

На правах рукописи



ГОРОХОВ ВАСИЛИЙ АНДРЕЕВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И
РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ
КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ТЕРМОСИЛОВЫХ, ЦИКЛИЧЕСКИХ И
ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2018

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

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор

Капустин Сергей Аркадьевич

Официальные оппоненты:

Бондарь Валентин Степанович, доктор физико-математических наук,
профессор, Московский политехнический университет, заведующий кафедрой
«Техническая механика»

Каюмов Рашит Абдулхакович, доктор физико-математических наук,
профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный
университет, профессор кафедры «Механика»

Углов Александр Леонидович, доктор технических наук, старший научный
сотрудник, Научно-исследовательский центр контроля и диагностики
технических систем, начальник сектора НИС-201

Ведущая организация:

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»**

Защита состоится 5 июля 2018 года в 12:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.166.09 при Национальном исследовательском
Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по
адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте **diss.unn.ru/818**.

Автореферат разослан 30 мая 2018 г.

И.О. ученого секретаря
диссертационного совета

Котов Василий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Режимы эксплуатации ранее созданных и вновь проектируемых технических объектов различных областей машиностроения и энергетики предполагают нахождение составляющих их агрегатов под действием высоких температур, силовых нагрузок с различными степенями интенсивности и закономерностями их изменения во времени, а для ряда конструктивных элементов ядерных энергетических установок характерно нейтронное облучение, приводящее к значительным изменениям механических свойств и дополнительным эффектам поведения облучаемого материала, оказывающим существенное влияние на процессы деформирования конструкции в целом. Растущие требования к повышению надежности, снижению веса и металлоемкости таких объектов диктует необходимость постоянного совершенствования методов и средств оценки прочности и ресурса проектируемых и действующих конструкций. Такие средства должны обеспечивать возможность детального описания термомеханических процессов в материалах исследуемых конструкций с учетом их реальных свойств и условий нагружения. Указанные условия нагружения приводят к появлению в материалах конструкций необратимых деформаций пластичности и термоползучести, радиационного распухания и радиационной ползучести, накоплению повреждений и последующего разрушения элемента конструкции. При этом особые требования предъявляются к моделям, описывающим поведение конструкционных материалов в условиях силовых, тепловых и радиационных воздействий. В частности, такие модели должны описывать основные эффекты поведения материала при различных типах нагружений, описывать основные стадии развития повреждений в материалах и учитывать влияние этих повреждений на процесс деформирования.

Исследование поведения конструкций с учетом перечисленных эффектов представляет собой сложную проблему, решение которой связано с решением комплекса самостоятельных вопросов:

- разработкой моделей материалов, описывающих процессы развития необратимых деформаций и поврежденности в точке тела при заданных законах изменения внешних воздействий;
- построения математической модели исследуемого объекта, описывающей поведение конструкции с учетом выбранных моделей;
- развитием методов и алгоритмов решения нелинейных краевых задач, к которым сводится исследование поведения конструкции;

- созданием эффективной вычислительной модели, связывающей используемые для анализа конструкций частные модели материалов, алгоритмы и их сочетание в составе единого вычислительного процесса.

Таким образом, проблема развития и экспериментально-теоретического обоснования математических моделей, численных алгоритмов и компьютерных кодов для исследования деформирования и разрушения материалов и конструкций при термосиловых, различных типах циклических нагружений и терморadiационного воздействия является крайне актуальной.

Степень разработанности темы.

Анализ современного состояния исследований в рамках рассматриваемой в работе проблемы позволяет судить о том, что к настоящему времени разработан широкий набор математических моделей и вычислительных средств, позволяющих проводить компьютерное моделирование процессов механического поведения материалов и элементов конструкций для квазистатических термосиловых режимов нагружения. Для определенного набора вариантов термосиловых нагружений выполнены расчетно-экспериментальные исследования, результаты которых свидетельствуют об адекватности предложенных теоретических подходов и развитых на их основе моделей упруговязкопластического деформирования и разрушения материалов и выполненных из них элементов конструкций.

В части, касающейся разработки математических моделей наибольшее число публикаций посвящено изучению процессов пластического деформирования материалов в условиях пропорциональных и непропорциональных силовых, температурных, и наиболее важных случаев малоцикловых нагружений, а также исследованию процессов ползучести при различных режимах термосиловых нагружений.

До настоящего времени значительная часть исследований, касающихся оценки прочности конструкций была ориентирована на создание моделей для описания неповрежденных материалов и моделей накопления повреждений. При этом, в большинстве исследований, использующих понятие накопления повреждений, при анализе прочности конструкций предполагалось, что развивающаяся в материале поврежденность не сказывается непосредственно на характеристиках процесса деформирования. Однако такое предположение справедливо лишь на ранних стадиях процесса разрушения, а с развитием поврежденности она начинает все сильнее влиять на механические характеристики материала. Это приводит к необходимости учета при формулировке уравнений состояния материалов взаимного влияния эффектов деформирования и поврежденности, т.е. применения соотношений механики поврежденной среды, позволяющих описать влияние развивающихся в

материале дефектов на механическое поведение поврежденного материала с помощью соответствующих параметров.

Следует отметить, что к настоящему времени достаточно мало исследований посвящено моделированию процессов деформирования конструкционных материалов в условиях терморadiационных воздействий. Такие модели должны учитывать зависимость свойств упругости, пластичности, термоползучести, а также эффектов радиационного распухания и радиационной ползучести от температуры и повреждающей дозы облучения.

Также следует отметить, что большинство современных моделей используемых для описания поведения материалов в условиях перечисленных выше условий и режимов нагружения ориентированы на изучение каких либо отдельных эффектов деформирования или накопления повреждений. При этом очевидно, что описать перечисленные эффекты в рамках одной модели практически невозможно. Выходом из этой ситуации может служить создание составной модели, представляющей собой набор более простых моделей, настраиваемых на описание конкретного механического процесса в зависимости от наличия необходимых свойств исследуемого материала и условий решаемой задачи. Вариант такой модели развивается автором в рамках настоящей работы.

Наибольшее распространение из известных методов решения краевых задач механики деформируемого твердого тела в настоящее время получил метод конечных элементов (МКЭ).

Цель и задачи диссертационной работы.

Развитие в рамках подходов механики поврежденной среды математических моделей и средств численного исследования процессов нелинейного деформирования и разрушения элементов конструкций, эксплуатирующихся в квазистатических режимах термостатического, циклического и радиационного воздействий. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- развитие составной иерархической модели поврежденного материала, представляющей собой набор частных моделей пластичности, ползучести и накопления повреждений, настраиваемых на описание конкретного механического процесса в зависимости от наличия необходимых свойств исследуемого материала и условий решаемой задачи;
- разработка вариантов моделей деформирования нержавеющей сталей при терморadiационных и малоцикловых нагружениях;
- разработка варианта модели накопления усталостных повреждений в жаропрочных сплавах при высокотемпературном многоцикловом нагружении;

- создание эффективных алгоритмов, реализующих предложенные модели в рамках программных средств решения на основе МКЭ задач оценки прочности и ресурса конструкций;
- программная реализация разработанных моделей, численных схем и алгоритмов в составе программных средств вычислительного комплекса УПАКС;
- оценка работоспособности созданных моделей, численных алгоритмов и средств компьютерного решения нелинейных задач деформирования и разрушения элементов конструкций;
- решение на основе разработанных средств ряда демонстрационных и практически важных задач исследования процессов деформирования и разрушения элементов конструкций.

Научная новизна.

1. Предложен вариант составной иерархической модели поврежденного материала, позволяющий исследовать взаимосвязанные процессы деформирования и разрушения конструкционных материалов при различных режимах термосилового, циклического и радиационного воздействий.

2. Разработана модель упруговязкопластического деформирования нержавеющей сталей, учитывающая зависимость свойств упругости, пластичности и термоползучести от температуры и повреждающей дозы облучения, а также эффекты радиационного набухания и радиационной ползучести.

3. Предложен вариант модели пластичности с комбинированным упрочнением для исследования малоцикловых процессов деформирования нержавеющей сталей, позволяющий описывать закономерности поведения материалов при мягких несимметричных нагружениях.

4. На основе энергетических критериев разрушения и концепции механики поврежденной среды, разработана модель многоциклового усталости, учитывающая зависимость числа циклов до разрушения от уровня действующей температуры, параметра асимметрии цикла, реализуемого в цикле вида НДС, накопленной поврежденности.

5. Разработаны алгоритмы и численные схемы, реализующие предложенные модели механического поведения материалов при терморadiационных и циклических воздействиях в задачах расчета прочности конструкций на основе МКЭ.

6. В рамках подходов механики поврежденной среды разработаны алгоритмы прогнозирования образования и развития повреждений в материале конструкций при мало- и многоцикловом нагружении.

7. Предложена численная схема, обеспечивающая возможность моделировать в рамках соотношений механики поврежденной среды зарождение и развитие трещины без изменения исходной топологии и схемы КЭ-дискретизации конструкции.

8. В рамках вычислительного комплекса УПАКС решения на основе МКЭ задач нелинейного деформирования и разрушения конструкций при квазистатических многофакторных воздействиях программно реализованы:

- предложенные модели деформирования и накопления повреждений;
- алгоритмы прогнозирования развития циклических повреждений;
- численная методика исследования процессов распространения трещин.

9. Выполнено решение ряда демонстрационных и прикладных задач исследования прочности элементов конструкций:

- разрушение экспериментального образца с концентратором в условиях плоского изгиба;
- развитие повреждений в цилиндрическом образце с выточкой при малоцикловом нагружении;
- оценка усталостной долговечности фрагмента сильфона в условиях высокотемпературного многоциклового нагружения;
- расчет НДС обечайки отражателя нейтронов при терморadiационном нагружении.

Теоретическая значимость работы.

В рамках подходов механики поврежденной среды выполнено развитие моделей механического поведения материалов и численных алгоритмов исследования процессов деформирования и разрушения конструкций в условиях квазистатических термосиловых, терморadiационных, мало- и многоцикловых нагружений, что является значительным вкладом в методы решения задач механики деформируемого твердого.

Практическая значимость работы.

Созданные в рамках развиваемого в НИИМ Нижегородского университета вычислительного комплекса УПАКС программные средства исследования нелинейного деформирования и разрушения конструкций в широком диапазоне квазистатических режимов нагружения являются эффективным инструментарием решения задач оценки прочности и ресурса конструкций технических объектов энергетики и машиностроения. Методика и программные средства исследования упруговязкопластического деформирования конструкций при терморadiационных воздействиях применялись в АО «ОКБМ Африкантов» для анализа НДС и радиационно-термического формоизменения конструктивных элементов реакторов на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800. Методика и программные средства

оценки многоциклового прочностии конструкций нашли применение в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Методология и методы диссертационного исследования.

В настоящей работе развивается вариант составной иерархической модели поврежденного материала, в которой реализована возможность представления сложного процесса развития взаимосвязанных эффектов деформирования и разрушения в виде последовательности формально независимых элементарных актов, описываемых соответствующими частными моделями пластичности, ползучести и накопления повреждений. Учет взаимодействия и взаимного влияния таких элементарных актов при описании реальных процессов осуществляется на верхнем уровне составной модели, обеспечивающем последовательную инициализацию частных моделей и коррекцию входящих в них параметров (напряжений, поврежденности, параметров, характеризующих историю упруговязкопластического деформирования материала). При этом описание взаимодействия различных видов поврежденности и влияния их на процесс деформирования строится на основе инвариантной по отношению к природе этих повреждений скалярной меры поврежденности ω , меняющейся от значения $\omega = 0$ для неповрежденного материала до $\omega = 1$ для полностью разрушенного материала.

Исследование поведения конструкций осуществляется путем пошагового интегрирования инкрементальных уравнений, записанных в метрике текущей деформированной конфигурации с использованием комбинированной шаговой схемы. Суть этой схемы заключается в оптимальном сочетании простейших схем интегрирования эволюционных уравнений пластичности, ползучести и накопления повреждений в отдельных точках материала с итерационным уточнением равновесного состояния конструкции в целом. Решение нелинейных задач на шагах верхнего уровня осуществляется в форме метода начальных напряжений. Численное решение линеаризованных задач осуществляется на основе МКЭ с использованием семейства изопараметрических квадратичных КЭ с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Развитие составной иерархической модели поврежденного материала, позволяющей исследовать взаимосвязанные процессы деформирования и разрушения конструкционных материалов при различных режимах термосилового, циклического и радиационного воздействий.

2. Модель упруговязкопластического деформирования нержавеющей сталей при терморadiационных нагружениях, учитывающая зависимость свойств упругости, пластичности, термоползучести, а также эффектов

радиационного распухания и радиационной ползучести от температуры и повреждающей дозы облучения.

3. Вариант модели пластичности с комбинированным упрочнением для исследования малоцикловых процессов деформирования нержавеющей стали, позволяющий описывать закономерности поведения материалов при мягких несимметричных нагружениях.

4. Модель многоциклового усталости жаропрочных сплавов на основе энергетических критериев разрушения и концепции механики поврежденной среды, учитывающая зависимость числа циклов до разрушения от:

- уровня действующей температуры;
- параметра асимметрии цикла;
- реализуемого в цикле вида НДС;
- накопленной поврежденности.

5. Алгоритмы многоступенчатого прогнозирования процессов образования и развития повреждений в материале конструкций на основе численного моделирования мало- и многоциклового усталости в рамках соотношений механики поврежденной среды.

6. Численная схема, позволяющая моделировать в рамках соотношений механики поврежденной среды зарождение и развитие трещины без изменения исходной топологии и схемы КЭ-дискретизации конструкции.

7. Методики и программное обеспечение решения МКЭ задач нелинейного деформирования и разрушения конструкций при следующих типах квазистатических внешних воздействий:

- термосиловые и терморadiационные;
- мало- и многоцикловые термосиловые нагружения.

8. Результаты оценки работоспособности, практической применимости и эффективности разработанных моделей пластичности, деформирования облучаемых материалов, накопления усталостных повреждений, алгоритмов прогнозирования, методик и программных средств конечно-элементного анализа кинетики НДС и разрушения конструкций.

9. Результаты численного решения ряда задач необратимого деформирования и разрушения элементов конструкций:

- исследование деформирования и разрушения экспериментального образца с концентратором в условиях плоского изгиба;
- анализ зарождения и развития повреждений в цилиндрическом образце с выточкой при малоцикловом нагружении;
- исследование накопления усталостных повреждений во фрагменте сильфона в условиях высокотемпературного многоциклового нагружения;

- расчет кинетики НДС обечайки отражателя нейтронов реактора БН-800 из нержавеющей стали Х16Н11М3 при терморadiационном нагружении.

Степень достоверности результатов.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается решением тестовых задач и хорошим согласованием расчетных данных с известными экспериментальными зависимостями и теоретическими положениями.

Апробация результатов.

Результаты диссертационной работы докладывались на:

- III школе-семинаре «Современные проблемы ресурса материалов и конструкций» (Москва, 2009);
- XXIII Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» (Санкт-Петербург, 2009);
- Одиннадцатой и двенадцатой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» (Санкт-Петербург; 2010, 2012),
- XVIII, XIX и XXIV Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Ярополец: 2012, 2013; Вятчи, 2018);
- IX, X и XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях NPNJ (Алушта; 2012, 2014, 2016);
- XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование» (Саров, 2012);
- 53, 55 и 57 Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2012; Харьков, 2014; Севастополь, 2016);
- XVIII, XIX и XX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам ВМСППС (Алушта; 2013, 2015, 2017);
- Форуме молодых ученых (Нижний Новгород, 2013);
- X и XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 2011; Казань, 2015);
- Научной конференции «Проблемы прочности, динамики и ресурса» (Нижний Новгород, 2015);
- Научной конференции «Проблемы прочности, динамики, ресурса и оптимизации» (Нижний Новгород, 2016);
- Международной научной конференции «Проблемы прочности, динамики и ресурса» (Нижний Новгород, 2017).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 32 работы [1–32], в том числе: 13 статей в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России [1–13] (из которых 2 статьи [10, 12] индексируются в базе WoS, 4 статьи [2, 5, 9, 11] в базе Scopus) и 1 монография [14].

Личный вклад.

Основные результаты диссертации и защищаемые положения получены ее автором. В совместных работах [7, 14, 20] автором диссертации разработана составная иерархическая модель поврежденного материала. В совместных работах [3, 5, 7, 14–17, 20, 29–31] автором диссертации выполнена разработка модели упруговязкопластического деформирования нержавеющей стали при терморadiационных нагрузениях. В совместных работах [8–10, 14, 22–25, 29] автором диссертации разработана модель многоциклового усталости при высокотемпературных воздействиях. В совместных работах [4, 6, 9, 11, 14, 26, 29] автору диссертации принадлежат результаты по развитию алгоритмов прогнозирования развития повреждений при циклических нагрузениях. В совместных работах [1, 2, 4, 11, 13, 14, 18, 19, 27, 29, 32] автором диссертации разработана численная схема развития трещины в конструкциях. В совместных работах [1–6, 8, 10, 12–14, 21] автору диссертации принадлежат методические и программные разработки, реализующие модели поведения материалов и конструкций. В совместных работах [3, 6, 8–14] автором диссертации выполнена оценка работоспособности разработанных методических и программных средств. В совместных работах [1–6, 8, 10, 14] автору диссертации принадлежат результаты численного исследования деформирования и разрушения элементов конструкций.

В совместных работах Капустин С.А. консультировал при выполнении исследований, участвовал в анализе и обсуждении результатов; Чурилов Ю.А. оказывал помощь при выполнении численных расчетов; Пантелеев В.Ю. оказывал помощь при постпроцессорной обработке результатов моделирования разрушения образца с концентратором; Горохов А.Н., Казаков Д.А. проводили экспериментальные исследования по деформированию и разрушению материалов при термосиловых нагрузениях; Гуленко А.Г., Марголин Б.З., Сорокин А.А. предоставили данные о механических свойствах материалов в условиях нейтронного облучения; Васильев Б.А., Виленский О.Ю., Зверев Д.Л., Кайдалов В.Б., Осетров Д.Л., Руин А.А. предоставили данные по характеристикам и условиям эксплуатации конструктивных элементов ЯЭУ; Антипов А.А. предоставил данные по условиям эксплуатации сильфона в условиях многоциклового нагружения; Миронов А.А. принимал участие в

постановке задачи и обсуждении результатов моделирования развития трещины в образце в условиях ползучести.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы; содержит 73 рисунка, 19 таблиц, библиографический список из 317 источников – всего 240 страниц.

Диссертационная работа выполнена при поддержке.

Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» соглашение № 14.578.21.0246 от 26.09.2017 (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57817X0246) (глава 1); грантов РНФ (14-19-01096, 16-19-10237 (раздел 4.4.), 17-79-20161 (раздел 4.5.)); грантов РФФИ (06-08-00360, 14-08-31084).

Благодарности.

Автор выражает благодарности: Капустину С.А. за ценные консультации при работе над диссертацией; Чурилову Ю.А. за помощь в проведении численных расчетов; Горохову А.Н., Жегалову Д.В., Казакову Д.А. за предоставленные экспериментальные данные о деформировании и разрушении материалов при термосиловых нагружениях; Гуленко А.Г., Марголину Б.З., Сорокину А.А. за предоставленные данные о механических свойствах материалов в условиях нейтронного облучения; Васильеву Б.А., Виленскому О.Ю., Звереву Д.Л., Кайдалову В.Б., Осетрову Д.Л., Руину А.А. за предоставленные данные по характеристикам и условиям эксплуатации конструктивных элементов ЯЭУ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, содержится информация о степени ее разработанности, цели и задачах, научной новизне, теоретической и практической значимости работы, методологии и методах исследования, положениях, выносимых на защиту, степени достоверности результатов, апробации, публикациях, личном вкладе, структуре и объеме диссертации.

Первая глава посвящена обзору современного состояния исследований в области численного моделирования деформирования и разрушения материалов и конструкций, подвергающихся квазистатическим термосиловым, радиационным и циклическим нагружениям.

Разработкой теоретических положений и математических моделей исследования процессов пластического деформирования материалов занимались А.А. Ильюшин, А.Ю. Ишлинский, В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашев, И.А. Биргер, Р.А. Васин, В.Г. Зубчанинов, В.С. Бондарь, Ю.Г.

Коротких, Ю.М. Темис, W. Prager, P.J. Armstrong, C.O. Frederick, J.L. Chaboche, N. Ohno, J.D. Wang, L. Taleb, S. Bari, T. Hassan, M. Abdel-Karim и др.

Проблеме моделирования ползучести посвящены работы Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова, Н.Н. Малинина, С.А. Шестерикова, А.М. Локощенко, О.В. Соснина, Б.В. Горева, А.Ф. Никитенко, Ю.Г. Коротких, С.А. Капустина, В.П. Радченко, Р.А. Арутюняна, И.Ю. Цвелодуба, Г.М. Хажинского, В.С. Наместникова, И.А. Волкова и др.

Развитие и применение моделей усталостного разрушения представлено в работах Н.А. Махутова, А.Н. Романова, А.П. Гусенкова, В.В. Новожилова, В.С. Бондаря, Ю.Г. Коротких, И.А. Волкова, С.А. Капустина, А.А. Шанявского, A. Palmgren, M. Miner, L.F. Coffin, S.S. Manson, J.L. Chaboche, G. Sines, B. Crossland, M. Brown, K.J. Miller, A. Fatemi, D.F. Socie и др.

Вопросами моделирования необратимого деформирования материалов и элементов конструкций в условиях нейтронного облучения занимались В.Н. Киселевский, Ю.И. Лихачев, Е.Н. Синицын, В.Н. Маневский, Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко, А.А. Бучатский, А.А. Сорокин, В.Я. Пупко, А.А. Тутнов, О.Ю. Виленский, В.Б. Кайдалов, S. Mohanty, S. Majumdar и др.

Различным аспектам анализа образования и распространения трещин посвящены работы М.Я. Леонова, В.В. Панасюка, Г.П. Черепанова, Л.И. Седова, Н.Ф. Морозова, Е.М. Морозова, В.З. Партон, В.В. Болотина, Ю.Г. Матвиенко, Семенова А.С., Мельникова Б.Е., И.К. Королева, С.В. Петина, Р.В. Гучинского, В.М. Волкова, А.А. Миронова, В.М. Корнева, В.Д. Кургузова, М.Е. Кожевниковой, В.Н. Шлянникова, Л.В. Степановой, P. Paris, F. Erdogan, J.R. Rice, M.L. Williams, D.S. Dugdale, T. Belytschko, F. Ellyin, G. Glinka, G. Irvin и др.

Во второй главе на основе положений механики поврежденной среды формулируются соотношения предлагаемого варианта составной иерархической модели поврежденного материала и определяющие соотношения, описывающие процессы необратимого деформирования, зарождения и развития повреждений в конструкционных материалах для рассматриваемых типов квазистатических воздействий.

В предлагаемом варианте модели иерархической модели поврежденного материала предполагается справедливость аддитивности упругой Δe_{ij}^e и необратимой составляющих Δe_{ij}^H изменения тензора деформаций (пластичности Δe_{ij}^P , термической ползучести Δe_{ij}^c и радиационной ползучести Δe_{ij}^r) и несжимаемость материала в условиях пластичности и ползучести.

Также предполагается, что влияние различных видов поврежденности на процесс деформирования осуществляется с помощью введенной Качановым и Работновым скалярной функции ω (меры поврежденности), представляющей собой меру уменьшения эффективных площадок действия напряжений по отношению к их начальному неповрежденному значению. Величина ω меняется от значения $\omega=0$ для неповрежденного материала до $\omega=1$ для полностью разрушенного материала.

Непосредственное влияние поврежденности на процесс деформирования учитывается в уравнениях равновесия путем введения зависимости упругих характеристик материала от текущего значения функции ω . В связи с этим при формулировке составной модели поврежденного материала в рассмотрение введены две характеристики напряжений: эффективные σ_{ij} , действующие на поврежденных площадках, и приведенные σ_{ij}^* , статически эквивалентные первым, но отнесенные к неповрежденным площадкам. Первые фигурируют во всех частных моделях, определяющих состояние материала в точке тела, вторые используются на уровне описания конструкции при формулировке уравнений равновесия и статических граничных условий.

С учетом сделанных замечаний конкретные уравнения составной модели поврежденного материала, устанавливающие связь между изменениями приведенных напряжений $\Delta\sigma_{ij}^*$ и деформаций Δe_{ij} на элементарном шаге изменения внешних воздействий, а также параметрами, характеризующими текущее состояние материала, могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{ij}^* &= 2G(\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij}) + \delta_{ij}(K - \frac{2}{3}G)(\Delta e_{ii} - \Delta d_{ii}), \\ \Delta d_{ij} &= \Delta e_{ij}^* + \omega(\Delta e_{ij} - \Delta e_{ij}^*), \\ \Delta e_{ij}^* &= \Delta e_{ij}^p + \Delta e_{ij}^c + \Delta e_{ij}^r - \frac{\Delta G^* \bar{\sigma}_{ij}'}{2G^* \bar{G}^*} + \delta_{ij}[\Delta(\alpha T) + \Delta\beta - \frac{\Delta K^* \bar{\sigma}}{3K^* \bar{K}^*}], \\ \Delta G^* &= G^* - \bar{G}^*; G^* = (1-\omega)G; \bar{G}^* = (1-\bar{\omega})\bar{G}, \\ \Delta K^* &= K^* - \bar{K}^*; K^* = (1-\omega)K; \bar{K}^* = (1-\bar{\omega})\bar{K}, \\ \Delta(\alpha T) &= \alpha T - \bar{\alpha} \bar{T}; \Delta\beta = \beta - \bar{\beta},\end{aligned}\tag{1}$$

где $\bar{K} = K(\bar{T})$, $K = K(T)$, $\bar{G} = G(\bar{T})$, $G = G(T)$ – модули объемной и сдвиговой деформации неповрежденного материала, отнесенные к уровню температур в исходном (в начале шага) и текущем (в конце шага) состояниях; $\bar{\alpha} = \alpha(\bar{T}, \bar{D})$, $\alpha = \alpha(T, D)$ – значения коэффициентов температурного

расширения; $\bar{\beta}, \beta$ – значения деформации радиационного распухания; $\bar{\sigma}'_{ij}, \bar{\sigma}$ – значения девиаторных и шаровой составляющих тензора напряжений в исходном состоянии. Фигурирующие в (1) величины изменения пластических деформаций Δe_{ij}^P , деформаций термической Δe_{ij}^C и радиационной Δe_{ij}^R ползучести, описываемые соответствующими частными моделями.

В основу частных моделей пластичности, ползучести и накопления повреждений, реализованных в составе рассмотренной модели поврежденного материала, положены варианты моделей термопластичности, термоползучести, а также различные варианты кинетических уравнений, описывающих накопление повреждений и деградацию материала для различных механизмов разрушения.

В частности, для описания процессов упругопластического деформирования используются вариант модели термопластичности с комбинированным упрочнением, предложенный в работах Ю.Г. Коротких, модифицированный вариант этой модели, а также предлагаемый в работе вариант модели пластичности для исследования малоцикловых процессов деформирования нержавеющей сталей с учетом закономерностей их поведения при мягких несимметричных нагружениях.

Для описания процессов термической ползучести в составе общей модели поврежденного материала реализован ряд моделей ползучести, основанных на гипотезе существования поверхности ползучести и градиентальности к ней вектора скорости деформации ползучести $\dot{e}_{ij}^C$.

В основу соотношений, используемых для описания процессов накопления повреждений в рамках используемой модели поврежденного материала, положено предположение, что разрушение в точке материала происходит при достижении в этой точке некоторой энергией W критического значения $W = W^R$. Конкретный вид этой энергии определяется механизмом рассматриваемого разрушения.

Функция поврежденности ψ представляет собой нормированный аналог энергии W . Для неповрежденного материала $\psi = 0$, в процессе разрушения значение ψ увеличивается до предельного значения $\psi = 1$. При развитии в материале одновременно нескольких видов повреждений для описания каждого вида используется своя функция ψ_k . В развиваемом варианте составной модели реализованы кинетические уравнения накопления повреждений, обусловленные развитием деформаций пластичности (на основе энергии

пластического разрыхления $W_1 = \int_0^{e^p} \rho_{ij} de_{ij}^p$), деформаций ползучести (на основе

энергии диссипации при ползучести $W_2 = \int_0^{e^c} \sigma'_{ij} de_{ij}^c$), а также на основе критерия

хрупкого разрушения с использованием предложенной в работе схемы «релаксации состояния».

Изменение меры поврежденности каждого вида $\Delta\omega_k$ в свою очередь связано с накопленным значением $\bar{\omega}$, а также с изменением функции поврежденности соответствующего вида $\Delta\psi_k$.

Учет стадийности накопления повреждений осуществляется путем введения переменной, определяющей завершение первой фазы. В качестве такой переменной используется величина ψ_k^a , определяемая для каждого k -го вида поврежденности значением упомянутой выше функции поврежденности к концу первой фазы. При этом зависимость изменения меры поврежденности $\Delta\omega_k$ от изменения функции поврежденности $\Delta\psi_k$ принимается в виде:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_k &= q \bar{\omega}^{\frac{q-1}{q}} \Delta\psi_k^0, \\ \Delta\psi_k^0 &= \frac{\Delta\psi_k}{1 - \psi_k^a} \quad \text{при } \psi_k > \psi_k^a, \\ \Delta\psi_k^0 &= 0 \quad \text{при } \psi_k \leq \psi_k^a,\end{aligned}\tag{2}$$

где $q = q(T)$ – функция материала.

В предлагаемой модели упруговязкопластического деформирования нержавеющей сталей при терморadiационных нагружениях принимается, что упругие характеристики материала G (модуль сдвиговой деформации) и K (модуль объемной деформации), а также коэффициент линейного температурного расширения α являются функциями действующей температуры T и не зависят от накопленной повреждающей дозы облучения D

$$G = G(T), K = K(T), \alpha = \alpha(T).\tag{3}$$

Изменение деформации радиационного формоизменения $\Delta\beta$ для нержавеющей сталей можно представить в виде

$$\Delta\beta = \frac{\partial\beta}{\partial D} \Delta D = \beta_D(T, k_p, \sigma) \Delta D,\tag{4}$$

где $\beta_D(T, k_p, \sigma)$ – скорость (по повреждающей дозе облучения) радиационного формоизменения, является функцией материала и зависит от температуры T ,

накопленной пластической деформации k_p , шаровой составляющей тензора напряжений σ .

В предлагаемом варианте модели пластичности с комбинированным упрочнением модели радиус поверхности текучести C_p представляется в виде функции, зависящей от температуры T , повреждающей дозы облучения D и накопленной пластической деформации, характеризуемой параметром k_p (параметром Одквиста):

$$C_p = C_p(T, D, k_p); k_p = \int \left(\frac{2}{3} de_{ij}^p de_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (5)$$

функция $C_p(T, D, k_p)$ представляется в виде:

$$C_p(T, D, k_p) = C_p^0(T, D) + \Delta C_p(T, k_p), \quad (6)$$

где $C_p^0(T, D)$ – радиус начальной поверхности текучести, $\Delta C_p(T, k_p)$ – изменение радиуса за счет изменения температуры T и параметра пластической деформации k_p .

Компоненты тензора ρ_{ij} являются функционалами процесса пластического деформирования, их изменение связано с изменением пластических деформаций Δe_{ij}^p соотношением

$$\Delta \rho_{ij} = g_1 \Delta e_{ij}^p + g_2 \rho_{ij} \Delta k_p, \quad (7)$$

где $g_1 = g_1(T, D)$, $g_2 = g_2(T, D)$ – материальные функции, определяемые по диаграммам пластического деформирования.

Для описания скорости деформации термической ползучести $\dot{e}_{ij}^c$ используется модель упрочнения, учитывающая влияние на процесс ползучести скорости набора повреждающей дозы облучения (интенсивность повреждающей дозы облучения) $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$:

$$\dot{e}_{ij}^c = \sigma'_{ij} B_c(T, k_c, \theta, \dot{D}); \quad (8)$$

$$B_c(T, k_c, \theta, \dot{D}) = L_0(T, \theta) H(T, k_c) F_c(T, \dot{D}),$$

где $L_0(T, \theta)$ – функция, характеризующая начальную скорость деформации термической ползучести материала, отнесенную к единичному напряжению, при уровне напряжений, определяемых параметром θ :

$$\theta = \frac{\sqrt{\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}} - C_0}{C_0}, \quad (9)$$

где $C_0 = C_0(T)$ – радиус начальной поверхности ползучести; $H(T, k_c)$ – функция упрочнения, характеризующая изменение начальной скорости деформации ползучести от параметра упрочнения k_c ; $F_c(T, \dot{D})$ – функция, учитывающая влияние скорости набора повреждающей дозы обучения $\dot{D}$ на скорость деформации термической ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ при заданном уровне температуры T .

Скорость деформации радиационной ползучести принята в виде:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^r = \sigma'_{ij} B_r(T, D) \dot{D}, \quad (10)$$

где $B_r(T, D)$ – функция материала.

Таким образом, для реализации модели упруговязкопластического деформирования нержавеющей сталей при терморadiационном нагружении необходим следующий набор материальных функций:

$$G(T), K(T), \alpha(T), \beta_D(T), C_p^0(T, D), \Delta C_p(T, k_p), g_1(T, D), \\ g_2(T, D), L_0(T, \theta), H(T, k_c), F_c(T, \dot{D}), C_0(T), B_r(T, D). \quad (11)$$

В предлагаемой модели многоциклового усталости, определяющее соотношение на участке линейной зависимости между напряжением σ и десятичным логарифмом предельного числа циклов N_f можно представить в виде:

$$N_f \cdot 10^{k\sqrt{W_c}} = C, \quad (12)$$

где W_c – энергия формоизменения за цикл нагружения; k и C – материальные параметры модели, определяемые по кривой многоциклового усталости.

Поскольку величины k и C определяются на основе кривой многоциклового усталости, полученной при фиксированных значениях температуры T , параметра асимметрии цикла r и параметра вида НДС Π , в общем случае многоциклового нагружения названные величины должны являться функциями этих параметров: $k = k(T, r, \Pi)$ $C = C(T, r, \Pi)$.

В предлагаемом варианте модели пластичности, позволяющем описывать закономерности поведения материалов при мягких несимметричных нагружениях поверхность текучести F представляется в виде гиперсферы в пространстве девиаторов напряжений σ'_{ij} , координаты центра которой определяются компонентами тензора остаточных микронапряжений ρ_{ij} .

Изменение ρ_{ij} на элементарном шаге изменения внешних воздействий, представляющее собой сумму микронапряжений двух типов, описываемых эволюционными уравнениями типа Армстронга-Фредерика-Кадашевича с дополнительно введенными корректирующими функциями для описания закономерностей деформирования при мягких режимах нагружения:

$$\Delta\rho_{ij} = \sum_{m=1}^2 \Delta\rho_{ij}^m, \quad (13)$$

$$\Delta\rho_{ij}^1 = G_1^1 \cdot \Delta e_{ij}^p - G_2^1 \cdot \rho_{ij}^1 \cdot \Delta k_p + g_T^p \cdot \rho_{ij}^1 \langle \Delta T \rangle,$$

$$\Delta\rho_{ij}^2 = G_1^2 \cdot \Delta e_{ij}^p - G_2^2 \cdot \rho_{ij}^2 \cdot \Delta k_p + g_T^p \cdot \rho_{ij}^2 \langle \Delta T \rangle.$$

В соотношениях (13):

$$\langle \Delta T \rangle = \Delta T \quad \text{при} \quad \Delta T \geq 0, \quad \langle \Delta T \rangle = 0 \quad \text{при} \quad \Delta T < 0,$$

$$G_1^1 = G_1^0 \cdot (1 - n_1(T, k_p)), \quad (14)$$

$$G_2^1 = G_2^0 \cdot (1 - n_2(T, e_u^p)).$$

В приведенных выше соотношениях (13) и (14):

$G_1^0(T)$, $G_2^0(T)$, $G_1^2(T)$, $G_2^2(T)$, $g_T^p(T)$ – зависящие от температуры T материальные функции; $n_1(T, k_p)$, $n_2(T, e_u^p)$ – корректирующие материальные функции (e_u^p – интенсивность пластических деформаций).

Третья глава содержит описание методики численного решения краевых задач деформирования и разрушения конструкций при различных режимах квазистатических нагружений.

Исследование поведения конструкций на основе рассмотренных физических соотношений осуществляется с помощью комбинированной шаговой схемы, в которой шаги каждого уровня несут различную функциональную нагрузку, при этом их размеры определяются из различных соображений.

На шагах верхнего уровня, называемых этапами нагружения, осуществляется внешняя линеаризация задачи. Реальная траектория нагружения представляется в виде кусочно-линейной кривой в пространстве параметров нагружения и аппроксимируется совокупностью прямолинейных участков, величина которых определяется только из условий удовлетворительной аппроксимации реальных траекторий нагружения.

Решение нелинейных задач на этапах осуществляется в форме метода начальных напряжений путем итерационного уточнения равновесного состояния для текущей деформированной конфигурации конструкции.

Для вычисления изменений необратимых деформаций и мер поврежденностей в пределах этапа последний разбивается на ряд шагов нижнего уровня. На внутренних шагах все вычисления строятся независимо для отдельных точек конструкции без коррекции уравнений равновесия.

На каждом этапе нагружения решается нелинейная краевая задача для соответствующего изменения внешних воздействий с учетом всей предшествующей истории необратимого деформирования и накопленной поврежденности материала. Линеаризация задачи на этапе нагружения осуществляется форме метода начальных напряжений. Численное решение линеаризованных задач осуществляется на основе МКЭ с использованием изопараметрических квадратичных КЭ с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений.

Для задач, связанных с оценкой прочности конструкций производится анализ выполнения соответствующих критериальных условий. Первый, связанный с локальным нарушением прочности, определяется условием достижения в одном или нескольких смежных физических узлах допустимого значения меры поврежденности ω_f

$$\omega \geq \omega_f. \quad (15)$$

Второй критерий определяет условие исчерпания конструкцией ее несущей способности. При этом малое изменение внешних воздействий заданного вида приводит к большим изменениям перемещений и деформаций, интенсивно возрастающим по мере увеличения параметра нагрузки, т.е. наступает потеря устойчивости необратимого деформирования. Проверка такого состояния конструкции осуществляется по изменению определителя системы алгебраических уравнений на этапах нагружения, а также на основе анализа изменения вектора узловых перемещений нелинейной части решения задачи на текущем этапе в процессе последовательных приближений.

Непосредственное применение описанной выше схемы решения задач для исследования поведения конструкций при циклических нагружениях путем последовательного интегрирования уравнений для большого числа циклов, представляется весьма затруднительным, как из-за большой трудоемкости вычислений, так и возможности накопления численной погрешности. Для преодоления этих затруднений предложен алгоритм прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных повреждений при малоцикловых термосиловых нагружениях на основе численного моделирования этих процессов в рамках соотношений механики поврежденной среды. В основу алгоритма положена возможность экстраполяции по циклам нагружения параметров, характеризующих упругопластическое состояние и

поврежденность материала в узлах конструкции. Такая экстраполяция может осуществляться либо до завершения первой стадии процесса развития повреждений, характеризующейся началом влияния поврежденности на характеристики процесса деформирования, после чего решение задачи продолжается в обычном режиме, либо до достижения в каком-либо узле предельного значения меры поврежденности ω_f , после чего процесс решения задачи заканчивается и фиксируется соответствующее число циклов.

Отправной точкой создания таких алгоритмов послужило представление о многостадийном характере развития повреждений в материале в процессе его деформирования.

На участках регулярных циклических нагружений в пределах первой стадии может происходить стабилизация процесса циклического деформирования, проявляющаяся в стабилизации амплитудных значений напряжений, деформаций, пластических деформаций. На участке процесса от начала стабилизации до конца первой стадии накопления повреждений, соответствующего значению $\psi = \psi^a$, параметры процесса пластического деформирования практически постоянны (амплитудные значения напряжений, деформаций, пластических деформаций, компонент тензора ρ_{ij}), а значения меры пластических деформаций k_p и функции ψ , характеризующие накопление повреждений, меняются по закону, близкому к линейному. Поэтому на этом участке можно, с достаточной степенью достоверности, прогнозировать значения перечисленных выше параметров путем их линейной экстраполяции на определенное число циклов вперед, исключив соответствующую часть трудоемкого процесса пошагового интегрирования уравнений исходной задачи.

На второй стадии разрушения при $\psi \geq \psi^a$ накопленная поврежденность значительно влияет на макроскопические характеристики материала и приводит к росту меры поврежденности ω . На этой стадии осуществляется прогнозирование параметров процесса циклического деформирования, но на основе более сложных алгоритмов нелинейной экстраполяции.

Аналогичный алгоритм предложен для исследования процессов накопления повреждений при многоцикловых нагружениях.

В условиях многоциклового нагружения производится линейная экстраполяция функций поврежденности ψ в физических узлах конструкции сразу же после просчета первого цикла нагружения.

На втором уровне прогнозирования производится экстраполяции параметров поврежденности материала ψ и ω на число циклов, определяемое

заданным изменением меры поврежденности $\Delta\omega^{\max}$ в наиболее нагруженном узле конструкции, с последующим уточнением ее равновесного состояния.

Экстраполяция второго уровня может производиться неоднократно, пока в некотором физическом узле конструкции мера поврежденности ω не достигнет критического значения, что будет свидетельствовать о появлении макроскопической трещины. При этом для грубой оценки предельного состояния вместо этого алгоритма, можно принять $\psi=1$ и сразу получить приближенную оценку предельного числа циклов.

Также предложена численная схема, позволяющая моделировать в рамках соотношений механики поврежденной среды процессы зарождения и развития трещины без изменения исходной топологии и схемы КЭ-дискретизации конструкции.

К моменту достижения в узле предельного значения $\omega = \omega_f$ (в расчетах предельное значение меры поврежденности принимается равной $\omega_f = 0.99$) материал в районе такого узла перестает сопротивляться дальнейшему деформированию, перераспределяя воспринимаемую ранее нагрузку на ближайшие соседние узлы. Для дальнейшего моделирования процесса следовало бы вводить в районе разрушенного узла элементарную трещину и продолжить вычислительный процесс с измененной расчетной схемой. Однако реализация такого подхода сопряжена с необходимостью, для каждого случая локального нарушения прочности перестраивать сетку КЭ-дискретизации исследуемой области, а следовательно менять топологию и структуру информационных массивов, осуществлять переинтерполяцию физических величин на новую сеточную область, не нарушая при этом условий равновесного состояния в локальной зоне повреждения и конструкции в целом.

В соответствии с предложенной численной схемой для устранения таких ситуаций использован алгоритм «выключения» физических узлов сетки конечных элементов при достижении в них значения меры $\omega = \omega_f$. Изменения необратимых деформаций, меры повреждения $\Delta\omega$ и напряжения $\bar{\sigma}_{ij}$ в таком узле принимаются равными нулю, а влияние трещины на окружающую зону материала компенсируется дополнительными силами, определяемыми параметрами Δd_{ij} , величина которых оказывается равной изменению полных деформаций в узле Δe_{ij} . Действительно, положив в (1) $\Delta e_{ij}^* = 0$ и $\omega = 1$ можно получить $\Delta d_{ij} = \Delta e_{ij}$, $\Delta \sigma_{ij} = 0$.

В четвертой главе приведены сведения о решении ряда тестовых задач. Результаты численных расчетов, полученные с помощью разработанных

моделей, алгоритмов и созданных на их основе программных средствах сравниваются с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Для оценки адекватности разработанных моделей и программных средств исследования процессов упруговязкопластического деформирования конструкций из нержавеющей стали с учетом зависимости механических свойств от повреждающей дозы облучения решен ряд задач исследования кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) призматического стержня, находящегося под действием равномерно распределенных по объему температурных и нейтронных полей. На один из торцов стержня накладываются кинематические граничные условия, исключающие перемещения стержня в осевом направлении, а другой торец находится под действием равномерно распределенных растягивающих нагрузок интенсивностью q (МПа). Материал – сталь X16H11M3.

В первой задаче процесс нагружения моделировался двумя этапами. На первом этапе осуществлялся мгновенный нагрев стержня до температуры $T=500^{\circ}\text{C}$, и растяжение поверхностной нагрузкой интенсивностью $q=275$ МПа. На втором этапе осуществлялось облучение стержня потоками нейтронов до значения повреждающей дозы $D=45$ сна. На рис. 1 приведены графики продольных деформаций (деформация с первого этапа+радиационное формоизменение+радиационная ползучесть) стержня в зависимости от уровня облучения. Значению $D=0$ соответствует деформация, полученная в конце первого этапа нагружения. Аналитическое решение показано сплошной линией, а численное отмечено точками.

Верификация модели пластичности осуществлялась путем сравнения диаграммы деформирования материала, построенной по экспериментальным данным, с диаграммой деформирования, полученной расчетным путем по разработанной модели. Результат решения одного из рассмотренных вариантов задачи представлен на рис. 2.

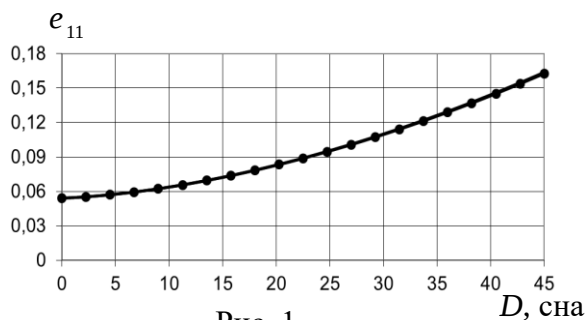


Рис. 1

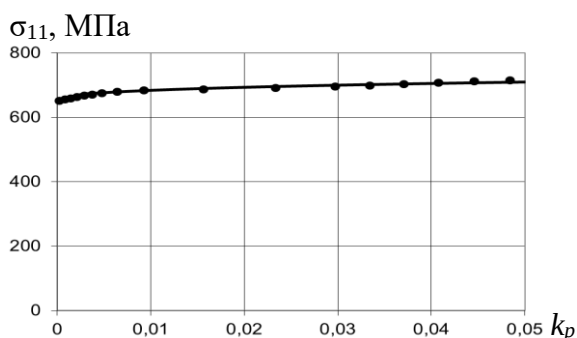


Рис. 2

В третьей тестовой задаче процесс нагружения также моделировался двумя этапами. На первом этапе осуществлялся мгновенный нагрев стержня до температуры $T=500^{\circ}\text{C}$, и растяжение поверхностной нагрузкой интенсивностью

$q=150$ МПа. На втором этапе осуществлялось облучение стержня потоками нейтронов до значения повреждающей дозы $D=4.563085$ сна за время $t=40000$ часов (такие условия нагружения выбраны из условия окончания к концу второго этапа первой стадии неустановившейся термической ползучести). На рис. 3 приведены графики деформаций термической ползучести в осевом направлении стержня в зависимости от времени. Аналитическое решение задачи показано сплошной линией, а численное отмечено точками.

В четвертой задаче верифицируется адекватность разработанной методики для описания совместных процессов пластического деформирования и термической ползучести. На первом этапе нагружения стержень нагревается до температуры $T=500^{\circ}\text{C}$ и растягивается поверхностной нагрузкой интенсивностью $q=166$ МПа. На втором этапе растягивающая нагрузка монотонно увеличивается до величины $q=236$ МПа за время $t=210000$ часов. Если второй этап нагружения разбить на 35 шагов, то приращение нагрузки будет равно 2 МПа, а длительность шага 6000 часов. Результаты решения задачи представлены на рис. 4 («аналитическое решение» – сплошные линии, численное решение – точки).

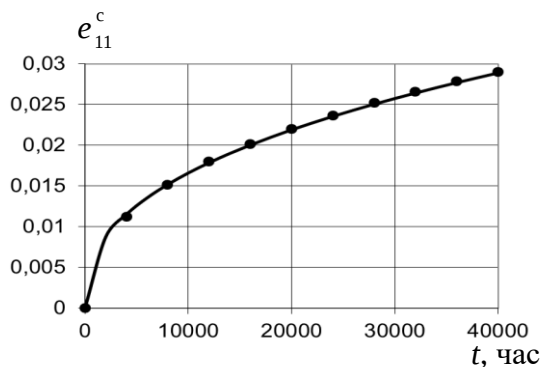


Рис. 3

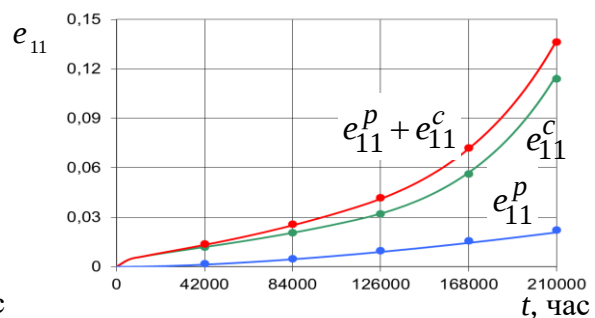


Рис. 4

Для оценки работоспособности предложенной модели многоциклового усталости и созданных на ее основе методик и программных средств выполнено численное исследование процессов многоциклового разрушения образца, который использовался для экспериментального изучения многоциклового усталости и получения необходимых материальных функций сплава ВЖ-159. Образец находился в условиях растяжения-сжатия осевыми силами, интенсивность которых меняется в цикле от минимальных $q_i^{\min}$ до максимальных $q_i^{\max}$ значений. Схема КЭ-дискретизации фрагмента образца изображена на рис. 5а. Рассмотрены варианты нагрузок, соответствующие различным значениям амплитуд напряжений и параметров асимметрии цикла.

Результаты расчета всех вариантов нагружений и сравнение их с соответствующими результатами эксперимента приведены на рис. 5б. Для одного из вариантов нагрузки на рис. 5в показана картина прогнозируемого

распределения функции поврежденности в продольном сечении фрагмента образца к моменту разрушения материала в наиболее нагруженной его точке, соответствующего числу циклов $N = N_f = 990694$. Сплошными линиями на рисунке изображены экспериментальные зависимости предельного числа циклов N_f от амплитуд напряжений σ_a при различных значениях параметра асимметрии r , результаты численного решения – точками.

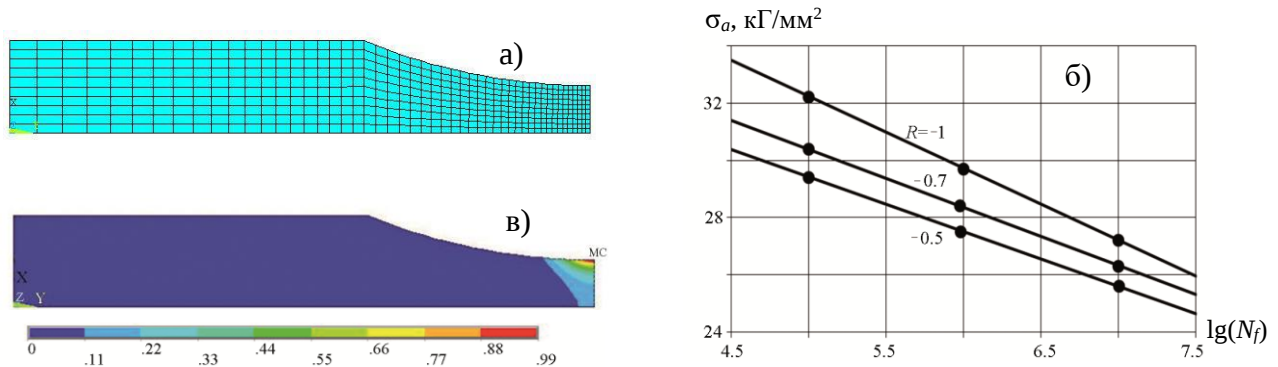


Рис. 5

Приведенные материалы показывают хорошее согласование результатов численных решений с экспериментальными данными (максимальная разница в прогнозе N_f составляет $\delta \approx 5\%$), что позволяет судить о высокой эффективности предложенной методики и работоспособности созданных программных средств.

Оценка применимости разработанной методики моделирования процессов зарождения и развития трещин в условиях ползучести выполнена на задаче численного исследования закономерностей развития трещин в цилиндрическом образце с концентратором из жаропрочного сплава ВЖ-159, в условиях осевого растяжения при температуре $T=850^0$ С.

Форма концентратора в образце выбрана в виде острого надреза, не имеющего какого либо скругления. Согласно теории коэффициент концентрации напряжений (ККН) в таком надрезе должен стремиться к бесконечности. Однако, согласно Нейберу ККН в остром надрезе конечен и соответствует значению такого коэффициента в надрезе со скруглением, радиус которого определяется структурой материала. Причем, значение такого ККН можно получить при использовании надреза с острым углом при использовании достаточно грубой сетки КЭ. Разрушение образца рассматривается как вязкое, за счет развития деформаций ползучести, без учета возможных эффектов хрупких повреждений.

Численные исследования проводились для ряда вариантов расчета, отличающихся значением растягивающих усилий p , параметрами КЭ дискретизации при неизменных размерах и формы образца и значениями

коэффициентов концентрации напряжений в районе выреза, обусловленных используемой схемой дискретизации. При фиксированном значении растягивающих усилий p установлено, что для всех рассмотренных вариантов КЭ-дискретизации расчетной области трещина развивалась по сечению образца от концентратора к его оси. Время начало разрушения (зарождения трещины) для каждого варианта было различным и зависело от соответствующего значения коэффициента концентрации напряжений K_σ . Показано, что по мере сгущения сетки КЭ вдоль траектории развития трещины расчетные кривые (длина трещины в зависимости от времени выдержки) приближаются к графику для наиболее мелкого разбиения.

Также было рассмотрено влияние уровня приложенной нагрузки p на закономерности развития трещины в образце. Результаты расчетов показывают, что увеличение растягивающей нагрузки приводит к уменьшению времени до момента образования трещины, увеличению скорости и сокращению времени ее устойчивого роста.

Адекватность предлагаемого варианта модели пластичности для описания процессов деформирования в условиях мягкого несимметричного нагружения (амплитудные значения напряжений в цикле $p_{\max} = 300 \text{ МПа}$ и $p_{\min} = -230 \text{ МПа}$) подтверждается результатами численного моделирования, согласующимися с соответствующими экспериментальными данными. На рис. 6 приведены зависимости смещения петли $\Delta l(n) = l(n) - l(50)$ от числа циклов нагружения n . Закономерности изменения размаха полных деформаций $h(n)$ в цикле в процессе нагружения представлены на рис. 7. Результаты численного моделирования на рис. 6 и рис. 7 обозначены сплошными линиями, экспериментальные результаты – точками.

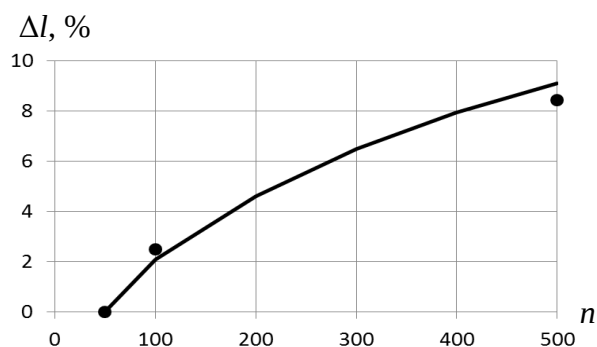


Рис. 6

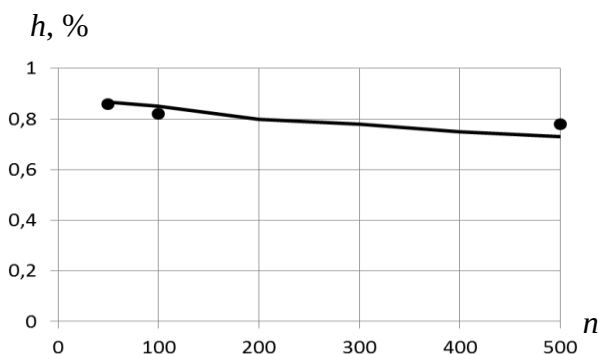


Рис. 7

Приведенные результаты показывают, что предложенная модель позволяет достаточно хорошо описать основные эффекты пластического деформирования рассмотренного материала при мягких несимметричных нагружениях при $n \leq 500$ циклов.

Пятая глава посвящена численному исследованию необратимого деформирования и разрушения элементов конструкций с помощью разработанных методического и программного обеспечения..

С целью иллюстрации применения предлагаемой методологии для моделирования процессов зарождения и развития трещин ниже представлены результаты численного моделирования процессов упругопластического деформирования, зарождения и развития трещин в экспериментальном образце с концентратором в условиях плоского изгиба.

Численный анализ процессов деформирования и разрушения образца осуществлялся в пространственной постановке для симметричной 1/4 его части с использованием изопараметрических двадцатиузловых конечных элементов.

Параметры дискретизации процесса нагружения выбирались на основе проведения предварительных расчетов из условия удовлетворительного описания кривой $P-V$ (V – вертикальное смещение верхней точки центрального сечения образца), характеризующей процесс разрушения образца. В результате шаг по нагрузке был выбран равным $\Delta V \approx V_M / 21$, где $V_M = 1.051$ мм – вертикальное смещение верхней точки центрального сечения образца (контролируемой точки), соответствующее максимальному значению силы P в эксперименте, а в качестве параметра, характеризующего процесс нагружения, выбрана величина $t = V/V_M$.

При моделировании процесса разрушения образца рассмотрены два варианта накопления повреждений.

В первом процесс накопления повреждений определялся только пластическими повреждениями, а во втором реализовалась возможность совместного учета накопления повреждений, вызванных эффектами пластичности и хрупкого разрушения.

При значениях параметра нагрузки $t \leq 1.0$ результаты расчетов для двух вариантов полностью совпадали, поскольку значения главных растягивающих напряжений в наиболее нагруженной точке образца не превышали соответствующих критериальных значений. При дальнейшем увеличении нагрузки $t \geq 1.0$, согласно первому варианту расчета, в образце продолжался рост пластических деформаций и пластических повреждений без заметного изменения размера самой зоны, сопровождающийся интенсивным ростом величин главных растягивающих напряжений.

Для второго варианта при $t \geq 1.0$ в объеме материала образца, на некотором удалении от свободной поверхности, появилась зона хрупкого накопления повреждений, конфигурацию и размер которой можно увидеть на Рис. 8а уже при $t = 1.0$. К моменту нагружения $t = 1.05$ размер этой зоны увеличился, а мера повреждений достигла величины $\omega \approx 0.31$, превысив

максимальное значение поврежденности в пластической зоне (см. рис. 8б). При дальнейшем увеличении параметра нагружения $t \geq 1.1$ мера поврежденности в этой зоне достигла предельного значения $\omega = 0.99$, что привело к зарождению магистральной трещины, которая начала интенсивно развиваться вдоль центрального сечения образца, захватив при $t \approx 1.1$ более половины толщины образца. Картины развития трещины для моментов нагружения $t \approx 1.05$ и 1.1 показаны на рис. 8б и рис. 8в, соответственно.

Фотография разрушенного в результате эксперимента образца представлена на рис. 8г.

Процесс развития трещины сопровождался прогрессирующим падением силы P . График зависимости силы P от перемещения контролируемой точки V , построенный на основе результатов численного моделирования, для обоих вариантов показан на рис. 9 в виде точечной и штриховой линий, отмеченных цифрами 1 и 2, соответственно. Аналогичная экспериментальная кривая изображена на этом же рисунке сплошной линией.

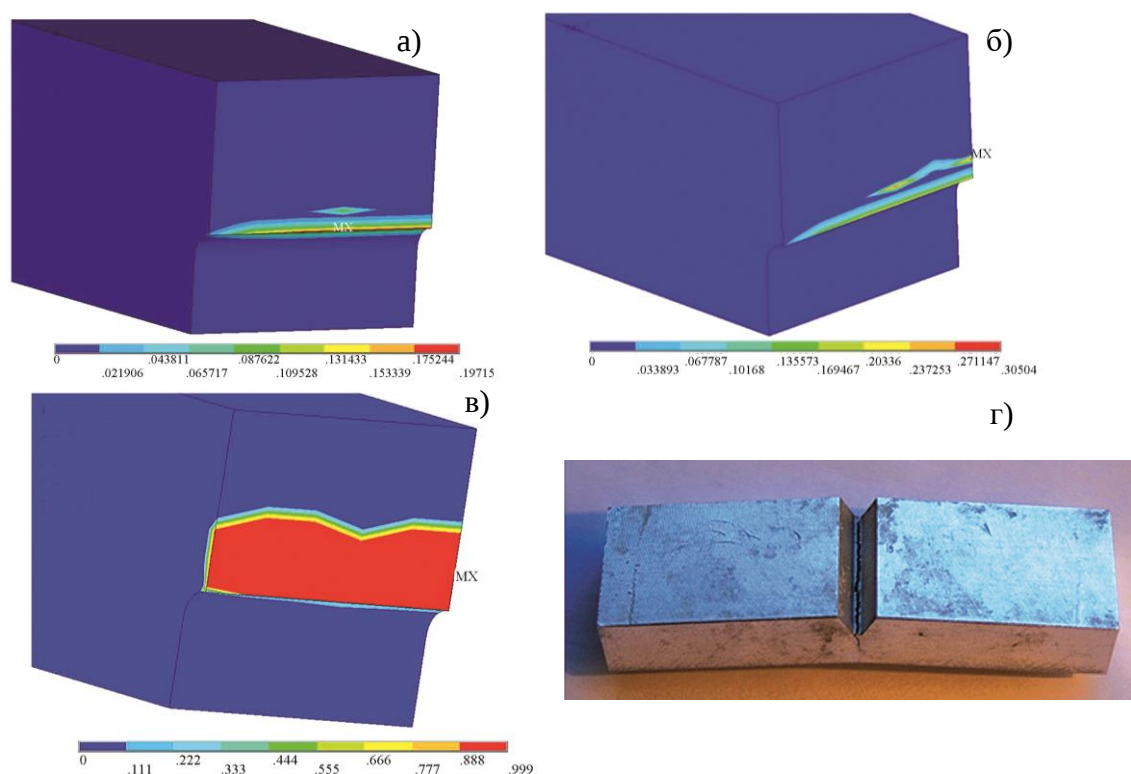


Рис. 8

Из графиков видно, что в эксперименте максимальная нагрузка, воспринимаемая образцом, оказалась равной $P = 853$ кГ при значении перемещения контролируемой точки $V = 1.051$ мм. Для первого варианта на всем протяжении процесса сила возрастала и, судя по поведению графика, предельного значения она могла достигнуть при $t > 1.8-2.2$. Результаты расчета, полученные на основе второго варианта, достаточно хорошо согласуются с

экспериментальными. Предельная сила здесь оказалась равной $P \approx 880$ кГ при перемещении контролируемой точки $V \approx 1.08$ мм, причем ниспадающий участок кривой практически совпал с аналогичным участком в эксперименте.

Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные кривые, полученные для образца, толщина которого (и нагрузка соответственно) уменьшена в десять раз. График, помеченный цифрой 3, соответствует упругопластическому разрушению, цифрой 4 – варианту с учетом хрупкого разрушения.

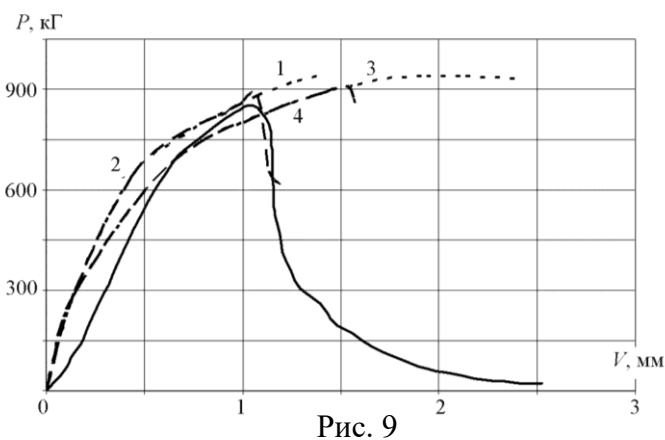


Рис. 9

Поскольку вид НДС в таком «узком» образце соответствует условиям меньшей стесненности процесса пластического деформирования, пластические деформации в нем появляются раньше и развиваются более интенсивно, чем в широком. Максимальная сила в нем $P \approx 940$ кГ при пластическом разрушении достигается для $t \approx 2.0$ ($V \approx 2.1$ мм), а при хрупком – для $t \approx 1.46$ ($P \approx 909$ кГ, $V \approx 1.53$ мм). Иначе говоря, с уменьшением стесненности пластического деформирования в материале увеличивается доля пластического разрушения.

Таким образом, приведенные материалы позволяют судить о том, что результаты численного моделирования процесса разрушения, полученные на основе одновременного учета в процессе разрушения пластических и хрупких повреждений, достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Максимальное значение силы P , отличающееся в расчете от экспериментального значения на величину $\delta \approx 3\%$, достигается в расчете и эксперименте при перемещениях, отличающихся не более чем на 3.6%. Характер излома образца, представленного на рис. 8г, подтверждает присутствие в процессе разрушения эффектов хрупкого разрушения.

С целью оценки работоспособности и вычислительной эффективности алгоритма прогнозирования процессов развития повреждений при малоцикловых нагружениях выполнено численное исследование процессов малоциклового деформирования и разрушения цилиндрического образца, выполненного из нержавеющей стали 12X18H10T, с кольцевой выточкой, расположенной в среднем по длине образца. Длина рабочей части образца $L=30$ мм, диаметр рабочей части $\varnothing=58$ мм, радиус выточки $R=8.5$ мм.

В результате проведенных исследований было установлено, что на первом цикле нагружения при значении $u_x = 0.019$ мм в наиболее нагруженной точке, расположенной на наружной поверхности центрального сечения образца

(в дальнейшем точка B), появились пластические деформации, которые к концу первой четверти цикла при $u_x = +0.095\text{мм}$ (в дальнейшем - максимальной точки цикла) охватили практически все сечение образца.

При дальнейшем нагружении зона пластичности распространялась по объему образца и стабилизировалась при $n \approx 15$ циклов.

В результате решения первого варианта задачи было установлено, что в точке B первая стадия накопления повреждений завершилась при $N_1^1 = 740$ циклов, причем при дальнейшем увеличении числа циклов процесс повреждений в этой точке развивался наиболее интенсивно. При значении $n = N_f^1 = 1040$ циклов мера поврежденности в этой точке достигла предельного значения $\omega \geq 0.99$.

Для второго варианта задачи экстраполяция параметров процесса была произведена при $n = N_0^2 = 20$ циклов на $n = N_E^2 = 750$ циклов, после чего, при $n = N_1^2 = 770$ циклов, в точке B завершилась первая стадия накопления повреждений. Прогнозируемое число циклов до разрушения материала в этой точке оказалось равным $n = N_f^2 = 1067$.

Для рассматриваемой задачи с помощью такого алгоритма удалось сэкономить более 70% трудоемкости вычислительного процесса, необходимой для определения начала малоциклового разрушения образца.

Исследование процесса дальнейшего разрушения образца осуществлялось на основе продолжения решения второго варианта задачи для третьей стадии разрушения с использованием рассмотренного выше алгоритма моделирования развития магистральных трещин. После завершения второй стадии разрушения материала образца в точке B , с увеличением числа циклов, поврежденность развивалась в виде магистральной трещины вдоль поперечного сечения средней части образца. Конфигурации трещины для циклов $n = 1122, 1181$ и 1237 , соответствующих различным уровням продвижения трещины, изображены на рис. 10.

Предельное число циклов до полного разрушения образца (потери несущей способности) составило $N_f \approx 1250$ циклов.

Для демонстрации возможностей разработанных средств оценки многоциклового прочностных элементов конструкций представлены результаты моделирования накопления повреждений усталости в сильфоне, общий вид и схема дискретизации которого изображены на рис. 11. Было рассмотрено два варианта циклического нагружения. Симметричный цикл без учета внутреннего давления и асимметричный цикл с учетом внутреннего давления.

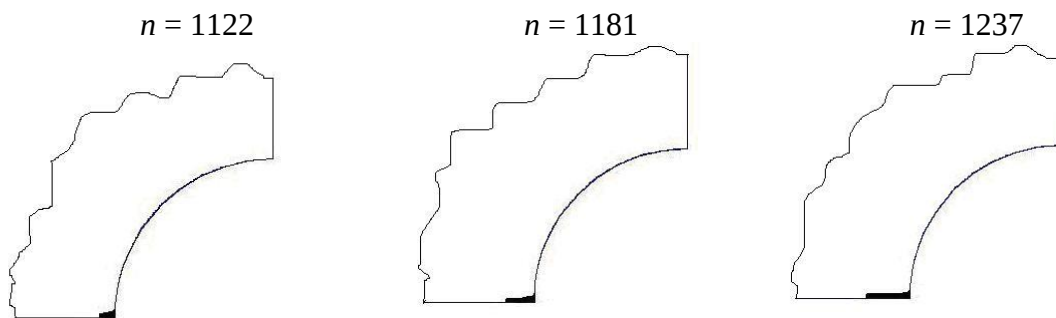


Рис. 10

Во втором варианте цикл состоит из трех этапов нагружения, однако перед циклическим нагружением к фрагменту сильфона прикладывается внутреннее давление:

- приложение внутреннего давления величиной $p = 0.05 \text{ кГ/мм}^2$ при неизменном положении левого торца ($\Delta u = 0.0 \text{ мм}$) (этап 1);
- смещение левого торца на величину $\Delta u = 0.6 \text{ мм}$ (при постоянном давлении $p = 0.05 \text{ кГ/мм}^2$) (этап 2);
- смещение левого торца на величину $\Delta u = -0.6 \text{ мм}$ (при постоянном давлении $p = 0.05 \text{ кГ/мм}^2$) (этап 3);
- возвращение левого торца в исходное состояние $\Delta u = 0.0 \text{ мм}$ (при постоянном давлении $p = 0.05 \text{ кГ/мм}^2$) (этап 4).

Таким образом, в данном варианте задачи цикл нагружения состоит из этапов нагружения 2, 3 и 4.

Прогнозируемое число циклов до разрушения составило $N_f = 894324$.

Картина распределения значений параметра поврежденности, соответствующая полученному числу циклов до разрушения, изображена на рис. 12.

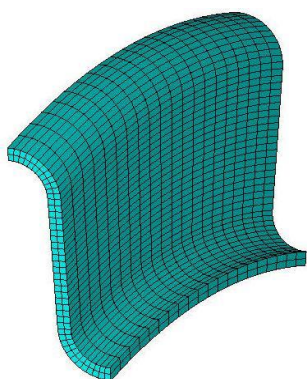


Рис. 11

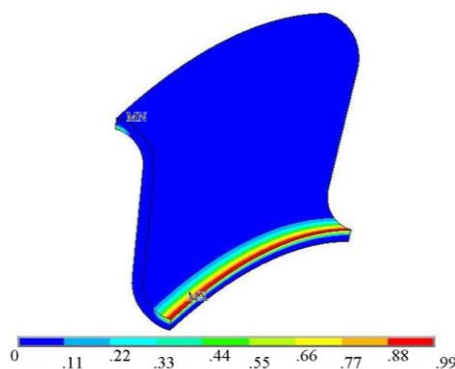


Рис. 12

С помощью разработанных методических и программных средств решена практически важная задача расчета НДС обечайки отражателя реактора БН-800 (сталь X16H11M3) при терморadiaционном нагружении. Конечно-элементная модель обечайки изображена на рис. 13а. Температурное поле в обечайке

распределено равномерно в окружном направлении, нелинейно меняется по ее высоте от $T = 355^{\circ}\text{C}$ до $T = 456^{\circ}\text{C}$. Повреждающая доза монотонно увеличивается от нуля до максимальных значений в течении 45 лет. Процесс нагружения моделировался двумя этапами нагружения: 1 – мгновенный прогрев до заданной температуры; 2 – облучение потоком нейтронов (90 подэтапов нагружения). Расчет НДС обечайки производился с учетом увеличенной в 2.0 раза скорости свободного радиационного распухания $\dot{S}_0$. Термическая ползучесть не учитывается.

Результаты численного моделирования (интенсивность напряжений) для моментов времени 0, 25 и 45 лет представлены соответственно на рис. 13б, 13в и 13г.

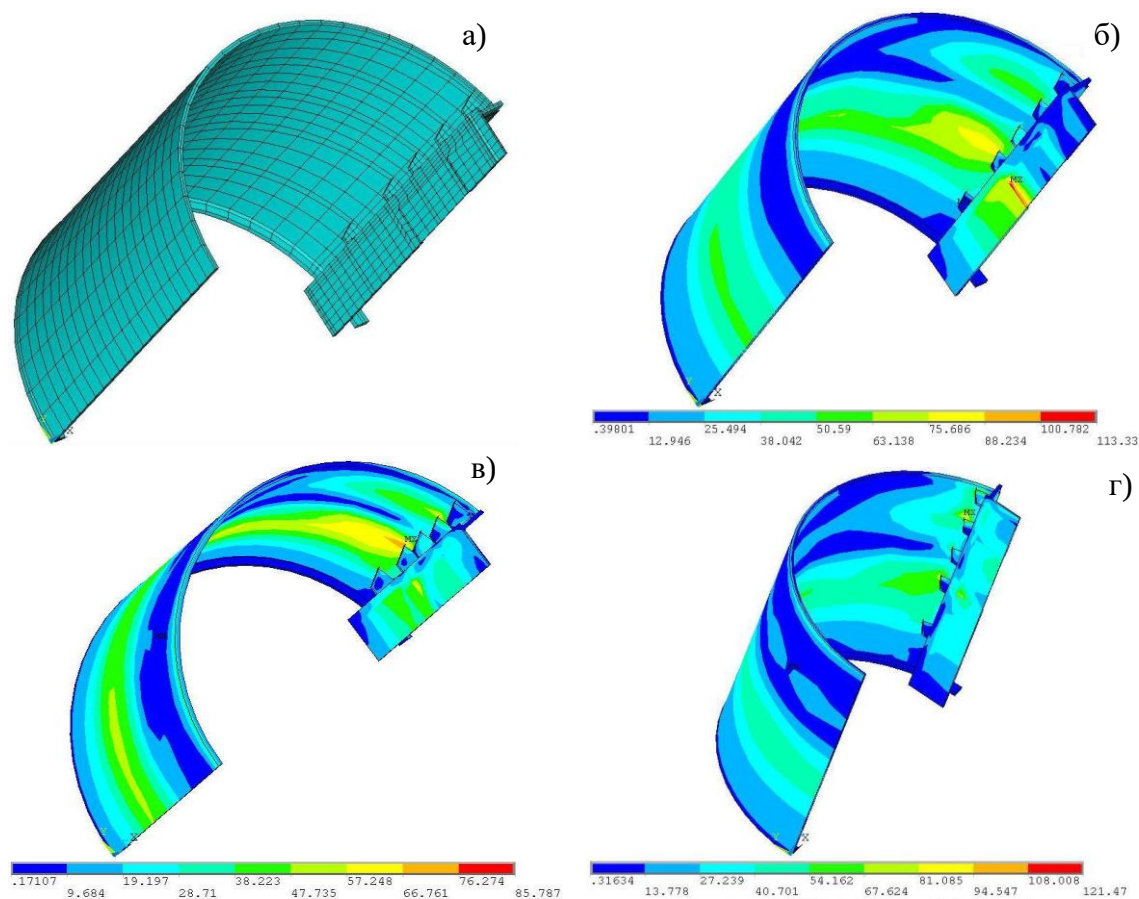


Рис. 13

Также был выполнен сравнительный анализ радиационно-термического формоизменения обечайки реакторов БН-800 и БН-600 (сталь X18Н9).

По результатам расчетов установлено, что при эксплуатации в течение 45 лет необратимые размерные изменения несущей обечайки отражателя реактора БН-800, изготавливаемой из стали X16Н11М3, значительно меньше, чем для несущей обечайки отражателя реактора БН-600 из стали X18Н9. Качественная картина формоизменения несущих обечаек этих отражателей (например,

выгибание наружу или внутрь в зоне максимального флюенса) также существенно различается, что обусловлено их конструктивными отличиями.

При этом формоизменение за счет влияния облучения как для отражателя реактора БН-800, так и отражателя БН-600 не приводит к потере работоспособности в течение 45 лет эксплуатации связанного с ними оборудования: сборок активной зоны, элеваторов загрузки-выгрузки и механизма перегрузки.

В заключении сформулированы итоги выполненного исследования:

1. Предложен вариант составной иерархической модели поврежденного материала, представляющей собой набор частных моделей пластичности, ползучести и накопления повреждений, настраиваемых на описание конкретного механического процесса в зависимости от наличия необходимых свойств исследуемого материала и условий решаемой задачи, позволяющий исследовать взаимосвязанные процессы деформирования и разрушения конструкционных материалов при различных режимах термосилового, циклического и радиационного воздействий.

2. На основе экспериментальных данных о закономерностях деформирования нержавеющей стали при термосиловых и радиационных воздействиях предложена модель упруговязкопластического деформирования материала, учитывающая радиационные ползучесть и набухание, зависимость свойств упругости, пластичности и термоползучести от температуры и повреждающей дозы облучения.

3. Предложен вариант модели пластичности с комбинированным упрочнением для исследования малоцикловых процессов деформирования нержавеющей стали, позволяющий описывать закономерности поведения материалов при мягких несимметричных нагружениях.

4. На основе энергетических критериев разрушения и концепции механики поврежденной среды, разработана модель многоциклового усталости, учитывающая зависимость числа циклов до разрушения от уровня действующей температуры, параметра асимметрии цикла, реализуемого в цикле вида НДС, накопленной поврежденности.

5. Разработаны алгоритмы и численные схемы, реализующие предложенные модели механического поведения материалов при терморadiационных и циклических воздействиях в задачах расчета прочности конструкций на основе МКЭ.

6. В рамках подходов механики поврежденной среды разработаны алгоритмы прогнозирования образования и развития повреждений в материале конструкций при мало- и многоцикловом нагружении.

7. Предложена численная схема, обеспечивающая возможность моделировать в рамках соотношений механики поврежденной среды процессы зарождения и развития трещин без изменения исходной топологии конструкции и схемы ее КЭ-дискретизации.

8. Выполнена реализация предложенных моделей и численных схем в составе программных средств вычислительного комплекса УПАКС решения на основе МКЭ задач нелинейного деформирования и разрушения конструкций при квазистатических многофакторных воздействиях.

9. Эффективность предложенных алгоритмов прогнозирования накопления повреждений подтверждена результатами численных исследований.

10. Оценка работоспособности и применимости разработанных методик при решении задач оценки многоциклового прочностных конструкций выполнена путем сопоставления результатов численных расчетов с экспериментальными данными о разрушении лабораторных образцов при повышенной температуре для различных значений параметров асимметрии цикла.

11. Результаты численных исследований малоциклового деформирования на основе предложенного варианта модели пластичности подтвердили ее работоспособность при различных режимах нагружений (жесткие, мягкие, симметричные, несимметричные).

12. С помощью разработанных методических и программных средств выполнено решение ряда демонстрационных задач исследования процессов деформирования и разрушения ряда элементов конструкций:

- экспериментального образца с концентратором в условиях плоского изгиба;
- цилиндрического образца с выточкой при малоцикловом нагружении;
- фрагмента сильфона в условиях высокотемпературного многоциклового нагружения.

13. Разработанные методика и программные средства исследования упруговязкопластического деформирования конструкций при терморadiационных нагружениях позволила решить практически важные задачи изучения закономерностей поведения конструктивных элементов ЯЭУ. Установлено, что в течение запланированного срока службы, условия эксплуатации оборудования (повышенные температуры и нейтронное облучение) не приведут к потере его работоспособности.

14. Развитие исследований в рамках тематики настоящей работы можно вести в направлениях:

- дальнейшей экспериментальной проверки и обоснования разработанных методических и программных средств;
- совершенствования предложенных в работе моделей при получении новых экспериментальных данных;
- практического использования разработанных методических и программных средств для решения актуальных задач оценки прочности и ресурса конструкций.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России

1. Капустин С.А., Горохов В.А., Пантелеев В.Ю., Чурилов Ю.А. Численное моделирование процессов зарождения и развития трещин на основе соотношений механики поврежденной среды // Проблемы прочности и пластичности. – 2009. – Вып. 71. – С. 36–44.
2. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А. Численное моделирование процесса разрушения экспериментального образца с концентратором в условиях плоского изгиба // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 6. – С. 47–53.
3. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Зверев Д.Л., Гуленко А.Г., Сорокин А.А. Верификация методических и программных средств численного исследования напряженно-деформированного состояния конструкций из стали типа Х16Н11М3 при квазистатических терморadiационных нагружениях // Проблемы прочности и пластичности. – 2010. – Вып. 72. – С. 36–45.
4. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А. Модели и алгоритмы прогнозирования процессов зарождения и развития трещин в элементах конструкций при монотонных и малоцикловых термосиловых нагружениях // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4(4). – С. 1515–1517.
5. Капустин С.А., Горохов В.А., Васильев Б.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Осетров Д.Л., Марголин Б.З., Гуленко А.Г. Сравнительный анализ радиационно-термического формоизменения отражателей реакторов БН-660 и БН-800 по результатам численного моделирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 6. – С. 99–107.
6. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А. Алгоритмы прогнозирования малоциклового прочностного состояния конструкций на основе МКЭ // Проблемы прочности и пластичности. – 2011. – Вып. 73. – С. 13–24.
7. Капустин С.А., Горохов В.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Руин А.А. Соотношения модели поврежденной среды для материалов, подвергающихся терморadiационным воздействиям // Проблемы прочности и пластичности. – 2012. – Вып. 74. – С. 5–15.

8. Антипов А.А., Горохов А.Н., Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А. Экспериментально-теоретическое исследование усталости материалов и конструкций в условиях высокотемпературных многоцикловых нагружений // Проблемы прочности и пластичности. – 2014. – Вып. 76(1). – С. 26–38.
9. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A. Models and prediction algorithms of fracture of structural elements for low- and high-cycle loading based on FEM // Materials Physics and Mechanics. – 2015. – V. 23. – P. 79–82.
10. Антипов А.А., Горохов А.Н., Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А. Экспериментально-теоретическое изучение многоциклового разрушения элементов конструкций из сплава ВЖ-159 // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 1. – С. 29–36.
11. Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Алгоритмы численного моделирования процессов деформирования и разрушения конструкций в рамках соотношений механики поврежденной среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 86–105.
12. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Численное моделирование процессов пластического деформирования и накопления повреждений в материалах конструкций при различных режимах малоциклового нагружения // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58. – № 3. – С. 98–107.
13. Горохов В.А., Капустин С.А., Миронов А.А., Чурилов Ю.А. Конечно-элементное моделирование развития трещины в образце с концентратором в условиях высокотемпературной ползучести // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т. 79. – № 3. – С. 312–326.

Монография

14. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ: монография. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2015. – 347 с. ISBN 978-5-91326-342-1

Материалы докладов на научных конференциях

15. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях квазистатических термосиловых и терморadiационных воздействий // Труды III школы-семинара «Современные проблемы ресурса материалов и конструкций». – Москва: МАМИ. – 2009. – С. 90–104.
16. Капустин С.А., Горохов В.А., Пантелеев В.Ю., Чурилов Ю.А. Численное моделирование на основе МКЭ квазистатических процессов деформирования и разрушения конструкций при термосиловых и терморadiационных воздействиях // Труды XXIII Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов». Санкт-Петербург, 2009. – С. 176–181.
17. Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Осетров Д.Л., Капустин С.А., Горохов В.А. Сравнительный анализ радиационно-термического формоизменения

отражателей реакторов БН-600 (сталь Х18Н9) и БН-800 (сталь Х16Н11М3) // Тезисы докладов одиннадцатой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Санкт-Петербург: ЦНИИ КМ «Прометей», 2010. – С. 86–87.

18. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Ширяев Д.Д. Численное моделирование процессов зарождения и развития трещин в конструкциях при монотонных и малоцикловых нагружениях // Материалы XVIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО “ТР-Принт”, 2012. – С. 65 – 66.

19. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Ширяев Д.Д. Моделирование на основе МКЭ процессов зарождения и развития трещин в элементах конструкций при квазистатических термосиловых нагружениях // Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ’2012), 25–31 мая 2012 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ. – С. 339 – 340.

20. Капустин С.А., Горохов В.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Руин А.А. Перспективы построения модели накопления повреждений в аустенитных сталях в условиях терморadiационных воздействий // Сборник тезисов Двенадцатой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Т. 3. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 187–195.

21. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Реализация моделей механики поврежденной среды в пакете ЛЭГАК-ДК для исследования квазистатических процессов деформирования и разрушения конструкций // Тезисы XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», 1–5 октября 2012 г., Саров: ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – С. 103–105.

22. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Моделирование процессов усталости конструкций при многоцикловых квазистатических термосиловых нагружениях // 53 Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности», 2–5 октября 2012 г. Витебск, Беларусь: сборник материалов. Ч.1. / УО «ВГТУ» – Витебск, 2012. – С. 215–217.

23. Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Экспериментально-теоретическое исследование усталости конструкций при многоцикловых квазистатических термосиловых нагружениях // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО “ТР-Принт”, 2013. – С. 69 – 71.

24. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Оценка усталости элементов конструкций при многоцикловых термосиловых нагружениях на основе соотношений механики поврежденной среды // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСPPС’2013), 22-31 мая 2013 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – С. 315–317.

25. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Численное моделирование усталости элементов конструкций при многоцикловых нагружениях на основе соотношений механики поврежденной среды // Форум молодых ученых: Тезисы докладов. Том 1. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2013. – С. 58 – 60.
26. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Алгоритм прогнозирования процесса разрушения при многоцикловых нагружениях для численного моделирования усталости конструкций в рамках соотношений механики поврежденной среды // Материалы X Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014), 25-31 мая 2014 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – С. 342 – 344.
27. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Моделирование на основе МКЭ развития трещин в конструкциях при многоцикловых нагружениях // Материалы 55-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». 9–13 июня 2014 года. Харьков, Украина: Сборник материалов / Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014. – С. 120.
28. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Численное исследование упругопластического деформирования и накопления повреждений в материалах при различных режимах малоцикловых нагружений // Материалы XIX международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2015), 24–31 мая 2015 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – С. 236–238.
29. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Численное решение квазистатических задач нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов. (Казань, 20 – 24 августа 2015 г.). – Казань: Издательство Академии наук РТ, 2015. – С. 81.
30. Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Численное моделирование высокотемпературной ползучести жаропрочных сплавов в условиях нейтронного облучения // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016), 25-31 мая 2016 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – С. 318 – 320.
31. Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Моделирование ползучести жаропрочных сплавов при высоких температурах и нейтронном облучении // Актуальные проблемы прочности: сборник тезисов LVII международной конференции, 24-27 мая, 2016 г. / СевГУ. – Севастополь, 2016. – С. 50.
32. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Моделирование развития трещин в элементах конструкций с концентратором в условиях высокотемпературной ползучести // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017), 24–31 мая 2017 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2017. – С. 217–219.

Подписано в печать 04.04.2018 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2. Заказ № 212. Тираж 100 экз.

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