

На правах рукописи



СМЕТАНИН ИЛЬЯ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

**ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (НИИМ Нижегородского университета)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Волков Иван Андреевич**

Официальные оппоненты: **Локощенко Александр Михайлович**, лауреат Государственной премии РСФСР, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией ползучести и длительной прочности Научно – исследовательского института механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Пичков Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, главный специалист отдела экспериментальной прочности и систем диагностики АО «ОКБМ Африкантов»

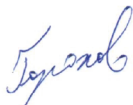
Ведущая организация: **Институт проблем машиностроения РАН** - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита состоится «23» декабря 2021 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 2.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте **diss.unn.ru/1172**.

Автореферат разослан «18» ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие конструкций и аппаратов современного энергомашиностроения, самолётостроения, нефтехимического оборудования и др. характеризуется увеличением их рабочих характеристик, снижением материалоемкости, ростом числа нестационарных режимов термомеханического нагружения, существенным расширением температурного диапазона работы машиностроительных конструкций. Указанные тенденции привели к тому, что на сегодняшний день одной из основных задач разработки, проектирования и эксплуатации конструкций и аппаратов новой техники является решение задачи надёжной расчётной оценки их прочности и ресурса. Такие задачи наиболее актуальны для конструкций эксплуатации, которых происходит в течении нескольких десятилетий (современные атомные энергетические установки, жидкостные ракетные двигатели, авиационные газотурбинные двигатели, газотурбинные установки нового поколения, резервуары для хранения газообразных и сжиженных продуктов и др.).

При проектировании конструкций обеспечение их безопасности с точки зрения прочности, сводится к расчётному обоснованию ресурса для заданной консервативной модели эксплуатации объекта с определёнными допусками на «незнание» реальных условий эксплуатации объекта, физико-механических характеристик материалов, приближённостью методов расчёта и т.п.

Повреждение и разрушение материала конструктивных узлов в основном обусловлено зарождением микродефектов, их ростом и слиянием в макроскопические трещины. Описание механического поведения микродефектов не менее важно, чем описание развития макротрещин и в последнее десятилетия для решения таких задач успешно развивается новое научное направление – механика повреждённой среды (МПС).

Данная работа посвящена применению моделей и методов МПС для численной оценки длительной прочности материалов и конструкций при термомеханическом нагружении, оценки их ресурсных характеристик, служащих основой для разработки экспертных систем оценки ресурса.

Степень разработанности темы

В настоящее время разработан ряд моделей МПС, описывающих деградационные процессы в конструкционных сплавах. Однако в большинстве случаев эти подходы ориентированы лишь на определённые режимы нагружения и не могут достоверно отразить зависимость протекания процессов зарождения и роста микродефектов от истории напряженно-деформированного состояния (НДС), температуры, скорости деформаций и др. В действительности, такие параметры как траектория деформирования, режим изменения температуры, характер НДС, история его изменения и др. в значительной степени влияют на процессы накопления повреждений. Всё это указывает на необходимость анализа кинетики НДС и накопления повреждений

в локальных опасных зонах элементов конструкций и его теоретического описания соответствующими уравнениями состояния.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является оценка длительной прочности конструкционных материалов (металлов и их сплавов), элементов и узлов несущих конструкций при высокотемпературном термомеханическом нагружении с использованием определяющих соотношений МПС.

Для достижения цели необходимо решить следующие основные задачи:

- методом численного моделирования экспериментальных процессов и сопоставления расчётных данных с опытными результатами, провести верификацию уравнений МПС, предложенных проф. Ю.Г. Коротких и развитых в работах его учеников (И.А. Волков, Д.А. Казаков, Д.Н. Шишулин) для сложных режимов высокотемпературного термомеханического нагружения с учетом сопутствующих малоизученных эффектов деформирования;

- разработать эффективный алгоритм интегрирования уравнений МПС и создать программные средства, используемые при решении конкретных задач;

- провести оценку достоверности используемых уравнений МПС путем проведения численных расчетов и сопоставления их результатов с данными натурных экспериментов для ряда наиболее характерных процессов деформирования;

- выявить характерные особенности процесса высокотемпературного термомеханического разрушения элементов конструкций и аппаратов современной техники путём численного решения прикладных задач.

Научная новизна

Методом численного моделирования экспериментальных процессов и сопоставление результатов расчета с опытными данными, проведены исследования:

- влияние скорости деформаций на процессы высокотемпературного вязкопластического деформирования поликристаллических конструкционных сплавов при простом и сложном термомеханическом нагружении;

- непропорциональности и нестационарности процесса вязкопластического деформирования;

- влияния температуры и уровня приложенных нагрузок (переход с одного значения напряжений к другим) на длительную прочность металлов;

- влияние вида траектории деформирования на длительную прочность поликристаллических конструкционных сплавов.

Проведена оценка достоверности модели МПС при расчете высокотемпературной нестационарной ползучести лабораторных образцов в условиях многоосного напряженного состояния и конкретизирован вид ряда определяющих соотношений.

Получены новые решения задачи оценки несущей способности корпуса реактора ядерной энергетической установки (ЯЭУ) в условиях гипотетической

аварии по механизму длительной прочности. Получены допустимые значения внутреннего давления, не приводящие к макроразрушению.

Теоретическая значимость работы

Получены новые данные по длительной прочности поликристаллических конструкционных сплавов. Показано существенное влияние скорости деформаций на процесс вязкопластического деформирования, вида траектории деформирования на длительную прочность конструкционных сплавов при высокотемпературном термомеханическом нагружении.

Показано, что подход основанный на правиле линейного суммирования повреждений при расчете длительной прочности материалов и конструкций может привести как к консервативной, так и неконсервативной оценке.

Практическая значимость работы

На базе методологии оценки ресурса ответственных инженерных объектов (ОИО) предложенной проф. Ю.Г. Коротких разработана научно - обоснованная методика, созданы алгоритмы и программные средства численного анализа длительной прочности при высокотемпературном термомеханическом нагружении элементов и узлов несущих конструкций. Показано, что благодаря учёту основных эффектов, сопутствующих процессам высокотемпературного термомеханического нагружения на базе данного подхода возможно создание экспертных систем по оценке ресурса конструкций и аппаратов современной техники. Внедрение результатов работы возможны на предприятиях Росатома, Роскосмоса, авиастроения, министерства обороны при проектировании конструкций и аппаратов современной техники.

Развитая модель МПС заложена в программе «EXPMODEL», позволяющей исследовать процессы вязкопластического деформирования и накопления повреждений в локальных зонах элементов конструкций. Данный программный продукт также может быть применён в экспериментальных исследованиях для обоснования формы и геометрических размеров лабораторных образцов.

Методология и методы диссертационного исследования

Основой диссертационного исследования является метод математического моделирования, сочетающий численное моделирование процессов высокотемпературной ползучести и длительной прочности материалов с экспериментальными исследованиями на испытательных машинах высокого класса точности. Основные положения базируются на фундаментальных законах механики деформируемого твёрдого тела (МДТТ). Для компьютерного моделирования длительной прочности конструкций численными методами используется интегрированный пакет прочностного анализа «ANSYS».

Положения, выносимые на защиту:

– результаты оценки достоверности определяющих соотношений МПС, для расчёта высокотемпературной нестационарной ползучести и длительной прочности поликристаллических конструкционных сплавов при простом и сложном термомеханическом нагружении;

– результаты исследования влияния скорости деформаций, непропорциональности и нестационарности процесса вязкопластического деформирования, характера и уровня приложенных нагрузок и температуры на длительную прочность поликристаллических конструкционных сплавов;

– результат решения конкретной прикладной задачи - оценка несущей способности корпуса реактора ядерной энергетической установки (ЯЭУ) в условиях гипотетической аварии.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным математическим обоснованием основных определяющих соотношений МПС, их соответствие фундаментальным законам МДТТ, сопоставлением численных результатов с опытными данными, применением широкоиспользуемого аппарата численных методов и использованием лицензированного программного обеспечения ANSYS (лицензия ANSYS №1069197 от 07.01.2020)

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– VIII Международном научном симпозиуме, посвященному 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчанинова «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела», 2015, Тверь.

– X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела, 2017, Самара;

– 28th Russian conference on mathematical modelling in natural sciences, rumanas 2019, Perm;

– XXVI Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 2020, Вятчи.

В общем объеме работа докладывалась на научном семинаре по динамике и прочности Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им Н.И. Лобачевского 2021, Нижний Новгород.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ [1 – 11], в том числе 6 [1 – 6] статей в журналах, входящих в перечень рекомендуемых ВАКом изданий.

Личный вклад автора:

– разработка ряда программных модулей программы «EXPMODEL» [1 – 6];

– численный анализ влияния скорости деформации на процессы нестационарного вязкопластического деформирования конструкционных сплавов при простом и сложном нагружении [3, 8];

– численное решение задачи оценки влияния вида траектории деформаций на высокотемпературную нестационарную ползучесть конструкционных сплавов при сложном нагружении [1, 5, 7];

– численное исследование процесса высокотемпературной ползучести и длительной прочности конструкционных сплавов при одноосном растяжении [2, 6, 9];

– численный анализ ряда характерных особенностей длительной прочности конкретных конструктивных элементов (корпуса реактора ядерной энергетической установки (ЯЭУ) в условиях гипотетической аварии), связанных с моментом образования и местоположением макротрещин, историей изменения НДС и величины поврежденности в зоне разрушения, нелинейным суммированием повреждений и др. [4, 10, 11].

В совместных работах Игумнову Л.А. принадлежит участие в обсуждении результатов исследований; Коротких Ю.Г. – помощь в адаптации модели МПС для решения задач нестационарной ползучести и длительной прочности; Волкову И.А. – постановка задач, руководство исследованиями, участие в анализе и обсуждении результатов; Казакову Д.А. – консультации при обработке экспериментальных данных, Шишулину Д.Н. – помощь в обработке экспериментальных данных и получении материальных параметров, а также помощь в проведении вычислений в ВК «ANSYS»; Тарасову И.С. – помощь в проведении численных расчетов в по программе «EXPMODEL»; Литвинчук С.Ю, Боеву Е.В – консультации при реализации модели пластичности Ю.Г. Коротких.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 147 страниц основного текста, включая 90 рисунков и 11 таблиц. Список литературы на 12 страницах включает 114 наименований.

Диссертация выполнена при поддержке

Результаты раздела 4.3 получены при поддержке Государственного задания Минобрнауки России (№0729-2020-0054).

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, указаны основные направления намеченных исследований, кратко очерчена область возможного применения.

В первой главе, имеющей обзорный характер, выполнен анализ экспериментальных данных по исследованию процессов высокотемпературной нестационарной ползучести и длительной прочности поликристаллических конструкционных сплавов, рассмотрены основные критерии и модели длительной прочности, численные методы решения краевых задач МДТТ.

Развитие экспериментальных и теоретических исследований развития процессов деградации конструкционных материалов и способов оценки их длительной прочности связано с именами отечественных исследователей, таких как: Н.Х. Арутюнян, Р.А. Арутюнян, И.А. Волков, В.А. Горохов, В.П. Дегтярев, Л.А. Игумнов, А.А. Ильюшин, Д.А. Казаков, С.А. Капустин, Л.М. Качанов,

Ю.Г. Коротких, А.А. Лебедев, В.А. Лихачев, А.М. Локощенко, Н.Н. Калинин, Б.Е. Мельников, Н.С. Можаровский, Т.Н. Можаровская, В.С. Наместников, А.Ф. Никитенко, Ю.Н. Работнов, А.Р. Ржаницын, О.В. Соснин, Г.М. Хажинский, С.А. Шестериков, Д.Н. Шишулин и др.

Большой вклад сделан зарубежными исследователями, среди которых: Бейли, Ж. Беттен, Бирон, Дж. Бойл, Д.А. Вудфорт, Гаруд, А. Кеннеди, Дж. Коллинз, Крайчинович, Ф.А. Лекки, Ж. Леметр, Ле Мэй, С. Мураками, Мэнсон, Д.Р. Хэйхерст, Хуа-Танг Яо, Ж.Л. Шабош, Ф. Эльин и др.

Большинство исследований конструкционных материалов на ползучесть и длительную прочность проведены при испытаниях на растяжение цилиндрических образцов при постоянных напряжениях и температурах. Однако реальные задачи ползучести и длительной прочности элементов конструкций связаны с гораздо более сложными условиями нагружения, например, переменными напряжениями, с изменением вида напряженного состояния и циклически меняющимися температурами. Поскольку ползучесть металлов и длительная прочность весьма чувствительны к изменению напряженного состояния и температуры, которая влияет на все их параметры, возникает проблема исследования закономерностей неизотермической ползучести при различных видах напряженных состояний и разработки методов оценки длительной прочности материала конструктивных элементов в условиях многоосного напряженного состояния на основании экспериментальных данных, полученных в результате испытаний при одноосном напряженном состоянии.

Кривые долговечности, как правило, построены для постоянных напряжений, в то время, как и практических условиях напряжения и температуры меняются по довольно сложным законам. В технических приложениях, в основном для этих целей, используют правило линейного суммирования повреждений, которые в конкретных прикладных задачах может приводить как к консервативным, так и неконсервативным оценкам.

Энергетическая концепция процесса термовязкопластического деформирования и накопления повреждений (область длительной прочности) в поликристаллических конструкционных сплавах показала тесную связь между термодинамическими параметрами и закономерностями термовязкопластического деформирования и накопления повреждений. При непропорциональном нагружении наблюдается дополнительное снижение долговечности по сравнению с пропорциональным.

Метод математического моделирования с использованием современных методов механики поврежденной среды и механики разрушения является основным как на стадии формулировки и оценке достоверности моделей поведения материалов, так и на стадии расчетов на прочность при решении прикладных задач оценки ресурсных характеристик элементов и узлов несущих конструкций.

Вторая глава диссертации посвящена формулировке и анализу определяющих соотношений МПС Ю.Г. Коротких для расчёта процессов

высокотемпературной нестационарной ползучести и длительной прочности материалов и конструкций при комбинированном термомеханическом нагружении. Кратко описана методика определения материальных параметров и скалярных функций определяющих соотношений МПС.

Модель поврежденной среды состоит из трех составных частей:

- соотношений, определяющих нестационарное вязкопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения;
- уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;
- критерия прочности поврежденного материала.

Основные положения рассматриваемого варианта МПС, заключаются в следующем:

- материал среды начально-изотропен и повреждения в нём отсутствуют;
- компоненты тензоров деформаций e_{ij} и скоростей деформаций $\dot{e}_{ij}$ представляют сумму «мгновенной» и «временной» составляющей. «Мгновенная» составляющая состоит из упругих компонент $e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e$ и пластических компонент $e_{ij}^p, \dot{e}_{ij}^p$. Временная составляющая (деформации ползучести $e_{ij}^c, \dot{e}_{ij}^c$) описывает временную зависимость процессов деформирования при низких скоростях нагружения;
- в пространстве напряжений существует семейство эквипотенциальных поверхностей ползучести радиуса C_c и координатами общего центра ρ_{ij}^c , вектор скорости деформации ползучести к которым направлен по нормали;
- изменение объема элемента тела упруго, т.е. $e_{ii}^p = e_{ii}^c = 0$;
- рассматриваются процессы деформирования, характеризующиеся малыми деформациями;
- единственным структурным параметром, характеризующем на макроуровне степень поврежденности материала, является скалярный параметр ω – «повреждённость» ($\omega_0 \leq \omega \leq \omega_f$);
- влияние накопленной поврежденности на процесс деформирования материала учитывается введением эффективных напряжений $\tilde{\sigma}_{ij}$.

а) Соотношения термползучести

Для описания процессов ползучести в пространстве напряжений вводится семейство эквипотенциальных поверхностей ползучести F_c имеющие общий центр ρ_{ij}^c и различные радиусы C_c :

$$F_c^{(i)} = S_{ij}^c - C_c^2 = 0, \quad S_{ij}^c = \sigma_{ij}' - \rho_{ij}^c, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Согласно ассоциированного закона

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c \frac{\partial F_c^{(i)}}{\partial S_{ij}^c} = \lambda_c S_{ij}^c, \quad (2)$$

где λ_c – соответствует текущей поверхности $F_c^{(i)}$, определяющей текущее напряжённое состояние S_{ij}^c .

Среди эквипотенциальных поверхностей можно выделить поверхность с радиусом $\bar{C}_c$, соответствующую нулевой скорости ползучести:

$$F_c^{(0)} = \bar{S}_{ij}^c \bar{S}_{ij}^c - \bar{C}_c^2 = 0, \quad \bar{S}_{ij}^c = \bar{\sigma}_{ij}' - \rho_{ij}^c, \quad (3)$$

где $\bar{S}_{ij}^c$ и $\bar{\sigma}_{ij}'$ – совокупность напряжённых состояний, отвечающих нулевой скорости ползучести.

Постулируем что,

$$\begin{aligned} \bar{C}_c &= \bar{C}_c(\chi_c, T); \quad \dot{\chi}_c = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^c, \dot{\epsilon}_{ij}^c \right)^{1/2}; \quad \chi_c = \int_0^t \dot{\chi}_c^c dt \\ \lambda_c &= \lambda_c(\psi_c, T); \quad \psi_c = \left[\frac{(S_{ij}^c S_{ij}^c)^{1/2} - \bar{C}_c}{C_c} \right]; \quad \lambda_c = \begin{cases} 0, & \psi_c \leq 0 \\ \lambda_c, & \psi_c > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

где $\bar{C}_c$ и λ_c – экспериментально определяемые функции температуры T .

Эволюционное уравнение для изменения координат центра поверхности ползучести имеет вид:

$$\dot{\rho}_{ij}^c = g_1^c \dot{\epsilon}_{ij}^c - g_2^c \rho_{ij}^c \dot{\chi}_c, \quad (5)$$

где g_1^c и $g_2^c > 0$ – экспериментально определяемые материальные параметры.

Постулируем, что:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \lambda_c(\psi_c, T) S_{ij}^c = \lambda_c \psi_c S_{ij}^c = \lambda_c \left(\frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c}{C_c} \right) S_{ij}^c, \quad (6)$$

откуда выражение для $\dot{\chi}_c$ примет вид:

$$\dot{\chi}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}_u^c = \sqrt{\frac{2}{3}} \lambda_c \left(\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c \right), \quad (7)$$

Для трёх участков кривой ползучести (рис. 1) выражение для λ_c имеет вид:

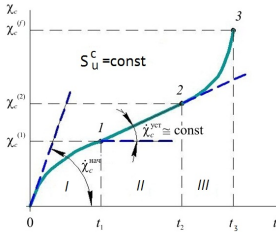


Рис.1

$$\lambda_c = \begin{cases} 0, & \psi_c \leq C_c \vee \chi_c = 0 \\ \lambda_c^{(1)}, & 0 \leq \chi_c \leq \chi_c^{(1)} \\ \lambda_c^{(2)}, & \chi_c^{(1)} \leq \chi_c \leq \chi_c^{(2)} \\ \lambda_c^{(3)}, & \chi_c^{(2)} \leq \chi_c \leq \chi_c^{(3)} \end{cases}, \quad (8)$$

где

$$\lambda'_c = \lambda_c^{(0)} \left(1 - \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}} \right) + \lambda_c^{(1)} \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}}, \lambda''_c = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_{11}^{(c)уст}}{\left(\sigma'_{11} - \frac{3}{2} \rho_{11}^c - \bar{\sigma}_c \right)}, \lambda'''_c = \lambda''_c(\omega)$$

В формулах (8): $\lambda_c^{(0)}$ и $\lambda_c^{(1)}$ – значение λ_c в начальной и конечной точках первого участка кривой ползучести материала; $e_{11}^{c(1)} = \chi_c^{(1)}$, $e_{11}^{c(2)} = \chi_c^{(2)}$ и $e_{11}^{c(3)} = \chi_c^{(3)}$ – границы участков кривой ползучести при одноосном напряжённом состоянии; $\dot{e}_{11}^{c(нач)}$ – скорость деформации ползучести в начальный момент времени, $\dot{e}_{11}^{c(уст)}$ – скорость деформации ползучести на участке установившейся ползучести (2-ой участок кривой ползучести); $\bar{\sigma}_c = \sqrt{\frac{2}{3} \bar{C}_c}$ – предел ползучести при одноосном напряжённом состоянии.

Для расчета процесса термопластического деформирования материала используется модель пластичности Ю.Г. Коротких с трансляционно – изотропным упрочнением. В общем случае напряжения, пластические деформации и деформации ползучести определяются интегрированием уравнений термоползучести четырехточечным методом Рунге – Кутты с коррекцией девиатора напряжений и последующим определением напряжений согласно модели термопластичности с учетом средней скорости ползучести на новом временном шаге.

Влияние поврежденности на прочностные характеристики материала учитывается введением эффективных напряжений:

$$\tilde{\sigma}'_{ij} = F_1(\omega) \sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}} \sigma'_{ij}, \tilde{\sigma} = F_2(\omega) \sigma = \frac{K}{\tilde{K}} \sigma, \quad (9)$$

где $\tilde{G}$, $\tilde{K}$ – эффективные модули упругости, определяемые по формулам Мак-Кензи :

$$\tilde{G} = G(1 - \omega) \left[1 - \frac{(6K + 12G)}{(9K + 8G)} \omega \right], \tilde{K} = 4GK(1 - \omega) / (4G + 3K\omega) \quad (10)$$

Аналогично определяется эффективная внутренняя переменная $\tilde{\rho}_{ij}^c$:

$$\tilde{\rho}_{ij}^c = F_1(\omega) \rho_{ij}^c = \frac{G}{\tilde{G}} \rho_{ij}^c. \quad (11)$$

б) Эволюционные уравнения накопления повреждений

Постулируем, что скорость процесса накопления повреждений при ползучести определяется эволюционным уравнением вида:

$$\dot{\omega} = f_1(\beta) f_2(\omega) f_3(W_c) f_4(\dot{W}_c). \quad (12)$$

где функции f_i , $i = 1...4$ учитывают: объёмность напряжённого состояния ($f_1(\beta)$), уровень накопленной повреждённости ($f_2(\omega)$), накопленную относительную энергию повреждения, затраченную на образование дефектов ($f_3(W_c)$) и скорость изменения энергии повреждения ($f_4(\dot{W}_c)$).

$$f_1(\beta) = \exp(\beta), f_2(\omega) = \begin{cases} 0, & W_c \leq W_c^a \\ \omega^{1/3}(1-\omega)^{2/3} \wedge W_c > W_c^a \wedge \omega \leq 1/3 \\ \frac{\sqrt[3]{16}}{9} \omega^{-1/3}(1-\omega)^{-2/3} \wedge W_c > W_c^a \wedge \omega > 1/3 \end{cases} \quad (13)$$

$$f_3(W_c) = \frac{W_c - W_c^a}{W_c - W_c^f}, f_4(\dot{W}_c) = \dot{W}_c / (W_c - W_c^f).$$

где β — параметр объёмности напряжённого состояния ($\beta = \sigma/\sigma_{11}$), W_c^a — значение энергии повреждения в конце стадии зарождения рассеянных повреждений при длительной прочности, а W_c^f — значение энергии, соответствующее образованию макроскопической трещины.

в) *Критерий прочности повреждённого материала*

В качестве критерия окончания фазы развития рассеянных микроповреждений (стадии образования макротрещины) принимается условие достижения величины повреждённости своего критического значения:

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (14)$$

Третья глава диссертации посвящена программной реализации модели повреждённой среды.

Определение основных характеристик процессов термовязкопластического деформирования повреждённых материалов (параметров состояния), которые в общем случае описываются тензорами $\sigma_{ij}, e_{ij}, e_{ij}^p, \rho_{ij}^p, e_{ij}^c, \rho_{ij}^c$ и скалярами $\chi, \chi_p, \chi_c, C_p, C_c, T$ и ω осуществляется при соответствующей формулировке определяющих соотношений МПС в приращениях, которые зависят от выбранного шага Δt и линеаризации алгоритма определения λ_p .

Для анализа кинетики НДС и процесса накопления повреждений в опасных зонах элементов конструкций была разработана программа «EXPMODEL», которая позволяет по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций $e_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ (жесткое нагружение), либо по истории изменения напряжений $\sigma_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ (мягкое нагружение) рассчитывать параметры процессов термопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах при комбинированных термомеханических воздействиях.

Используя сервисные средства программы, можно создавать и редактировать файлы баз данных, осуществлять сопровождение работы процессора и проводить постпроцессорную обработку результатов счета.

Расчет кинетики напряженно-деформированного состояния и накопления повреждений в рамках программы «EXPMODEL» может осуществляться в одномерной, двумерной (плоское напряжённое состояние) и трехмерной (объёмной) постановках путем совместного интегрирования определяющих соотношений МПС для элементарного объема материала опасной зоны конструктивного элемента.

Значения физико-механических характеристик конструкционных материалов и материальных параметров моделей для расчетов по программе «EXPMODEL» содержатся в файлах формата .csv. Данный формат представляет собой таблицу значений. Файлы данного формата можно просматривать и редактировать с помощью программы Excel, входящей в пакет программ Microsoft Office. Файловая структура позволяет проводить ее расширение и включать в ее состав новые конструкционные материалы.

Тестирование программы «EXPMODEL» проводилось путём сопоставления результатов расчётов с экспериментальными данными в условиях одноосного растяжения

В первом примере представлены результаты исследования степени достоверности соотношений МПС при деградации материала по механизму длительной прочности лабораторных образцов из стали 12Х18Н9 в результате одноосного растяжения при температуре $T = 650^{\circ}\text{C}$ и трёх значениях напряжений $\sigma_{11} = 200, 220$ и 240 МПа. Здесь и далее результаты испытаний были представлены в виде кривых ползучести.

Во втором примере были представлены результаты исследований высокотемпературной ползучести нержавеющей стали Х18Н10Т при температуре $T = 850^{\circ}\text{C}$ и напряжениях $\sigma_{11} = 40, 50, 60$ и 80 МПа в условиях осевого растяжения.

В третьем примере представлены результаты исследований высокотемпературной нестационарной ползучести и длительной прочности цилиндрических медных образцов при растяжении. В каждый момент времени растягивающие напряжения σ_{11} равны 40, 50, 60 и 70 Мпа при $T = 400^{\circ}\text{C}$.

В четвертом примере приведены результаты исследований процессов кратковременной высокотемпературной ползучести жаропрочного сплава ВЖ-159. Опыты были выполнены в условиях одноосного растяжения для различных уровней нормальных напряжений σ_{11} и температур T при:

- температуре $T = 750^{\circ}\text{C}$ и напряжениях $\sigma_{11} = 350\text{МПа}$ и 450МПа соответственно;
- температуре $T = 850^{\circ}\text{C}$ и напряжениях $\sigma_{11} = 120\text{МПа}$ и 150МПа соответственно;
- температуре $T = 750^{\circ}\text{C}$ и переходе с уровня напряжений $\sigma_{11} = 350\text{МПа}$ на уровень $\sigma_{11} = 450\text{МПа}$ (рис. 2);

– температуре $T=850^{\circ}\text{C}$ и переходе с уровня напряжений $\sigma_{11}=120\text{МПа}$ на уровень $\sigma_{11}=150\text{МПа}$ (рис. 3).

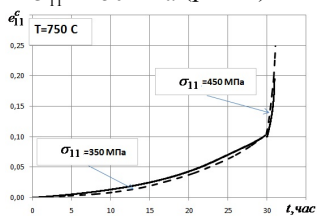


Рис. 2

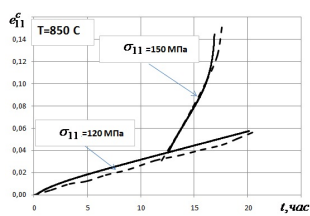


Рис. 3

В пятом примере представлены результаты исследований процесса обратной ползучести.

Анализируя полученные численные результаты, можно отметить, что используемая модель МПС качественно и количественно описывает основные эффекты, наблюдаемые при нестационарной ползучести конструкционных сплавов и деградацию начальных прочностных свойств материала по механизму длительной прочности.

Четвертая глава диссертации посвящена возможности использования рассмотренных уравнений МПС для расчета процессов неізотермического неупругого деформирования и накопления повреждений в материалах при высокотемпературном термомеханическом нагружении в условиях многоосного НДС.

В первом примере представлены результаты экспериментальных исследований стали 304 на ползучесть в условиях многоосного напряжённого состояния. Испытания проводили при температуре $T=650^{\circ}\text{C}$ при периодическом чередовании двух видов напряжённого состояния с различными направлениями главных осей тензора напряжений, характеризующемся углом θ . Эксперименты проводили по схеме «мягкого» нагружения. Каждый цикл повторяющегося многоосного нагружения состоит из чистого кручения в течении $t_{\text{час}}^*$ с последующей полной разгрузкой и совместного растяжения с кручением в течении $t_{\text{час}}^*$ с последующей разгрузкой.

На рис. 4, 5 сопоставлены расчетные и экспериментальные траектории деформаций ползучести при $\theta=150^{\circ}, 90^{\circ}$.

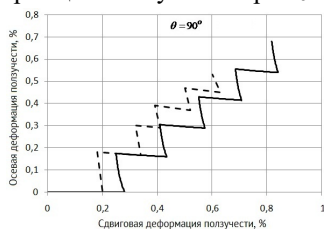


Рис. 4

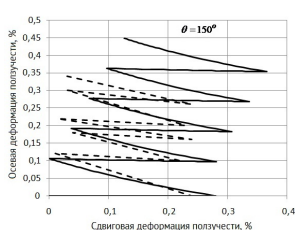


Рис. 5

В целом анализируя полученные численные результаты, можно отметить качественное и количественное совпадение модельных представлений с опытными данными по нестационарной ползучести при блочном многоосном напряженном состоянии.

Во втором примере представлены результаты исследования закономерностей изменения скалярных и векторных свойств стали 30ХГСА при проведении (P+q)-опытов (растяжение с внутренним давлением) на сложное нагружение по двухзвенным ломанным траекториям при температуре $T = 550^\circ\text{C}$ на тонкостенных цилиндрических образцах с длиной рабочей части $l = 120\text{ мм}$, толщиной стенки $h = 1\text{ мм}$ и радиусом срединной поверхности $R = 40,5\text{ мм}$.

В начале получены результаты исследований нестационарной ползучести стали 30ХГСА в случае простого нагружения (одноосное растяжение), с целью оценки влияния скорости деформации. При температуре $T = 550^\circ\text{C}$ были испытаны девять образцов при скоростях деформации $0,833 \cdot 10^{-4}$, $0,833 \cdot 10^{-5}$ и $0,275 \cdot 10^{-5} \text{ (с}^{-1}\text{)}$ соответственно.

Установлено, что с изменением скорости деформирования происходит перераспределение вклада пластических деформаций и деформаций ползучести в процесс деформирования лабораторного образца.

Далее при постоянной скорости деформаций получены траектории в виде двухзвенных ломанных траекторий непропорционального деформирования. Трубчатый образец при постоянной температуре $T = 550^\circ\text{C}$ растягивали с постоянной скоростью деформаций $\dot{e}_{11} = \text{const}$ до точки А (значение $e_{11} = 0,42\%$), а затем после излома траектории деформирования на 90° реализовывалось пропорциональное деформирование внутренним давлением с постоянной скоростью деформаций $\dot{e}_{22} = \text{const}$ до точки В, при этом деформация e_{11} оставалась постоянной (см. рис. 6,7).

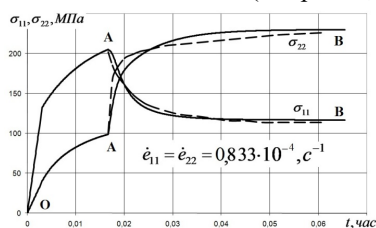


Рис. 6

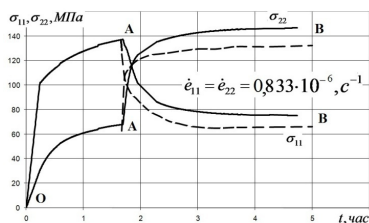


Рис. 7

Сопоставляя полученные численные результаты с экспериментальными данными можно отметить качественное и количественное совпадение модельных представлений с опытными данными по ползучести металлов при сложном нагружении. Показано, что с изменением скорости деформаций вследствие наличия реономных эффектов изменяется уровень напряжений и происходит перераспределение вклада пластических деформаций и деформаций ползучести в общий процесс деформирования лабораторного образца.

В третьем примере решена прикладная задача оценки несущей способности корпуса реактора ЯЭУ в условиях гипотетической аварии по механизму длительной прочности. Материал корпуса реактора – сталь 15Х2НМФА. В качестве расчётной схемы принята осесимметричная конструкция корпуса реактора, состоящая из цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем. Аварийная ситуация моделировалась воздействием внутреннего гидростатического давления p_1 , меняющего от нуля на высоте $h=1,5\text{ м}$ от нижней точки днища и моделирующего силовое воздействие от расплава, внутреннего давления p_2 и температуры T , меняющейся в пределах рассматриваемой части корпуса реактора от 184° до 1510°C .

Численное решение задачи оценки длительной прочности корпуса реактора ЯЭУ было проведено в два этапа:

- на первом этапе выполнялся расчёт на этапе повышения давления и температуры до максимальных значений за малый промежуток времени (продолжительность этапа разогрева составляла 1 минуту).
- на втором этапе проводилась выдержка при постоянном давлении и температуре.

Так же был выполнен ряд расчётов отличающихся величиной внутреннего давления p_2 .

Распределение величины повреждённости по сечению корпуса реактора в момент образования макроскопической трещины для первого варианта расчёта приведено на рис. 8, а для второго – на рис. 9. Видно, что макроскопическая трещина для обоих вариантов расчёта зарождается в центральной части эллиптического днища в окрестности срединной поверхности конструктивного элемента.

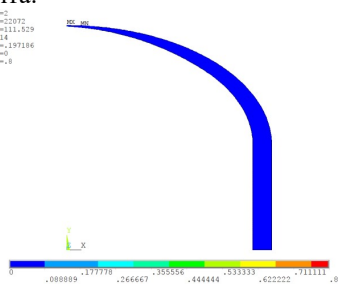


Рис. 8

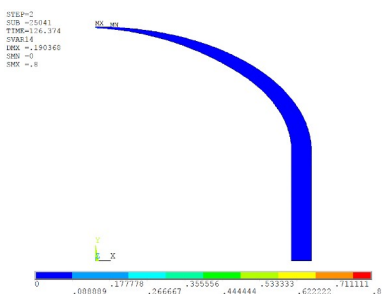


Рис. 9

На рис. 10 показана зависимость величины повреждённости ω от времени процесса t в наиболее опасной зоне для первого варианта температурного поля и различных значений давления p_2 , а на рис. 11 аналогичные зависимости для второго варианта температурного поля.

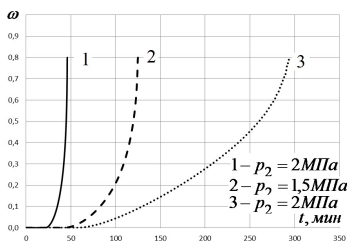


Рис. 10

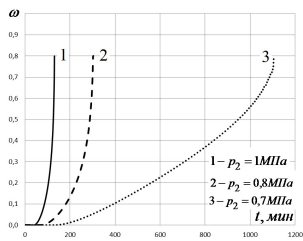


Рис. 11

Анализ полученных численных результатов позволяет отметить следующие характерные закономерности процесса деформирования корпуса реактора ЯЭУ (рис. 10):

- для варианта температурного поля максимально допустимое значение давления p_2 не приводящее к образованию макроскопической трещины по механизму длительной прочности не должно превышать значения $p_2 = 1,3 \text{ МПа}$, а для второго температурного поля – $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$;

- полученные в настоящей работе численные результаты по определению допустимых значений давлений согласуются с аналогичными результатами, полученными другими исследователями.

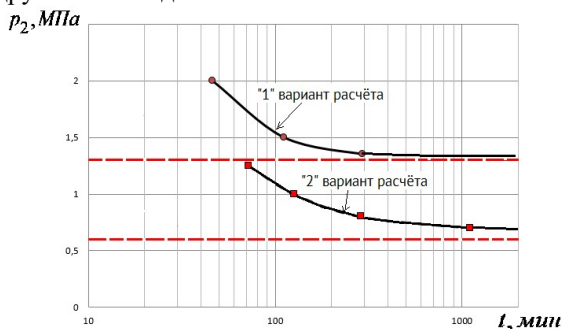


Рис. 10

Основные результаты и выводы.

1. Представлен вариант математической модели МПС Ю.Г. Коротких адаптированной для расчета параметров процессов нестационарного термовязкопластического деформирования и накопления повреждений по механизму длительной прочности при высокотемпературном термомеханическом нагружении в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) по заданной истории их нагружения.

2. Показано, что модель МПС учитывает:

- зависимость физико-механических характеристик материала от температуры и наличия соотношений между скоростями механической и температурной деформацией;

- влияние на темпы накопления повреждений объемности напряженного состояния и непропорциональности процесса деформирования;
- наличие двух стадий накопления повреждений;
- нелинейность процесса накопления повреждений;
- нелинейность суммирования повреждений при изменении режимов нагружения, вида напряженного состояния.

3. Проведена верификация определяющих соотношений МПС и получены материальные параметры моделей МПС в условиях высокотемпературного термомеханического деформирования для ряда конструкционных сплавов: сталь -12Х18Н9, Х18Н10Т, сталь 304, 30ХГСА, 15Х2НМФА, жаропрочный сплав ВЖ-159, медь и др.

4. Путем сопоставления результатов численных экспериментов с имеющимися экспериментальными данными для произвольных сложных траекторий непропорционального неизотермического деформирования, показана достоверность развитых определяющих соотношений МПС и программных средств, которая подтвердила правильность моделирования процессов высокотемпературного термомеханического деформирования и накопления повреждений.

5. Проведён анализ кинетики НДС конкретных конструктивных элементов, подверженных воздействию высокотемпературного термомеханического нагружения и выполнен на его основе прогноз длительной прочности, который показал, что данный подход пригоден для разработки на его основе экспертных систем оценки ресурса ОИО.

Полученные в диссертации деформационные и прочностные свойства жаропрочных сплавов являются необходимым элементом для дальнейшей оценки ресурсных характеристик элементов конструкций при термомеханических воздействиях. Результаты работы найдут применение при оценке прочности и ресурса элементов ЯЭУ, конструктивных узлов энергетических установок и др.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Шишулин Д.Н., Сметанин И.В. Определяющие соотношения нестационарной ползучести при сложном напряженном состоянии// Проблемы прочности и пластичности. – 2016. №. 78 (4). С. 436-451.

2. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Миронов А.А., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н., Сметанин И.В. Модель поврежденной среды для описания длительной прочности конструкционных материалов (металлов и их сплавов) // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. №. 79 (3). С. 285-300.

3. Волков И.А., Игумнов Л.А., Шишулин Д.Н., Тарасов И.С., Сметанин И.В. Закономерности изменения характеристик ползучести и

пластичности в экспериментах на кратковременную ползучесть при сложном нагружении // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. № 79 (1). С. 62-75.

4. Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н., Сметанин И.В. Оценка длительной прочности элементов конструкции при термомеханическом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. – 2018. № 80 (4). С. 495-512.

5. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Шишулин Д.Н., Тарасов И.С., Сметанин И.В. Определяющие соотношения механики поврежденной среды для оценки длительной прочности конструкционных сплавов // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. № 60 (1). С. 181-194.

6. Сметанин И.В., Численное исследование процесса высокотемпературной ползучести и длительной прочности конструкционных сплавов при одноосном растяжении // Проблемы прочности и пластичности. – 2021. № 81 (3). С. 294-310.

Материалы докладов на научных конференциях и другие научные публикации:

7. Волков И.А., Шишулин Д.А., Тарасов И.С., Сметанин И.В. Математическая модель нестационарной ползучести металлов при сложном напряженном состоянии // Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела. Межвузовский сборник научных трудов. Тверской государственный технический университет. – 2017. С. 4-14.

8. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С., Сметанин И.В. Модель поврежденной среды для оценки ресурсных характеристик конструкционных сталей при механизмах истощения, сочетающих усталость и ползучесть материала // VIII Международный научный симпозиум, посвященный 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчанинова «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела», 2015, г. Тверь.

9. Волков И.А., Игумнов Л.А., Сметанин И.В., Шишулин Д.Н., Определяющие соотношения механики поврежденной среды для описания длительной прочности металлов // X Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела. – 2017, г. Самара.

10. Volkov I.A., Igumnov L.A., Litvinchuk S.Y., Volkov A.I., Smetanin I.V., Continual damage model and its implementation for solving the problems of fatigue durability and long – term strength in materials and structures // 28th Russian conference on mathematical modelling in natural sciences, Perm, 2019.

11. Волков И.А., Волков А.И., Сметанин И.В., Боев Е.В., Оценка усталостной долговечности элементов конструкций при термодинамических // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред, Материалы XXVI международного симпозиума им. А.И. Горшкова, 2020, г. Вятки

Подписано в печать 21.10.2021 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1. Заказ № 364. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ННГУ им. Н.И. Лобачевского.
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37