

На правах рукописи



Шарова Валентина Игоревна

**ТЕРМОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВТОРНЫХ И
ДЛИТЕЛЬНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР**

Специальность: 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Московский политехнический университет" на кафедре "Техническая механика и компьютерное моделирование".

Научный руководитель: Бондарь Валентин Степанович

Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры "Техническая механика и компьютерное моделирование" ФГАОУ ВО "Московский политехнический университет"

**Официальные
оппоненты:**

Гаврюшин Сергей Сергеевич

Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Компьютерные системы автоматизации производства", ФГАОУ ВО "Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)"

Темис Юрий Моисеевич

доктор технических наук, профессор, советник генерального директора по образовательной деятельности, ФАУ "Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова"

Ведущая организация

ФГБУН "Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук"

Защита состоится "24" декабря 2026 г. в 13:00 часов на базе ФГБОУ ВО "Тверской государственный технический университет" по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22, ауд. Ц-208.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО "Тверской государственный технический университет" и на сайте ВУЗа по адресу: <https://new.tstu.tver.ru/science/dissertation/24.2.410.03/#pills-defense>

Автореферат разослан " ____ " _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Алексеев
Андрей Алексеевич

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие техники предъявляет высокие требования к прочности и ресурсу конструкционных материалов. В авиационных и ракетно-космических системах детали и узлы подвергаются сложным комбинациям статических, динамических и термомеханических нагрузок. Для таких конструкций характерны циклические процессы нагружения, сопровождающиеся эффектами упрочнения и разупрочнения, возникновением остаточных микронапряжений и накоплением повреждений. Существование широкого круга прикладных задач приводит к формированию различных подходов в теории пластичности, являющихся теоретической основой для расчета прочности и ресурса конструкций в различных областях техники. В условиях воздействия высоких температур теории пластичности позволяют учитывать совместное действие пластической деформации и ползучести, а также прогнозировать накопление повреждений и зарождение трещин.

В настоящее время теории пластичности развиваются по двум основным направлениям: теориям упругопластических процессов и теориям пластического течения. Первое направление связано с развитием идей А. А. Ильюшина, который сформулировал общую математическую теорию пластичности и предложил рассматривать процессы нагружения и деформирования как траектории в пятимерных векторных пространствах напряжений и деформаций. В рамках этого подхода был разработан постулат изотропии и принцип запаздывания скалярных и векторных свойств. В подходе А.А. Ильюшина нет деления упругих и пластических деформаций, все деформирование рассматривается как единый необратимый процесс в пространстве деформаций. Такой подход лег в основу деформационной теории пластичности (теория малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина), в которой тело представляется как нелинейно упругое, а напряженное состояние не зависит от истории деформирования. Эта теория применяется для описания упругопластического поведения изотропных материалов, и развивалась в работах А.П. Гусенкова, В.В. Москвитина, Н.А. Махутова и С.В. Серенсена, С.М. Шнейдеровича, Б.Ф. Шора и И.А. Биргера, И.В. Пучкова и Ю.М. Темиса и др.

Деформационная теория позволяет прогнозировать максимальные напряжения при монотонном пропорциональном нагружении, однако не применима к непропорциональным нагружениям и сложна для адаптации уравнений при изменении направления деформирования. Дальнейшее развитие идей А.А. Ильюшина привело к формированию теории процессов пластичности, в которой соотношения определяются выбором функционалов процесса для различных траекторий деформирования. Эта теория применяется для моделирования упругопластического поведения материалов с начальной изотропией. Вклад в развитие этого направления внесли Дао Зуй Бик, В.А. Пелешко, В.Г. Зубчанинов, Р.А. Васин, А.С. Вавакин, И.Н. Молодцов, В.С. Бондарь, А.А. Маркин, Н.И. Марин, К.Я. Шульц, М.Ю. Соколова, В.И. Малый, В.П. Дегтярев, С.И. Ратнер, В.С. Ленский, А.М. Жуков,

И.М. Ройтман, Н.Л. Охлопков, В.И. Гультияев, Д. Соси, J. Baushinger, L. Bairstow, G. Masing, G. Kang, L.F. Coffin, G.Saks и Н. Shoji и др.

Второе направление, теория пластического течения, основывается на разделении деформаций на упругую и пластическую составляющие. Напряжения зависят от упругих деформаций, а скорости пластических деформаций – от напряжений. Классическим элементом этих теорий является поверхность нагружения в пространстве напряжений, разделяющая области упругого и упругопластического деформирования. В отличие от подхода теорий процессов, здесь пластическая деформация трактуется как непрерывное течение, а связь между напряжениями и деформациями выражается через инкрементальные (дифференциальные) соотношения. Эти модели способны описывать сложные эффекты при циклических нагружениях: эффект Баушингера, упрочнение и разупрочнение, посадку и вышагивание петель упругопластического гистерезиса, а также влияние температуры. Развитие теорий течения связано с работами А.Ю. Ишлинского, В.В. Новожилова, Ю.И. Кадашевича, И.А. Биргера, В.С. Бондаря, В.С. Бондаря и Д.Р. Абашева, Ю.Г. Коротких, Л.А. Игумнова, И.А. Волкова, И.В. Демьянушко, Ю.М. Темиса, Б.Е. Мельникова, А.А. Мовчана, J.-L. Chaboche, J. Besson, C.O. Frederick и P.J. Armstrong, G. Backhaus, Z. Mroz, W. Prager, J. Lemaitre, J.-D. Wang и N. Ohno, E. Tanaka и др.

Современные реализации этих теорий нашли отражение в конечно-элементных моделях, где наиболее распространенным является вариант теории течения при изотропном упрочнении, в котором поверхность текучести может только изотропно расширяться, не меняя формы. Однако такие модели не описывают эффекты циклического деформирования, поэтому были предложены обобщенные модели комбинированного упрочнения, а также модели, в которых поверхность текучести изменяет размер и положение с нелинейным кинематическим упрочнением. Развитие идей комбинированного упрочнения привело к созданию уравнений для смещения центра поверхности нагружения, предложенных В.С. Бондарем, и позволяющих моделировать процессы сложного циклического нагружения, включая эффекты посадки и вышагивания петли упругопластического гистерезиса. В модели неупругости В.С. Бондаря микронапряжения разделяются на различные типы, каждый из которых отвечает за определенный механический эффект, однако для описания процессов нестационарного нагружения требуется ее дальнейшая адаптация.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки и прогнозирования ресурса конструкционных материалов, работающих в условиях длительных циклических неизотермических нагружений. Модели деформирования, применяемые в инженерных расчетах, зачастую не позволяют описывать сложные циклические и неизотермические режимы нагружения, а также процессы накопления повреждений. Разработка модифицированной модели термовязкопластичности, позволяющей описывать ряд эффектов при вязкопластическом неизотермическом

циклическом и монотонном нагружении, и создание на её основе программного комплекса для расчета напряженно-деформированного состояния, является актуальной научной и прикладной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Проблема моделирования термовязкопластического деформирования и оценки ресурса материалов при повторном и длительном термомеханическом нагружении исследуется в работах отечественных и зарубежных авторов. В ряде расчетных систем используются модели, в которых пластическая деформация и ползучесть рассматриваются отдельно, что ограничивает точность описания сложных режимов нагружения. Известны также подходы, основанные на теориях Ю.Г. Коротких и Ж. Шабоша, позволяющие учитывать отдельные особенности циклического деформирования, однако имеющие ряд ограничений в описании нестационарных процессов нагружения. Модель неупругости В.С. Бондаря позволяет описывать накопление повреждений в материале при вязкопластическом деформировании, однако существует потребность ее модификации для применения к процессам вязкопластического неизотермического циклического и монотонного нагружения.

Цель работы. Разработка модифицированной модели термовязкопластичности и проведение экспериментальных исследований процессов термовязкопластического деформирования и разрушения металлических материалов – конструкционных сталей и сплавов – при повторных и длительных нагружениях в условиях высоких температур.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих основных задач:

1. Формулировка основных положений и уравнений модифицированной модели термовязкопластичности;
2. Получение на основе общих уравнений модели термовязкопластичности системы уравнений шестиосного напряженно-деформированного состояния для различных случаев задания компонент напряжений и (или) деформаций;
3. Формулировка базового эксперимента и метода определения материальных функций;
4. Проведение базовых экспериментов и определение материальных функций для ряда конструкционных сталей и сплавов;
5. Проведение экспериментальных исследований образцов бронзового сплава БрХ08-Ш и нержавеющей стали 12Х18Н10Т при повторных и длительных, изотермических и неизотермических режимах нагружения;
6. Разработка программного комплекса на основе модифицированной модели термовязкопластичности для определения кинетики напряженно-деформированного состояния и разрушения материала при повторных и длительных нагружениях в условиях высоких температур;

7. Проведение расчетных исследований термовязкопластического деформирования и разрушения ряда конструкционных сталей и сплавов и сопоставление полученных результатов с результатами экспериментальных исследований при повторных и длительных, изотермических и неизотермических нагружениях, в условиях как простого, так и сложного нагружения.

Научная новизна работы. Для оценки поведения и разрушения металлических материалов – конструкционных сталей и сплавов – при вязкопластическом повторном и длительном нагружениях разработана новая модель термовязкопластичности, учитывающая влияние эффектов, возникающих при циклическом, монотонном и длительном изотермическом и неизотермическом видах нагружения. Получены новые результаты экспериментальных исследований поведения и разрушения бронзового сплава БрХ08-Ш и нержавеющей стали 12Х18Н10Т при повторных и длительных, изотермических и неизотермических режимах нагружения. Сопоставление результатов расчетов и экспериментов показало достаточную работоспособность модифицированной модели термовязкопластичности при оценке поведения и разрушения металлических материалов при повторных и длительных нагружениях в условиях высоких температур – отличие по характеристикам деформирования не превысило 10-15%, а разрушения – 30%.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты имеют теоретическую ценность и практическую значимость при моделировании процессов термовязкопластического деформирования и разрушения материалов. Создан программный комплекс для расчета кинетики напряженно-деформированного состояния и разрушения материалов при циклических, монотонных и длительных нагружениях, при постоянной и переменной температуре.

Методология и методы исследования. Математическое моделирование процессов циклического, монотонного и длительного нагружения при постоянной и переменной температуре проводится с использованием разработанного программного комплекса, основанного на решении системы дифференциальных уравнений разработанной модели термовязкопластичности методом Рунге-Кутты 4 порядка. Экспериментальные исследования проведены на универсальной испытательной машине LFMZ 100kN.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модифицированная модель термовязкопластичности при повторных и длительных нагружениях металлических материалов в условиях высоких температур;
2. Базовый эксперимент, метод определения материальных функций и материальные функции сталей 12Х18Н10Т, 304, 30ХГСА и сплавов БрХ08-Ш, АЛ-25;

3. Программный комплекс для определения кинетики напряженно-деформированного состояния и разрушения материала при повторных и длительных нагружениях в условиях высоких температур.

4. Результаты экспериментальных исследований деформирования и разрушения образцов бронзового сплава БрХ08-Ш и нержавеющей стали 12Х18Н10Т при циклических, монотонных, длительных изотермических и неизотермических видах нагружения.

5. Результаты расчетных исследований термовязкопластического деформирования и разрушения сталей 12Х18Н10Т, 304, 30ХГСА и сплавов БрХ08-Ш, АЛ-25 и сопоставления полученных результатов с результатами экспериментальных исследований при повторных и длительных, изотермических и неизотермических нагружениях в условиях как простого, так и сложного нагружения.

Достоверность результатов подтверждается сопоставлением расчетов на основе разработанной модели термовязкопластичности и экспериментов по вязкопластическому деформированию, малоцикловой и длительной прочности.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены на:

1. XXXIII Всероссийской школе-конференции "Математическое моделирование в естественных науках" (Пермь, 2024 г.);

2. 67-й Всероссийской научной конференция МФТИ (Москва, 2025 г.);

3. Семинаре "Ресурс, многообразие, длительность, долговечность" АО "ЦНИИмаш" (Королев, 2025 г.);

4. XXXIV Всероссийской школе-конференции "Математическое моделирование в естественных науках" (Пермь, 2025 г.);

5. Семинаре "Динамика и прочность авиационных двигателей" ФАУ "ЦИАМ им. П.И. Баранова" (Москва, 2026 г.).

6. Научно-техническом совете отдела "Прочность, живучесть и безопасность машин" ФГБУН "Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН" (Москва, 2026 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в семи научных работах, четыре из которых в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (Перечень ВАК). Также, три из научных работ опубликованы в изданиях, индексируемых в базе Scopus.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, получены лично соискателем в процессе научной деятельности. Заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка источников и четырех приложений. Общий объем работы составляет 174 страницы, в том числе 121 страницу основного текста, содержит 34 рисунка, 25 таблиц и 4 приложения. Список использованных источников включает в себя 187 наименований на 17 страницах. Объем приложений составляет 31 страницу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору вариантов моделей термовязкопластичности, применяемых при расчетах напряженно-деформированного состояния материалов, а также различных вариантов оценки и прогнозирования ресурса материала. Рассматриваются модели Ю.Г. Коротких, Ж-Л. Шабоша, В.С. Бондаря и модель, применяемая в программном комплексе Abaqus.

Модель Ю.Г. Коротких основана на разделении деформации на "мгновенные" и "временные" компоненты. Для разделения процессов монотонного и циклического нагружений в пространстве микронапряжений вводится поверхность циклической памяти. Используемый подход не соответствует действительным процессам эволюции поверхности памяти. При пластическом деформировании используется теория течения при комбинированном упрочнении с простейшими аналогом эволюционного уравнения для микронапряжений Армстронга-Фредерика-Кадашевича. Данный вариант теории неудовлетворительно описывает процессы сложного нагружения, а также процессы посадки и вышагивания петли упругопластического гистерезиса при несимметричных циклических нагружениях. Для определения деформаций ползучести используется модель изотропной ползучести при степенном законе упрочнения. Эта модель не позволяет адекватно описывать процессы деформирования при сложных циклических нагружениях.

Модель Ж-Л. Шабоша базируется на концепции разделения полной деформации на упругую, неупругую и термическую составляющие. Неупругая деформация разделяется на пластическую и деформацию ползучести. Для неупругих деформаций применяется теория течения при комбинированном упрочнении. Скорость накопленной деформации ползучести определяется на основе степенного закона. Микронапряжения раскладываются на сумму независимых микронапряжений (гипотеза суммирования микронапряжений Новожилова-Шабоша). Для каждого микронапряжения вводится свое эволюционное уравнение (аналог уравнения Армстронга-Фредерика-Кадашевича), обобщенное на неизотермическое нагружение и процессы восстановления (рекристаллизации) микронапряжений, зависящих от времени. Для изотропного упрочнения вводятся также эволюционное уравнение, обобщенное на неизотермическое нагружение, в котором кроме упрочнения имеет место разупрочнение, зависящее от времени. Данный вариант удовлетворительно описывает процессы сложного циклического нагружения. Однако в модели нет поверхности памяти и, соответственно, нет

возможности описать особенности и различия процессов монотонных и циклических нагружений при нестационарных несимметричных нагружениях. Отсутствуют уравнения накопления повреждений и влияние повреждений на процесс неупругого деформирования.

Модель В.С. Бондаря относится к моделям с комбинированным упрочнением. Тензор скоростей неупругой деформации определяется градиентальным законом течения. Изотропное упрочнение (радиус поверхности нагружения) определяется на основе эволюционного уравнения, где кроме упрочнения учитывается разупрочнение, зависящее от времени, также обеспечивается неизотермический переход. Тензор микронапряжений определяется на основе эволюционного уравнения с трехчленной структурой, обобщенной на неизотермические нагружения и процессы восстановления (рекристаллизация) микронапряжений, зависящих от времени. Эволюционные уравнения для радиуса и тензора микронапряжений зависят от повреждений. Данный вариант теории неупругости прошел апробацию на широком спектре конструкционных сталей и сплавов, программ экспериментальных исследований в условиях повторности и длительности воздействия термомеханических нагрузок.

Модель пластичности на основе теории течения, с возможностью применения при различных вариантах упрочнения, внедрена в программный комплекс Abaqus, основой которого является метод конечных элементов. Для пластического деформирования используется современный вариант теории течения при комбинированном упрочнении с достаточно простыми эволюционными уравнениями для микронапряжений (принцип суммирования Новожилова-Шабоса, эволюционные уравнения на основе уравнений Армстронга-Фредерика-Кадашевича). Для вязкого деформирования (ползучесть) используется простейшая модель ползучести на основе степенного закона. Данный вариант не способен адекватно описать многие особенности термовязкопластического деформирования конструкционных сталей и сплавов при повторных нагружениях в условиях длительных термомеханических воздействий; механизм определения ресурса в данной модели отсутствует.

Были рассмотрены варианты оценки и прогнозирования ресурса Л.Б. Гецова, Ю.Г. Коротких и В.С. Бондаря. В четырехчленном деформационном критерии Л.Б. Гецова применяется правило линейного суммирования повреждений за счет пластической деформации в пределах цикла, деформации ползучести в пределах цикла, одностороннее накопление пластической деформации и одностороннее накопление деформации ползучести. Для применения этого критерия необходимо иметь достаточно достоверную теорию термовязкопластичности, а также рассматривать только простые изотермические процессы нагружения.

Кинетические уравнения накопления повреждений Ю.Г. Коротких построены на энергетическом принципе: при пластическом деформировании используется работа микронапряжений на поле пластических деформаций, а

при ползучести – работа напряжений на поле деформаций ползучести. Кинетические уравнения описывают нелинейный процесс накопления повреждений, а для определения суммарного повреждения используется правило линейного суммирования повреждений. Процессы охрупчивания и залечивания повреждений здесь не учитываются.

Для описания процесса накопления повреждений в модели В.С. Бондаря используется энергетический подход. В качестве энергии, расходуемой на создание повреждений в материале, принимается энергия, равная работе микронапряжений на поле неупругих деформаций. В процессе нагружения имеет место: накопление повреждений за счет работы микронапряжений на поле неупругих деформаций, залечивание повреждений и охрупчивание материала. Залечивание и охрупчивание связаны с длительностью процесса нагружения. Критерием разрушения материала будет достижение повреждением предельного значения, обычно принимаемого равным единице или близким к единице.

Таким образом теория неупругости В.С. Бондаря и связанные с ней кинетические уравнения накопления повреждений по своим свойствам и возможностям, а также четкости базового эксперимента и метода определения материальных функций превосходит другие варианты теорий термовязкопластичности.

Вторая глава посвящена разработке модифицированной модели термовязкопластичности, формулировке базового эксперимента и метода определения материальных функций. На базе теории неупругости В.С. Бондаря разработана модель термовязкопластичности, которая позволяет учитывать неупругое деформирование материала при пропорциональных и сложных режимах нагружения, как монотонных, так и циклических, включая эффект Баушингера, процессы циклического упрочнения и разупрочнения, посадку и вышагивание петли упругопластического гистерезиса, а также особенности перехода от циклического нагружения к монотонному и обратно. Кроме того, модель описывает вязкое деформирование при пропорциональном и сложном нагружении с учетом процессов ползучести и релаксации напряжений на различных стадиях реологического поведения материала. В модели учитываются неизотермические эффекты, приводящие к изменению параметров упруговязкопластического деформирования при вариации температуры, а также определяется накопление повреждений в условиях неизотермического термовязкопластического нагружения. Далее излагаются основные соотношения и положения разработанной модели термовязкопластичности.

Тензор скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}$ представляется в виде суммы скоростей упругой $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$, неупругой $\dot{\varepsilon}_{ij}^{in}$ и температурной $\dot{\varepsilon}^{th}$ деформаций

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^{in} + \dot{\varepsilon}^{th} \delta_{ij}, \quad (1)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$).

Девиатор e_{ij}^e и среднее значение ε_0^e упругой деформации связаны с девиатором s_{ij} и средним значением σ_0 напряжений законом Гука

$$s_{ij} = 2Ge_{ij}^e, \quad \sigma_0 = 3K\varepsilon_0^e \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига, K – модуль объемного сжатия, s_{ij} – девиатор напряжений, σ_0 – среднее значение напряжений, e_{ij}^e – девиатор упругой деформации, ε_0^e – средняя упругая деформация.

Температурная деформация определяется законом линейного расширения

$$\varepsilon^{th} = \alpha(T - T_R), \quad (4)$$

где α – коэффициент теплового линейного расширения, T_R – базовая температура материала.

Уравнение поверхности нагружения имеет вид

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2}(s_{ij} - a_{ij})(s_{ij} - a_{ij}) - C^2 = 0. \quad (5)$$

Здесь $s_{ij}^* = s_{ij} - a_{ij}$ – девиатор активных напряжений, a_{ij} – тензор остаточных микронапряжений, C – размер поверхности нагружения.

Изменение размера поверхности нагружения описывается следующим эволюционным уравнением:

$$\dot{C} = q_\varepsilon \dot{\varepsilon}_{u*}^{in} + q_T \dot{T} - q_R, \quad \dot{\varepsilon}_{u*}^{in} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}_{ij}^{in} \dot{\varepsilon}_{ij}^{in}. \quad (6)$$

Здесь $\dot{\varepsilon}_{u*}^{in}$ – интенсивность скоростей неупругой деформации (скорость накопленной неупругой деформации), q_ε, q_T, q_R – определяющие функции, которые выражаются через материальные, определяемые экспериментально.

$$q_\varepsilon = \begin{cases} \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{u*}^{in}} - K_C \left(\frac{C - C_p}{C_p} \right) & \text{– циклическое нагружение,} \\ \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{u*}^{in}} + M_C & \text{– монотонное нагружение,} \end{cases} \quad (7)$$

где K_C и M_C – материальные функции, определяющие модули изотропного упрочнения при циклическом и монотонном нагружении соответственно, C_p – значение размера поверхности нагружения при циклическом деформировании.

$$q_T = \frac{C}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial T}, \quad q_R = \begin{cases} q_\varepsilon P_C, & q_\varepsilon > 0 \\ 0, & q_\varepsilon \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$P_C = \exp(b_C) (C - \sigma_{-1})^{n_C} (1 - \omega)^{-m_\omega}, \quad (9)$$

$$\dot{\sigma}_{-1} = \begin{cases} \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{u*}^{in}} \varepsilon_{u*}^{in} + \frac{\partial C_p}{\partial T} \dot{T} & \text{— циклическое нагружение,} \\ 0 & \text{— монотонное нагружение,} \end{cases} \quad (10)$$

где b_c , n_c и m_ω — материальные функции, σ_{-1} — предел ползучести, $\omega \in [0; 1)$ — мера повреждения, P_c — функция изотропной ползучести.

Тензор микронапряжений a_{ij} есть сумма тензоров микронапряжений первого $a_{ij}^{(1)}$ и второго $a_{ij}^{(2)}$ типов, каждый из которых описывается следующим эволюционным уравнением:

$$a_{ij} = a_{ij}^{(1)} + a_{ij}^{(2)}, \quad (11)$$

$$\dot{a}_{ij}^{(m)} = \frac{2}{3} g^{(m)} \dot{\varepsilon}_{ij}^{in} + g_a^{(m)} a_{ij}^{(m)} \dot{\varepsilon}_{u*}^{in} + g_T^{(m)} a_{ij}^{(m)} \dot{T} - g_R^{(m)} a_{ij}^{(m)}, \quad (12)$$

где $m = 1, 2$. Здесь $g^{(m)}$, $g_a^{(m)}$, $g_T^{(m)}$, $g_R^{(m)}$ — определяющие функции, которые выражаются через материальные, определяемые экспериментально.

$$g^{(1)} = E_a, \quad (13)$$

$$g_a^{(1)} = \begin{cases} \frac{1}{E_a} \frac{\partial E_a}{\partial \varepsilon_{u*}^{in}} & \text{— циклическое нагружение,} \\ 0 & \text{— монотонное нагружение.} \end{cases} \quad (14)$$

Здесь E_a — модуль анизотропного упрочнения 1 типа.

$$\dot{E}_a = \begin{cases} -K_E \left(\frac{E_a}{E_{a0}} \right)^{n_E} \dot{\varepsilon}_{u*}^{in} + \frac{E_a}{E_{a0}} \frac{d}{dT} \dot{T} & \text{— циклическое нагружение,} \\ M_E \left(\frac{E_{a0} - E_a}{E_{a0}} \right) \dot{\varepsilon}_{u*}^{in} + \frac{E_a}{E_{a0}} \frac{dE_{a0}}{dT} \dot{T} & \text{— монотонное нагружение,} \end{cases} \quad (15)$$

где E_{a0} — материальная функция, определяющая начальное значение модуля анизотропного упрочнения 1 типа, K_E, M_E, n_E — материальные функции, определяющие процесс посадки и вышагивания.

$$g^{(2)} = \beta \sigma_a, \quad g_a^{(2)} = -\beta, \quad (16)$$

$$g_T^{(1)} = \frac{1}{E_{a0}} \frac{dE_{a0}}{dT}, \quad g_T^{(2)} = \frac{1}{\sigma_a} \frac{d\sigma_a}{dT}, \quad (17)$$

$$g_R^{(m)} = \left(\frac{g^{(1)} + g^{(2)}}{a_u^{(m)}} + g_a^{(m)} \right) P_a, \quad (18)$$

$$P_a = \exp(b_a) (a_u)^{n_a} (1 - \omega)^{-m_\omega}, \quad (19)$$

Здесь a_u — интенсивность микронапряжений, β и σ_a — модули анизотропного упрочнения, b_a и n_a — материальные функции, определяющие релаксацию напряжений, P_a — функция анизотропного упрочнения.

Направление неупругого деформирования определяется ассоциированным законом течения

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{in} = \sqrt{\frac{3}{2}} n_{ij} \dot{\varepsilon}_{u*}^{in}, \quad n_{ij} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_u^*}, \quad \sigma_u^* = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^*}. \quad (20)$$

Здесь n_{ij} – тензор, определяющий направление неупругого деформирования, σ_u^* – интенсивность активных напряжений.

Уравнение поверхности памяти записывается в виде

$$F(\varepsilon_{ij}^{in}) = \frac{2}{3}(\varepsilon_{ij}^{in} - \xi_{ij})(\varepsilon_{ij}^{in} - \xi_{ij}) - C_\varepsilon^2 = 0. \quad (21)$$

Здесь C_ε – размер (радиус) поверхности памяти, ξ_{ij} – тензор смещения центра поверхности памяти.

$$\dot{C}_\varepsilon = \eta^*(n_{ij}n_{ij}^*)\varepsilon_{u*}^{in}, \quad (22)$$

$$\dot{\xi}_{ij} = (1 - \eta^*)\sqrt{\frac{3}{2}}(n_{ij}n_{ij}^*)n_{ij}^*\varepsilon_{u*}^{in}, \quad n_{ij}^* = \sqrt{\frac{2}{3}}\frac{\varepsilon_{ij}^{in} - \xi_{ij}}{C_\varepsilon}. \quad (23)$$

Здесь тензор n_{ij}^* определяет нормаль к поверхности памяти, функция η^* определяет соотношение между изменением размера поверхности памяти и его смещением.

Процесс накопления повреждений описывается по следующему закону:

$$\dot{\omega} = \alpha_\omega \omega^{\frac{\alpha_\omega - 1}{\alpha_\omega}} \frac{a_{ij}^{(2)} \dot{\varepsilon}_{ij}^{in}}{W} - g_\omega \omega, \alpha_\omega = \frac{\sigma_a}{a_u^{(2)}}, g_\omega = \lambda_\omega, \quad (24)$$

$$\lambda_\omega = \begin{cases} 0 & \text{при } \sigma_{ii} \geq 0, \\ \exp(b_\lambda) |\sigma_{ii}|^{n_\lambda} & \text{при } \sigma_{ii} < 0, \end{cases} \quad (25)$$

Здесь ω – мера повреждения, α_ω – функция, описывающая нелинейность процесса накопления повреждений, W – энергия разрушения; b_λ и n_λ – материальные функции, определяющие скорость залечивания материала.

$$\dot{W} = g_W^T \dot{T} - g_W W, g_W = \rho, g_W^T = \frac{W}{W_0} \frac{dW_0}{dT}, \rho = \exp(b_\rho)(\sigma_u)^{n_\rho}, \quad (26)$$

где W_0 – начальная энергия разрушения, σ_u – интенсивность напряжений, b_ρ и n_ρ – материальные функции, определяющие скорость охрупчивания материала.

Критерием разрушения является достижение повреждением ω значения единицы. Процесс идентификации материальных функций основан на результатах базовых экспериментов по растяжению-сжатию и ползучести одноосных образцов при постоянной температуре. По набору материальных параметров для требуемого диапазона температур определяются материальные функции, необходимые для проведения расчетов.

Базовый эксперимент для определения параметров пластического деформирования без учета реологических эффектов состоит из трех этапов нагружения:

1. Циклическое нагружение при размахе деформации $\Delta\varepsilon_1 = 0.01 \dots 0.015$, среднем значении деформации $\varepsilon_{m,1} = 0$ (симметричный цикл) или $\varepsilon_{m,1} = 0,5\Delta\varepsilon_1$ (отнулевой цикл) и числе циклов $N_1 = 20 \dots 50$. Число циклов зависит от циклического упрочнения материала. Необходимо, чтобы в

конце этапа изменение размаха напряжений от цикла к циклу не превышало 1%;

2. Монотонное растяжение до $\varepsilon_2 = 0.05 \dots 0.1$ (значение деформации зависит от пластичности материала ($\varepsilon_2 \approx 0,2\varepsilon_B$, где ε_B – деформация в момент достижения временного сопротивления разрыву при растяжении));

3. Циклическое нагружение при среднем значении деформации цикла равном деформации, достигнутой на втором этапе ε_2 , и размахе $\Delta\varepsilon_3 = 0.01 \dots 0.015$, до разрушения.

Базовым экспериментом для определения материальных функций, отвечающих за реологическое поведение материала, является набор диаграмм ползучести, связывающих деформацию образца со временем нагружения для различных уровней напряжений. С помощью набора диаграмм определяются параметры изотропной и анизотропной ползучести, а также параметры залечивания и охрупчивания. Во второй главе на примере стали 12X18H10T приводится метод идентификации материальных функций, а также определенные материальные функции бронзового сплава БрХ08-Ш, нержавеющей стали 12X18H10Т, алюминиевого сплава Ал-25, сталей 304 и 30ХГСА.

Третья глава посвящена описанию разработанного программного комплекса для расчета кинетики напряженно-деформированного состояния и повреждения материала. Модель термовязкопластичности представляется в виде системы линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка. Решение системы линейных дифференциальных уравнений можно найти различными методами. В данной работе для решения системы уравнений применяется метод Рунге-Куты 4-го порядка. На основании полученных уравнений разработан программный комплекс на языке программирования Python. Программный код состоит из нескольких блоков.

1. В первом блоке происходит импорт необходимых для работы программы библиотек – NumPy, SciPy и Pandas. Библиотека NumPy используется для работы с многомерными массивами (матрицами) и различными математическими уравнениями. Из библиотеки SciPy берется функция `solve_ivp`, которая является решателем для системы дифференциальных уравнений. Библиотека Pandas используется для упорядочивания получаемых данных, построения таблиц с этими данными и сохранению результатов в отдельный файл.

2. Во втором блоке "Вспомогательные функции" реализована функция свертки векторов, одномерная и двумерная интерполяция и определение производных табличных функций.

3. В блоке "Материальные параметры и функции" реализована функция считывания из пользовательского файла материальных параметров.

4. В блоке "Функция нагружения" реализована функция считывания заданных в табличном виде функции температуры и компонент тензоров.

5. В блоке "Различные расчетные случаи" реализованы расчетные уравнения для 16 вариантов задания комбинаций компонент тензоров скоростей напряжений и/или деформаций. Случай нагружения определяется текстовой переменной, состоящей из 6 символов "s" и "e". Номер символа в переменной соответствуют номеру компоненты тензора заданных скоростей напряжений или деформации. Символ "s" обозначает задание компоненты скорости напряжений, а символ "e"— деформаций.

6. В блоке "Массивы дифференциальных уравнений параметров процесса деформирования" вычисляются значения скоростей параметров нагружения на основе системы дифференциальных уравнений модели термовязкопластичности.

7. В последующих блоках реализуется функция запуска расчета, и сохранения результатов в файл с результатами расчета.

В главе приводится инструкция по работе с программным комплексом. Материальные функции и параметры нагружения задаются в файлах формата *.csv. После задания материальных функций и параметров нагружения необходимо запустить саму программу расчета с помощью любого интерпретатора, например, Jupiter Notebook. Для работы программы необходимо по очереди запускать каждый блок программы. В процессе работы программы в окне интерпретатора отображаются результаты расчета.

Четвертая глава посвящена расчетным и экспериментальным исследованиям процессов термовязкопластического деформирования и разрушения металлических материалов – конструкционных сталей и сплавов – при повторных и длительных нагружениях в условиях высоких температур.

Рассматриваются исследования образцов бронзового сплава БрХ08-III и нержавеющей стали 12Х18Н10Т при циклических и монотонных, длительных, изотермических и неизотермических режимах нагружения, сплава АЛ-25 при изотермическом и неизотермическом циклическом нагружении (эксперименты Е.А. Аверченкова), а также сталей 304 и 30ХГСА при сложных длительных режимах нагружения (эксперименты И. Охаши и В.П. Дегтярева).

Экспериментальные исследования образцов сплава БрХ08-III и стали 12Х18Н10Т проведены на универсальной испытательной машине LFMZ 100kN, воспроизводящей диапазон нагрузок от 0.5 до 100 кН с точностью измерений 0.5%. Испытательная машина имеет электромеханический тип привода, предназначена для статических испытаний на растяжение и сжатие, а также для испытаний на длительную прочность, ползучесть и малоцикловую усталость. Для проведения испытаний в условиях высоких температур испытательная машина оснащена трехзонной муфельной печью, позволяющей проводить нагрев образца до температуры 1100 °С.

Испытания при *циклическом нагружении* образцов *сплава БрХ08-III* в условиях высоких температур проведены при симметричном жестком циклическом растяжении-сжатии до разрушения с постоянным размахом деформации при температурах 400, 500 и 600 °С.

В таблице 1 приведены расчетные и экспериментальные значения числа циклов до разрушения образцов сплава БрХ08-Ш. На рисунке 1 приведены диаграммы циклического деформирования на 50-м цикле нагружения при 400, 500 и 600 °С.

Таблица 1 – Число циклов до разрушения образцов сплава БрХ08-Ш при циклическом нагружении

Температура, °С	Эксперимент	Расчет
400	81	76
500	111	121
600	98	89

Испытания цилиндрических образцов бронзового сплава *БрХ08-Ш* в условиях ползучести проводились при постоянной нагрузке и постоянных температурах 400, 500 и 600 °С, на трех уровнях напряжения для каждой температуры. На рисунке 2 приведены диаграммы длительной прочности образцов сплава БрХ08-Ш при температурах 400, 500 и 600 °С.

На рисунках 1, 2 сплошными линиями показаны результаты расчета, кружками – результаты эксперимента. Синий цвет соответствует температуре 400°С, оранжевый – 500°С, зеленый – 600°С.

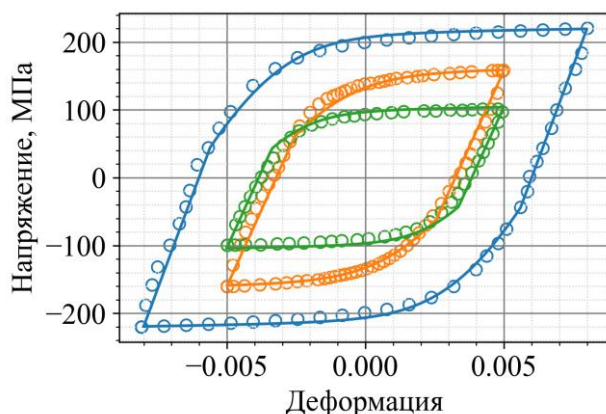


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования образцов сплава БрХ08-Ш на 50-м цикле нагружения при 400, 500 и 600 °С

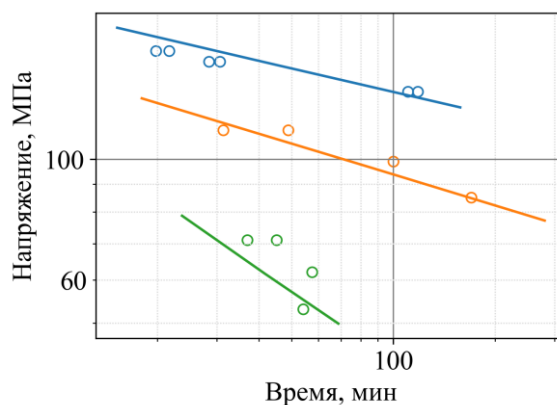


Рисунок 2 – Диаграммы длительной прочности образцов сплава БрХ08-Ш при температурах 400, 500 и 600 °С

Проведен *неизотермический эксперимент* на образцах бронзового сплава *БрХ08-Ш*. В результате эксперимента были получены зависимости деформации от времени. На рисунке 3 синей пунктирной линией показано изменение температуры от времени, зеленой пунктирной линией – изменение повреждения, черной линией – расчетное изменение полной деформации, а светлыми кружками – экспериментальные значения полной деформации.

Расчетное время разрушения составило 54 мин., а экспериментальное – 60 мин.

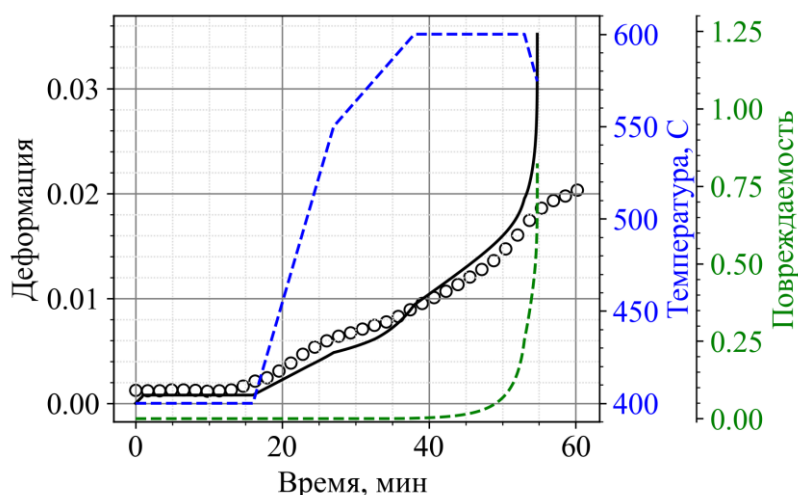


Рисунок 3 – Зависимость полной деформации, температуры образца и повреждаемости от времени для образцов сплава БрХ08-Ш

Проведен эксперимент *в условиях ползучести* на образцах из нержавеющей стали 12Х18Н10Т при температурах 600°C и 700°C и трех уровнях напряжения на каждой температуре. На рисунке 4 приведены диаграммы длительной прочности стали 12Х18Н10Т. Экспериментальные результаты обозначены светлыми кружками, а расчетные – сплошными линиями.

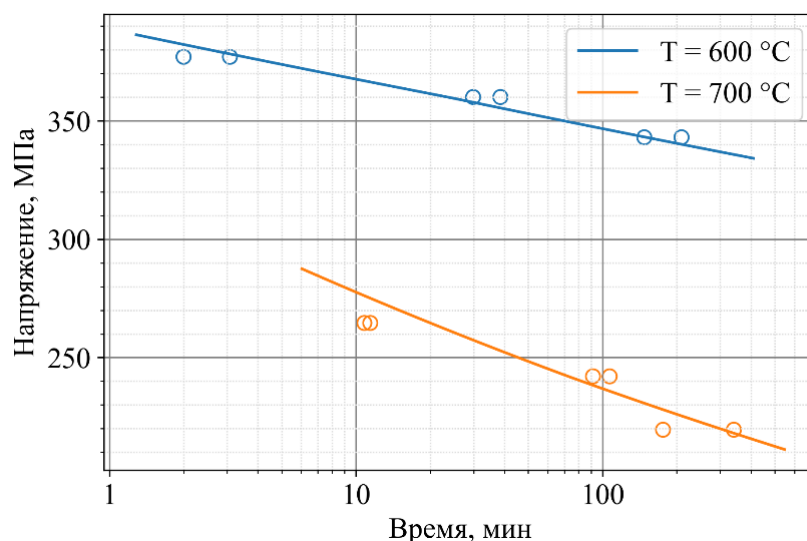


Рисунок 4 – Диаграммы длительной прочности стали 12Н18Н10Т

Проведен эксперимент *по нестационарному нагружению* на цилиндрических образцах нержавеющей стали 12Х18Н10Т, состоящий из комбинации циклических блоков жесткого нагружения и монотонных переходов между ними. Проведены эксперименты при температурах 20, 300 и 600 °С. Частота нагружения составила 0.2 Гц. На рисунке 5 приведена диаграмма циклического деформирования при нестационарном режиме нагружения при 20 °С. Для сравнения приведены результаты расчета по

модели неупругости, обозначенные пунктирной линией. В таблице 2 приведены расчетные и экспериментальные значения циклов до разрушения.

Таблица 2 – Число циклов до разрушения стали 12X18H10T при нестационарном режиме нагружения

Температура, °С	Эксперимент	Расчет
20	2791	2469
300	4973	4779
600	3371	3243

На рисунке 6а показаны расчетные и экспериментальные зависимости среднего напряжения от номера цикла при жестком режиме нагружения, результаты расчета по модели неупругости (без модификации) обозначены пунктирной линией. Из результатов следует, что модифицированная модель термовязкопластичности позволяет учитывать влияние эффектов посадки петли упругопластического гистерезиса, а также упрочнение и разупрочнение, возникающее при переходе от циклического нагружения к монотонному и обратно.

Проведены испытания образцов из стали 12X18H10T при мягком несимметричном циклическом нагружении при нормальной температуре. Эксперимент состоит из трех блоков циклических симметричных и несимметричных нагружений. На рисунке 6б приведены расчетные и экспериментальные зависимости средней деформации от номера цикла при мягком режиме нагружения. Результаты расчета по модели без модификации обозначены пунктирными линиями. Модификация модели позволяет описывать эффект вышагивания (ratcheting), возникающий при мягком несимметричном режиме нагружения.

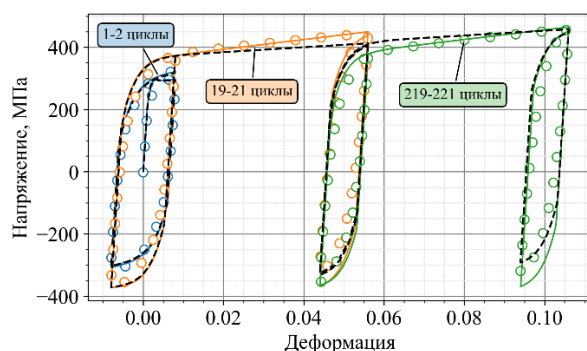


Рис. 5 – Экспериментальные и расчетные диаграммы деформирования при нестационарном режиме нагружения для образцов стали 12X18H10T при 20 °С

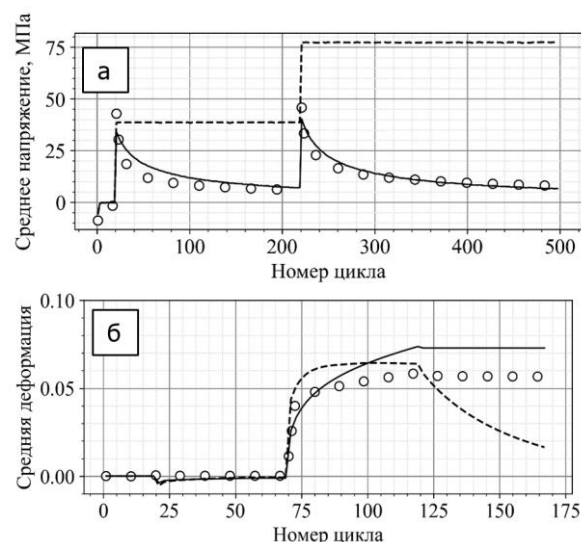


Рис. 6 – Зависимости среднего напряжения от номера цикла при жестком режиме нагружения (а) и средней деформации от номера цикла при мягком режиме нагружения (б) стали 12X18H10T при 20 °С

Проведены два *неизотермических эксперимента* на образцах нержавеющей стали 12Х18Н10Т. На рисунках 7 и 8 приведены расчетные и экспериментальные изменения размаха напряжений, вызванные циклической неизотермической деформацией с размахом 0.008 и частой 0.4 Гц для программ 1 и 2. Изменения температуры на рисунках 7 и 8 показано пунктирной линией.

При испытаниях по программе 1 экспериментально материал выдержал 5500 циклов до разрушения, тогда как расчеты прогнозировали 5000 циклов; при испытаниях по программе 2 образец разрушился после 3200 циклов нагружения при расчетном значении в 2700 циклов.

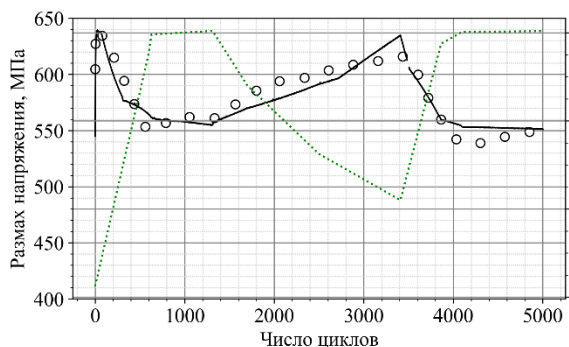


Рис. 7 – Зависимость температуры образца и размаха напряжений от числа циклов по программе 1

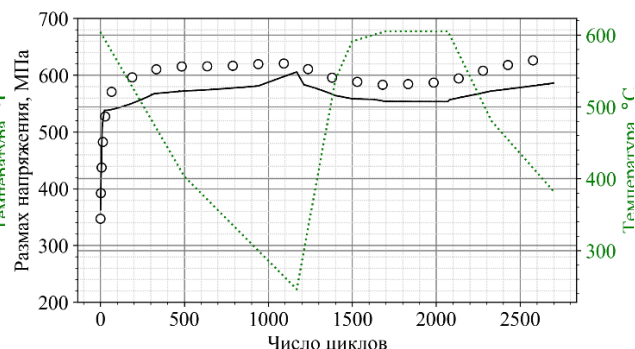


Рис. 8 – Зависимость температуры образца и размаха напряжений от числа циклов по программе 2

Экспериментальные исследования *циклического деформирования* на образцах *алюминиевого сплава АЛ-25* (эксперименты Е.А. Аверченкова) проведены при температурах 150, 250 и 350 °С при симметричном цикле нагружения длительностью 130 с. Сравнение расчетных данных с экспериментальными для 10-го и 40-го циклов нагружения при температуре 350 °С приведено на рисунке 9. При исследованиях на образцах *алюминиевого сплава АЛ-25* в условиях *неизотермического нагружения* деформация и температура изменялись по треугольному закону. Размах деформации составлял 0.007, а среднее значение – 0.0023; размах температуры составлял 150°С, а среднее значение – 225°С. Длительность цикла нагружения составляла 180 с. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов для 1-го и 6-го циклов приведено на рисунке 10.

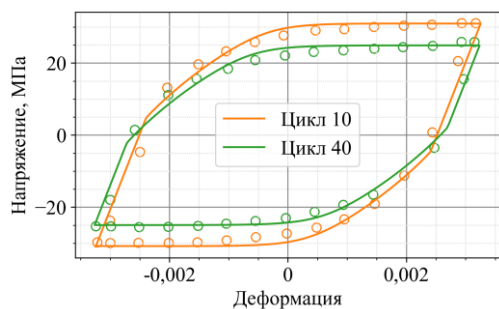


Рисунок 9 – Диаграмма циклического деформирования при температуре 350 °С

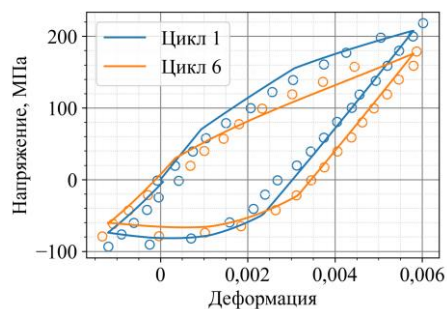


Рисунок 10 – Диаграмма неизотермического нагружения алюминиевого сплава АЛ-25

Экспериментальные исследования И. Охаши на образцах *стали 304* проводились при циклическом вращении вектора напряжений на углы от 90° до 180° с выдержкой длительностью 8 ч. в максимальных по интенсивности напряжений точках. На рисунке 11 показаны задаваемые траектории напряжений и результаты исследований при угле вращения вектора на 180° . Экспериментальные результаты обозначены светлыми кружками, расчетные – сплошными линиями.

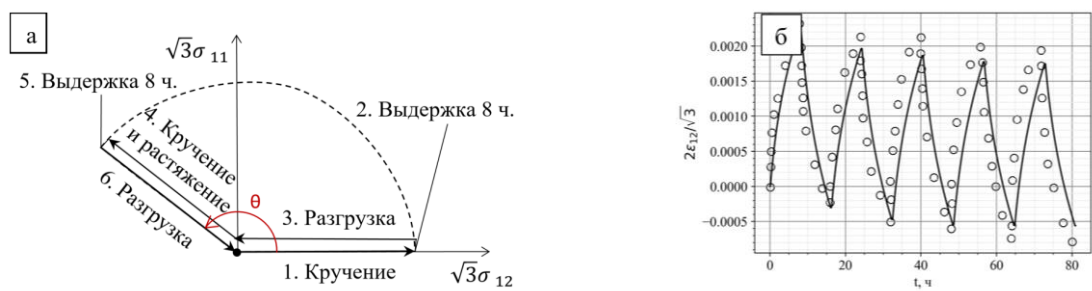


Рис. 11 – Результаты расчетных и экспериментальных исследований в опытах И. Охаши: а – схема циклического нагружения; б – изменение сдвиговой деформации при угле вращения вектора напряжений на 180°

Экспериментальные исследования В.П. Дегтярева на трубчатых образцах из *стали 30ХГСА* проводились по трем программам жесткого нагружения с различными скоростями деформирования ($5 \cdot 10^{-3}$, $1.65 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-5}$ мин $^{-1}$) при температуре 550°C . На рисунке 12 приведены траектории деформаций (в векторном пространстве деформаций А.А. Ильюшина) и напряжений в экспериментах в сравнении с расчетными результатами.

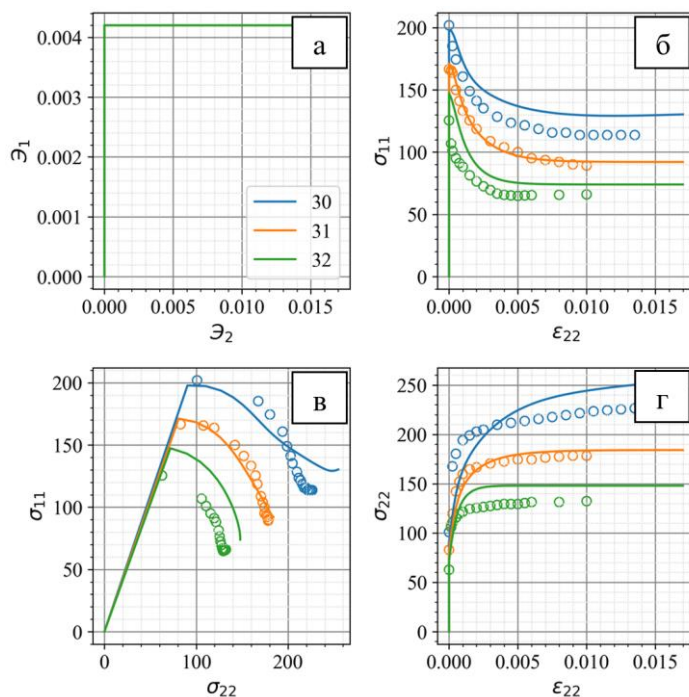


Рис. 12 – Результаты расчетов и экспериментов в экспериментах В.П. Дегтярева: а – траектории деформаций; б, в, г – траектории напряжений

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе.

Основные результаты:

1. Сформулированы основные положения и уравнения модифицированной модели термовязкопластичности, позволяющей моделировать процессы вязкого, пластического, вязкопластического, неизотермического циклического и монотонного деформирования.

2. Сформулирован простейший базовый эксперимент в условиях одноосного напряженного состояния и разработан метод определения материальных функций на основе результатов базового эксперимента.

3. Получены системы уравнений модифицированной модели термовязкопластичности для шестиосного напряженного состояния, для различных случаев задания компонент напряжений и (или) деформаций, на основании которых разработан программный комплекс для определения напряженно-деформированного состояния и ресурса материала.

4. Проведены испытания образцов бронзового сплава БрХ08-Ш и стали 12Х18Н10Т при циклических и монотонных, длительных, изотермических и неизотермических режимах нагружения.

5. Проведены расчетные исследования термовязкопластического деформирования и разрушения нержавеющей стали 12Х18Н10Т, бронзового сплава БрХ08-Ш, алюминиевого сплава АЛ-25, сталей 304 и 30ХГСА при изотермических и неизотермических режимах сложного и простого нагружения. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов. Отличие расчетных и экспериментальных результатов по характеристикам деформирования не превышает 10-15%, а разрушения – 30%.

Основные выводы:

1. Для описания эффектов, возникающих при комбинации монотонного и циклического нагружения необходимо введение поверхности памяти, разделяющей процессы деформирования при этих видах нагружения, и позволяющей моделировать эффекты дополнительного изотропного и анизотропного упрочнения и разупрочнения, возникающие при таком виде нагружения.

2. В результате сравнения расчетных результатов на основе модифицированной модели термовязкопластичности и экспериментальных данных показано, что модель удовлетворительно описывает процессы термовязкопластического деформирования и разрушения металлических материалов – конструкционных сталей и сплавов при циклических, монотонных длительных, изотермических и неизотермических нагружениях как при простых, так и при сложных нагружениях.

Перспективы развития:

Перспективами развития является внедрение модели термовязкопластичности в конечно-элементные программные комплексы, используемые в машиностроительной и смежных областях для проведения прочностных расчетов высоконагруженных элементов конструкций,

работающих в условиях повторного и длительного, изотермического и неизотермического нагружения, что позволит проводить оценку ресурса таких конструкций с учетом геометрических особенностей.

В приложении А представлен акт о внедрении результатов диссертационной работы в рабочий процесс отдела "Обработки металлов давлением и разработки нового технологического оборудования" филиала АО "ОДК" "НИИД" при разработке технологических процессов оснастки для изотермической штамповки заготовок из конструкционных жаропрочных сплавов в условиях высоких температур.

В приложении Б представлен акт о внедрении в расчетную практику отдела Статической прочности при проведении прочностных расчетов элементов жидкостных ракетных двигателей, работающих в условиях экстремальных температурно-силовых воздействий.

В приложении В представлен акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении аспирантов по направлению подготовки 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

В приложении Г представлен код программы для расчета кинетики напряженно-деформированного состояния и оценки ресурса конструкционных сталей и сплавов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Шарова В.И. Модифицированная теория неупругости // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2025. – № 1. – С. 104–116.
2. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Шарова В.И. Модель неупругости, метод идентификации материальных функций и верификация модели // Проблемы прочности и пластичности. – 2025. Т.87, № 2. – С. 228–240.
3. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Шарова В.И. Моделирование процессов ползучести и оценка длительной прочности образцов с концентраторами напряжений // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2026. – №1. – С. 34–39.
4. Шарова В.И. Ползучесть и длительная прочность элементов конструкций с концентраторами напряжений// Машиностроение и инженерное образование. – 2025. №4 (78). – С. 32–40.
5. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Шарова В.И. Применение модифицированной теории неупругости для расчета термовязкопластического деформирования конструкционных сталей и сплавов // материалы XXXIII Всероссийской конференции (г. Пермь, 2–4 октября 2024 г.) / ФГАОУ ВО «ПНИПУ». – Пермь, 2024. – С. 72 – 75.
6. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Шарова В.И. Моделирование неупругого деформирования бронзового сплава // Материалы 67-й Всероссийской Конференции МФТИ: (30 марта – 5 апреля 2025 года). – Москва. – 2025 – С. 131 – 133.
7. Абашев Д.Р., Бондарь В.С., Шарова В.И. Моделирование процессов ползучести и оценка длительной прочности образцов с концентратором напряжений // материалы XXXIV Всероссийской школы-конференции (г. Пермь, 8–10 октября 2025 г.) / ФГАОУ ВО «ПНИПУ». – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2025. – С. 11 – 14.