

Дудкин Сергей Александрович

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТИПА В УСЛОВИЯХ НЕУПРУГОГО
РЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
МАТЕРИАЛОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара – 2003

Работа выполнена в Самарском государственном техническом университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Владимир Павлович Радченко

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Яков Мордухович Клебанов

доктор физико-математических наук,

профессор Валерий Владимирович Стружанов

Ведущая организация

Институт гидродинамики СО РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится «__» декабря 2003 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д.212.218.02 при Самарском государственном университете по адресу: 443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1, зал заседаний

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Самарского государственного университета

Автореферат разослан «__» ноября 2003г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Л.В. Степанова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Хорошо известно, что даже при испытаниях в лабораторных условиях деформации пластичности и ползучести при повышенных температурах имеют существенный разброс. В таких условиях обычные детерминированные реологические уравнения оказываются плохо приспособленными к целям прогнозирования поведения реальных конструкций. В лучшем случае они позволяют предсказать поведение материала в «среднем», что, однако, не может решить всех проблем, связанных с оценкой ресурса изделий, и приводит к необоснованно высоким запасам прочности, увеличению материалоемкости изделий, существенному их удорожанию.

Изложенное свидетельствует о необходимости применения вероятностных методов при исследовании процессов неупругого реологического деформирования и разрушения материалов, построении соответствующих определяющих соотношений и решении краевых задач на их основе.

Задачи, связанные с описанием стохастических полей напряжений и деформации для упругих сред, в настоящее время исследованы достаточно подробно. Известен ряд работ этого плана для пластических сред. В теории ползучести такой подход, несмотря на его актуальность, проработан весьма слабо для довольно узкого класса материалов, в основном, в пределах первых двух стадий. В целом же, стохастическое исследование напряженного и деформированного состояний сред, осложненное наличием деформаций пластичности и ползучести, процессами накопления поврежденности и разрушения материала, в настоящее время практически отсутствует.

Вышеизложенное определяет актуальность диссертационного исследования и позволяет сформулировать цели настоящей работы.

Целью работы являлось систематическое экспериментальное исследование одномерных и двумерных полей неупругой реологической деформации вплоть до разрушения, построение стохастической макро- и микромоделей реологического деформирования и разрушения материалов, разработка методов решения стохастических краевых задач и методов оценки ресурса элементов конструкций на их основе.

Достижение указанной глобальной цели связано с решением следующих частных задач:

1) разработка методики и программ экспериментального исследования одномерных и двумерных полей деформации ползучести и пластичности с учетом эффектов разупрочнения и разрушения на примере сплава АД-1;

2) выполнение корреляционного анализа экспериментальных полей деформаций ползучести и пластичности для выяснения микромеханизмов их образования и структуры определяющих стохастических уравнений;

3) разработка стохастических феноменологических макро- и микромоделей неупругого реологического деформирования и разрушения материалов для одноосного и сложного напряженных состояний с использованием скалярного параметра поврежденности энергетического типа; экспериментальное обоснование гипотез по выбору структуры случайных функций модели;

4) разработка метода прогнозирования деформационных и прочностных свойств материалов на основе стохастических определяющих соотношений и метода статистических испытаний;

5) разработка метода решения стохастических краевых задач в условиях реологического деформирования и разрушения материала на основе предложенных стохастических моделей и метода статистических испытаний;

6) разработка методик оценки ресурса элементов конструкций по параметрическим и катастрофическим критериям анализа в стохастической постановке;

7) выполнение обстоятельной проверки адекватности всех разработанных моделей и методов экспериментальным данным.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) впервые выполнено комплексное экспериментальное исследование одномерных и двумерных полей деформации ползучести и пластичности разрушающегося материала (включая этапы чередования образования деформаций пластичности и ползучести);

2) установлена слабая коррелированность полей пластической деформаций и деформации ползучести и сильная коррелированность необратимых деформаций одного вида; расчетно-экспериментальным путем обоснована гипотеза о разных независимых механизмах образования полей микродеформаций пластичности и ползучести по пространственно-временным координатам.

3) разработаны стохастические феноменологические макро- и микромодели неупругого реологического деформирования и разрушения материалов для одноосного и сложного напряженных состояний с использованием скалярного параметра поврежденности энергетического типа;

4) разработан метод решения стохастических краевых задач для разрушающихся реологических деформирующих сред;

5) разработаны методики и алгоритмы оценки ресурса элементов конструкций со случайными реологическими свойствами материала по параметрическим и катастрофическим критериям отказа;

6) выполнен ряд новых расчетно-экспериментальных исследований по проверке адекватности расчетных данных, полученных на основании предложенных стохастических моделей и решений краевых задач на их основе, экспериментальным данным.

Практическая значимость работы заключается в экспериментальном обосновании и разработке стохастических макро- и микромоделей неупругого реологического деформирования и разрушения материалов, методов решения стохастических краевых задач на их основе и создании методик прогнозирования ресурса элементов конструкций по параметрическим и катастрофическим критериям отказа.

С одной стороны, это является важным вкладом в дальнейшее развитие методов описания неупругого реологического деформирования, накопления поврежденности и разрушения материалов и элементов конструкций в условиях разброса данных по ползучести и пластичности и служит определенным шагом (в смысле внутренней завершенности) для развития соответствующего раздела механики деформируемого твердого тела. С другой стороны, предложенные

модели и методы позволяют более научно обоснованно подходить к проблеме назначения остаточного ресурса материалов и элементов конструкций.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований подтверждается:

- адекватностью имеющихся модельных представлений физической картине исследуемых процессов;
- корректностью использования математического аппарата, законов механики деформируемого твердого тела, положений теории вероятностей и математической статистики, вычислительных программных комплексов;
- удовлетворительным совпадением количественных расчетов по предложенным стохастическим моделям с экспериментальными данными.

На защиту выносятся:

1) результаты комплексного экспериментального исследования одномерных и двумерных полей деформаций ползучести и пластичности разрушающегося материала; расчетно-экспериментальное обоснование гипотезы о независимости механизмов образования полей микродеформаций ползучести и пластичности;

2) стохастические феноменологические макро- и микромодели неупругого реологического деформирования и разрушения материалов для одноосного и сложного напряженных состояний;

3) метод решения стохастических краевых задач для разрушающихся реологических сред на основе метода статистических испытаний;

4) методики и алгоритмы оценки ресурса элементов конструкций со случайными реологическими свойствами материала по параметрическим и катастрофическим критериям отказа;

5) качественные, количественные и экспериментальные результаты, полученные при использовании стохастических моделей материала, решении стохастических краевых задач и оценке надежности элементов конструкций в условиях неупругого реологического деформирования и разрушения материалов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников из 128 названий. Работа содержит 191 страницу основного текста.

Апробация работы. Результаты научных исследования опубликованы в 17 печатных работах и докладывались на пятой, шестой, восьмой межвузовских конференциях «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 1995-1998 гг.), на Международных конференциях «Разрушение и мониторинг свойств металлов» (г. Екатеринбург, 2001, 2003 г.г.), на Международной конференции «Математическое моделирование. ММ-2001» (г. Самара, 2001г.), на Шестой Всероссийской школе-коллоквиуме по стохастическим методам (г. Самара, 1999 г.), на первой, третьей и четвертой Международных конференциях молодых ученых «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2000, 2002, 2003 г.г.); на Четвертом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (г. Сочи, 2003 г.); на тринадцатой Зимней Школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2003 г.); на научном семинаре «Механика и

прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. проф. Радченко В.П., 1999-2003 г.г.);

Работа выполнялась в рамках НИР НИИ Проблем Надежности Механических Систем СамГТУ на 1995-2000 г.г. (тема «Разработка структурных и феноменологических моделей деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций в условиях ползучести»); включена в межвузовский план государственных НИР по научному направлению «Механика», утвержденного Министерством образования РФ на 1998-2003 г.г. (тема «Надежность механических систем в промышленности, энергетике и на транспорте»); являлась основой плана работ по гранту РФФИ № 01-01-00528.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определяются цели исследований, излагаются научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводится план диссертационной работы, а также сведения об апробации работы и публикациях.

В **главе 1** дан краткий обзор литературы, посвященной вопросам экспериментальных и теоретических исследований стохастических полей деформаций пластичности и ползучести, построения стохастических моделей неупругого реологического деформирования и разрушения материалов, разработки методов решения краевых задач на их основе.

Отмечается, что наиболее ответственными характеристиками, предопределяющими работоспособность элементов конструкций из реономных материалов, являются деформации пластичности, ползучести и время до разрушения, опытные данные для которых имеют существенный разброс.

Обосновывается необходимость разработки стохастических моделей неупругого деформирования и разрушения материалов. Указывается, что вопросам экспериментального и теоретического исследований этой проблемы посвящены работы Бадаева А.Н., Болотина В.В., Волкова С.Д., Геминова В.Н., Еремина Ю.А., Ивановой В.С., Клебанова Я.М., Ковпака В.И., Кузнецова В.А., Локощенко А.М., Ломакина В.А., Махутова Н.А., Малинина Н.Н., Одингга И.А., Осаюка В.В., Павловой Г.А., Работнова Ю.Н., Радченко В.П., Романова В.А., Русова Б.П., Салли А., Самарина Ю.П., Сорокина О.В., Шестерикова С.А. и других.

Здесь же отмечается, что при построении соответствующих стохастических определяющих уравнений необходимо учитывать, что структура полей макро- и микронеоднородностей механических характеристик различна. В этой связи рассматриваются двухуровневые стохастические модели: макромоделли и микромоделли неупругого реологического деформирования и разрушения. Медленные изменения рассматриваемых функций, соответствующие макронеоднородностям материала и обусловленные трендом (постепенным изменением) условий производства, свойства сырья, нестабильностью технологических процессов и т.д., описываются макромоделлями. Быстроосциллирующие около

тренда изменения характеристик, обусловленные микроструктурным строением материала (вариация химического состава и объемного содержания включений, размеры зерна и т.д.) описываются микромоделями. Такого рода двухуровневый подход развивался в работах Самарина Ю.П. и Волкова С.Д. и их учеников.

Указано, что построение стохастических моделей базируется на основе обобщения соответствующих детерминированных моделей. Выбор феноменологических детерминированных теорий неупругого реологического деформирования и разрушения достаточно широк. Здесь отмечаются работы В.И. Астафьева, А.Н. Бадаева, В.В. Болотина, Б.В. Горева, Ю.И. Кадашевича, Л.М. Качанова, Я.М. Клебанова, В.И. Ковпака, В.Л. Колмогорова, Г.Ф. Лепина, А.Ф. Никитенко, В.В. Новожилова, А.М. Локощенко, Н.Н. Малинина, Ю.Н. Работнова, Ю.Н. Радаева, В.П. Радченко, Ю.П. Самарина, О.В. Соснина, С.А. Шестерикова, И.Ю. Цвелодуба, J.A. Betten, J.T. Boyle, F.A. Leckie, J. Spence и многих других авторов.

Выделен класс задач, в которых строятся модели, отражающие закритическое неупругое деформирование и разрушение материала, и разрабатываются методы решения соответствующих краевых задач. Решению этой проблемы посвящены работы Вильдемана В.Э., Каткова В.Л., Ключникова В.Д., Лебедева А.А., Небогиной Е.В., Миронова В.И., Радченко В.П., Соколкина Ю.В., Стружанова В.В., Ташкинова А.А., Шина Р.Г. и других

Проанализированы существующие методы решения стохастических краевых задач и их использование для оценки ресурса конструкций.

По результатам литературных данных сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Глава 2 посвящена экспериментальному исследованию и корреляционному анализу одномерных полей деформаций ползучести и пластичности. В пункте 2.1 сформулированы задачи, рассматриваемые в главе 2.

В пункте 2.2 описана методика и программы экспериментальных исследований одномерных стохастических полей деформаций пластичности и ползучести.

В качестве материала для изготовления опытных образцов служил технически чистый алюминий марки АД-1 при $T = 26^\circ C$. Заготовкой образцов являлся прутки пресованный, из которого изготавливались заготовки для плоских и цилиндрических одноосных образцов.

Базовые испытания проводились на круглых образцах диаметром 4 мм и длиной 40 мм, вырезанных как в продольном, так и в поперечном к оси заготовки направлениях. Для выявления характера распределения остаточной деформации по длине образца на его боковой поверхности с помощью конусообразного индентора наносились контрольные лунки, отстоящие друг от друга на расстоянии ~ 2 мм. В ходе проводимых испытаний измерение расстояний между контрольными лунками проводилось на большом инструментальном микроскопе БМИ-1Ц с цифровым показывающим устройством УЦП-1М, имеющим цену деления 1 мкм. Возможности испытательной установки позволяют производить мгновенную разгрузку образца в любой точке диаграммы растяжения или кривой ползучести и тем самым зафиксировать достигнутую на данный момент неупругую деформацию (при этом на каждом образце подобную про-

цедуру можно повторять многократно, вплоть до его разрушения). После разгрузки производился замер распределения неупругой деформации с помощью инструментального микроскопа БМИ-1Ц. Контроль промера удлинений на базе ~ 2 мм производился сравнением суммарного удлинения по всем базам на образце с интегральным удлинением всего образца.

В ходе проведенных исследований были осуществлены следующие программы испытаний для одномерных образцов:

1) упругопластическое нагружение до разрушения ступенями до накопленной неупругой деформации 1-2% на каждой ступени с последующей разгрузкой и замером локального поля пластических деформаций;

2) ступенчатое нагружение на ползучесть вплоть до разрушения при постоянном напряжении до значения накопленной необратимой деформации 1-2% на каждой ступени с последующей разгрузкой и замером поля деформации ползучести по длине образца;

3) комбинированное нагружение с чередованием упругопластического деформирования и деформирования при постоянном напряжении во времени на ползучесть до значения накопленной деформации 1-2 % на каждой ступени нагружения с последующей разгрузкой и замером локального поля остаточных деформаций.

В пункте 2.3 описаны результаты экспериментальных исследований стохастических полей деформаций ползучести и пластичности и результаты их корреляционного анализа. Показано, что анизотропия оказалась несущественной (точнее, она укладывалась в рамки естественного разброса механических свойств). Типичная картина распределения пластической деформации по длине образца приведена на рис. 1, а на рис. 2 точками показаны состояния, в которых производилось измерение деформации.

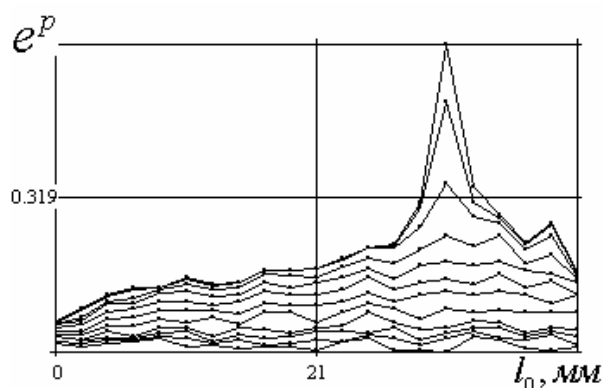


Рис. 1. Распределение микропластической деформации по длине образца №115, l_0 - первоначальная длина образца.

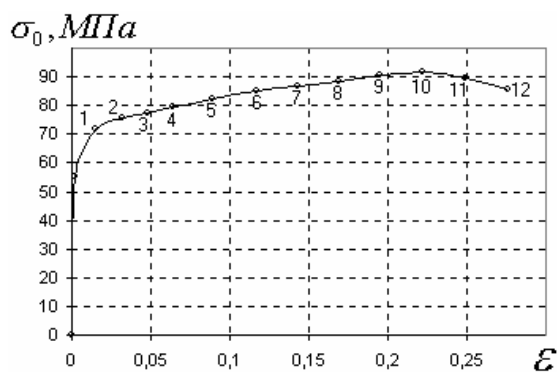


Рис. 2. Диаграмма упругопластического макродеформирования образца №115.

Если обозначить $e_i^p = (e_{i1}^p, e_{i2}^p, \dots, e_{iN}^p)$, $p_k = (p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kN})$ (N - число баз измерения) – векторы распределения пластической деформации и деформации ползучести соответственно, то результаты корреляционного анализа показали, что значения нормированной корреляционной функции $r(e_k^p, e_s^p)$ и

$S(p_k^p, p_s^p)$ ($k \neq s$) - близки к единице, а $r(e_k^p, p_s^p)$ - значительно меньше единицы (для всех программ нагружений).

В целом, выполненные экспериментальные исследования и их стохастический и корреляционный анализ позволили сделать следующие выводы:

1) наблюдается существенный разброс локальной неупругой деформации по длине образца, достигающий на некоторых ступенях 50%;

2) существует достаточно высокая коррелированность каждой из компонент неупругой деформации одного типа, распределённой по длине образца, в зависимости от накопленной макросредней (интегральной) её величины;

3) наблюдается слабая коррелированность полей пластической деформации и деформации ползучести, распределённых по длине образца.

Полученные результаты говорят о том, что слабая коррелированность полей распределения пластической деформации и деформации ползучести свидетельствует, по-видимому, о разных механизмах образования деформаций пластичности и ползучести. Это тезис подтвержден и дополнительными исследованиями поверхности разрушенных образцов. Оказалось, что поверхность пластически деформированных образцов неровная, с ярко выраженными следами и полосами, имеет «холмистый» вид; в области же ползучести поверхность образца достаточно гладкая, с низкой степенью «шероховатости». Полученные результаты позволили выдвинуть гипотезу о том, что при математическом моделировании стохастические поля для деформаций ползучести и пластичности можно строить независимо.

В главе 3 дается концепция построения феноменологических стохастических макромоделей неупругого деформирования и разрушения материалов и выполнена проверка их адекватности экспериментальным данным.

В связи с тем, что структура полей макро- и микронеоднородностей механических характеристик различна, принята следующая схема построения стохастических моделей. Если исследуемый материал представить в виде бесконечного стержня и обозначить через x его координату, то влияние неоднородностей на некоторую характеристику $A(x)$ описывается кривой, изображенной на рис. 3. Медленные изменения рассматриваемой функции соответствуют макронеоднородностям, высокочастотные – микронеоднородностям. Для глобального описания неоднородностей можно использовать соотношение

$$A(x) = u_0(x) + \sum_k [u_k(x) \cos w_k x + v_k(x) \sin w_k x]. \quad (1)$$

Здесь функция $u_0(x)$ описывает тренд исследуемой механической характеристики, т.е. макронеоднородность, а выражение под знаком суммы – ее микроструктурные флуктуации. Функции $u_k(x)$ и $v_k(x)$ изменяются так же медлен-

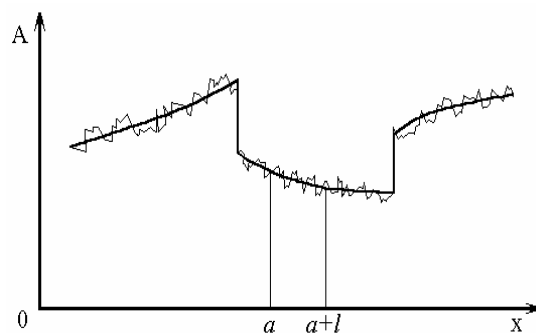


Рис.3. Схематическое распределение неоднородностей по пространственной координате.

но, как и $u_0(x)$. Они предназначены для описания тренда амплитуд микроструктурных флуктуаций, при этом $|u_k(x)| \ll |u_0(x)|$, $|n_k(x)| \ll |u_0(x)|$.

Пусть теперь из глобального стержня вырезан образец длиной l , соответствующий отрезку $[a, a+l]$ (рис. 3). При этом предполагается, что величина l значительно больше, чем характерная длина волны микронеоднородностей, т.е. число $w_k l / 2p$ является большим. С другой стороны, длину l будем считать достаточно малой для того, чтобы зафиксировать тренд. Тогда в (1) функции $u_0(x)$, $u_k(x)$ и $v_k(x)$ можно приближенно считать независимыми от x ($x \in [a, a+l]$):

$$A(x) = u_0 + \sum_k (u_k \cos w_k x + v_k \sin w_k x). \quad (2)$$

Очевидно, что величины $u_0(x)$, $u_k(x)$ и $v_k(x)$ зависят от того места, где вырезан образец, то есть от величины a (см. рис. 1.1). Если местоположение образцов выбирать случайно, то указанные величины будут восприниматься по отношению к набору образцов тоже как случайные.

Таким образом, для описания макронеоднородностей, т.е. случайных свойств партии однотипных образцов (изделий, элементов конструкций) достаточно рассматривать лишь величину u_0 , причем для набора образцов она будет восприниматься при статистическом исследовании как случайная величина, закон распределения которой зависит от формы кривой, выражающей тренд.

В соответствии с изложенной схемой моделирования, предложен стохастический вариант одномерной макромоделли реологического деформирования и разрушения, который получен обобщением детерминированной модели, рассмотренной в работах Самарина Ю.П. и Радченко В.П. Основной ее вариант имеет вид:

$$\begin{aligned} e &= e + e^p + p, \dot{e} = \frac{\dot{s}}{E}; \\ \dot{e}^p &= \begin{cases} 0, & s(t) \leq \Sigma_{np}; \\ I [A(s(t) - \Sigma_{np})^{n_1} - e^p(t)], & A(s(t) - \Sigma_{np})^{n_1} > e^p(t), \\ 0, & A(s(t) - \Sigma_{np})^{n_1} \leq e^p(t), s(t) \geq \Sigma_{np}; \end{cases} \\ \begin{cases} p = u + v + w; \\ u(t) = \sum_{k=1}^s u_k(t), \dot{u}_k(t) = I_k \left[A_k \left(\frac{s(t)}{s_*} \right)^n - u_k(t) \right]; \\ v(t) = \sum_{k=1}^s v_k(t); \dot{v}_k = \begin{cases} I_k \left[B_k \left(\frac{s(t)}{s_*} \right)^n - v_k(t) \right], & B_k \left(\frac{s(t)}{s_*} \right)^n > v_k(t), \\ 0, & B_k \left(\frac{s(t)}{s_*} \right)^n \leq v_k(t); \end{cases} \\ \dot{w}(t) = C \left(\frac{s(t)}{s_*} \right)^m; \end{cases} \\ s = s_0(1+w); \quad \dot{w} = gs \dot{e}^p + as \dot{p}; \quad g = G(e^p)^{m_2}, a = L_1(s_0)^{m_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

С целью прогнозирования времени до разрушения $t = t^*$ используется критерий разрушения энергетического типа:

$$\int_0^{t^*} \frac{\mathbf{S}(t) de^p(t)}{R_A^p} + \int_0^{t^*} \frac{\mathbf{S}(t) dp(t)}{L_A (S_0)^{m_A}} = 1. \quad (4)$$

Здесь e , e , e^p - полная, упругая и пластическая деформация (соответственно); p - деформация ползучести; \mathbf{S} и S_0 - истинное и номинальное напряжения; E , Σ_{np} , A , n_1 , I , S , I_k , A_k , B_k , n , S_* , C , m , G , m_2 , L_1 , m_1 , R_A^p , L_A , m_A - параметры, при этом величины R_A^p , Σ_{np} , A , G , L_1 , C , L_A , $A_k = a_u C_k$, $B_k = (1 - a_u) C_k$ являются случайными (a_u - детерминированная величина), а остальные параметры - детерминированные.

В пункте 3.2 дана методика построения стохастической одноосной макро-модели пластического деформирования и разрушения на основании экспериментальных данных сплава АД-1 обоснован выбор структуры случайных величин R_A^p , Σ_{np} , A , G ; разработана методика идентификации оценок этих случайных параметров.

В пункте 3.3 приведена методика построения макро-модели реологического деформирования и длительной прочности. На основании экспериментальных данных по ползучести стали 20 ($T = 500^\circ C$), ЖС6КП ($T = 900^\circ C$), ЭИ698 ($T = 750^\circ C$) обоснован выбор структуры величин C , C_k , L_A , L_1 в модели (3)-(4), разработана методика их идентификации.

В пункте 3.4 выполнена проверка одноосной стохастической макро-модели экспериментальным данным по ползучести и разрушению образцов из сплава ЭИ698 ($T = 750^\circ C$) как при постоянных, так и переменных режимах нагружения. Показано, что экспериментальные данные для деформации ползучести и длительной прочности попадают в соответствующие расчетные доверительные интервалы.

В пункте 3.5 разработана стохастическая макро-модель для случая сложного напряженного состояния, которая получена формальным обобщением одноосной модели (3)-(4). Здесь же разработан метод решения стохастических краевых задач в условиях неупругого реологического деформирования и разрушения материала на основе метода статистических испытаний и стохастической макро-модели.

Решена модельная стохастическая краевая задача упруго-пластического деформирования и разрушения трубы из сплава АД-1 под действием внутреннего давления. Кроме этого решена аналогичная краевая задача для трубы из стали 20 при $T = 500^\circ C$ и выполнена проверка адекватности данных расчета по длительной прочности с экспериментальными данными. В целом, для одиннадцати режимов нагружения наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных (в вероятностной постановке) и экспериментальных данных.

Разработан метод оценки ресурса элемента конструкции со стохастическими свойствами материала по катастрофическим (разрушение) и деформационным критериям отказа. Выполнены модельные расчеты ресурса по этим критериям для толстостенных труб под действием внутреннего давления из сплава АД-1 в условиях упругопластического деформирования и стали 20 ($T = 500^\circ C$) в условиях ползучести.

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию стохастических полей деформации пластичности для плоских образцов из сплава АД-1 методом фотоупругости. Дается краткое описание экспериментальной установки, методики проведения эксперимента, технологии изготовления образцов, выбора фоточувствительного покрытия. Отмечено, что подобранный и испытанный материал фотоупругого покрытия дает возможность с успехом замерять упругопластические деформации до значений 7-8% без внесения существенных ошибок в результаты.

Проводятся результаты экспериментальных исследований (для двух образцов) распределения пластической деформации по плоской области. Отмечается существенная неравномерность распределения неупругой деформации в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (вдоль и поперек растяжения образца). Кроме этого наблюдается значительный разброс значений пластической деформации по образцу. Делается вывод о целесообразности построения стохастических микромоделей, так как микронеоднородности имеют существенное значение при формировании напряженно-деформированного состояния даже для плоских образцов без концентраторов.

Глава 5 посвящена построению феноменологических стохастических микромоделей неупругого деформирования и разрушения образцов.

В пункте 5.1 сформулирована постановка задачи данного раздела.

В пункте 5.2 изложена идеология построения феноменологической микромодели одноосного реологического деформирования и разрушения. Полагается, что $e = e_1 + e_2$, где e - полная деформация, e_1 - главная часть случайной функции реологической деформации e , отражающая устойчивые случайные свойства материала, а e_2 удовлетворяет условиям $M[e_2] = 0$, $|e_1| \ll |e_2|$ ($M[\circ]$ - символ математического ожидания). Другими словами, e_2 рассматривается как некоторый «шум», наложенный на главную часть e_1 . Стохастическая микромодель для величины e_1 получена обобщением макромоделей (3)-(4) следующим образом: вместо случайных величин Σ_{np} , A , G , R_A^p , C_k , C , L_1 , L_A введены соответствующие случайные функции $\Sigma_{np}(x)$, $A(x)$, $G(x)$, $R_A^p(x)$, $C_k(x)$, $C(x)$, $L_1(x)$, $L_A(x)$. Выполненный анализ показал, что Σ_{np} , R_A^p , L_A являются случайными величинами, не зависящими от x , а остальные пять случайных функций имеют структуру вида

$$y(x) = y^* [1 + du^*], \quad (5)$$

где U^* - случайная величина; $u^*(x)$ - случайная нормированная функция, причем $M[u^*] = 0$, $M[(u^*)^2] = 0$; число d играет роль коэффициента вариации флуктуаций реологических свойств. Относительно $u^*(x)$ введена гипотеза, согласно которой она является почти периодической и быстро осциллирует:

$$u^*(x) = \sum_{k=1}^{\infty} N^{(k)} \cos\left(\frac{2pk}{l}x + y^{(k)}\right), \quad (6)$$

где l - длина образца; $N^{(k)}$ и $y^{(k)}$ - случайные величины, причем $y^{(k)}$ равномерно распределена на отрезке $(0, 2p)$, и кроме этого выполняются условия:

$$M[N^{(k)}] = 0, \quad M[N^{(k)} \cdot N^{(l)}] = 0 \quad (k \neq l),$$

$$M[y^{(k)} \cdot y^{(l)}] = 0 \quad (k \neq l), \quad M[N^{(k)} \cdot y^{(l)}] = 0.$$

Введено дополнительное предположение, что $N^{(k)}$ распределены с конечной дисперсией, то есть выполняется равенство $\sum_{k=1}^{\infty} D[N^k] = 2$, где $D[\circ]$ - символ дисперсии.

Подробно рассмотрена методика построения микромоделей для деформации пластичности на примере материала АД-1. Анализ экспериментальных данных показал, что величина d постоянна в пределах одного образца (но она является случайной для совокупности образцов). Показано, что «шум» можно моделировать стационарной центрированной случайной величиной с малым радиусом корреляции. Разработана методика идентификации оценок всех случайных функций и параметров микромоделей. Выполнена экспериментальная проверка микромоделей. В качестве примера на рис.4 приведены экспериментальные и смоделированные на основании микромоделей (3)-(4) значения распределения пластической деформации (при моделировании первые 3 реализации при малых напряжениях не рассматривались в силу сильной зашумленности).

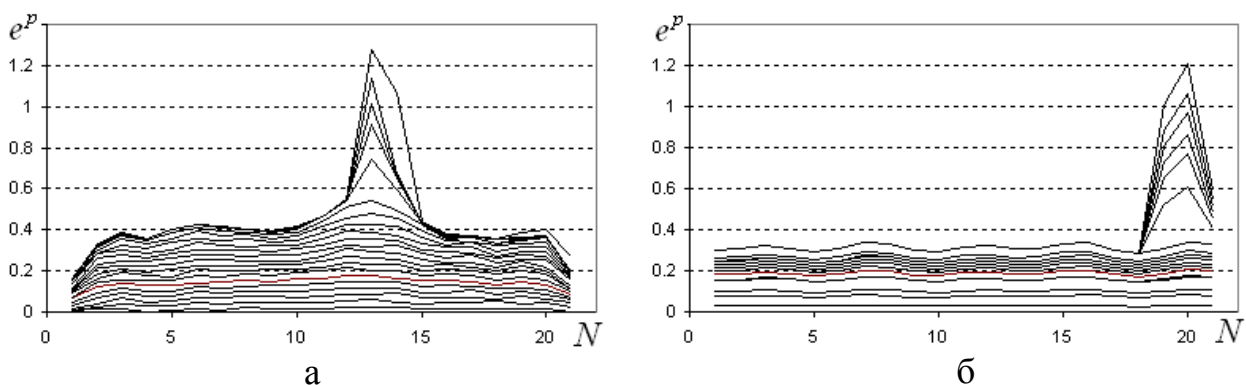


Рис.4. Экспериментальные(а) и смоделированные(б) значения распределения пластической деформации (при одних и тех же напряжениях) для образца №206.

В пункте 5.3 одноосная модель обобщена на сложное напряженное состояние, при этом структура (5) сохраняется, а

$$u^*(x, y, z) = \sum_{k=1}^{\infty} N^{(k)} \cos \left[\left(\frac{2pk}{l_1} x + \frac{2pk}{l_2} y + \frac{2pk}{l_3} z \right) + y^{(k)} \right],$$

где l_1, l_2, l_3 - параметры, имеющие размерность характерных размеров области интегрирования в направлениях координатных осей.

Здесь же приводится методика решения краевых задач на основе микромоделей и метода статистических испытаний.

Основные результаты выполненных исследований состоят в следующем:

1. Выполнен цикл экспериментальных исследований по определению характера распределения одноосных полей деформаций пластичности и ползучести по длине образца для трех программ нагружения и выполнен их детальный корреляционный анализ, который показал слабую коррелированность полей пластической деформации и деформации ползучести и сильную коррелированность необратимых деформаций одного вида.

2. Исследование поверхности разрушенных образцов и результаты корреляционного анализа позволили сделать вывод о разных независимых механизмах образования полей микродеформаций пластичности и ползучести по пространственным (пространственно-временным) координатам.

3. Предложены и экспериментально обоснованы феноменологические варианты стохастических макро- и микромоделей реологического деформирования и разрушения материалов в условиях одноосного и сложного напряженных состояний.

4. На основании экспериментальных данных для сплавов ЭИ698 ($T=750^\circ\text{C}$), ЖС6КП ($T=900^\circ\text{C}$), АД-1 ($T=26^\circ\text{C}$) и стали 20 ($T=500^\circ\text{C}$) обоснован выбор структуры случайных функций, разработана методика идентификации оценок случайных функций и параметров макро- и микромоделей.

5. Выполнена проверка адекватности данных расчета по макромоделю экспериментальным данным для случая одноосного напряженного состояния в вероятностной постановке для сплавов ЭИ698 ($T=750^\circ\text{C}$), ЖС6КП ($T=900^\circ\text{C}$), АД-1 ($T=26^\circ\text{C}$), а для микромоделей – для сплава АД-1.

6. Разработан метод решения стохастических краевых задач в условиях неупругого деформирования и разрушения материала на основе стохастических макро- и микромоделей и метода статических испытаний; выполнена проверка его адекватности экспериментальным данным по длительной прочности для толстостенной трубы из стали 20 при $T=500^\circ\text{C}$.

7. На основе макро- и микромоделей разработан метод оценки ресурса элементов конструкций со стохастическими свойствами материала по катастрофическим и деформированным критериям отказа, решен ряд модельных задач.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Радченко В.П., Симонов А.В., Дудкин С.А. Стохастический вариант одномерной теории ползучести и длительной прочности//Вестник СамГТУ. Серия: Физико-математ. науки. Вып. 12. Самара: СамГТУ, 2001. С.73-84.
2. Радченко В.П., Дудкин С.А., Тимофеев М.И. Экспериментальное исследование и анализ полей неупругих микро- и макродеформаций сплава АД-1 //Вестник СамГТУ. Серия: Физико-математ. науки. Вып. 16. Самара: СамГТУ, 2002. С.111-118.
3. Радченко В.П., Дудкин С.А. Феноменологический вариант стохастической макро модели пластического деформирования и разрушения материалов//Вестник СамГТУ. Серия: Физико-математ. науки. Вып. 19. Самара: СамГТУ. 2003. С.70-79.
4. Радченко В.П., Симонов А.В., Дудкин С.А. Математическое моделирование макро- и микронеоднородностей в задачах надежности конструкций с реологическими свойствами//Математическое моделирование. ММ-2001.Труды международной конференции/Под редакцией А.А.Самарского. Самара, 2001, С.38-40.
5. Радченко В.П., Дудкин С.А., Тимофеев М.И. Экспериментальное исследование локальных стохастических полей неупругой деформации сплава АД-1 в условиях одноосного напряжения//Математическое моделирование систем и процессов управления. Сб. научных трудов. Самара: СамГТУ, 1997. С.79-86.
6. Радченко В.П., Дудкин С.А., Тимофеев М.И. Экспериментальное исследование и корреляционный анализ стохастических деформационных полей сплава АД-1//Математическое моделирование и краевые задачи. Труды пятой межвузовской конференции, Самара: СамГТУ, 1995. С.31-32.
7. Радченко В.П., Дудкин С.А., Тимофеев М.И. К вопросу построения локальных стохастических полей для неупругой деформации металлов//Математическое моделирование и краевые задачи. Труды шестой межвузовской конференции, Самара: СамГТУ, 1996. С.94.
8. Дудкин С.А., Тимофеев М.И. Экспериментальное обоснование построения одномерной стохастической модели пластичности//Математическое моделирование и краевые задачи. Труды восьмой межвузовской конференции. Самара: СамГТУ, 1998, С.130-134.
9. Дудкин С.А., Тимофеев М.И. Расчетно-экспериментальный анализ локальных полей неупругой деформации и построение одномерной стохастической модели пластичности// Разрушение и мониторинг свойств металлов. Тезисы докладов международной конференции. Екатеринбург, 2001. С.39-40.
10. Дудкин С.А., Радченко В.П. К обоснованию построения феноменологической стохастической модели реологического микродеформирования и разрушения материалов // Тринадцатая Зимняя Школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Пермь, 2003. С.144.
11. Радченко В.П., Дудкин С.А. Экспериментальное исследование формирования микродеформаций пластичности и ползучести в условиях одноосного нагружения// Разрушение и мониторинг свойств металлов. Тезисы докладов международной конференции. Екатеринбург, 2003. С.24-25.

12. Радченко В.П., Дудкин С.А. Построение стохастической модели неупругого деформирования материалов//Обзор прикладной и промышленной математики. 1999. Т.6. Вып.2. С.194.
13. Радченко В.П., Дудкин С.А. Решение краевых задач неупругого реологического деформирования и разрушения на основе феноменологических стохастических уравнений состояния//Обзор прикладной и промышленной математики. 2003. Т.10. Вып.2, с.418.
14. Дудкин С.А. Стохастический корреляционный анализ и построение модели одномерных полей неупругой деформации металлов//Актуальные проблемы современной науки. Труды 1-ой межд. конф. молод. ученых. Ч.1. Математика. Физика. Самара, 2000. С.21.
15. Дудкин С.А. Об одном подходе решения стохастических краевых задач в условиях неупругого реологического деформирования и разрушения материала//Актуальные проблемы современной науки. Труды 3-ей межд. конф. молод. ученых. Ч.1. Математика. Механика. Физика. Самара, 2002. С.55.
16. Дудкин С.А. Экспериментальное исследование одномерных и двумерных стохастических полей микродеформаций пластичности и ползучести сплава АД-1//Актуальные проблемы современной науки. Труды 3-ей межд. конф. молод. ученых. Ч.1. Математика. Механика. Физика. Самара, 2002. С.55-58.
17. Радченко В.П., Дудкин С.А. Вариант стохастической макро модели пластичности без поверхности текучести//Актуальные проблемы современной науки. Труды 4-ой межд. конф. молод. ученых. Ч.1. Математика. Механика. Машиностроение. Самара, 2003. С.96-101.

Заказ №1531. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

Самарский государственный технический университет

Отдел типографии и оперативной полиграфии.

443100, г.Самара, ул.Молодогвардейская, 244