \leq R_2$). Из анализа экспериментальных зависимостей для $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$, представленных на рис. 4.1, схематически эту зависимость при $R_1 \leq r \leq R_2$ можно представить, как на рис. 4.2. Для аппроксимации этой зависимости используется следующая функциональная зависимость:

$$\sigma_{\theta}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left[-\frac{(r - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2}\right] - \sigma_2 \exp\left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2}\right], \quad (4.2)$$

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

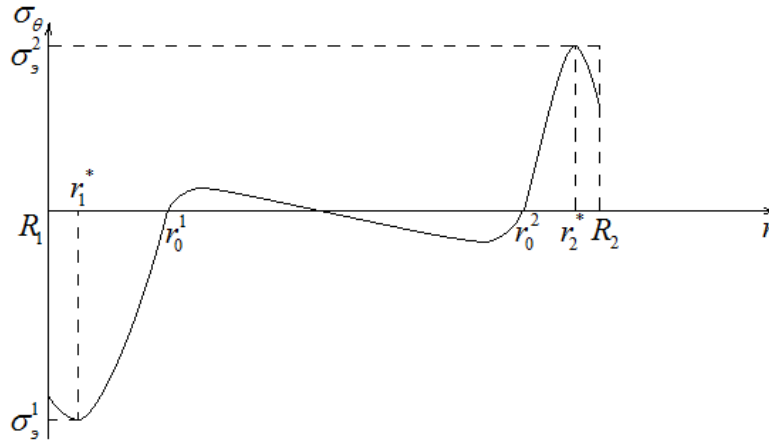


Рис. 4.2. Схематический график зависимости остаточных напряжений $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(r)$ в образцах в состоянии поставки

Численные значения параметров зависимости (4.2) определяются из решения системы уравнений, образованной функциональными уравнениями

$$\sigma_{\theta}(r_1^*) = \sigma_3^1, \quad \sigma_{\theta}(r_2^*) = \sigma_3^2, \quad \sigma_{\theta}(r_0^1) = 0, \quad \sigma_{\theta}(r_0^2) = 0 \quad (4.3)$$

и условием самоуравновешенности окружных остаточных напряжений

$$\int_{R_1}^{R_2} \sigma_{\theta}(r) dr = 0, \quad (4.4)$$

где $r_1^* = R_1 + h_1^*$, $r_2^* = R_2 - h_2^*$ – значения радиуса, в которых достигаются локальные экстремумы σ_3^1 и σ_3^2 экспериментальной зависимости $\sigma_{\theta}(r)$ во внутреннем и внешнем приповерхностных слоях, соответственно; r_0^1 и r_0^2 – значения радиусов, в которых экспериментальная эпюра остаточных напряжений принимает нулевые значения в областях, примыкающих к внутренней и внешней поверхности цилиндрической трубки (см. рис. 4.2).

Таким образом, модель реконструкции технологических остаточных напряжений для образцов в состоянии поставки состоит из соотношений (4.1),

(4.2), а зависимости (4.3), (4.4) используются для процедуры идентификации этой модели.

Рассмотрим теперь случай двухстороннего поверхностного упрочнения трубок. Дальнейшие теоретические исследования вновь основаны на экспериментальных данных для трубок из X18H10T, которые приведены в [90], полученных виброударной обработкой внешней и внутренней поверхности образцов той же партии, которая исследовалась в состоянии поставки. Виброударная обработка дробью (УЗУ) – это широко используемый технологический способ упрочнения тонкостенных деталей [1, 24, 49, 57, 126, 149 и другие]. В работе [90] описана виброударная обработка дробью трубопровода, которая проводилась на специальном вибростенде, принципиальная схема которого представлена на рис. 4.3. К столу вибростенда 3 крепился цилиндрический контейнер 2, заполненный микрошариками диаметром 3 мм. Упрочняемая трубка (1) из стали X18H10T заполнялась на 50% микрошариками диаметром 1 мм и помещалась внутрь контейнера. Оси трубки и контейнера совпадали. Пространство между трубкой и контейнером на 80% было заполнено микрошариками. Внутри трубки устанавливались пробки 4, ограничивающие упрочненную зону. Для обеспечения равномерного упрочнения трубка в контейнере вращалась. Длина контейнера и упрочняемой трубки выбиралась так, чтобы собственная частота участка была значительно выше частоты стенда. Частота колебаний стенда – 18,5 КГц, время упрочнения – 20 мин.

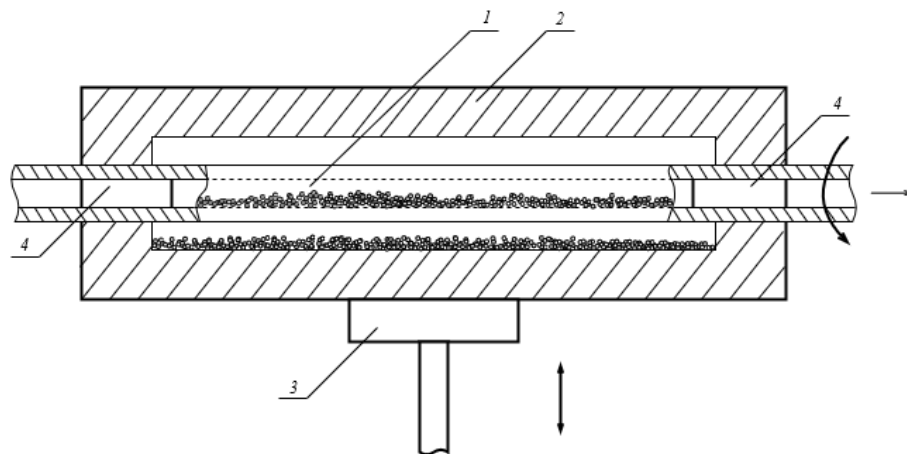


Рис. 4.3. Схема испытаний на вибростенде: 1 – упрочняемая трубка; 2 – контейнер; 3 – стол вибростенда; 4 – пробки

Экспериментальное определение остаточных напряжений σ_θ и σ_z после упрочнения выполнено методом колец и полосок – его технология и математическое обеспечение для его реализации подробно описаны в главе 1 настоящей диссертации. Расчетно-экспериментальные значения для окружной и осевой компонент тензора остаточных напряжений в областях, прилегающих к внутренней и внешней поверхностям трубок, приведены маркерами на рис. 4.4.

Анализ полученных экспериментальных результатов, представленных на рис. 4.4, позволяет сделать вывод, что упрочнение виброударной обработкой микрошариками, позволяет создать у внутренней и внешней поверхности «благоприятные» сжимающие остаточные напряжения значительной величины и нивелировать тем самым отрицательные последствия механической отделочной обработки поверхности трубки.

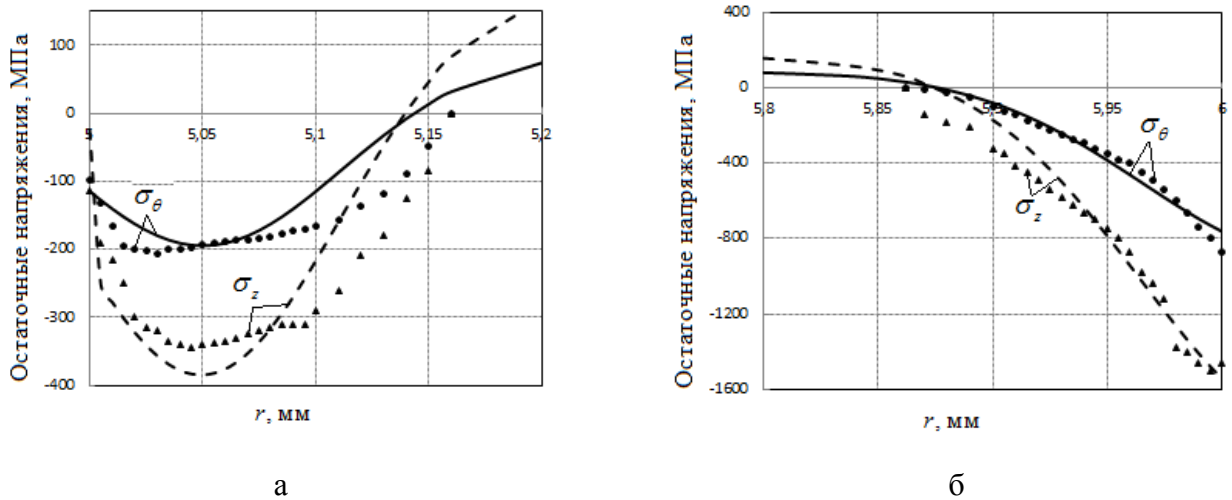


Рис. 4.4. Экспериментальные (маркеры) и расчетные зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ (сплошные линии) и $\sigma_z = \sigma_z(r)$ (штриховые линии) в областях, прилегающих к внутренней (а) и внешней (б) поверхности трубок после двухстороннего упрочнения

Феноменологическая модель реконструкции напряженно-деформированного состояния после поверхностного пластического упрочнения повторяет изложенную методику для образцов в состоянии поставки, т.е. основные соотношения также задаются формулами (4.1), но с другой аппроксимацией для компоненты $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$. Для выбора ее структуры

рассмотрим схематический график $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$, исходя из экспериментальных зависимостей на рис. 4.4, который представлен на рис. 4.5.

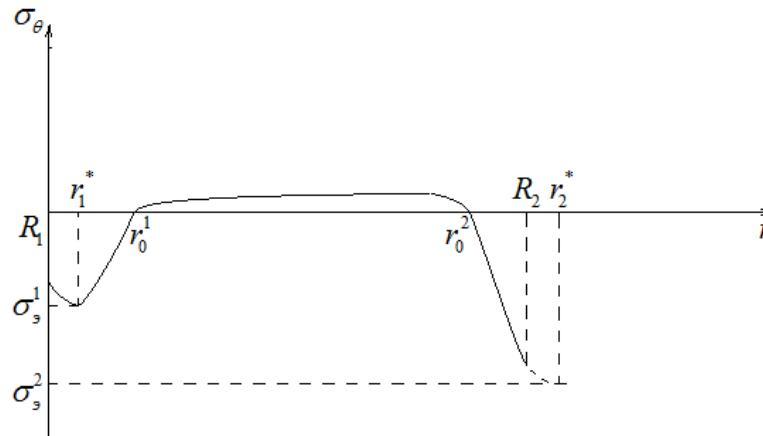


Рис. 4.5. Схематический график $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ в упрочненных образцах после двухстороннего упрочнения

Схематический график, качественно отражающий характер экспериментальной зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ в приповерхностных областях, имеет одну особенность. В области, прилегающей к внешней поверхности ($r = R_2$), зависимость не имеет локального экстремума. В этом случае экспериментальные данные экстраполируются в фиктивную область $r > R_2$ «вручную» и получаем фиктивный локальный экстремум. Теперь очевидно, что и в этом случае можно использовать аппроксимацию вида (4.2), а для идентификации параметров – соотношения (4.3), (4.4). Только в этом случае величина $h_2^* = R_2 - r_2^*$ будет иметь отрицательный знак в отличие от варианта с технологическими остаточными напряжениями в состоянии поставки.

4.3. Идентификация параметров моделей и проверка их адекватности экспериментальным данным

Рассмотрим теперь методику идентификации параметров аппроксимации (4.2) на основе экспериментальных данных, представленных на рис. 4.1 и рис. 4.4. Эта методика будет единой и для образцов в состоянии поставки, и для поверхностно упрочненных трубок. Зависимость (4.2) определена с точностью до 5 констант: σ_0 , σ_1 , σ_2 , b_1 , b_2 . Величины $h_1^* = r_1^* - R_1$ и $h_2^* = R_2 - r_2^*$ определяются

из графиков зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ (см. рис. 4.2 и рис. 4.5). Тогда из условий (4.3) и (4.5) получаем систему нелинейных алгебраических уравнений относительно 5 параметров:

$$1^\circ. r = r_1^* = R_1 + h_1^* :$$

$$\sigma_0 - \sigma_1 - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - R_1 - h_1^* - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] = \sigma_3^1; \quad (4.5)$$

$$2^\circ. r = r_2^* = R_2 - h_2^* :$$

$$\sigma_0 - \sigma_1 \exp \left[-\frac{(R_2 - R_1 + h_1^* - h_2^*)^2}{b_1^2} \right] - \sigma_2 = \sigma_3^2; \quad (4.6)$$

$$3^\circ. r = r_1^0 :$$

$$\sigma_0 - \sigma_1 \exp \left[-\frac{(r_1^0 - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2} \right] - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r_1^0 - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] = 0; \quad (4.7)$$

$$4^\circ. r = r_2^0 :$$

$$\sigma_0 + \sigma_1 \exp \left[-\frac{(r_2^0 - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2} \right] - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r_2^0 - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] = 0; \quad (4.8)$$

$$5^\circ. \int_{R_1}^{R_2} \left\{ \sigma_0 - \sigma_1 \exp \left[-\frac{(r - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2} \right] - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] \right\} dr = 0. \quad (4.9)$$

Решить систему функционально-интегральных уравнений (4.5) – (4.9) крайне сложно. Поэтому примем ряд упрощающих предположений, при использовании которых можно получить приближенное решение системы (4.5) – (4.9). На первом этапе используем предположение, что упрочненный слой на внешней поверхности не влияет на формирование напряжений на внутренней поверхности и наоборот. Тогда можно построить аппроксимации отдельно для внутреннего и внешнего упрочненных слоев и использовать их суперпозицию. В таком случае для внешнего слоя имеем аппроксимацию

$$\sigma_{\theta}^{(1)}(r) = \sigma_0^{(1)} - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2} \right]. \quad (4.10)$$

Подставляя характеристические точки $r = r_2^* = R_2 - h_2^*$ и $r = r_2^0$ в (4.10), используя значения функции в этих точках и условие самоуравновешенности (4.4), получим

$$\sigma_0^{(1)} - \sigma_2 = \sigma_2^2, \quad (4.11)$$

$$\sigma_0^{(1)} - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r_2^0 - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] = 0, \quad (4.12)$$

$$\int_{R_1}^{R_2} \left\{ \sigma_0^{(1)} - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] \right\} dr = 0. \quad (4.13)$$

Система уравнений (4.11) – (4.13) содержит лишь 3 неизвестных: $\sigma_0^{(1)}$, σ_2 , b_2 . Ее можно свести к одному уравнению относительно величины b_2 следующим образом. Из уравнения (4.12) имеем

$$\frac{\sigma_0^{(1)}}{\sigma_2} = \exp \left[-\frac{(R_2 - r_2^0 - h_2^*)^2}{b_2^2} \right]. \quad (4.14)$$

Из (4.13) получаем

$$\frac{\sigma_0^{(1)}}{\sigma_2} \cdot (R_2 - R_1) = \int_{R_1}^{R_2} \left\{ \sigma_0^{(1)} - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] \right\} dr,$$

откуда

$$\frac{\sigma_0^{(1)}}{\sigma_2} = \frac{1}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \left\{ \sigma_0^{(1)} - \sigma_2 \exp \left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] \right\} dr. \quad (4.15)$$

Теперь из (4.14) и (4.15) находим уравнение для определения параметра b_2 :

$$\frac{1}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \exp \left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] dr - \exp \left[-\frac{(R_2 - r_2^0 - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] = 0, \quad (4.16)$$

которое решается численно. После определения b_2 из (4.11), (4.12), (4.15) находим

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_3^2}{\exp\left[-\frac{(R_2 - r_2^0 - h_2^*)^2}{b_2^2}\right] - 1},$$

$$\sigma_0^{(1)} = \frac{\sigma_2}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \exp\left[-\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2}\right] dr.$$

Аналогично решается задача на внутреннем контуре. Здесь аппроксимация имеет вид

$$\sigma_\theta^{(2)}(r) = \sigma_0^{(2)} - \sigma_1 \exp\left[-\frac{(r - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2}\right]. \quad (4.17)$$

Используя значения функции (4.17) в характерных точках $r = r_1^* = R_1 - h_1^*$ и $r = r_1^0$ и условие самоуравновешенности (4.4), получаем

$$\sigma_0^{(2)} - \sigma_1 = \sigma_3^1, \quad (4.18)$$

$$\sigma_0^{(2)} - \sigma_1 \exp\left[-\frac{(r_1^0 - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2}\right] = 0, \quad (4.19)$$

$$\int_{R_1}^{R_2} \left\{ \sigma_0^{(2)} - \sigma_1 \exp\left[-\frac{(r - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2}\right] \right\} dr = 0. \quad (4.20)$$

Решение системы (4.18) – (4.20) строится аналогично и в итоге получаем уравнение для определения b_1 :

$$\frac{1}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \exp\left[-\frac{(r - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2}\right] dr - \exp\left[-\frac{(r_1^0 - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2}\right] = 0, \quad (4.21)$$

после численного решения которого находятся

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3^1}{\exp\left[-\frac{(r_1^0 - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2}\right] - 1}, \quad (4.22)$$

$$\sigma_0^{(2)} = \frac{\sigma_1}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \exp \left[-\frac{(r - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2} \right] dr. \quad (4.23)$$

В силу предположения о независимости влияния напряженного состояния во внутреннем слое на напряженное состояние во внешнем слое и наоборот используется суперпозиция величин $\sigma_0^{(1)}$ и $\sigma_0^{(2)}$, т.е. величина σ_0 в аппроксимации (4.2) находится по формуле

$$\sigma_0 = \sigma_0^{(1)} + \sigma_0^{(2)}.$$

В итоге получаем аппроксимацию (4.2) в первом приближении, поскольку все ее параметры σ_0 , σ_1 , σ_2 , b_1 , b_2 определены.

На втором этапе производится уточнение параметров аппроксимации итерационным способом по следующей схеме. Параметры b_1 , b_2 полагаются равными значениям, полученным в первом приближении, а параметры σ_0 , σ_1 , σ_2 варьировались до достижения минимума среднеквадратическим отклонением расчетных данных от экспериментальных значений для зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ для всех значений $R_1 \leq r \leq R_2$:

$$\Delta = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n [\sigma_\theta(r_i) - \sigma_\theta^{\text{э}}(r_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [\sigma_\theta^{\text{э}}(r_i)]^2} \right\}^{1/2} \rightarrow \min, \quad (4.24)$$

где $\sigma_\theta(r_i)$ и $\sigma_\theta^{\text{э}}(r_i)$ – расчетные и экспериментальные значения в точках дискретизации отрезка $[R_1, R_2]$ соответственно, т.е. $R_1 = r_0 < r_1 < \dots < r_{n-1} < r_n = R_2$. Однако при варьировании учитывались следующие особенности аппроксимации (4.2) для трубок в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения: обе они должны удовлетворять условию самоуравновешенности (4.4). Поэтому фактически в работе варьировались лишь величины σ_1 , σ_2 , а величина σ_0 определялась из уравнения (4.9).

Рассмотрим применение изложенной методики идентификации параметров аппроксимации (4.2) сначала к экспериментальным данным для трубок в

состоянии поставки. Используя экспериментальные данные для $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ на рис. 4.1, определены из графиков следующие величины: для внутренней области – $h_1^* = 0,005$ мм, $r_1^0 = 5,08$ мм, $r_1^* = R_1 + h_1^* = 5,005$ мм, $\sigma_1^0 = -365$ МПа; для внешней области – $h_2^* = 0,055$ мм, $r_2^0 = 5,865$ мм, $r_2^* = R_2 - h_2^* = 5,945$ мм, $\sigma_2^0 = 395$ МПа. Подставляя эти значения в системы функционально-интегральных уравнений (4.11) – (4.13) и (4.18) – (4.20), находилось решение в первом приближении, из которого окончательно определены значения $b_1 = 0,042$ мм и $b_2 = 0,051$ мм. Далее итерационно по изложенной выше схеме уточнялись значения параметров $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$. В результате окончательно получены их значения: $\sigma_0 = -25,3$ МПа, $\sigma_1 = 312,2$ МПа, $\sigma_2 = -456,2$ МПа. Таким образом, окончательная аппроксимация зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta(r) = & -25,3 + 456,2 \cdot \exp \left[- \left(\frac{R_2 - r - 0,055}{0,051} \right)^2 \right] - \\ & - 312,2 \cdot \exp \left[- \left(\frac{r - R_1 - 0,005}{0,042} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (4.25)$$

На рис. 4.1 расчетные значения для зависимости (4.25) приведены сплошными линиями. Наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных, при этом величина погрешности, определяемая по формуле (4.24), имеет значение $\Delta = 20\%$.

После построения аппроксимации для $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ остальные компоненты тензора остаточных напряжений и необратимых деформаций рассчитываются по алгоритму (4.1), в котором фигурирует параметр анизотропии α . Как уже отмечалось выше, если мы имеем изотропное упрочнение поверхности, то параметр $\alpha = 1$, эпюры $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ и $\sigma_z = \sigma_z(r)$ практически совпадают и задача фактически решена. Но анализ графиков на рис. 4.1 свидетельствует о существенном отличии этих зависимостей, поэтому в данном случае в эксперименте реализована процедура анизотропного упрочнения и величина $\alpha \neq 1$. Конкретное значение α может быть получено лишь в результате

апостериорного анализа задачи с привлечением экспериментальной зависимости $\sigma_z = \sigma_z(r)$ в обоих приповерхностных слоях. В этом случае при заданной зависимости (4.25) варьируется величина α , при каждом ее значении реализуется схема (4.1), рассчитываются теоретические зависимости для $\sigma_z = \sigma_z(r)$ и вычисляется величина среднеквадратического отклонения между теоретическими и экспериментальными зависимостями для осевой компоненты остаточных напряжений по формуле (4.24) с заменой $\sigma_\theta(r_i)$ и $\sigma_\theta^3(r_i)$ на $\sigma_z(r_i)$ и $\sigma_z^3(r_i)$ соответственно. Итерационная процедура уточнения величины α заканчивается по достижению функционалом (4.24) минимального значения. Реализация данного подхода применительно к экспериментальным данным, представленным на рис. 4.1, позволила вычислить значение величины $\alpha = 0,1$. В расчетах было принято $E = 1,98 \cdot 10^5$ МПа; $\nu = 0,285$. На рис. 4.1 штриховой линией приведена рассчитанная зависимость $\sigma_z = \sigma_z(r)$, соответствующая этому значению параметра. В целом наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных для осевой и окружной компонент остаточных напряжений. Поэтому процедуру реконструкции остаточных напряжений для случая трубок в состоянии поставки можно считать реализованной. В конечном итоге получены диагональные компоненты тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций (недиагональными компонентами мы пренебрегаем). В качестве примера на рис. 4.6 приведена рассчитанная эпюра для $\sigma_r = \sigma_r(r)$, а на рис. 4.7 – зависимость для компоненты $q_\theta = q_\theta(r)$ в области, прилегающей к внешней поверхности трубок.

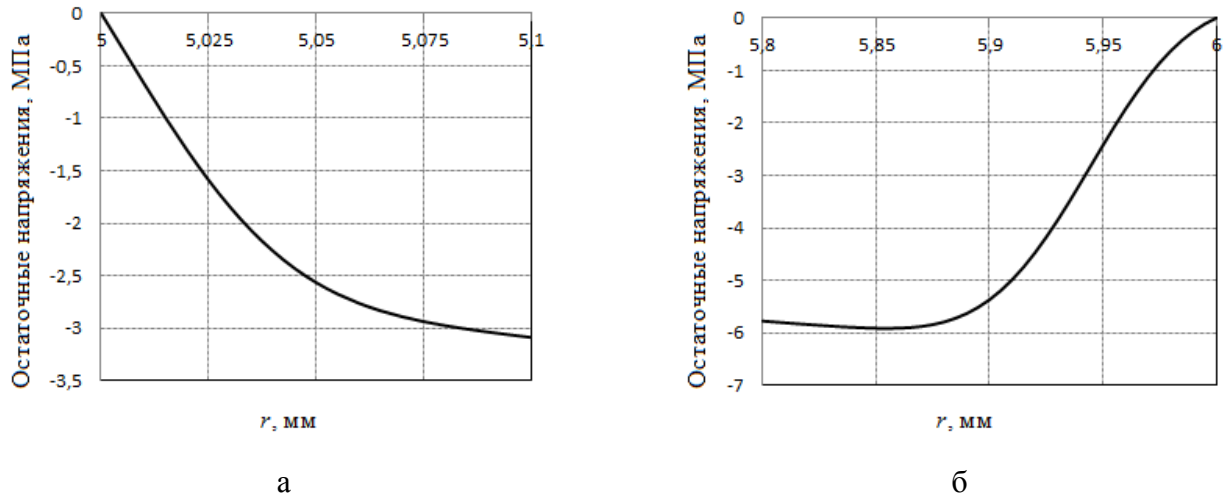


Рис. 4.6. Расчетные зависимости $\sigma_r = \sigma_r(r)$ в областях, прилегающих к внутренней (а) и внешней (б) поверхности трубок в состоянии поставки

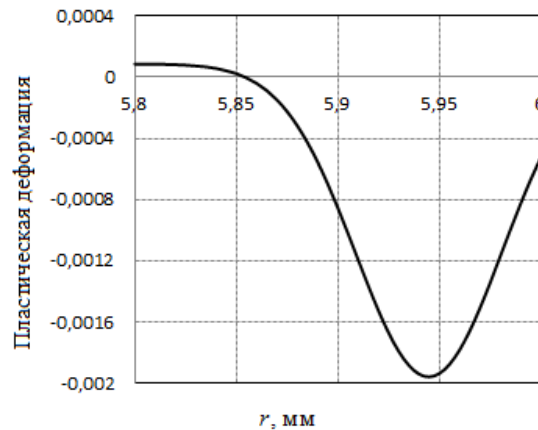


Рис. 4.7. Расчетная зависимость $q_\theta = q_\theta(r)$ в области, прилегающей к внешней поверхности трубок в состоянии поставки

Рассмотрим теперь применение изложенной методики идентификации параметров аппроксимации (4.2) к варианту двухстороннего поверхностно пластического деформирования тонкостенных трубок. Используя экспериментальные данные для $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ на рис. 4.5, определены из графиков следующие величины: для внутренней области – $h_1^* = 0,05$ мм, $r_1^0 = 5,16$ мм, $r_1^* = R_1 + h_1^* = 5,05$ мм, $\sigma_1^0 = -205,8$ МПа; для внешней области – $h_2^* = -0,04$ мм, $r_2^0 = 5,862$ мм, $r_2^* = R_2 - h_2^* = 6,04$ мм, $\sigma_2^0 = -999,6$ МПа. Подставляя эти значения в системы функционально-интегральных уравнений (4.11) – (4.13) и (4.18) – (4.20), находилось решение в первом приближении, из которого окончательно

определены значения $b_1 = 0,087$ мм и $b_2 = 0,105$ мм. Далее итерационно по изложенной выше схеме уточнялись значения параметров σ_0 , σ_1 , σ_2 . В результате окончательно получены их значения: $\sigma_0 = 88,4$ МПа, $\sigma_1 = 981,6$ МПа, $\sigma_2 = 283,2$ МПа. Таким образом, окончательная аппроксимация зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ имеет следующий вид:

$$\sigma_\theta(r) = 88,4 - 981,6 \cdot \exp\left[-\left(\frac{R_2 - r + 0,04}{0,105}\right)^2\right] - 283,2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{r - R_1 - 0,05}{0,087}\right)^2\right]. \quad (4.26)$$

На рис. 4.4 расчетные значения для зависимости (4.26) приведены сплошными линиями. Наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных, при этом величина погрешности, определяемая из (4.24), имеет значение $\Delta = 13\%$.

После построения аппроксимации для $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ остальные компоненты тензора остаточных напряжений и необратимых деформаций рассчитываются по алгоритму (4.1), в котором фигурирует параметр анизотропии α . Реализация описанного выше подхода нахождения параметра анизотропии α позволила вычислить значение величины $\alpha = 4,2$. В расчетах было принято $E = 1,98 \cdot 10^5$ МПа; $\nu = 0,285$. На рис. 4.4 штриховой линией приведена рассчитанная зависимость $\sigma_z = \sigma_z(r)$, соответствующая этому значению параметра.

Также были получены диагональные компоненты тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций (недиагональными компонентами мы пренебрегаем). В качестве примера на рис. 4.8 приведена рассчитанная эпюра для $\sigma_r = \sigma_r(r)$, а на рис. 4.9 – зависимость для компоненты $q_\theta = q_\theta(r)$.

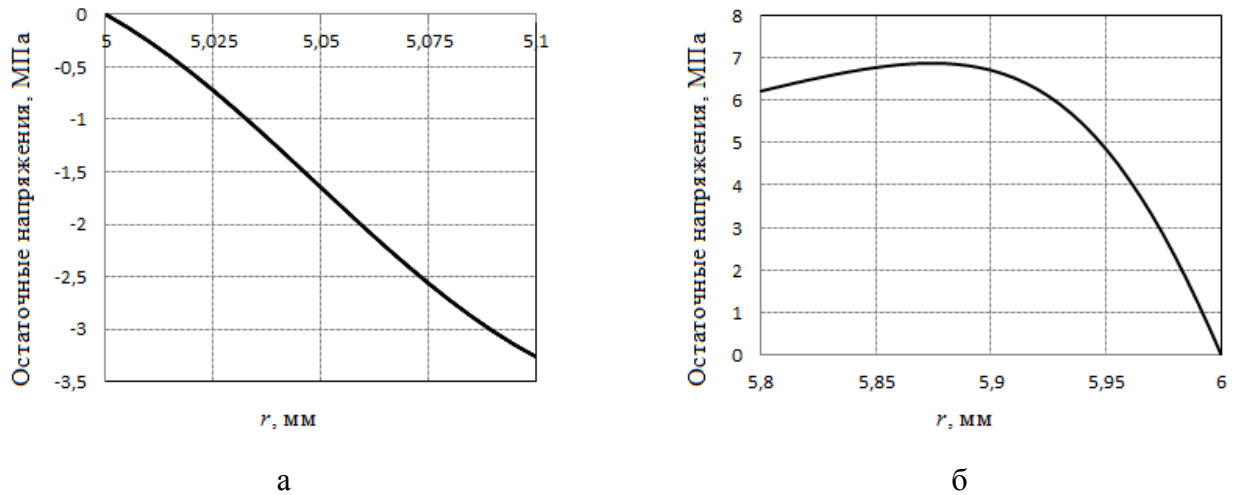


Рис. 4.8. Расчетные зависимости $\sigma_r = \sigma_r(r)$ в областях, прилегающих к внутренней (а) и внешней (б) поверхности трубок после двухстороннего упрочнения поверхности

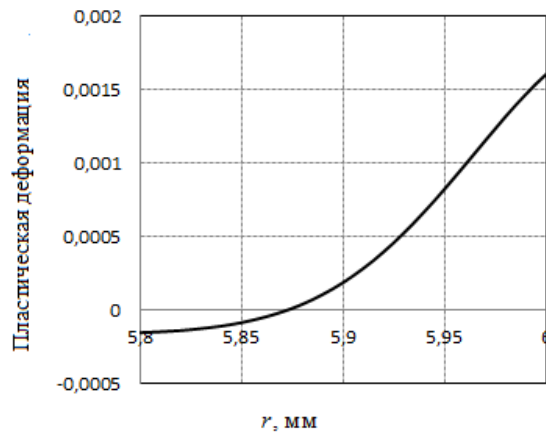


Рис. 4.9. Расчетная зависимость $q_\theta = q_\theta(r)$ в области, прилегающей к внешней поверхности трубок после двухстороннего упрочнения поверхности

Отметим, что полученные значения $\alpha = 0,1$ для образцов в состоянии поставки и $\alpha = 4,2$ для поверхностно упрочненных трубок свидетельствуют о существенной анизотропии распределения остаточных пластических деформаций q_θ и q_z вдоль осей θ и Z , а это, в свою очередь, является причиной существенного отличия эпюр остаточных напряжений σ_θ и σ_z . Анализ графиков для компоненты $\sigma_r = \sigma_r(r)$ на рис. 4.6 и рис. 4.8 свидетельствует, что значения этой компоненты по модулю более чем на 2 порядка меньше значений компонент для $|\sigma_\theta|$ и $|\sigma_z|$ в зонах упрочнения, прилегающих к внешней и внутренней поверхности трубок.

Таким образом, и в случае образцов в состоянии поставки, и в случае двухстороннего поверхностного пластического деформирования одним значением параметра анизотропии α описано напряженно-деформированное состояние во внешнем и внутреннем слоях тонкостенных трубок. Это является убедительным подтверждением принятой гипотезы $q_z(r) = \alpha q_\theta(r)$ при построении феноменологической модели реконструкции полей остаточных напряжений и деформации в приповерхностных внешнем и внутреннем слоях как при технологических отделочных операциях поверхности трубок, так и после ППД.

4.4. Исследование релаксации остаточных напряжений в тонкостенных трубках в состоянии поставки и после упрочнения в условиях ползучести

В пункте 4.1 отмечалось, что прямолинейные тонкостенные трубки являются частью трубопроводов авиационных пневмогидросистем авиационных газотурбинных двигателей, условия эксплуатации которых характеризуются высокими температурами с возникновением деформаций ползучести. Следствием этого является релаксация остаточных напряжений в тонкостенных трубках, имеющих как в состоянии поставки, так и после технологических операций поверхностно пластического деформирования (ППД). Поэтому естественным образом возникает задача разработки методов расчета релаксации остаточных напряжений вследствие деформации ползучести. На сегодняшний день разработана соответствующая методика для односторонне упрочненных полых цилиндрических образцов. Эта методика, согласно работе [103], подробно изложена в пункте 1.2 и решение задачи релаксации остаточных напряжений для самого общего случая анизотропного упрочнения внешней поверхности полого цилиндра, нагруженного внутренним давлением, крутящим моментом и осевой растягивающей нагрузкой, задается формулами (1.11) – (1.30).

В настоящей диссертационной работе эта методика применяется и для случая наличия остаточных напряжений в приповерхностных слоях на внешней и внутренней поверхности, изменения касаются лишь начального напряженно-деформированного состояния после упрочнения: вместо полей остаточных

напряжений и деформаций, возникающих после упрочнения внешней поверхности (1.1) – (1.10), используются поля напряжений и деформаций для трубок из стали X18H10T после двухстороннего упрочнения и в состоянии поставки, исследованные в пунктах 4.2 и 4.3 и приведенные на рис. 4.1 и 4.3. Поэтому для дальнейших расчетов в условиях ползучести использовалась известная методика (1.1) – (1.30), но с начальным напряженно-деформированным состоянием, определяемым по (4.1), с аппроксимацией (4.2) для эпюры остаточных окружных напряжений, которая конкретизируется соотношением (4.25) для напряжений $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ для трубок в состоянии поставки, и зависимостью (4.26) – после двухстороннего упрочнения.

Для реализации методики оценки релаксации остаточных напряжений необходимо иметь теорию ползучести для стали X18H10T. В разделе 1 указано, что рабочая температура эксплуатации деталей из этой стали (и ее аналогов) не должна превышать 600 °С. Однако в научной литературе не удалось найти экспериментальные данные для этой стали в диапазоне температур, не превосходящих 600 °С. Имеются лишь данные по кратковременной ползучести при $T = 850$ °С, полученные для малых значений напряжений: {40;50;60;80} МПа [52, 53]. Поэтому в данной работе для модельных расчетов используются экспериментальные данные для раннего аналога стали X18H10T, а именно, для стали 08X18H9 из работы [60], где представлены экспериментальные данные при $T = 600$ °С и шести уровнях напряжений $\sigma = \{190;200;220;240;260;280\}$ МПа, которые приведены сплошными линиями на рис. 4.10. Исходя из характера этих зависимостей, строилась реологическая модель для этого материала на основе теории ползучести энергетического типа, которая для одноосного нагружения задается соотношениями (1.31) – (1.38). Учитывая небольшую величину деформации ползучести, накопленную на первой стадии ползучести, соотношение (1.36) принято в виде

$$\dot{\omega} = \beta \sigma \dot{\omega}, \quad \beta = \alpha_1 (\sigma_0)^{m_\alpha}, \quad (4.27)$$

где α_1 и m_α – постоянные величины. Из (4.27) следует, что накопление поврежденности связывается только с компонентой вязкого течения (при постоянном напряжении – со стадией установившейся ползучести). Тогда на начальной стадии деформирования можно считать, что поврежденность является незначительной и для компонент $u(t)$ и $v(t)$, описывающих первую стадию ползучести, истинные и номинальные напряжения практически равны, т.е. $\sigma_0 \approx \sigma$. Предполагаем также, что вязкоупругая компонента деформации ползучести отсутствует, т.е. деформация ползучести полностью необратима. Тогда в соотношениях (1.32) величина $u(t) \equiv 0$. С учетом этого при постоянном напряжении $\sigma_0 = \text{const}$ интегрирование уравнений (1.31) – (1.36) дает следующую зависимость для деформации ползучести:

$$p(t) = \sum_{k=1}^s b_k (1 - e^{-\lambda_k t}) (\sigma_0)^n - \frac{1}{m\sigma_0\beta} \ln |1 - \beta m c (\sigma_0)^{m+1} t|, \quad \beta = \alpha_1 (\sigma_0)^{m_\alpha}. \quad (4.28)$$

Зависимость (4.28) использовалась для идентификации параметров реологической модели. На первом этапе строилась аппроксимация второй стадии ползучести, описываемой компонентой w . Для этого на всех шести графиках (см. рис. 4.10) выделялись прямолинейные участки, находилась скорость деформации ползучести при каждом номинальном напряжении σ_0 (данные приведены в таблице 4.2) и осуществлялась аппроксимация зависимости скорости от напряжения (на начальном участке $\sigma_0 \approx \sigma$) в виде степенной зависимости:

$$\dot{w} = c (\sigma_0)^m. \quad (4.29)$$

Таблица 4.2

Значения скорости установившейся ползучести от напряжения

$\dot{w} \cdot 10^3$	0,787	1,31	2,63	4,8	7,7	13,4
σ_0 , МПа	190	200	220	240	260	280

Используя метод наименьших квадратов, на основе данных таблицы 4.2 получены значения $c = 3,33 \cdot 10^{-20}$; $m = 7,2$.

На втором этапе строилась аппроксимация для вязкопластической компоненты $v(t)$, которая описывается первым слагаемым в формуле (4.28). Для этого на каждой кривой ползучести до начала третьей стадии ползучести из экспериментальных данных вычиталась величина $w(t)$, задаваемая (4.29). В результате были получены шесть кривых для компоненты $v(t)$, каждая из которых имеет асимптотическое значение $v_{\infty}(\sigma_0)$.

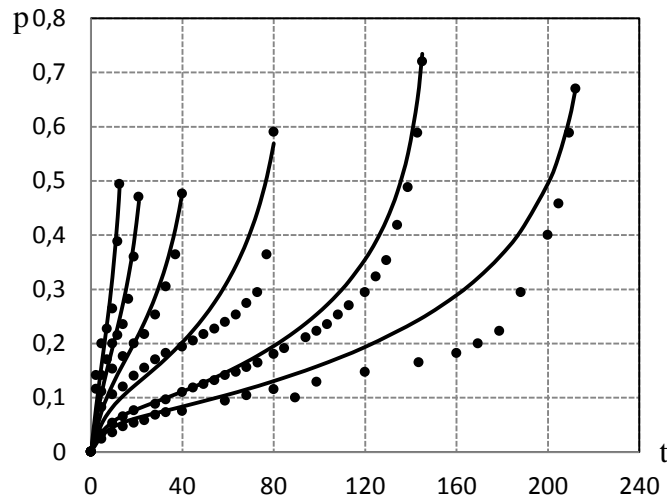


Рис. 4.10. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) кривые ползучести стали 08X18H9 при $T = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – $\sigma_0 = 190$ МПа, 2 – $\sigma_0 = 200$ МПа, 3 – $\sigma_0 = 220$ МПа, 4 – $\sigma_0 = 240$ МПа, 5 – $\sigma_0 = 260$ МПа, 6 – $\sigma_0 = 280$ МПа.

В таблице 4.3 приведены значения $v_{\infty}(\sigma_0)$ при всех шести значениях напряжения σ_0 .

Таблица 4.3

Асимптотические значения вязкопластической компоненты деформации ползучести при различных значениях напряжения

$v_{\infty} \cdot 10^2$	4,84	6,06	8,48	9,7	12,5	14,5
σ_0 , МПа	190	200	220	240	260	280

Для кривой ползучести при $\sigma_0 = 200$ МПа строилась экспоненциальная аппроксимация для компоненты $v = v(t)$ в соответствии с методом выделения экспоненциальных слагаемых [108]. В итоге оказалось, что для аппроксимации

этой кривой $v = v(t)$ достаточно одной компоненты, т.е. в (4.29) $s = 1$, а величины $\lambda_k = \lambda = 0,17 \left(\frac{1}{\text{ч}}\right)$, $b_k = b = 4,27 \cdot 10^{-9}$. Далее, используя данные таблицы 4.3 строилась степенная зависимость

$$\frac{v_{\infty}(\sigma)}{v_{\infty}(240)} = A \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right)^n,$$

где $v_{\infty}(240)$ – это значения $v_{\infty}(t)$ при напряжении $\sigma_* = 240$ МПа.

В результате получено $n = 3,087$, $A = 1,03$. В конечном итоге для аппроксимации $v = v(t)$ получено выражение

$$v(t) = 4,27 \cdot 10^{-9} (\sigma_0)^{3,087} (1 - e^{-0,17t}). \quad (4.30)$$

На третьем этапе определялась величина β в (4.27). Для этого использовались значения времени (t_*) и деформации ($p_* = p(t_*)$) для последней точки на графиках для всех шести напряжений и величина β определялась из (4.28) при известных t_* , p_* , λ , b , n , c , m . В результате для каждой кривой ползучести получены значения β , которые приведены в таблице 4.4, используя которые построена степенная аппроксимация для параметра β (второе соотношение (4.27) или (4.28)), в которой $\alpha_1 = 7,49$; $m_{\alpha} = -1,443$, т.е.

$$\beta = 7,49 \cdot (\sigma_0)^{-1,443}. \quad (4.31)$$

Таблица 4.4

Зависимость параметра β от напряжения

$\beta \cdot 10^3, (\text{МПа})^{m_{\alpha}}$	3,91	3,8	2,9	2,6	2,5	2,3
$\sigma_0, \text{МПа}$	190	200	220	240	260	280

Таким образом, все параметры модели (1.31) – (1.36) для стали 08X18Н9 определены.

Расчетные кривые ползучести по формулам (4.28) с найденными значениями параметров приведены на рис. 4.10 штриховыми линиями. Наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных.

После построения реологической модели выполнены модельные расчеты для оценки релаксации остаточных напряжений по изложенной в главе 1 методике (1.11) – (1.30) в предположении, что начальные поля напряжений и деформаций для образцов в состоянии поставки и после упрочнения задаются в виде (1.1) – (1.10) при начальной аппроксимации для компоненты $\sigma_\theta(r)$ по формулам (4.25) и (4.26) соответственно.

Рассмотрим подробно процесс релаксации остаточных напряжений в тонкостенных трубках из стали 08X18H9 таких же геометрических размеров, как и в рассмотренных ранее трубках из стали X18H10T ($\varnothing 12 \times 1$ мм), при начальном напряженном состоянии, заданном для трубок в состоянии поставки (см. пункт 4.2 и рис. 4.1). Рассматриваются следующие режимы нагружения: чистая термоэкспозиция; осевое растяжение; внутреннее давление; растяжение + внутреннее давление. Температура – 600 °С. Для того, чтобы не перегружать графики, иллюстрирующие результаты расчетов, полагалось, что модуль Юнга не зависит от температуры и использовалось его значение $E = 1,98 \cdot 10^5$ МПа, а коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Другими словами, не учитывалась температурная нагрузка при переходе от температуры упрочнения $T = 20$ °С до температуры $T = 600$ °С. Поэтому к результатам расчета следует относиться как к качественным, но они отражают основные тенденции релаксации остаточных напряжений. Таким образом, начальное напряженно-деформированное состояние задается формулами (4.1) при аппроксимации для $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ (4.25) и параметре анизотропии $\alpha = 0,1$.

Результаты расчетов кинетики остаточных напряжений в трубках в состоянии поставки приведены на рис. 4.11 – 4.21. Прокомментируем полученные результаты. На рис. 4.11 – 4.13 показаны зависимости для остаточных напряжений в различные временные сечения в условиях термоэкспозиции (чисто температурное нагружение при отсутствии внешних нагрузок). На рис. 4.11 – зависимости для компоненты $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ по всей толщине (рис. 4.11,а), а на рис. 4.11 (б, в) приведены распределения этой компоненты в тонких слоях,

примыкающих к внешней и внутренней поверхностям. На рис. 4.12 и рис. 4.13 представлены аналогичные зависимости для компонент $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ и $\sigma_r = \sigma_r(r, t)$. Анализ этой информации позволяет сделать вывод о достаточно быстрой релаксации технологических остаточных напряжений в тонкостенных трубках в состоянии поставки, уже к $t = 50$ часов наблюдается практически их полная релаксация. Отметим, что радиальные напряжения по модулю на 2 – 3 порядка меньше осевых и окружных компонент.

На рис. 4.14 и рис. 4.15 показаны аналогичные зависимости для компонент $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ и $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ при осевом растяжении трубок внешним напряжением $\sigma_0 = 100$ МПа. И если для осевой компоненты (рис. 4.15) при $t = 0 + 0$ наблюдается ступенчатое увеличение всего графика на величину $\sigma_0 = 100$ МПа, то для окружной компоненты зависимости после упрочнения и приложения нагрузки совпадают. Здесь также наблюдается практически полная релаксация остаточных напряжений к моменту времени $t = 50$ час.

На рис. 4.16 – 4.18 приведены зависимости для всех компонент тензора остаточных напряжений при действии внутреннего давления $q = 20$ МПа. Здесь (в отличие от случая осевого растяжения) наблюдается ступенчатое изменение напряжения $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ в момент приложения нагрузки (см. рис. 4.16), а также ступенчатое изменение напряжения $\sigma_r = \sigma_r(r, t)$, причем на внутреннем радиусе эта величина как раз и равна 20 МПа, т.е. соответствует величине приложенной нагрузки (см. рис. 4.18), что является одним из критериев адекватности метода расчета. Для компоненты $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ в момент приложения нагрузки ступенчатого изменения напряжения не наблюдается.

На рис. 4.19 – 4.21 приведены зависимости для компонент тензора остаточных напряжений в случае одновременного комбинированного нагружения растягивающим напряжением $\sigma_0 = 100$ МПа и внутренним давлением $q = 20$ МПа. Здесь для всех трех компонент наблюдается ступенчатое изменение напряжений при приложении внешних нагрузок.

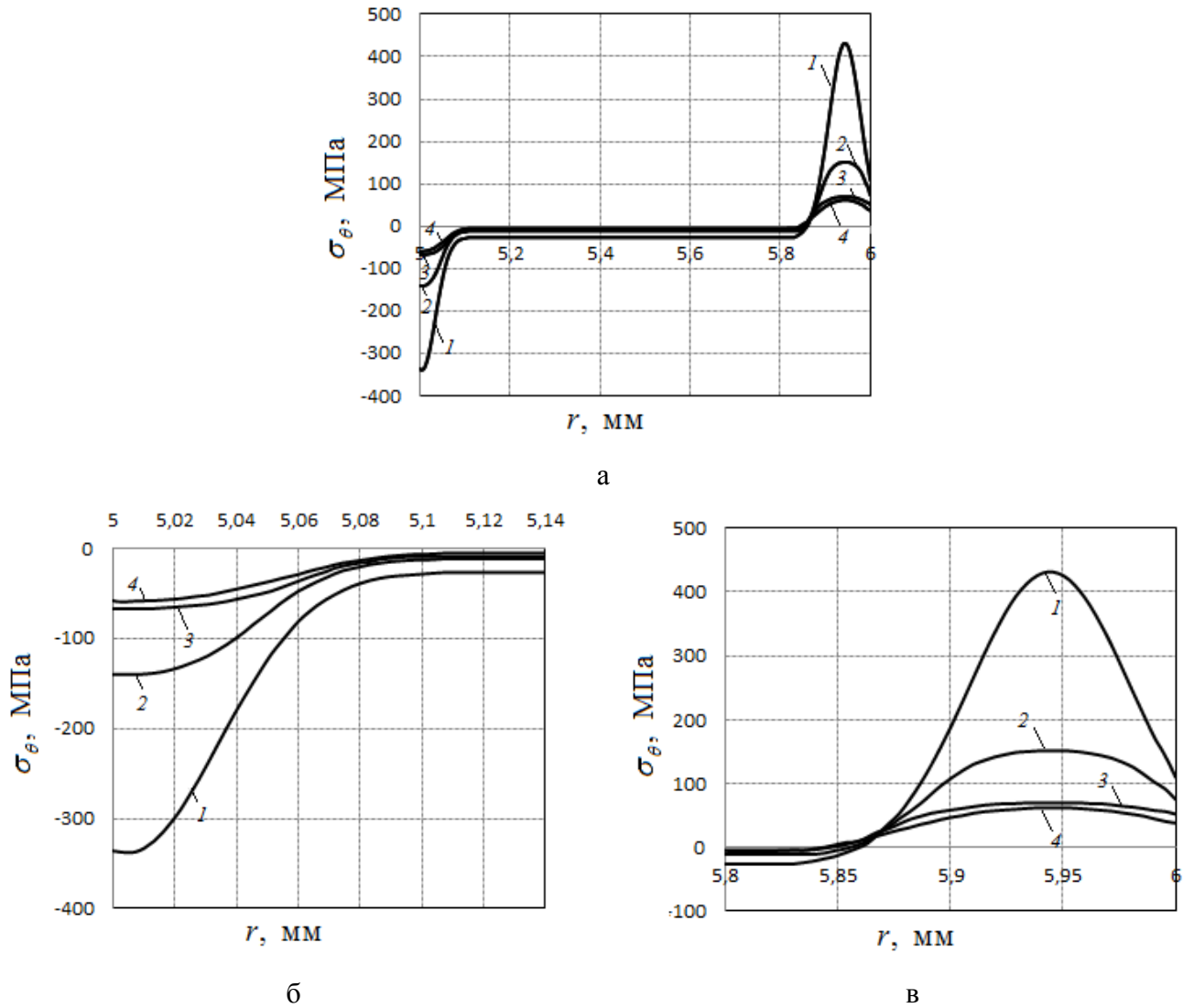


Рис. 4.11. Зависимость $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ в условиях термоэкспозиции в различные моменты времени при ползучести: а – по толщине трубки; б – на внутренней поверхности; в – на внешней поверхности. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – $t = 0,1$ часа; 3 – $t = 1$ час; 4 – $t = 50$ часов.

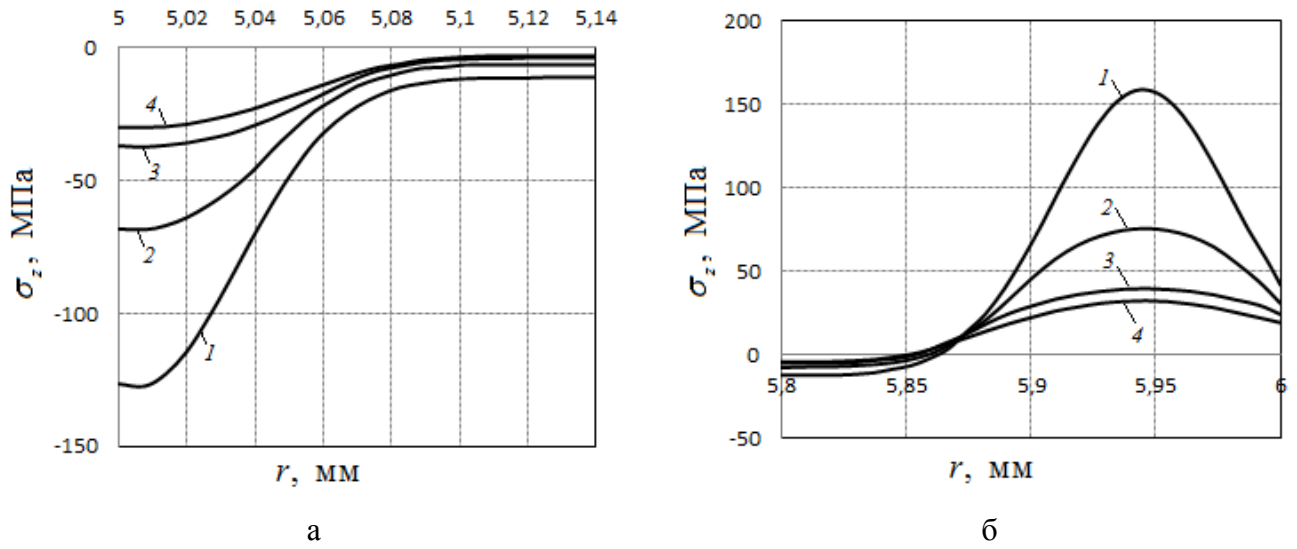


Рис. 4.12. Зависимость $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ в условиях термоэкспозиции в различные моменты времени при ползучести: а – на внутренней поверхности; б – на внешней поверхности. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – $t = 0,1$ часа; 3 – $t = 1$ час; 4 – $t = 50$ часов.

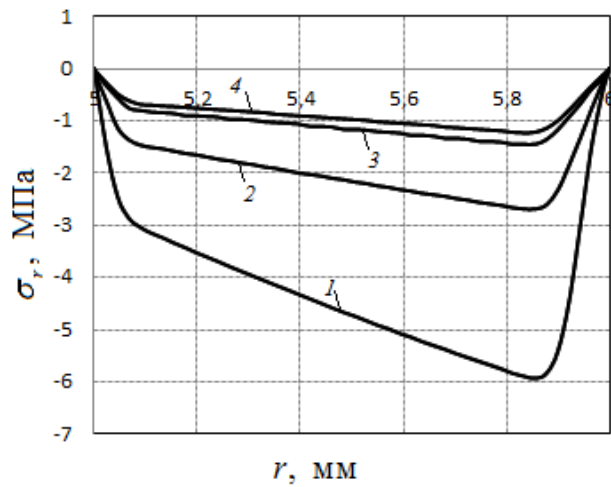


Рис. 4.13. Зависимость $\sigma_r = \sigma_r(r, t)$ в условиях термоэкспозиции в различные моменты времени при ползучести. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – $t = 0,1$ часа; 3 – $t = 1$ час; 4 – $t = 50$ часов.

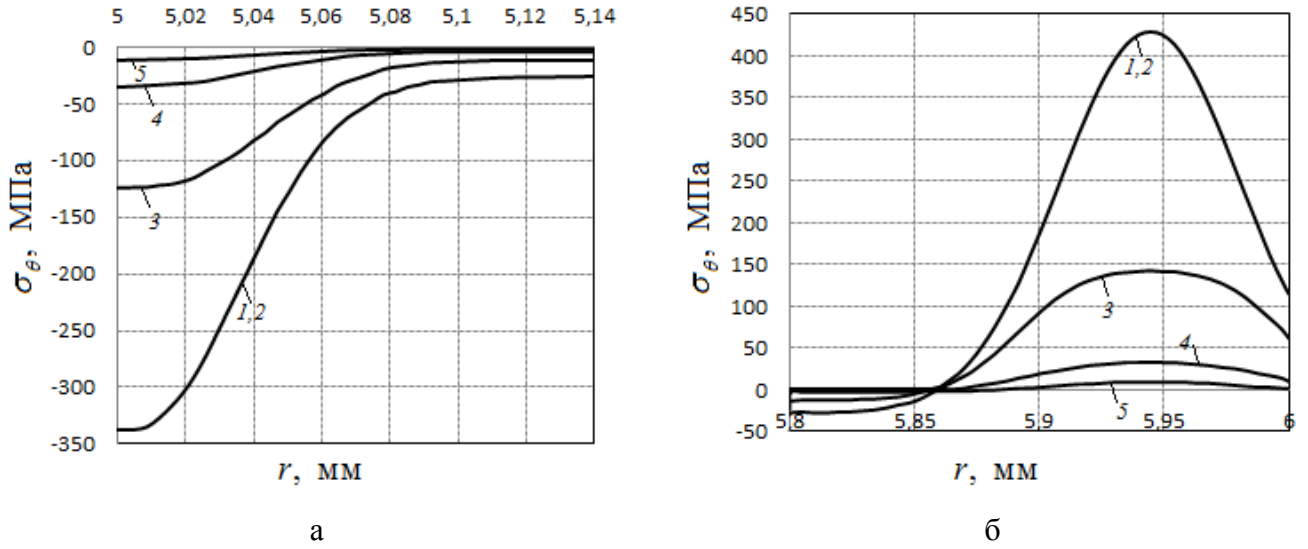


Рис. 4.14. Зависимость $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ при осевом растяжении напряжением $\sigma_0 = 100$ МПа в различные моменты времени при ползучести: а – на внутренней поверхности; б – на внешней поверхности. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 1$ час; 5 – $t = 50$ часов.

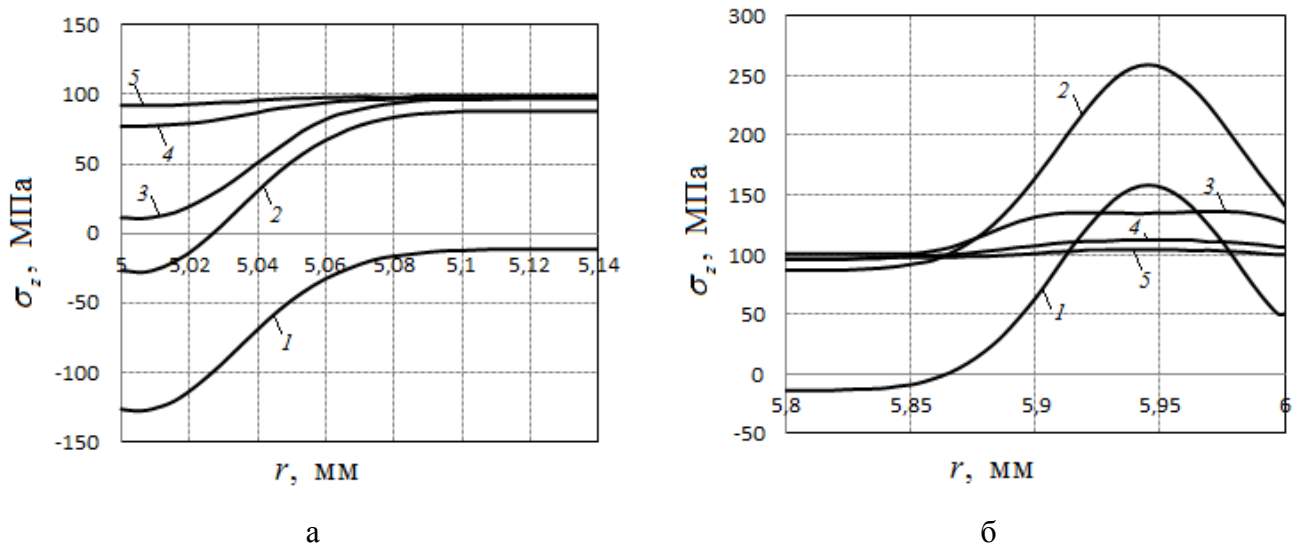


Рис. 4.15. Зависимость $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ при осевом растяжении напряжением $\sigma_0 = 100$ МПа в различные моменты времени при ползучести: а – на внутренней поверхности; б – на внешней поверхности. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 1$ час; 5 – $t = 50$ часов.

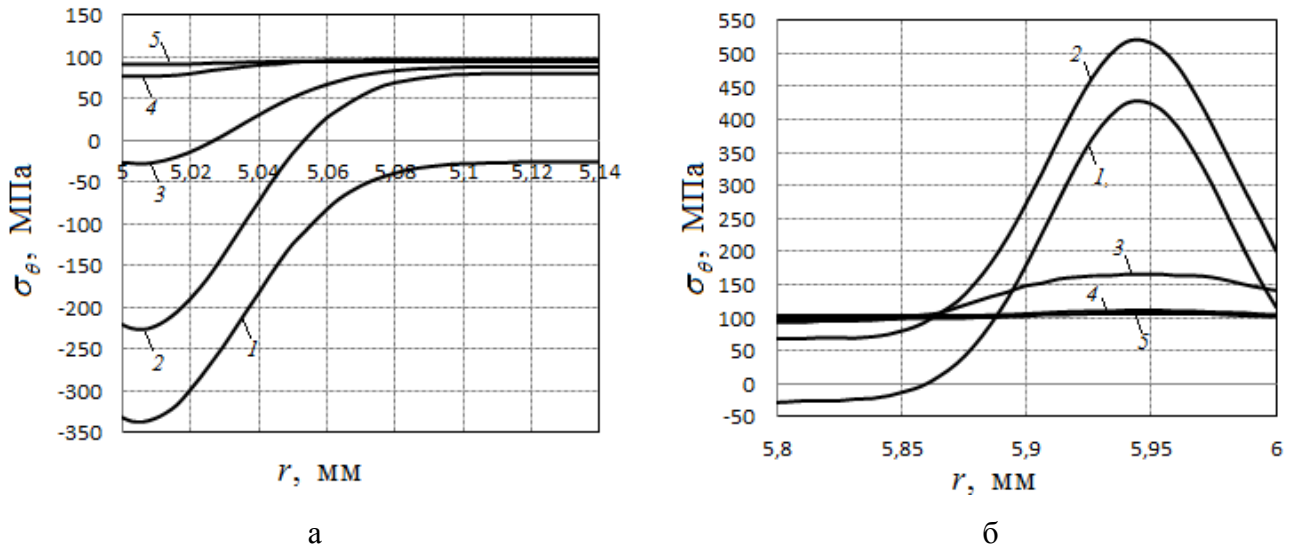


Рис. 4.16. Зависимость $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ при действии внутреннего давления $q = 20$ МПа в различные моменты времени при ползучести: а – на внутренней поверхности; б – на внешней поверхности. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 1$ час; 5 – $t = 50$ часов.

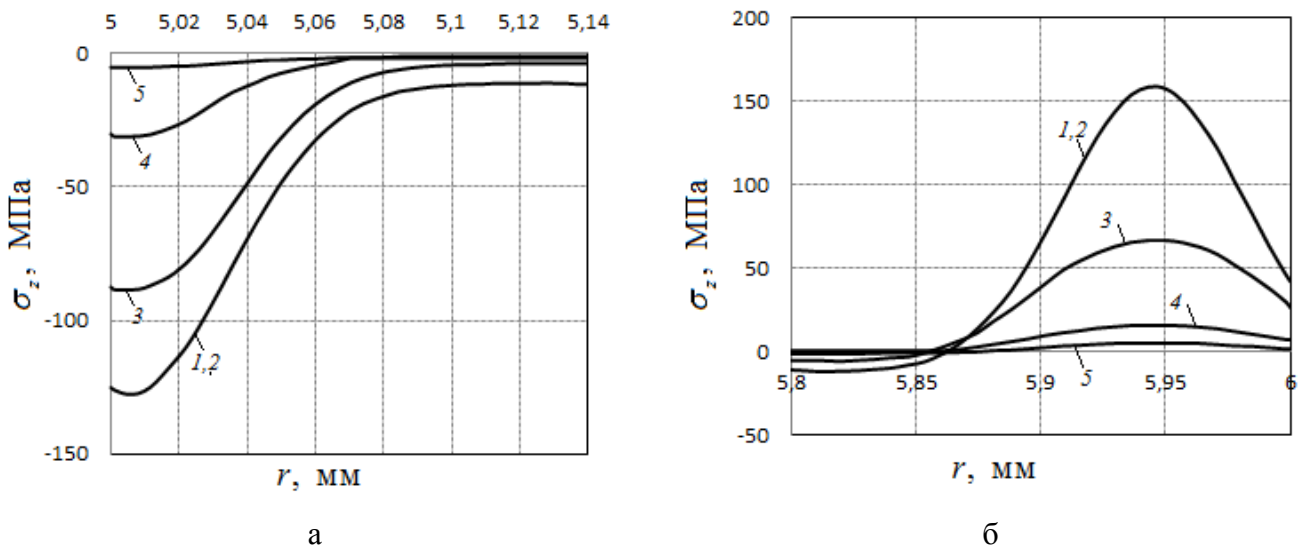


Рис. 4.17. Зависимость $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ при действии внутреннего давления $q = 20$ МПа в различные моменты времени при ползучести: а – на внутренней поверхности; б – на внешней поверхности. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 1$ час; 5 – $t = 50$ часов.

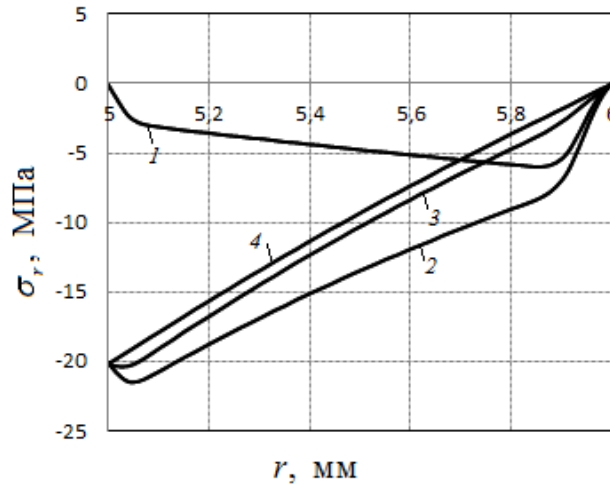


Рис. 4.18. Зависимость $\sigma_r = \sigma_r(r, t)$ при действии внутреннего давления $q = 20$ МПа в различные моменты времени при ползучести. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 50$ часов.

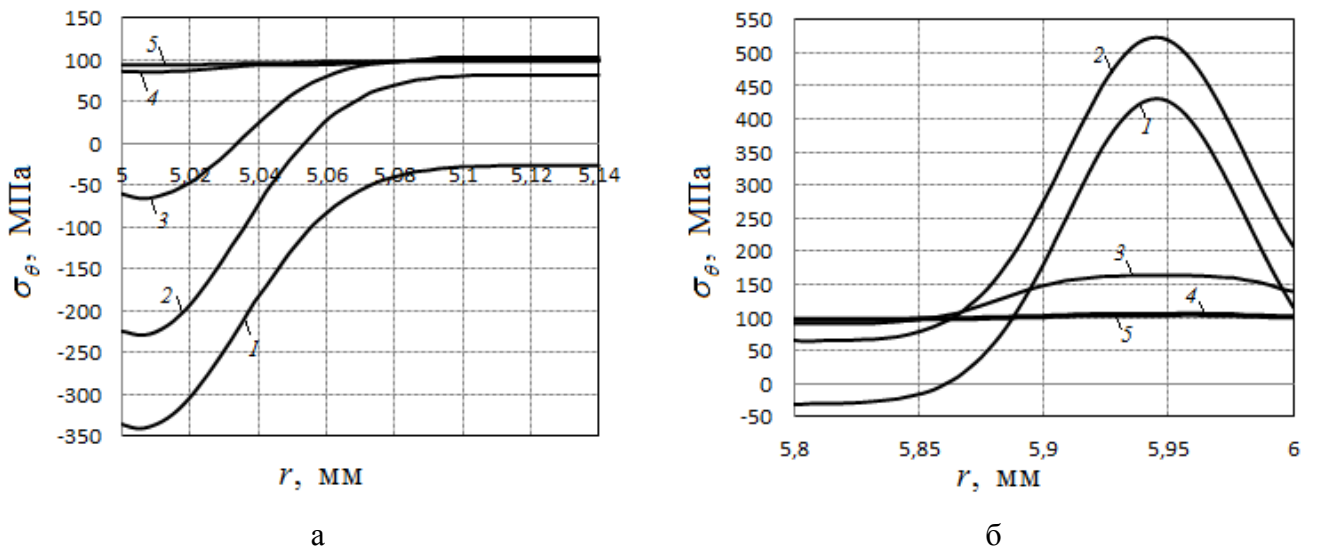


Рис. 4.19. Зависимость $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ при действии осевого растяжения при напряжении $\sigma_0 = 100$ МПа и внутреннего давления $q = 20$ МПа в различные моменты времени при ползучести: а – на внутренней поверхности; б – на внешней поверхности. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 1$ час; 5 – $t = 50$ часов.

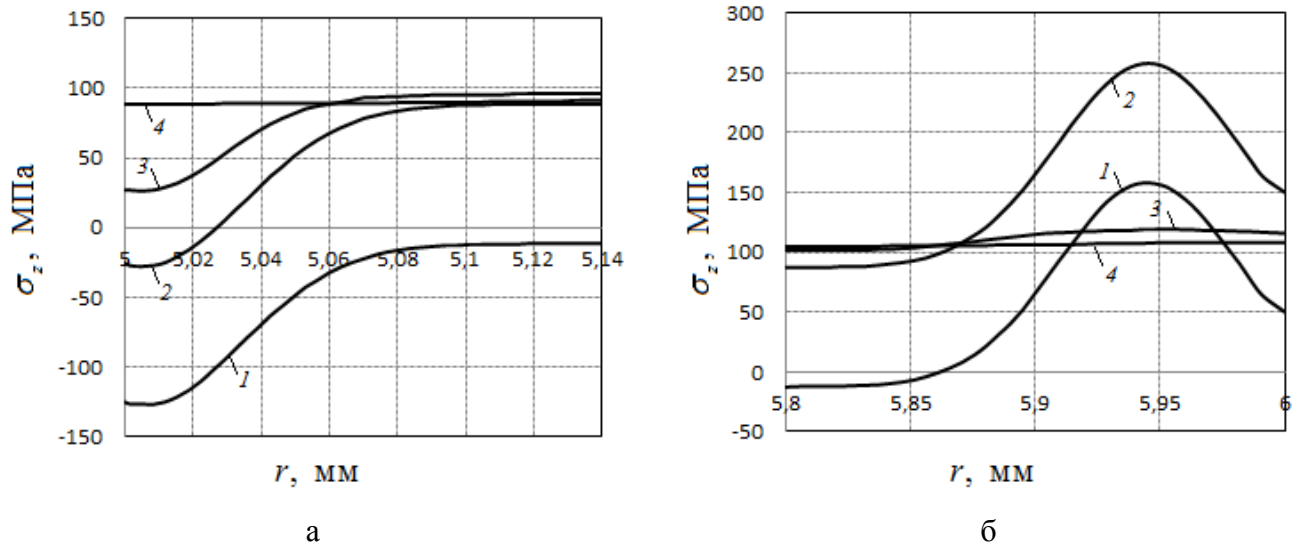


Рис. 4.20. Зависимость $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ при действии осевого растяжения при напряжении $\sigma_0 = 100$ МПа и внутреннего давления $q = 20$ МПа в различные моменты времени при ползучести: а – на внутренней поверхности; б – на внешней поверхности. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 50$ часов.

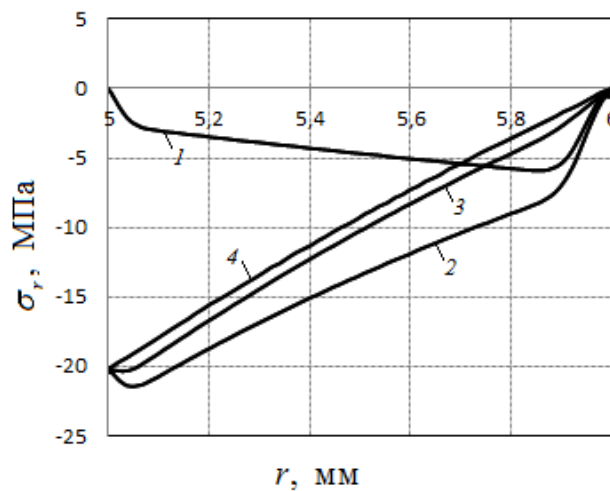


Рис. 4.21. Зависимость $\sigma_r = \sigma_r(r, t)$ при действии осевого растяжения при напряжении $\sigma_0 = 100$ МПа и внутреннего давления $q = 20$ МПа в различные моменты времени при ползучести. Маркеры: 1 – в состоянии поставки; 2 – силовое нагружение; 3 – $t = 0,1$ часа; 4 – $t = 50$ часов.

Для всех рассмотренных случаев наблюдается достаточно быстрая релаксация остаточных напряжений, уже к моменту времени $t = 0,1$ часа все компоненты становятся по модулю в 3–4 раза меньше по сравнению с начальными значениями в состоянии поставки, а к моменту времени $t = 50$ часов все компоненты практически полностью релаксировали. И если на внешней

поверхности в состоянии поставки мы имели растягивающие остаточные технологические напряжения, которые являются неблагоприятными, например, для многоциклового усталости, то факт их быстрой релаксации – это позитивный факт. В то время как на внутренней поверхности наблюдаются сжимающие остаточные напряжения, которые являются «благоприятными» с точки зрения многих показателей надежности, и здесь быстрая их релаксация – это отрицательный эффект.

Аналогичные расчеты были выполнены и для трубок после процедуры ультразвукового двухстороннего упрочнения. Но поскольку величины остаточных напряжений (по модулю) на внешней поверхности в 3–4 раза больше, чем в состоянии поставки, то уже к моменту времени $t = 0,1$ часа в этой области остаточные напряжений практически полностью срелаксировали. На внутренней же поверхности трубок картина кинетики остаточных напряжений аналогична приведенным соответствующим зависимостям на рис. 4.11 – 4.21. Также к моменту $t = 50$ часов происходит полная релаксация всех компонент остаточных напряжений. Поскольку все графики в этом случае качественно (а на внутренней поверхности – и количественно) ведут себя аналогично рассмотренным, они здесь не приводятся.

4.5. Выводы по главе 4

1. Разработана математическая модель реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных цилиндрических трубках в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного пластического упрочнения.
2. Разработана и реализована методика идентификации параметров модели на примере тонкостенных трубок $\varnothing 12 \times 1$ мм из стали X18H10T в состоянии поставки и после двухстороннего механического ультразвукового упрочнения.
3. Выполнена экспериментальная проверка математической модели реконструкции остаточных напряжений в тонкостенных трубках из стали X18H10T экспериментальным данным в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного пластического упрочнения.
4. Разработана методика расчета двухсторонней 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, внутреннего давления и совместного действия осевого растяжения и внутреннего давления при $T = 600$ °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.

Глава 5. Алгоритмы расчета и программное обеспечение для идентификации параметров моделей для призматических образцов и трубок и реализации методик ползучести упрочненных образцов

В пунктах 2.3, 2.5 настоящей диссертационной работы описана методика идентификации параметров модели формирования остаточного напряженно-деформированного состояния в упрочненном полупространстве и поверхностно упрочненном призматическом образце соответственно. В пункте 3.2 предложена методика расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненном призматическом брусе в условиях ползучести. В пункте 3.4 исследовано влияние вида напряженного состояния на релаксацию остаточных напряжений в призматическом образце при двухосном растяжении. В пункте 4.2 описана методика реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций для тонкостенных цилиндрических образцов в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного упрочнения. В данной главе описано программное обеспечение, на основании которого были проведены вышеуказанные исследования.

Изложим алгоритм идентификации параметров модели реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния в упрочненном полупространстве и поверхностно упрочненном призматическом образце.

Исходными данными для расчета являются:

- характерные точки z^* , z_0 эпюры остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$;
- значения функции (2.16) или (2.29) в характерных точках: σ^* , σ_{\min} ;
- экспериментальные данные для остаточных напряжений $\sigma_x^0(z_j)$;
- шаг при итерационном определении параметра модели b : Δb .

Алгоритм расчета.

1. Производится дискретизация по параметру модели b :

$$b_i = i\Delta b \quad (i = 1, 2, 3 \dots).$$

2. Определяется начальное приближение значения b из уравнения

$$b \exp(-z^{*2}) - \exp\left(-\frac{z^{*2}}{b^2}\right) = \sigma^*$$

на основе его численного решения по методу бисекций (после выделения интервала $b_i \cdot b_{i-1} < 0$).

3. Рассчитываются остальные параметры модели по формулам

$$\sigma_0 = \sigma_1 b, \quad \sigma_1 = \frac{\sigma_{\min}}{b-1}.$$

4. Для определения второго приближения параметров при найденном значении b варьируются величины σ_0, σ_1 в пределах $\pm 10\%$ от значений, определенных в пункте 3 до достижения минимума функционала

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\sigma_x(z_i) - \sigma_x^*(z_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [\sigma_x^*(z_i)]^2}},$$

тем самым достигается меньшая погрешность (в среднем), чем при использовании характерных точек.

Для реализации описанного выше алгоритма идентификации параметров модели реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния в упрочненном полупространстве и поверхностно упрочненном призматическом образце разработана программа на языке программирования Java.

Рассмотрим алгоритм методики реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций для тонкостенных цилиндрических образцов в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного упрочнения.

Исходными данными для расчета являются:

- параметры аппроксимации (4.2) $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, b_1, b_2, h_1^*, h_2^*$ параметр анизотропии α ;
- геометрические параметры образца: внутренний и внешний радиусы R_1, R_2 ;

- параметры, определяющие упругие свойства материала: модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν ;
- параметры расчета: шаг интегрирования по глубине образца Δr .

Алгоритм расчета.

1. Производится дискретизация по пространственной координате:

$$r_i = R_1 + i\Delta r \quad (i = 0, 1, 2, \dots).$$

2. Рассчитывается окружная компонента тензора остаточных напряжений:

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

3. Определяются остальные компоненты тензора остаточных напряжений и пластических деформаций:

$$\sigma_r(r) = \frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta(\xi) d\xi, \quad R_1 \leq r \leq R_2,$$

$$q_\theta(r) = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1+\alpha\nu)^2} r^{\frac{2+\alpha}{1+\alpha\nu}} \int_{R_1}^r \xi^{\frac{1+\alpha-\alpha\nu}{1+\alpha\nu}} [\sigma_r(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta(\xi)] d\xi +$$

$$+ \frac{1+\nu}{E(1+\alpha\nu)} [\nu\sigma_r(r) - (1-\nu)\sigma_\theta(r)],$$

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

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

$$\sigma_z(r) = E \left[\varepsilon_z^0 - q_z(r) \right] + \nu [\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)].$$

Для реализации описанного выше алгоритма методики реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций для тонкостенных цилиндрических образцов в состоянии поставки и после двухстороннего поверхностного упрочнения разработана программа на языке программирования Java. Для вычисления интеграла был использован модуль метода `varIntegral()`, в рамках которого производился расчет по методу трапеций.

Рассмотрим алгоритм расчета кинетики напряженно-деформированного состояния призматических образцов в условиях двухосного растяжения при ползучести.

Исходными данными для расчета являются:

- параметры аппроксимации (2.29) σ_0 , σ_1 , b , z^* , параметр анизотропии α ;
- параметры, определяющие упругие свойства материала: модуль Юнга E_0 при температуре T_0 и модуль Юнга E_1 при температуре T_1 , а также коэффициент Пуассона ν ;
- параметры, определяющие реологические свойства материала: s , λ_k , a_k , b_k , c , n , m , α_1 , m_α , A_1 , m_A – константы модели ползучести (1.31) – (1.39);
- параметры расчета: шаг интегрирования по времени Δt , шаг интегрирования по глубине образца Δz , максимальное время t_{\max} (время ползучести), максимальная глубина (высота) призматического образца z_{\max} ;
- параметры вывода результатов расчетов: моменты времени t_1, t_2, \dots, t_N .

Алгоритм расчета.

1. Производится дискретизация по временной и пространственной координатам:

$$t_i = t_0 + ih \quad (i = 0, 1, 2, \dots; t_0 = 0); \quad z_j = j\Delta z \quad (j = 0, 1, 2, \dots).$$

2. Рассчитываются компоненты тензора остаточных напряжений:

$$\sigma_x(z_j) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z_j - z^*)^2}{b^2}\right), \quad \sigma_y(z_j) = \frac{1 + \alpha\nu}{\alpha + \nu} \sigma_x(z_j).$$

Находятся пластические деформации:

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

3. Осуществляется расчет остаточных напряжений после температурной нагрузки с температуры T_0 до температуры T_1 :

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

4. Определяются остаточные напряжения после силовой нагрузки образца внешними напряжениями σ_x^0 и σ_y^0 .

5. Задаются нулевые значения деформаций ползучести в момент времени $t=0$:

$$p_x(z_j, 0) = 0; \quad p_y(z_j, 0) = 0; \quad p_x^0(0) = 0; \quad p_y^0(0) = 0.$$

6. Вычисляется интенсивность напряжений внешних нагрузок по формуле

$$S = \sqrt{(\sigma_x^0)^2 + (\sigma_y^0)^2 - \sigma_x^0 \sigma_y^0}.$$

7. Производится расчет напряженно-деформированного состояния, используя метод «шагов по времени». В каждый момент времени $t = t_i$ в цикле по времени с шагом Δt рассчитываются:

– интенсивность напряжений:

$$S_1(z_j, t_i) = \sqrt{(\sigma_x(z_j, t_{i-1}))^2 + (\sigma_y(z_j, t_{i-1}))^2 - \sigma_x(z_j, t_{i-1})\sigma_y(z_j, t_{i-1})};$$

– деформации ползучести:

$$p_x^0(t_i) = p_x^0(t_{i-1}) + c \left(\frac{S}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_x^0 - \frac{1}{2}\sigma_y^0}{\sigma^{**}} \right) \Delta t,$$

$$p_y^0(t_i) = p_y^0(t_{i-1}) + c \left(\frac{S}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_y^0 - \frac{1}{2}\sigma_x^0}{\sigma^{**}} \right) \Delta t,$$

$$p_x(z_j, t_i) = p_x(z_j, t_{i-1}) + c \left(\frac{S_1(z_j, t_{i-1})}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_x^0(z_j, t_{i-1}) - \frac{1}{2}\sigma_y^0(z_j, t_{i-1})}{\sigma^{**}} \right) \Delta t,$$

$$p_y(z_j, t_i) = p_y(z_j, t_{i-1}) + c \left(\frac{S_1(z_j, t_{i-1})}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left(\frac{\sigma_y^0(z_j, t_{i-1}) - \frac{1}{2}\sigma_x^0(z_j, t_{i-1})}{\sigma^{**}} \right) \Delta t;$$

– остаточные напряжения:

$$\sigma_x(z_j, t_i) = \sigma_x^0 + \frac{E_1}{1-\nu^2} \left[\left(p_x^0(t_i) + \nu p_y^0(t_i) \right) - \left(q_x(z_j) + \nu q_y(z_j) \right) - \left(p_x(z_j, t_i) + \nu p_y(z_j, t_i) \right) \right],$$

$$\sigma_y(z_j, t_i) = \sigma_y^0 + \frac{E_1}{1-\nu^2} \left[\left(p_y^0(t_i) + \nu p_x^0(t_i) \right) - \left(q_y(z_j) + \nu q_x(z_j) \right) - \left(p_y(z_j, t_i) + \nu p_x(z_j, t_i) \right) \right].$$

В конечном итоге, к моменту времени $t = t^*$ получим значения $\sigma_x(z_j, t^*)$, $\sigma_y(z_j, t^*)$, $p_x^0(t^*)$, $p_y^0(t^*)$, $p_x(z_j, t^*)$, $p_y(z_j, t^*)$.

8. Осуществляется расчет компонент тензора остаточных напряжений после силовой разгрузки:

$$\sigma_x(z_j, t^*) = \frac{E_1}{1-\nu^2} \left[\left(p_x^0(t^*) + \nu p_y^0(t^*) \right) - \left(q_x(z_j) + \nu q_y(z_j) \right) - \left(p_x(z_j, t^*) + \nu p_y(z_j, t^*) \right) \right],$$

$$\sigma_y(z_j, t^*) = \frac{E_1}{1-\nu^2} \left[\left(p_y^0(t^*) + \nu p_x^0(t^*) \right) - \left(q_y(z_j) + \nu q_x(z_j) \right) - \left(p_y(z_j, t^*) + \nu p_x(z_j, t^*) \right) \right].$$

9. Рассчитываются остаточные напряжения после ползучести при температурной разгрузке с температуры T_1 до температуры T_0 :

$$\sigma_x(z_j, t^*) = \frac{E_0}{1-\nu^2} \left[\left(p_x^0(t^*) + \nu p_y^0(t^*) \right) - \left(q_x(z_j) + \nu q_y(z_j) \right) - \left(p_x(z_j, t^*) + \nu p_y(z_j, t^*) \right) \right],$$

$$\sigma_y(z_j, t^*) = \frac{E_0}{1-\nu^2} \left[\left(p_y^0(t^*) + \nu p_x^0(t^*) \right) - \left(q_y(z_j) + \nu q_x(z_j) \right) - \left(p_y(z_j, t^*) + \nu p_x(z_j, t^*) \right) \right].$$

Программное обеспечение.

Для реализации описанного выше алгоритма расчета кинетики напряженно-деформированного состояния призматических образцов в условиях двухосного растяжения при ползучести разработано программное обеспечение на языке программирования Java. Данное программное обеспечение представляет собой консольное приложение, которое содержит классы:

1. Main.java – главный класс;
2. Creep.java – класс, в котором содержится информация о параметрах, определяющих реологические свойства материала;
3. Plastic.java – класс, в котором содержится информация о пластических деформациях после процедуры поверхностного пластического деформирования;

4. SigmaRes.java – класс, в котором содержится информация о компонентах тензора остаточных напряжений после процедуры поверхностного пластического деформирования;
5. Stress.java – класс, в котором содержится информация об остаточных напряжениях в условиях ползучести;
6. Graph.java – класс для вывода результатов.

В главном классе Main.java расчет производится по алгоритму:

1. strengthening() – метод, в котором рассчитываются остаточные напряжения и пластические деформации после упрочнения;
2. raiseTemperature() – метод, в котором производится расчет остаточных напряжений при температурной нагрузке;
3. load() – метод, в котором пересчитываются остаточные напряжения при силовой нагрузке;
4. creep() – метод, в котором производится расчет релаксации остаточных напряжений при ползучести;
5. unloading() – метод, в котором рассчитываются остаточные напряжения при силовой разгрузке;
6. resetTemperature() – метод, в котором рассчитываются остаточные напряжения при температурной разгрузке;
7. output() – вывод найденных значений в файл формата .csv.

На рис. 5.1 для примера показана работа программы и выведенные в файл данные.

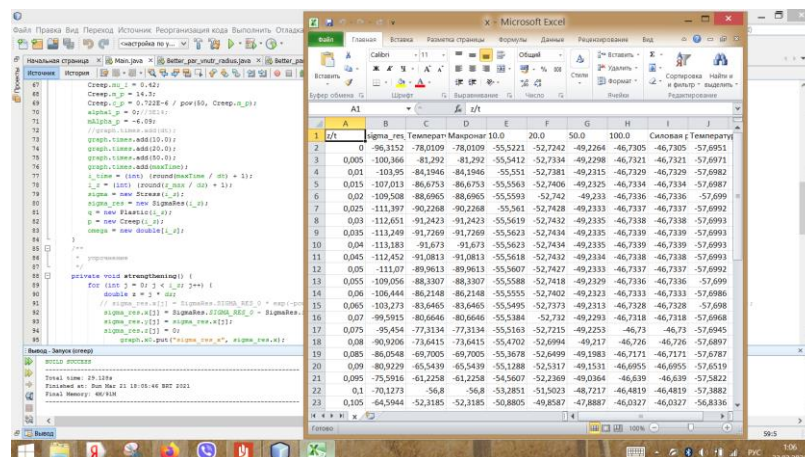


Рис. 5.1. Вывод полученных значений в файл

Анализ полученных данных производился в Microsoft Office Excel, куда копировались данные из файла формата .csv.

Заключение

Сформулируем основные выводы и научные результаты, полученные в рамках настоящей диссертационной работы.

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 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 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.
7. Разработана методика расчета релаксации остаточных напряжений на внешней и внутренней поверхностях тонкостенных трубок в условиях ползучести на основе обобщения соответствующей методики при одностороннего 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 литературы

1. Александров М. К., Папшева Н. Д., Акушская О. М. Ультразвуковое упрочнение деталей ГТД // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2011. № 3(27). С. 271–276.
2. Антонов А. А., Бобрик А. И., Морозов В. К., Чернышев Г. Н. Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии // Механика твердого тела. 1980. № 2. С. 182–189.
3. Антонов А. А., Ифимовская А. А., Чернышев Г. Н. Бесконтактный электростатический метод оценки НДС твердых тел. Сб. Остаточные технологические напряжения. М., 1988. С. 32–38.
4. Архипов А. Н., Темис Ю. М. Исследование остаточных напряжений в конструкциях сложной формы методом конечных элементов // Проблемы прочности. 1980. № 7. С. 81–84.
5. Багмутов В. П., Паршев С. Н., Дудкина Н. Г. и др. Электромеханическое упрочнение металлов и сплавов. ВолгГТУ. Волгоград. 2016. 460 с.
6. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963. 232 с.
7. Бойцов В. Б., Скрипкин Д. Э., Чернявский А. О. Расчётный анализ образования остаточных напряжений при виброупрочнении // Динамика, прочность и износостойкость машин. 1985. № 5. Челябинск: ИПМ АН СССР. С. 69–72.
8. Бордаков С. А. Разработка методов расчета остаточных напряжений и сопротивления усталости в неоднородном поверхностном слое элементов конструкции. Автореф. дис. д-ра техн. наук / СГАУ. Самара, 2000. 37 с.
9. 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.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Букатый А. С. Конечно-элементное моделирование и исследование остаточных напряжений и деформаций после дробеструйного упрочнения // Вестн. Машиностроения. 2016. № 6. С. 52–57.
14. Вакулюк В. С., Букатый А. С., Афанасьева О. С. и др. Влияние характера распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя на предел выносливости образцов // Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. Киев, 2013. С. 48–50.
15. Вакулюк В. С. Влияние технологии изготовления на остаточные напряжения и сопротивление усталости шлицевых деталей // Вестник Сам. госуд. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2013. № 2 (38). С. 99–104.

16. Васильев Д. М., Трофимов В. В. Современное состояние рентгеновского способа измерения макронапряжений // Заводская лаборатория. 1984. Т. 50, № 7. С. 20–29
17. Ватульян А. О., Дударев В. В. О некоторых проблемах реконструкции неоднородного предварительно напряженного состояния в упругих телах // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Математика. Механика. Информатика. 2009. Т. 9. Вып. 4. Ч. 2. С. 25–32.
18. Ватульян А. О. К формулировке интегральных уравнений в проблеме идентификации предварительно напряженного состояния // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2006. № 2. С. 23–25.
19. Ватульян А. О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела. М.: Физматлит, 2007. 223 с.
20. Ватульян А. О. Проблемы идентификации неоднородных свойств твердых тел // Вестник Самар. ун-та. 2007. Вып. 54, № 4. С. 93–103.
21. Виндокуров И. В., Владыкин А. В., Келлер И. Э. и др. К вопросу о реконструкции остаточных напряжений и деформаций пластины после дробеструйной обработки // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2018. Т. 22, № 1. С. 40–64.
22. Гецов Л. Б. Детали газовых турбин (материалы и прочность). Л.: Машиностроение, 1982. 296 с.
23. Гликман Л. А. Влияние температуры и продолжительности нагрева на снятие остаточных напряжений в аустенитной стали // Котлотурбостроение. 1948. № 20. С. 12–16.
24. Гребенников М. А., Заличихие С. Д., Стебельков И. А. Физика и технология упрочнения деталей в поле ультразвука // Вестник двигателестроения. 2013. С. 72–74.
25. Гринченко И. Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1971. 120 с.
26. Гузь А. Н. Упругие волны в сжимаемых материалах с начальными напряжениями и неразрушающий ультразвуковой метод определения

- двухслойных остаточных напряжений // Прикладная механика. 1994. Т. 30, № 1. С. 3–17.
27. Денисевич Д. С. и др. Комбинированное поверхностное упрочнение стальных и титановых сплавов на основе электромеханической и ультразвуковой обработок // Изв. ВолгГТУ. Сер.: Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2013. Вып. 7. № 6 (109). С. 68–71.
28. Денисевич Д. С. Разработка методики прогнозирования остаточных напряжений, возникающих при импульсной термосиловой обработке изделий из титановых сплавов. Автореферат дисс. канд. техн. наук. М., 2019. 16 с.
29. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. № 53. Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 32–42.
30. Иванов С. И. Определение остаточных напряжений в пластинах методом полосок // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. № 48. Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 139–152.
31. Иванов С. И. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндра // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. № 48. Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 153–168.
32. Иванов С. И., Павлов В. Ф., Минин Б. В. и др. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2015. 170 с.
33. Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. № 1. Куйбышев: КуАИ, 1974. С. 88–95.
34. Казанцев В. Ф., Кудряшов Б. А., Нигметзянов Р. И. и др. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование // Вестн. Харьк. нац. автодорож. ун-та. 2009. № 46. С. 7–9.
35. Капранов Б. И., Коротков М. М., Короткова И. А. Акустический контроль. Томск, 2004. 119 с.

36. Каратушин С. И., Спиридонов Д. В., Плешанова Ю. А. Сравнительный анализ расчетных методов определения остаточных напряжений // Новые материалы и технологии производства. 2016. № 4 (94). С. 51–56.
37. Келлер И. Э., Трофимов В. Н., Владыкин А. В. и др. К вопросу о реконструкции остаточных напряжений и деформаций пластины после дробеструйной обработки // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2018. Т. 22, № 1. С. 40–64.
38. Кирпичёв В. А., Букатый А. С. Влияние режимов пневмодробеструйной обработки на остаточные напряжения, микротвердость и сопротивление усталости // Физика прочности и пластичности материалов: Тр. XVII Междунар. конф. Т. 1. Самара: СамГТУ, 2009. С. 109–111.
39. Кирпичёв В. А., Павлов В. Ф., Чирков А. В., Иванова А. В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов различного диаметра // Вестник СГАУ. 2012. № 5 (36). Ч. 1. С. 100–107.
40. Колотникова О. В. Эффективность упрочнения методами поверхностного пластического деформирования деталей, работающих при повышенных температурах // Проблемы прочности. 1983. №2. С. 112–114.
41. Комлев Д. И. и др. Воздействие контактной шовной сварки на плазменные покрытия // Физика и химия обработки материалов. 2013. С. 69–77.
42. Копылов Ю. Р. Математическое моделирование процесса виброударного упрочнения деталей сложной формы // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 11. С. 3–8.
43. Костичев В. Э. Повышение сопротивления усталости коленчатых валов тепловых двигателей: дис. канд. техн. наук / Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т). Самара, 2017. 192 с.
44. Кравченко Б. А. Влияние напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя на долговечность деталей газотурбинных двигателей // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 1998. № 5. С. 71–77.

45. Кравченко Б. А., Круцило В. Г., Гутман Г. Н. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин. Самара: СамГТУ, 2000. 216 с.
46. Кудрявцев И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. М.: Машгиз, 1951. 278 с.
47. Кудрявцев И. В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1969. 100 с.
48. Кудрявцев Ю. Ф. Некоторые закономерности изменения остаточных напряжений в зависимости от их начального уровня и концентрации напряжений / Ю. Ф. Кудрявцев, О. И. Гуца // Пробл. прочн. 1986. № 11. С. 32–38.
49. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И., Волков В. И. Технологические методы повышения надежности деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 304 с.
50. Лебедев В. А., Чумак И. В. Кинетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей виброударными методами ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 7. С. 3–8.
51. Лиманова Л. В. Расчет тепловых и механических полей при термопластическом упрочнении пластины с двумя цилиндрическими отверстиями с учетом зависимости свойств материала от температуры // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки, 1999. № 7. С. 63–70.
52. Локощенко А. М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
53. Локощенко А. М., Шестериков С. А. Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // ПМТФ. 1980. № 3. С. 155–159.
54. Мавлютов Р. Р., Мардимасова Т. Н., Куликов В. С. Остаточные напряжения и деформации при упрочнении отверстий // Прочность конструкций. Уфа: УГАТУ, 1996. С. 90 – 97.

55. Макаров В. Ф. Оценка напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали при ультразвуковой упрочняющей финишной обработке деталей ГТД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 5. С. 49–52.
56. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
57. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1989. 237 с.
58. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев: Техника, 1971. 143 с.
59. Матлин М. М., Мосейко В. О., Мосейко В. В. Механика силового контактного взаимодействия дроби с поверхностью упрочняемой детали // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 10. С. 45–52.
60. 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: Машинообудування. 2010. № 59. С. 37–40.
61. Неразрушающий контроль. В 5-ти томах. Том 2. Акустические методы контроля: практическое пособие / Под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высшая школа, 1991. 283 с.
62. Никитенко А. Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. Новосибирск: НГАСУ, 1997. 278 с.
63. Ножницкий Ю. А., Фишгойт А. В., Ткаченко Р. И., Теплова С. В. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоев. (Обзор) // Вестн. двигателестроения. 2006. №2. С. 8–16.
64. Носов В. К., Кононов С. А., Перевозов А. С. и др. Реологические свойства сплава ЭП742–ИД в контексте интегрированного вычислительного материаловедения и инжиниринга (ICME). Часть 1. Результаты

- экспериментальных исследований // Известия вузов. Цветная металлургия. 2018. № 1. С. 30–42.
65. Орлов П. И. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие. М.: Машиностроение, 1988. 623 с.
66. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Вакулюк В. С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. 125 с.
67. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 64 с.
68. Павлов В. Ф., Столяров А. К., Вакулюк В. С., Кирпичев В. А. Расчет остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 124 с.
69. Павлов В. Ф., Столяров А. К., Павлович Л. И. Исследование остаточных напряжений в резьбе болтов по первоначальным деформациям // Проблемы прочности. 1987. № 5. С. 117–119.
70. Плихунов В. В. Численное моделирование осесимметричной задачи одиночного удара дробинки с учетом физико-механических свойств поведения металлов // Авиационная промышленность. 2008. № 4. С. 24–28.
71. Подзей А. В., Сулима А. М., Евстигнеев М. И. Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
72. Поздеев А. А., Няшин Ю. И., Трусов П. В. Остаточные напряжения: теория и приложения. М.: Наука, 1982. 109 с.
73. Пономаренко Д. А., Скугорев А. В., Кин Т. Ю., Шпагин А. С. Штамповка заготовок дисков турбины малогабаритных ГТД из слитков сплава ЭП742–ИД на изотермических прессах // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2019.
74. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 745 с.
75. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.

76. Радченко В. П., Афанасьева О. С., Глебов В. Е. Влияние технологии поверхностного пластического упрочнения, остаточных напряжений и граничных условий на выпучивание балки // Вестник ПНИПУ. Механика. 2020. № 1. С. 87–98.
77. Радченко В. П., Афанасьева О. С., Глебов В. Е. Исследование влияния остаточных напряжений на геометрические параметры поверхностно упрочненного бруса // Изв. Саратов. ун-та. Нов. серия: Математика. Механика. Информатика. 2019. Т. 19, № 4. С. 464–478.
78. Радченко В. П., Бочкова 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.
79. Радченко В. П., Еремин Ю. А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. М.: Машиностроение-1, 2004. 265 с.
80. Радченко В. П., Кирпичев В. А., Лунин В. В. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т // Вестник Сам. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2011. № 3 (24). С. 181–184.
81. Радченко В. П., Кирпичев В. А., Лунин В. А. Влияние термоэкспозиции на остаточные напряжения образцов из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2012. № 3 (35). С. 147–154.
82. Радченко В. П., Кочеров Е. П., Саушкин М. Н., Смыслов В. А. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом образце в условиях ползучести // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 1. С. 169–177.
83. Радченко В. П., Либерман А. Е., Рузов А. В. Исследование влияния пространственно-временной неоднородности деформации ползучести на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном полом

- цилиндре из сплава Д16Т // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2018. № 1 (57). С. 149–163.
84. Радченко В. П., Лунин В. В., Морозов А. П. Исследование кинетики физико-механических параметров упрочненных образцов из сплавов В95 и Д16Т вследствие температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний // Вестник СамГТУ. Сер.: Физ.-матем. науки. 2012. № 1 (26). С. 123–132.
85. Радченко В. П., Морозов А. П. Исследование изменения макроструктуры металла упрочненных цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т вследствие температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний // Вестник Сам. госуд. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2010. № 7 (28). С. 107–112.
86. Радченко В. П., Морозов А. П., Саушкин М. Н. Стохастическая модель для расчета остаточных напряжений в поверхностно упрочненном цилиндре в условиях ползучести // Вестник ПНИПУ. Механика. 2017. № 1. С. 181–207.
87. Радченко В. П., Морозов А. П. Экспериментальное исследование влияния пневмодробеструйной обработки, температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочненного слоя цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2010. № 5 (21). С. 222–228.
88. 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.
89. 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.
90. 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.
91. Радченко В. П., Павлов В. Ф., Саушкин М. Н. Исследование влияния анизотропии поверхностного пластического упрочнения на распределение остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 1. С. 130–147.
92. Радченко В. П., Павлов В. Ф., Саушкин М. Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных втулках с учетом остаточных касательных напряжений // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 1. С. 138–150.
93. 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.
94. 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.
95. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических элементов конструкций при ползучести // Извест. вузов. Машиностроение. 2004. № 11. С. 3–17.

96. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Павлов В. Ф. Метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // ПМТФ, 2011. Т. 52, № 2. С. 173–182.
97. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение-1, 2005. 226 с.
98. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочненном изделии цилиндрической формы при ползучести // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 6. С. 90–99.
99. 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.
100. Радченко В. П., Цветков В. В. Кинетика напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненном цилиндрическом образце при сложном напряженном состоянии в условиях ползучести // Вестник Сам. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2014. № 1 (34). С. 93–108.
101. Радченко В. П., Цветков В. В. Напряжённо-деформированное состояние цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения и кручения при ползучести // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2013. № 3 (32). С. 77–86.
102. Радченко В. П., Цветков В. В. Ползучесть и длительная прочность толстостенной трубы в условиях растяжения, кручения и внутреннего давления // XX Зимняя школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2017. С. 276.
103. 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.

104. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с надрезом полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер.: Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, № 4. С. 478–492.
105. Сазанов В. П., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С., Павлов В. Ф. Определение первоначальных деформаций в упрочненном слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчетного комплекса PATRAN/NASTRAN // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19, № 2. С. 35–40.
106. Сазанов В. П., Семенова О. Ю., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С. Математическое моделирование первоначальных деформаций в поверхностно упрочненных деталях при выборе образца-свидетеля // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. Т. 20, № 3. С. 31–37.
107. Самарин Ю. П., Клебанов Я. М. Обобщенные модели в теории ползучести конструкций. Самара: Поволж. отд. академии РФ – СамГТУ, 1994. 197 с.
108. Самарин Ю. П. Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами. Куйбышев: Куйбышевский госуниверситет, 1979. 84 с.
109. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: Едиториал УРСС, 2004. 480 с.
110. Сапожников В. М. Монтаж и испытания гидравлических и пневматических систем на летательных аппаратах. М. : Машиностроение, 1972. 271 с.
111. Саушкин М. Н., Куров А. Ю. Анализ напряженного состояния в надрезах полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования сплошных цилиндрических образцов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2012. № 1 (26). С. 133–140.
112. Саушкин М. Н., Радченко В. П., Бербасова Т. И. Моделирование процесса релаксации остаточных напряжений в плоских поверхностно упрочнённых

- деталей в условиях ползучести // Труды IX международной конференции «Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред». Горис, Армения. Ер.: НУАСА, 2018. С. 278–282.
113. Серебряков В. И. Формирование остаточных напряжений при единичном ударе // Проблемы повышения качества, надёжности и долговечности деталей машин и инструментов. Брянск: Брянск. ин-т трансп. машиностр., 1992. С. 68–72.
114. Смыслов В. А. Расчёт полей остаточных напряжений и упругих деформаций при нагреве цилиндрического изделия // Вестник Сам. госуд. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2013. № 4 (40). С. 120–125.
115. Соснин О. В., Горев Б. В., Никитенко А. Ф. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. 95 с.
116. Старцев Н. И. Трубопроводы газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 271 с.
117. Сулима А. М., Шувалов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
118. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
119. Трофимов В. В., Яблокова Н. А. Исследование остаточных напряжений в деталях сложной формы ГТД методом рентгеновской тензометрии. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2011. № 1. С. 112–117.
120. Цветков В. В. Решение краевой задачи о кручении сплошных и полых цилиндрических образцов из стали 45 и сплава АМГ-6М в условиях кратковременной установившейся ползучести // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2017. Т. 21, № 3. С. 507–523.
121. Цейтлин В. И., Колотникова О. В. Релаксация остаточных напряжений в деталях турбин ГТД в процессе эксплуатации // Проблемы прочности. 1980. №3. С. 6–11.

122. Чепя П. А. Анализ процесса формирования остаточных напряжений при упрочнении деталей поверхностным деформированием // Проблемы прочности. 1980. № 11. С. 100–104.
123. Чернышев Г. Н., Попов А. Л., Козинцев В. М., Пономарев И. И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996. 240 с.
124. Altenberber I., Nalla R. K., Sano Y., Wagner L., Ritchie R. O. On the effect of deeprolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6-Al-4V at elevated temperatures up to 550°C // Int. J. Fatigue. 2012. Vol. 44. Pp. 292–302.
125. ANSYS/LS-DYNA. URL: <http://www.ansys.com/products/Structures/ANSYS-LS-DYNA>. Accessed: 2018-01-20.
126. Badreddine J., Rouhaud E., Micoulaut M., Remy S. Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: Effects of process parameters // International Journal of Mechanical Sciences. 2014. Vol. 82. Pp. 179–190.
127. Bergstrom J. Relaxation of residual stresses during cyclic loading // Adv. Surface Treat.: Technol., Appl., Eff. 1986. Vol. 3. Pp. 97–111.
128. Bergstrom J. Relaxation of shot peening induced compressive stress during fatigue of notched steel samples / J. Bergstrom, T. Ericsson // Surface Eng. 1986. Vol. 2, no. 2. Pp. 115–120.
129. Besserdich G., Scholtes B., Müller H., Mochrauch E. Consequences of transformation plasticity on the development of residual stress and distortion during martensitic hardening of SAE4140 steel cylinders // Steel Res. 1994. Vol. 65, no. 1. Pp. 41–46.
130. Betten J. Creep mechanics. Berlin: Springer – Verlag. 2002. 327 p.
131. Brockman R. A., Braisted W. R., Olson S. E. et al. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening // Int. J. Fatigue. 2012. Vol. 36, no. 1. Pp. 96–108.
132. Buchanan D. J., John R. Relaxation of shot – peened residual stresses under creep loading // Scripta Materialia. 2008. No 3. Pp. 286–289.

133. ComplexStressRelax // Свид. о регистрации программы для ЭВМ № 2015613229 / Цветков В. В.; правообладатель Цветков В. В. – заявка № 2014663033; заявл. 12.12.2014; зарегистр. 10.03.2015.
134. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation // *Int. J. Fatigue*. 2008. Vol. 30, no. 8. Pp. 1398–1408.
135. Davis J., Ramulu M. A study of the residual stress induced by shot peening for an isotropic material based on Prager's yield criterion for combined stresses // *Meccanica*. 2015. Vol. 50. Pp. 1593–1604.
136. Dounde A. A., Seemikeri C. Y., Tanpure P. R. Study of shot peening process and their effect on surface properties // *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications (IJEBEA)*. 2015. Pp. 104–107.
137. Foss B. J., Gray S., Hardy M. C. et al. Analysis of shot-peening and residual stress relaxation in the nickel-based superalloy RR1000 // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61, no. 7. Pp. 2548–2559.
138. Franchim A. S., Campos V. S., Travessa D. N., Moura Neto C. Analytical modeling for residual stresses produced by shot peening // *Materials and Design*. 2009. Vol. 30, no. 5.
139. Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M. et al. Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure // *Comptes Rendus Mechanique*. 2016. Vol. 344. Pp. 355–374.
140. Gambin W. Estimation of residual stresses in metal surface layers after the roller burnishing process // *Mech. teor. i stosow.* 1997. Vol. 35, no. 1. Pp. 43–55.
141. Gambin W. Plastic analysis of metal surface layers undergoing the roller burnishing process // *Eng. Trans.* 1996. Vol. 44, no. 3–4. Pp. 471–481.
142. Hoffmann J., Scholtes B., Vohringer O. et al. Thermal relaxation of shot peening residual stresses in the differently heat treated plain carbon steel Ck 45 // *Shot Peening: Sci., Technol., Appl.: Pap. 3 Int. Conf.* – Oberwisel et al. 1987. Pp. 360–367.
143. Hoffmann J., Scholtes B., Vohringer O., Macherauch E. Thermal relaxation of shot peened residual stresses in the differently heat treated plain carbon steel Ck 45

- // Shot Peening: Sci., Technol., Appl.: Pap. 3 Int. Conf.—Oberwisel et al. 1987. Pp. 239–247.
144. Isakov V. Inverse problems for PDE. N.Y.: Springer-Verlag, 2005. 284 p.
145. James M. N., Hughes D. J., Chen Z. et al. Residual stresses and fatigue performance // *Engineering Failure Analysis*. 2007. Vol. 14, no. 2. Pp. 384–395.
146. Jebahi M., Gakwaya A., Lévesque J. et al. Robust methodology to simulate real shot peening pro-cess using discrete-continuum coupling method // *Int. J. Mech. Sci.* 2016. Vol. 107. Pp. 21–33.
147. Khadraoui M., Cao W., Castex L., Gu'edou J. Y. Experimental investigations and modelling of relaxation behaviour of shot peening residual stresses at high temperature for nickel base superalloys // *Mater. Sci. Technol.* 1997. Vol. 13, no. 4. Pp. 360–367.
148. Kraus L., Trofimov V. V. Rentgenova tenzometrie. Praha. Academia, 1988. 248 pp.
149. Liu Yu, Wang L., Wang D. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process. // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 21. Pp. 2106–2113.
150. Majzoobi G. H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 // *Materials Science and Engineering A*. 2009. Vol. 516, no. 1–2. Pp. 235–247.
151. McClung R. C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2007. Vol. 30, no. 3. Pp. 173–205.
152. Pechersky M. J. Determination of residual stresses by thermal relaxation and speckle correlation interferometry // *Strain*. 2002. Vol. 38, no. 4. Pp. 141–149.
153. Purohit R., Verma C. S., Rana R. S. et al. Simulation of shot peening process // *Material Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4. Pp. 1244–1251.
154. Radchenko V. P., Pavlov V. F., Berbasova T. I. Modeling the formation of residual stresses in thin-walled cylindrical samples after plastic surface hardening

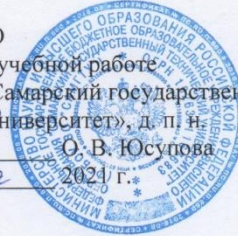
- of inner and outer surfaces // *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2020) AIP Conf. Proc.* 2315. Pp. 020038-1–020038-4.
155. Radchenko V. P., Saushkin M. N., Berbasova T. I. Mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of residual stresses 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.)
156. Radchenko V. P., Tsvetkov V. V., and Derevyanka T. T. 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. Pp. 898–906.
157. Radchenko V. P., Tsvetkov V. V., Saushkin M. N. Residual stress relaxation in a hardened cylinder under creep, loaded by an axial force, torque, and internal pressure // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2020. Vol. 61, no. 4. Pp. 583–592.
158. Sherafatnia K., Farrahi G. H., Mahmoudi A. H., Ghasemi A. Experimental measurement and analytical determination of shot peening residual stresses considering friction and real unloading behavior // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 657. Pp. 309–321.
159. Soady K. A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening. Part 1 – effect of shot peening on fatigue resistance // *Mater. Sci. Technol*. 2013. Vol. 29, no. 6. Pp. 637–651.
160. Strelax // Свид. о регистрации программы для ЭВМ № 2013619758 / Смыслов В. А., Саушкин М. Н.; правообладатель Смыслов В. А. – заявка № 2013615774; заявл. 09.07.2013; зарегистр. 14.10.2013.

161. Terres M. A., Laalai N., Sidhom H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach // Mater. Des. 2012. Vol. 35. Pp. 741–748.
162. T-jump // Свид. о регистрации программы для ЭВМ № 2014614005 / Смыслов В. А.; правообладатель Смыслов В. А. – заявка № 2014611458; заявл. 25.02.2014; зарегистр. 14.04.2014.
163. Vohringer O. Relaxation of residual stresses by annealing or mechanical treatment // Adv. Surface Treat. 1987. Vol. 4. Pp. 367–396.
164. Xie L., Jiang C., Ji V. Thermal relaxation of residual stresses in shot peened surface layer of (TiB+TiC)/Ti-6Al-4V composite at elevated temperatures // Mater. Sci. Eng. A. 2011. Vol. 528, no. 21. Pp. 6478–6483.
165. Xie L., Wang Ch., Wang L. et al. Numerical analysis and experimental validation on residual stress distribution of titanium matrix composite after shot peening treatment // Mech. Mat. 2016. Vol. 99. Pp. 2–8.
166. Zimmermann M., Klemenz M., Schulze V. Literature review on shot peening simulation // International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering. 2010. Vol. 3. Pp. 289–310.

Приложение А

Акт о внедрении результатов работы в учебном процессе

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», д. п. н.
О. В. Юсупова
«19» марта 2024 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Т. И. Бербасовой «Методы расчёта формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций при ползучести», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебном процессе Самарского государственного технического университета.

Комиссия в составе начальника учебного управления университета к.э.н., доцента Е. А. Алонцевой, заведующего кафедрой «Прикладная математика и информатика» д.ф.-м.н., профессора В. П. Радченко и председателя методического совета Института автоматизации и информационных технологий д.т.н., доцента А. Н. Дилигенской составила настоящий акт о том, что в учебном процессе Самарского государственного технического университета использованы следующие результаты кандидатской диссертации Т. И. Бербасовой «Методы расчёта формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций при ползучести»

1. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные на основе методов реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочнённых призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций, используются в лекционных курсах для бакалавров 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».

2. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные на основе метода решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое призматических и тонкостенных цилиндрических элементов конструкций вследствие ползучести, используются в лекционных курсах для бакалавров 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».

Начальник УУ СамГТУ
к.э.н., доцент

Е. А. Алонцева

Зав. кафедрой ПМИИ
д.ф.-м.н., профессор

В. П. Радченко

Председатель МС ИАИТ
д.т.н., доцент

А. Н. Дилигенская

Приложение Б

Акт о внедрении результатов работы на предприятии

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор

ПАО «Кузнецов»

кандидат технических наук



Чупин П.В.

2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Бербасовой Татьяны Игоревны

«Методы расчёта формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций при ползучести»

Мы, представители публичного акционерного общества «Кузнецов» – эксперт Кочеров Е.П. и ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) – заведующего кафедрой «Прикладная математика и информатика» Радченко В.П. и начальник управления научных исследований Давыдов А.Н. составили настоящий акт о том, что:

- 1) феноменологические методы реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций для поверхностно упрочнённых призматических элементов конструкций и расчёта их релаксации в процессе ползучести;
 - 2) феноменологические методы реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций для тонкостенных цилиндрических продуктопроводов пневмогидросистем ГТД в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения внешней и внутренней поверхности и расчёта их релаксации в процессе ползучести;
 - 3) результаты теоретических и экспериментальных исследований по влиянию вида сложного напряжённого состояния на кинетику остаточных напряжений вследствие ползучести в поверхностно упрочнённом призматическом образце из сплава ЭП 742 при $T = 650^{\circ}\text{C}$ и тонкостенном продуктопроводе пневмогидросистем после двухстороннего упрочнения из стали 08X18H9 при $T = 600^{\circ}\text{C}$
- внедрены в расчётную практику в отделе прочности ОКБ ПАО «Кузнецов».

Эксперт ПАО «Кузнецов»,
кандидат технических наук

Е. П. Кочеров

Зав. кафедрой «Прикладная
математика и информатика»
ФГБОУ ВО СамГТУ,
д.ф.-м.н., профессор

В. П. Радченко

Начальник управления
научных исследований
ФГБОУ ВО СамГТУ,
к.т.н., доцент

А. Н. Давыдов