

На правах рукописи

Завойчинская

ЗАВОЙЧИНСКАЯ Элеонора Борисовна

**УСТАЛОСТНОЕ МАСШТАБНО-СТРУКТУРНОЕ РАЗРУШЕНИЕ И
ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ
ПРОЦЕССАХ НАГРУЖЕНИЯ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре теории упругости механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Махутов Николай Андреевич, член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук, председатель Рабочей группы при Президенте РАН по анализу риска и безопасности, главный научный сотрудник Института машиноведения имени А.А. Благонравова (ИМаш РАН);

Арутюнян Роберт Ашотович, доктор физико-математических наук, профессор, Иностраный член НАН Республики Армения, профессор кафедры «Теория упругости» математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) ;

Морозов Евгений Михайлович, доктор технических наук, профессор, Почетный профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры «Физика прочности» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет».

Защита состоится 26 сентября 2018 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, дом 4, МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/doctor/index.php?ELEMENT_ID=88723.

Автореферат разослан «21» июня 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Федотенков Григорий Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и цели работы. Настоящая диссертация посвящена разработке актуальной научной проблемы создания критериев усталостного разрушения материалов и на их основе методов оценки долговечности и безопасной эксплуатации конструкций. Диссертация состоит из четырех глав и приложения, объединенных общей тематикой и методами исследований.

Предметом исследования являются процессы хрупкого усталостного разрушения металлов и сплавов, занимающие одно из основных мест в проблеме оценки долговечности конструкций.

Экспериментально-теоретические результаты системных исследований по физике твердого тела, металловедению, механике деформируемого твердого тела представлены в работах Л.Р. Ботвиной, В.С. Ивановой, Н.А. Махутова, Н.Ф. Морозова, Е.М. Морозова, Р.А. Арутюняна, В.В. Болотина, В.И. Бетехтина, Ю.Н. Работнова, С.А. Головина, И.И. Новикова, А.М. Глезера, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова, С.Д. Волкова, С.Н. Журкова, В.Е. Панина, А.А. Шанявского, В.Т. Трощенко, В.А. Ермишкина, В.В. Панасюка, С.Я. Яремы, Г.П. Карзова, Г.П. Черепанова, Б.Л. Авербаха, Дж. Богданоффа, Д. Броека, М.В. Брауна, Т. Екобори, Х. Зеннера, Дж.Р. Райса, С. Ивасимидзу, Ф. Козина, Дж. Коллинза, С. Коцаньды, А.Х. Коттрелла, У. Делингера, У. Круппа, Л. Кубина, Д. МакДауэлла, Э. Маха, К. Дж. Миллера, Х. Муграби, Й. Мураками, Х. Китагавы, М. Такахаши, С. Нишида, Й. Окамото, М. Онами, А. Пино, Р.П. Скелтона, С. Сонсино, Д. Соси, А. Спаньолли, С. Сила, Р. Томсона, А. Фатеми, П. Форреста, С. Хоси, Дж. Сиха, Дж. Нотта, Е.О.Орвана, С.Таира, М.Танаки, К. Хеллана и др.

Целью **Главы 1** является обоснование требований к создаваемой теории усталостного разрушения, в том числе необходимости учитывать развитие процессов последовательного усталостного разрушения на различных масштабных структурных уровнях. Проводится анализ результатов обширных экспериментальных исследований и современных теорий усталостного разрушения для представительного ряда углеродистых, легированных, нержавеющей, коррозионно-стойких, аустенитно-мартенситных сталей; черных и цветных металлов; чугунов; никелевых, алюминиевых, титановых сплавов.

Стадийный процесс усталостного разрушения связан с эволюцией структуры металла. Усталостное разрушение представляет собой многоуровневый и разномасштабный кинетический процесс и характеризуется обязательным прохождением стадий образования полосовых субструктур, микротрещин, формированием коротких и макротрещин. При этом каждая стадия контролируется своими физическими механизмами, и процесс разрушения происходит в результате взаимодействия объектов, имеющих разный масштабный уровень от атомного до мезо- и макроскопического. Случайные распределения по объему дефектов делают процесс усталостного разрушения стохастическим и возникает необходимость вероятностного подхода при его описании.

Целью настоящей работы является построение феноменологической теории усталостного разрушения металлов при сложном напряженном состоянии в рамках механики деформируемого твердого тела, в которой формулируются определяющие соотношения, позволяющие находить вероятность достижения дефектами каждого уровня определенных предельных состояний и образования дефектов последующих уровней, что дает возможность построить кривую усталости металла по определенному уровню накопленных дефектов. Этому посвящены вторая и третья главы диссертации.

В **Главе 2** формулируется система гипотез о развитии дефектов на микро-, мезо- и макроуровне и на их основе строится теория усталостного масштабноструктурного разрушения металлов при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении, охватывающая весь поэтапный процесс разрушения с выделением соответствующего типичного состояния – дефекта определенного масштабноструктурного уровня и описывающая вероятность разрушения на каждом уровне системой рекуррентных определяющих соотношений.

Глава 3 посвящена математическому моделированию развития процессов хрупкого усталостного разрушения металлов и сплавов при трехмерном пропорциональном нагружении. Формулируются определяющие соотношения для функций вероятности разрушения, материальные функции которых выбираются на основе современных теорий усталостной прочности.

Тематически работа охватывает широкий круг современных проблем, связан-

ных с оценкой долговечности и безопасной эксплуатации конструкций с учетом анализа образования и развития дефектов в их конструктивных элементах. Современная промышленность предъявляет высокие требования к оценке долговечности и остаточного срока службы конструктивных элементов по уровню накопленных в них дефектов. Для решения этой задачи возникает необходимость построить теорию усталостного разрушения на различных масштабных структурных уровнях.

Рассматриваемые в Главе 4 и Приложении вопросы мотивированы рядом прикладных задач по расчету долговечности и безопасной эксплуатации различных участков магистральных нефте- и газопроводов.

В **Главе 4** в рамках проблемы оценки безопасности протяженных конструкций предлагается критерий конструктивной надежности с учетом антропогенного фактора.

В **Приложении** излагается метод оценки сроков безопасной эксплуатации конструкций нефте- и газопроводов, основанный на разработанных критерии конструктивной надежности и критерии масштабного разрушения.

Методы исследований. В диссертации сделана попытка объединить методы физики твердого тела и механики деформируемого твердого тела при решении задач усталостного разрушения материалов и элементов конструкций.

Предлагаемая математическая модель усталостного разрушения при построении определяющих соотношений использует понятия, материальные функции и методы механики деформируемого твердого тела. Основными понятиями являются вероятность разрушения конструктивных элементов по дефектам определенного масштабного структурного уровня и вероятности разрушения конструкции с учетом антропогенного фактора.

Построение критериев усталостного разрушения основывается на анализе развития усталостного разрушения на разных масштабных структурных уровнях.

Для верификации полученных теоретических результатов применялись данные физических методов исследований структуры металлов и механизмов развития разрушения и стандартных испытаний на усталостную прочность и методы вычислительного эксперимента.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

Впервые построена теория усталостного разрушения металлов для пропорциональных (простых) нагружений при сложном напряженном состоянии, охватывающая весь поэтапный процесс последовательного образования, развития и слияния дефектов на характерных масштабных-структурных уровнях разрушения. Теория описывает вероятность хрупкого разрушения на каждом уровне системой рекуррентных определяющих соотношений.

Вначале в Главе 2 выписываются определяющие соотношения для трех базовых видов плоского напряженного состояния: симметричных одноосного и двухосного равномерного нагружений и сдвига. В них в качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения, и предлагается методика определения базовых констант модели по данным стандартных усталостных испытаний с учетом результатов проведенного анализа физических закономерностей по развитию хрупких трещин.

Следующим шагом формулируются определяющие соотношения теории для одноосного и двухосного равномерного нагружения и сдвига с несимметричным циклом напряжения. В этом случае материальные функции модели определяются по данным стандартных усталостных испытаний при симметричных нагружениях, а зависимость от параметра асимметрии цикла учитывается в соответствии с известными критериями усталостной прочности металлов.

И, наконец, для трехмерных пропорциональных нагружений в качестве переменной также выбирается амплитуда максимального главного напряжения, при этом материальные функции учитывают отношение главных напряжений и параметр асимметрии цикла в соответствии с известными теориями усталостной прочности. Формулируется условие для определения момента начала развития дефектов каждого уровня и долговечности металла по дефектам мезоуровня. Впервые получена кривая усталости металла для трехмерных нагружений как результат эволюции микро- и мезодефектов.

Предложенная математическая модель хрупкого усталостного разрушения металлов может быть рассмотрена как теоретическая основа планирования экспериментов по исследованию фундаментальных механических свойств в зависимо-

сти от структурных закономерностей и физических механизмов усталостного разрушения на разных масштабно-структурных уровнях.

В проблеме оценки долговечности конструкций в Главе 4 впервые сформулирован критерий безопасной эксплуатации конструкций в наиболее общем виде, как обобщение известных подходов, используемых в расчетной практике.

Впервые построен и реализован метод оценки сроков безопасной эксплуатации и остаточной долговечности участков магистральных газо- и нефтепроводов, основанный на разработанном критерии безопасности эксплуатации участков и предложенной теории поэтапного разрушения их конструктивных элементов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- система гипотез, отражающая физические закономерности стадийного процесса изменения структуры металла и развития усталостных микро- и макротрещин;
- теория усталостного разрушения металлов при пропорциональном (простом) процессе нагружения с симметричным и несимметричным циклами напряжений как новая теория в рамках физико-механического подхода к описанию закономерностей процесса усталостного разрушения;
- критерий конструктивной надежности с учетом антропогенного фактора на основе разработанных критериев социальной, промышленной и экологической безопасности при эксплуатации потенциально опасных объектов;
- метод оценки сроков безопасной эксплуатации конструкций нефте- и газопроводов на основе предложенных критериев безопасности и усталостного масштабно-структурного разрушения конструктивных элементов.

Для выяснения непротиворечивости и полноты системы утверждений теории рассматривается достаточно представительный класс процессов хрупкого разрушения для различных металлов и сплавов.

Непротиворечивость системы утверждений следует из того, что она устанавливает однозначную взаимосвязь между процессом нагружения и последовательными процессами развития усталостного разрушения на разных масштабно-структурных уровнях.

Полнота системы утверждений соответствует тому, что прогнозируемые виды разрушений реализуются в экспериментах и раскрывается на основе анализа

структуры металла, физических механизмов появления и развития микроскопических и коротких трещин, закономерностей развития усталостного макроразрушения; кинетических диаграмм и кривых усталости металлов; известных физических и механических теорий усталостного разрушения.

Обоснованность и достоверность научных результатов, сформулированных в диссертации, обеспечиваются достоверностью физических представлений, использованием современных методов структурного анализа и исследования физико-механических свойств, сравнением с литературными данными теоретических и экспериментальных исследований, проведением вычислительного эксперимента и проверкой следствий модели для большого класса металлов и сплавов.

Построенная модель усталостного разрушения отражает основные закономерности развития хрупких усталостных микро- и макротрещин, которые в настоящее время установлены экспериментально-теоретическими методами исследования в физике твердого тела и в механике деформируемого твердого тела.

Проектные сроки службы представительных участков трубопроводов по предложенному методу подтверждаются результатами их эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость. Диссертационная работа выполнялась в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова в соответствии с планами государственных научных программ «Развитие физико-механических основ механики деформируемых тел и сред» (№ ЦИТИС 01.200.1 17207), 1990 – 2015 гг., «Развитие физико-механических основ и разработка методов расчета сложных систем в механике деформируемого твердого тела при термосиловых воздействиях различной природы» (№ ЦИТИС АААА-А16-116071210055-5), 2016 г. по настоящее время. На различных этапах работа поддерживалась грантами РФФИ (коды проектов № 08-08-00841-а, 10-08-00933).

Теоретический вклад в развитие раздела механики деформируемого твердого тела «Усталостная прочность металлов и элементов конструкций» состоит в построенных определяющих соотношениях, связывающих вероятность хрупкого усталостного разрушения с амплитудой максимального главного напряжения и числом циклов нагружения на каждом масштабно-структурном уровне при простых процессах нагружения в условиях сложного напряженного состояния.

Предложенная модель хрупкого разрушения использовалась в расчетах долговечности конструктивных элементов нефте- и газопроводов с учетом анализа образования и развития дефектов. Представленный в диссертации метод по оценке долговечности был разработан по заданию Управления проектирования и экспертизы ПАО Газпром и АО «Вымпел» и включен в ряд нормативных документов для проектных организаций ПАО «Газпром», в том числе, в «Методику оценки сроков службы газопроводов» (М.: ИРЦ Газпром, 1997. 100 с.), «Рекомендации по оценке безопасности магистрального газопровода при проектировании» (М.: ОАО «Газпром», 2000. 105 с.), «Рекомендации по оценке безопасности и долговечности газопроводов при проектировании» (М.: ОАО «Газпром», 2002. 160 с.), «Методические рекомендации по срокам эксплуатации газопроводов» (М.: ООО «ВНИИгаз», 2005. 100 с.). Подготовлено 19 Заключений о сроках службы и остаточной долговечности конструкций магистральных газо- и нефтепроводов с определенным уровнем накопленных дефектов, в том числе:

- линейной части магистральных нефтепродуктопроводов «Уфа–Камбарка», «Московский НПЗ – ЛПДС «Володарская», «Ишинбай–Уфа», «Уфа–Омск», «Куйбышев–Брянск», «Альметьевск–Нижний Новгород»,
- линейной части и конструкций газоизмерительных станций магистральных газопроводов «Сахалин–Хабаровск–Владивосток», КС «Сохрановка»– КС «Каменск-Шахтинская»– КС «Октябрьская», «Новопсков–Аксай–Моздок», «Изобильный–Невинномысск», ССПХГ, «Починки–Изобильное–ССПХГ», КС «Артезиан» газопровода «Макат–Северный Кавказ», «Бурмакино» магистрального газопровода «Починки–Грязовец»;
- конструкций узлов редуцирования газа с магистрального газопровода КС «Сохрановка»–КС «Октябрьская» на Б. Калитву, Волгодонск; с магистрального газопровода «Починки–Грязовец» на «Грязовец–КГМО», «Горький–Череповец», «Саратов–Горький», «Горький–Центр», на отвод к Костромской ГРЭС; газопроводов «Новопсков–Аксай–Моздок», «Изобильный–Невинномысск»;
- конструкций установок очистки газа, дожимных компрессорных станций газопроводов «Новопсков–Аксай–Моздок», «Изобильный–Невинномысск».

Полученные результаты могут рассматриваться как научно-методическая база

по достижению требуемых экономических показателей конструктивных решений в части назначения ресурса участкам газо- и нефтепроводов, установлению сроков плановой технической диагностики, сроков остаточной долговечности конструкций продуктопроводов. Сформулированная система гипотез о развитии дефектов на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях может быть использована при разработке методов диагностики технического состояния и методов прогнозирования долговечности элементов различных металлических конструкций.

Полученные научные и практические результаты вошли в специальные курсы кафедры теории упругости механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Физико-механические критерии прочности и разрушения и их приложения к оценке долговечности конструкций» и «Физико-механические основы прочности и разрушения» для студентов, бакалавров, магистров и аспирантов, по материалам которых подготовлен ряд учебных пособий, среди них «Введение в теорию процессов разрушения твердых тел. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ. 2004. 168 с.», «Современные теории разрушения при сложном нагружении. Учебно-методическое пособие к специальному курсу кафедры теории упругости "Прочность и разрушение материалов и элементов конструкций" М.: Изд-во МГУ, 2008. 63 с.»

Публикации и личный вклад автора. Настоящая работа является итогом многолетних исследований автора по проблеме механики разрушения и долговечности материалов и элементов конструкций, начатые в 1990 г., и по проблеме безопасной эксплуатации конструкций продуктопроводов, начатые в 2000 г. Ее основные результаты отражены в 94 работах автора, включая 18 тезисов докладов. 42 статьи опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Основные научные результаты получены лично автором. Вклад в публикации, выполненные в соавторстве, состоял в формулировке гипотез и критериев, выполнении аналитических исследований и численных расчетов. При использовании результатов других исследований приводятся соответствующие ссылки.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и библиографического списка из 281 наименований. Во введении сформулированы: цель работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость; дан обзор глав диссертации. В конце каждой из глав изложены итоги и основные результаты по главам. В заключении сформулированы основные результаты диссертации. Работа изложена на 303 страницах, содержит 71 рисунок и 18 таблиц.

Апробация результатов. Все основные результаты докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах (представлено более 30 докладов), регулярно – на конференциях «Ломоносовские чтения» в МГУ им. М.В. Ломоносова (2008 – 2018 гг.), на Международных научных симпозиумах по проблемам механики деформируемых тел, посвященных памяти А.А. Ильюшина (2006, 2011, 2016 гг.), на Международных конференциях в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (2015–2018 гг.), в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, на Международных симпозиумах и семинарах по проблемам безопасности трубопроводов ПАО «Газпром», ООО «Газпром ВНИИГаз», ОАО «Гипроспецгаз», регулярно – на научно-исследовательском семинаре кафедры теории упругости мех.-мат. ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова под рук. проф. И.А. Кийко (2000–2015 гг.) и проф. РАН Георгиевского Д.В. (2015–2018 гг.), на научно-исследовательском семинаре «Актуальные проблемы геометрии и механики» под руководством проф. РАН Д.В. Георгиевского, д.ф.-м.н. М.В. Шамолина и проф. С.А. Агафонова (2013–2018 гг.), в Институте механики полимеров АН Латвии на научно-исследовательских семинарах академика АН Латвии В.П. Тамужа, на научно-исследовательском семинаре кафедры теории упругости математико-механического факультета СПбГУ под руководством академика РАН Н.Ф. Морозова (2015 г.), на научно-исследовательском семинаре кафедры газовой и волновой динамики под рук. академика РАН Р.И. Нигматулина (2015 г.), на Между-

народных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (2016–2018 г.г.), на научно-исследовательском семинаре по механике деформируемого твердого тела под руководством академика РАН И.Г. Горячевой (2016 г.), на междисциплинарном семинаре «Методы многомасштабного моделирования и их приложения» ВЦ РАН под руководством академика РАН Е.И. Моисеева, проф. С.А. Лурье, проф. С.Я. Степанова (2016 г.), и др.

Благодарности. Теория процессов нагружения, созданная моим учителем член-корр. РАН Алексеем Антоновичем Ильюшиным, явилась идейной основой разработки рассматриваемой в диссертации проблемы.

С 2000 г. по 2015 г. научно-организованную поддержку работе оказывал заслуженный деятель науки РФ, проф. Игорь Анатольевич Кийко.

Автор выражает глубокую благодарность д.ф.–м.н. Борису Ивановичу Завойчинскому за идейную поддержку и постоянное участие в совместном анализе рассматриваемой проблемы и проф. РАН Дмитрию Владимировичу Георгиевскому за постоянное внимание к работе, ценные рекомендации и организационную поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено краткое содержание по главам, обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель исследования, показана его научная и практическая значимость, перечислены основные результаты, составляющие новизну работы, и положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** представлены результаты системного исследования для определения закономерностей развития процесса усталостного разрушения на различных масштабно-структурных уровнях.

По нашему мнению, механика хрупкого усталостного разрушения металлов должна изучать четыре последовательные стадии процесса развития разрушения. Первая стадия развития разрушения на микромасштабном уровне обусловлена процессами эволюции дефектных субструктур и микроструктур. Вторая стадия

включает последовательное зарождение и развитие макротрещин на мезоуровне ансамблей зерен. Эти стадии изучаются экспериментально-теоретическими методами физики твердого тела и металловедения.

Третья стадия включает развитие единичных хрупких макротрещин на макромасштабном уровне. Четвертая стадия характеризуется возникновением и ростом магистральных трещин, приводящих к разделению материала на части. Эти стадии изучают в обширном разделе – механика разрушения.

Хрупкое усталостное разрушение металлов рассматривается как стадийный процесс, характеризующийся прохождением определенных стадий эволюции дефектов: полосовой субструктуры, появления, роста и слияния хрупких микротрещин на микроуровне и коротких и макротрещин на мезоуровне, и ведущий к образованию единичных макротрещин. Выделяется шесть масштабных уровней разрушения, отвечающих разным стадиям развития хрупкого разрушения по разным физическим механизмам.

Строится классификация хрупкого разрушения по дефектам i -ого масштабно-структурного уровня, $i=1, \dots, 6$. Дефект i -ого уровня характеризуется линейным размером $l_i = l_i(\tau)$ и плотностью $q_i = q_i(\tau)$ в представительном объеме V_c (в котором возможно зарождение начальной трещины механики разрушения) в интервале времени нагружения $\tau \in [0, t]$. Предельное состояние дефекта i -ого уровня определяется предельными линейным размером $l_{f,i}$ и плотностью $q_{f,i}$.

После кристаллизации наблюдаются нарушения регулярной структуры (определяемые как дефекты первого уровня линейных размеров, в среднем, $l_1 \leq 10^{-3} d$, d – средний размер зерна металла): точечные дефекты (вакансионные кластеры, замещения и внедрения атомов, дефекты по Шоттки, междоузельные частицы, дефекты по Френкелю, включения чужеродных атомов, ионов, молекул, электронно-дырочные дефекты), субмикротрещины, двумерные и трехмерные дефекты (границы зерен, дефекты упаковки, поверхности раздела фаз, двойники, поры (скопления вакансий) и др. На первом (инкубационном) уровне с увеличением числа циклов нагружения эволюция этих дефектов приводит к формирова-

нию упорядоченной полосовой (сетчатой) субструктуры, связанной с их накоплением. При достижении критического значения плотности дефектов первого уровня имеет место фазовый переход от полосовой субструктуры к хрупким микротрещинам (дефектам второго уровня средних размеров $l_2 \in [10^{-3}, 10^{-2}]d$), стабильность размеров которых создает возможность значительного увеличения их плотности и слияний с зарождением хрупких нераспространяющихся трещин (дефектов третьего уровня средних размеров $l_3 \in [10^{-2}, 10^{-1}]d$) внутри зерна и на границах зерен. Эволюция дефектов на микроуровне может быть описана на основе принципов неравновесной термодинамики. С достижением плотности последних предельного значения происходят их слияния с образованием коротких трещин размеров зерна (дефектов четвертого уровня средних размеров $l_4 \in [10^{-1}, 1]d$), которые формируют известный «речной узор» на поверхности образца с образованием экструзий и интрузий. Происходит переход с микро- на мезоуровень развития разрушения. В результате слияния короткие трещины выходят за границу зерна, пересекают три–четыре зерна, образуются транскристаллитные и зернограницные макротрещины (дефекты пятого и, затем, шестого уровней) с достижением линий необратимой повреждаемости Френча. Дальнейшая эволюция приводит к возникновению одиночных макротрещин и окончательному хрупкому разрушению.

Усталостное разрушение металлов определяется независимыми процессами вязкого и хрупкого разрушений по различным физическим механизмам. В пластичных материалах протекают процессы образования и развития дислокационной ячеистой структуры по механизмам двойникования и скольжения, что ведет к движению ансамблей зерен и зарождению вязких микротрещин с ямочным микрорельефом. Эволюция полосовой структуры приводит к хрупкому макро-разрушению при упругом макродеформировании, эволюция ячеистой структуры – к вязкому макроразрушению при развитых неупругих макродеформациях.

Особенностью циклических нагрузений является то, что развитие процесса разрушения в области $N_f \in [5 \cdot 10^6, 10^{10}]$ циклов происходит при упругом макродеформировании. Во многих металлах при одноосном нагружении с амплитудой напряжений, равной пределу выносливости металла, происходит хрупкое макроразрушение по коротким трещинам (дефектам четвертого уровня) и механизмам межзеренного или транскристаллитного скола.

Проведенный анализ опытных данных, кинетических диаграмм и кривых усталости металлов и сплавов показал, что процесс разрушения хрупких материалов при одноосном нагружении и числе $N_f \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов характеризуется образованием и ростом хрупких единичных макротрещин при упругом деформировании и приводит к хрупкому или квазихрупкому макроразрушению.

Физические структурные теории хрупкого усталостного разрушения описывают взаимодействия дефектов и элементов внутренней структуры в поле микронапряжений. В основе структурно-энергетических теорий лежат гипотезы оценки энергии искажения кристаллической решетки, дефектов упаковки, разрыва межатомных связей, принципы термодинамики, синергетики, структурно-скейлинговых переходов. Физические стохастические модели изучают распределения микронапряжений и микроструктурных повреждений на основе марковских случайных процессов. При этом большинство моделей содержат параметры структуры и физических механизмов разрушения, не идентифицируемые в макроэкспериментах, и не позволяют определять прочностные макрохарактеристики сопротивлению усталости. Построение критериев разрушения в зависимости от процессов нагружения физическими теориями не рассматриваются.

В феноменологических теориях вводится понятие тензора поврежденности, функционально определяемого процессом нагружения в детерминированном или вероятностном виде. Большинство теорий рассматривают эволюцию поврежденности материала, но не учитывают архитектуру внутреннего строения металла, физические механизмы и стадийность процесса усталостного разрушения. Ме-

ханика хрупкого разрушения, в свою очередь, изучает развитие единичных хрупких макротрещин на макроуровне на основе деформационных, силовых и энергетических подходов.

С учетом изложенного появляется возможность построения теории усталостного разрушения при сложном напряженном состоянии в рамках физико-механического подхода по аналогии с современными теориями пластичности.

В Главе 2 и Главе 3 рассматриваются процессы хрупкого усталостного разрушения металлов на разных структурно-масштабных уровнях при простых циклических нагружениях следующего вида:

$$\sigma_{kk}(\tau) = \alpha_k \sigma_a f(\tau), \quad f(\tau) = \alpha + \sin(\omega\tau + \theta), \quad k = 1, 2, 3, \quad \tau \in [0, t] \quad (1)$$

$$|\sigma_{11}| \geq |\sigma_{22}| \geq |\sigma_{33}|, \quad \alpha_k = \frac{\sigma_{kk}}{|\sigma_{11}|}, \quad \alpha_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_{11}}, \quad \sigma_0 = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \sigma_{kk}$$

где под величиной σ_a понимают амплитуду максимального главного напряжения, ω – частота изменения напряжений, α_k – отношения главных напряжений, α – параметр асимметрии цикла напряжений.

Развитие усталостного разрушения зависит от вида напряженно-деформированного состояния. Построение теории для процесса (1) начинается с формулировки определяющих соотношений в **Главе 2** при трех базовых видах нагружения в условиях плоского напряженного состояния:

$$1. \text{ одноосном симметричном нагружении: } \alpha_1 = 1, \alpha = \alpha_2 = \alpha_3 = 0; \quad (2)$$

$$2. \text{ симметричном сдвиге: } \alpha_1 = 1, \alpha_2 = -1, \alpha = \alpha_3 = 0; \quad (3)$$

$$3. \text{ двухосном равномерном нагружении: } \alpha_1 = \alpha_2 = 1, \alpha = \alpha_3 = 0. \quad (4)$$

Модель строится для металлов и сплавов, первоначально имеющих дефекты металлургического и технологического происхождения, но не имеющих макротрещин, в области $N_f \in [5 \cdot 10^3, 10^{10}]$ циклов.

На основе результатов Главы 1 формулируется система гипотез о развитии дефектов в металле на микро-, мезо- и макроуровне. Предполагается, что образование дефектов каждого уровня происходит вследствие последовательного зарождения, развития и слияния дефектов предыдущих уровней. Вводится непрерывная

возрастающая усредняющая функция i -ого уровня вида: $l_i^* = l_i^*(\tau)$, $\tau \in [0, t]$, имеющая размерность длины: $l_i^*(\tau) = l_i(\tau) (q_i(\tau) V_c)^\gamma$, $\gamma = const$, $i = 1, \dots, 6$. Предельное состояние дефектов $(i-1)$ -ого уровня и образование дефектов i -ого уровня характеризуется достижением усредняющей функцией своего предельного значения $l_{f,i}^*$, $i = 1, \dots, 6$, в момент времени $t_i = t_i(\sigma_a)$, $i = 1, \dots, 6$.

Поврежденность $\Omega_i = \Omega_i(\tau)$ по дефектам i -ого уровня определяется как монотонно возрастающая функция в виде: $\Omega_i(\tau) = l_i^*(\tau) [l_{f,i}^*]^{-1}$, $0 \leq \Omega_i \leq 1$, $i = 1, \dots, 6$, $\tau \in [0, t]$. Для каждого момента времени τ значения l_i^* и поврежденности Ω_i являются случайными величинами. Отсюда возникает необходимость ввести функцию вероятности разрушения по дефектам i -ого уровня, которая является основной определяющей функцией рассматриваемой теории.

Под вероятностью разрушения по дефектам i -ого уровня $Q_i = Q_i(\tau)$, $i = 1, \dots, 6$, понимается вероятность события, при котором усредняющая функция i -ого уровня $l_i^* = l_i^*(\tau)$ достигает предельного значения $l_{f,i}^*$ в момент времени τ (дефекты i -го уровня – предельного состояния), $\tau \in [0, t]$.

Согласно постулату макроскопической определенности А.А.Ильюшина процесс хрупкого усталостного разрушения на интервале времени $\tau \in [0, t]$ определяется процессом упругого деформирования металла и вероятность хрупкого разрушения можно полагать функционалом от процесса нагружения. На микроуровне ($i = 1, 2, 3$) при макроупругом деформировании механические свойства металлов меняются незначительно, имеет место стабилизация свойств; возможно появление дефектов других уровней, но, в силу постоянных слияний, их вкладом в вероятность разрушения можно пренебречь. На мезоуровне ($i = 4, 5, 6$) происходит интенсивное изменение механических свойств металла. Для базовых нагружений (1), (2) – (4) в предположении равномерного распределения дефектов в

объеме V_c для вероятности разрушения по дефектам i -го уровня $Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$, $i=1, \dots, 6$, в зависимости от амплитуды напряжения σ_a , числа циклов нагружения n и числа циклов начала образования дефектов i -го уровня n_i , следуя методам механики деформируемого твердого тела в соответствии с теорией подобия, следующими соотношениями:

i -тый уровень дефектов	вероятность разрушения по дефектам i -того уровня $Q_i = Q_i(n)$	Уравнение начала роста дефектов i -того уровня
$i=1, 2, 3$ $\sigma_a \geq \sigma_{i-1}$ $\lg n \geq \lg n_i(\sigma_a)$ $\sigma_0 = 0, n_1 = 1$	$Q_i = F_i \left(\frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}}{\sigma_i - \sigma_{i-1}} \right) R_i \left(\frac{\lg n - \lg n_i(\sigma_a)}{\lg N_i - \lg n_i(\sigma_i)} \right) \quad (5)$ $0 \leq Q_i \leq 1$	$Q_i(n_{i+1}) = 1 \quad (13)$
$i=4$ $\sigma_3 \leq \sigma_a$ $\lg n \geq \lg n_4(\sigma_a)$	$Q_4 = F_4 \left(\frac{\sigma_a - \sigma_3}{\sigma_4 - \sigma_3} \right) R_4 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)} \right) \quad (6)$ $0 \leq Q_4 \leq 1$	$Q_4(n_5) = 1 \quad (14)$
$i=5$ $\sigma_4 \leq \sigma_a$ $\lg n \geq \lg n_5(\sigma_a)$	$Q_5 = F_5 \left(\frac{\sigma_a - \sigma_4}{\sigma_5 - \sigma_4} \right) R_5 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)} \right) \quad (7)$ $Q_4 = G_4 \left(\frac{\sigma_5 - \sigma_a}{\sigma_5 - \sigma_4} \right) R_4 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)} \right) \quad (8)$ $0 \leq Q_i \leq 1, i=4, 5$ $Q_6 = 0 \quad (9)$	$Q_5(n_6) = 1 \quad (15)$
$i=6$ $\sigma_5 \leq \sigma_a$ $\lg n \geq \lg n_6(\sigma_a)$	$Q_6 = F_6 \left(\frac{\sigma_a - \sigma_5}{\sigma_6 - \sigma_5} \right) R_6 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_6 - \lg n_4(\sigma_6)} \right) \quad (10)$ $Q_5 = G_5 \left(\frac{\sigma_6 - \sigma_a}{\sigma_6 - \sigma_5} \right) R_5 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)} \right) \quad (11)$ $0 \leq Q_i \leq 1, i=5, 6$ $Q_4 = 0 \quad (12)$	$Q_6(n_7) = 1 \quad (16)$

В рекуррентной системе (5) – (16) последующее уравнение связано с предыдущим через число циклов $n_{i+1} = n_{i+1}(\sigma_a)$, при котором функция $l_i^* = l_i^*(n)$ до-

стигает предельного значения $l_{f,i}^*$, дефект i -го уровня предельного состояния и зарождаются дефекты $(i+1)$ -го уровня, $i=1, \dots, 6$. Для них формулируются уравнения (13) – (16). В соотношениях введена система материальных функций $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $i=1, \dots, 6$, $\alpha_2 = 0, 1, -1$ для симметричных одноосного и двухосного равномерного нагружений и сдвига соответственно, при которых происходит разрушение по дефектам i -го уровня. В Главе 2 диссертации рассматривается методика определения базовых констант модели по данным стандартных усталостных испытаний с учетом результатов проведенного анализа физических закономерностей по развитию хрупких трещин.

Предлагаемая модель позволяет подбирать вид функций $F_i = F_i(\sigma_a)$ и $R_i = R_i(n)$, $i=1, \dots, 6$, в выражениях (5) – (16) для конкретных материалов. В данной работе рассмотрение ограничено функциями следующего вида:

$$F_i = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}}{\sigma_i - \sigma_{i-1}} \right)^{\beta_i}, R_i = \left(\frac{\lg n - \lg n_i(\sigma_a)}{\lg N_i - \lg n_i(\sigma_i)} \right)^{\phi_i}, i=1, \dots, 4;$$

$$F_i = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}}{\sigma_i - \sigma_{i-1}} \right)^{\chi_i}, R_i = \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_i - \lg n_4(\sigma_i)} \right)^{\phi_i}, i=5, 6; G_i = \left(\frac{\sigma_{i+1} - \sigma_a}{\sigma_{i+1} - \sigma_i} \right)^{\chi_i}, i=4, 5, \quad (17)$$

где введены материальные функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $\beta_i = \beta_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $\phi_i = \phi_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $\chi_i = \chi_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $\alpha_2 = 0, 1, -1$ для нагружений (1), (2) – (4).

Разрушения по дефектам мезоуровня, $i=4, 5, 6$, рассматриваются как независимые события. В общем случае вводится функция вероятности разрушения по дефектам мезоуровня $Q = Q(\tau)$ в виде:

$$Q(\tau) = \sum_{i=4}^6 \frac{Q_i(\tau)}{1 - Q_i(\tau)} \prod_{j=4}^6 (1 - Q_j(\tau)), \quad (18)$$

где функции $Q_i = Q_i(\tau)$ – вероятности разрушения по дефектам i -го мезоуровня. Для нагружений (1), (2) – (4) в выражение (18) входят соотношения для

$Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$, которые рассматриваются в виде (7) – (12), и по уравнениям (13), $i=3$, (14) и (15) определяются числа циклов $n_i = n_i(\sigma_a)$, $i=4,5,6$.

Долговечность по дефектам мезоуровня определяется как решение уравнения:

$$Q(n_f) = 1 \quad (19)$$

из которого для процессов (1), (2) – (4) находится долговечность металла по дефектам мезоуровня $n_f = n_f(\sigma_f)$ (по образованию единичных макротрещин), σ_f – амплитуда напряжения при разрушении по дефектам мезоуровня.

Для идентификации материальных функций $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $i=1, \dots, 6$, $\alpha_2 = 0, 1, -1$ требуется большой объем экспериментов с обработкой шлифов методами анализа микроструктуры. В силу трудоемкости и недостаточности имеющихся данных это в большинстве случаев не представляется возможным. Поэтому на основе анализа физических закономерностей развития хрупких трещин вводится ряд предположений. Пределы выносливости металла при базовых видах нагружения σ_{-1} , τ_{-1} , $\hat{\sigma}_{-1}$ полагаются материальными константами для дефектов четвертого уровня. Заметное изменение микро- и макроструктуры металла наблюдается при изменении числа циклов нагружения на десятичные порядки. Следуя этому принимается: $\lg N_i = \lg N_4 + 4 - i$, $i=1, \dots, 4$; $\lg N_i = \lg N_4 + 3 - i$, $i=5, 6$. На микроуровне в выражениях (17) выбирается: $\beta_i = \chi_i = 1$, $\phi_i = 1/2$, $i=1, 2, 3$, и $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_4, \omega)$, $i=1, 2, 3$, при которых достигается соответствующее предельное значение $l_{f,i}^*$ при числе циклов N_4 . Отсюда по модели при числе $N_4 = 10^6$ циклов базовые амплитуды следующие: $\sigma_1 \approx 0.5\sigma_4$, $\sigma_2 \approx 0.604\sigma_4$, $\sigma_3 \approx 0.75\sigma_4$. В качестве σ_1 можно выбрать предел чувствительности материала к циклическим напряжениям.

Серии поверочных экспериментов для базовых нагружений могут быть по-

строены таким образом. При амплитуде, равной пределу выносливости, партия образцов доводится до макроразрушения, определяется число циклов N_4 , в хрупком изломе измеряются размеры дефектов четвертого уровня, находится значение $l_{f,4}^*$. Последовательно осуществляются нагружения с амплитудами σ_i , $i=1,2,3$, до числа циклов N_i , по фотографиям микроструктуры определяются дефекты i -го уровня, их плотность и $l_i(N_i)$, далее, догружая образец, по данным со шлифов числа циклов N_i корректируются, если максимальное значение усредняющей функции достигнуто позже.

На мезоуровне для базовых нагружений амплитуды напряжений σ_i , $i=5,6$, определяются из кривой усталости по образованию единичных макротрещин (достижению усредняющей функции предельного значения $l_{f,i}^*$) при N_i , $i=5,6$, соответственно. При отсутствии данных можно полагать: $\sigma_6 = \sigma_s$, $\sigma_6 = \tau_s$, $\sigma_6 = \hat{\sigma}_s$ (σ_s , τ_s , $\hat{\sigma}_s$ – пределы текучести при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении) и серией поверочных опытов скорректировать число циклов N_6 , по данным серии опытов с различными амплитудами напряжений из диапазона $\sigma_a \in (\sigma_4, \sigma_6)$ и анализа микроструктуры найти амплитуду напряжений σ_5 , при которой на базе N_5 циклов усредняющая функция достигает предельного значения $l_{f,5}^*$. Для нахождения функций β_i , ϕ_i , χ_i необходимо задавать дополнительные базовые характеристики модели.

Универсальность построения модели заключается в том, что в качестве переменной в определяющих соотношениях (5) – (16) выбирается амплитуда максимального главного напряжения, а материальные функции определяются по данным стандартных усталостных испытаний с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин и являются функциями параметров нагружения α , α_2 , α_3 . Так, с учетом асимметрии цикла напряжений в Главе 2

для базовых нагружений материальные функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, \alpha, N_i, \omega)$ предлагаются представлять в виде:

$$\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega) \bar{\sigma}_i(\alpha, \eta_i(\alpha_2)), \quad \eta_i(\alpha_2) \equiv \frac{\sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)}{\sigma_i^0(\alpha_2, N_i, \omega)}, \quad \alpha_2 = 0, -1, 1, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (20)$$

где $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $\sigma_i^0 = \sigma_i^0(\alpha_2, N_i, \omega)$ – базовые функции для симметричного и пульсирующего ($\alpha = 1$) одноосного нагружения $\alpha_2 = 0$, сдвига $\alpha_2 = -1$ и двухосного нагружения $\alpha_2 = 1$ соответственно. На основе анализа известных экспериментальных данных по влиянию асимметрии цикла на характеристики усталостной прочности и известных критериев усталостной прочности выражение для функции $\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i(\alpha, \eta_i)$ выбирается в виде:

$$\bar{\sigma}_i(\alpha, \eta_i) = \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right) |\alpha| + 1, \quad (21)$$

В качестве примера на рис. 1 и рис. 2 представлены стадии усталостного разрушения малоуглеродистой Ст.3 по опытным данным Л.Р. Ботвиной, Л. Бэрстоу, В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, В.Г. Пойды, К. Танаки и др. и результаты расчета по модели областей развития дефектов и кривой усталости с различными параметрами асимметрии цикла одноосного нагружения. Кривая 1–1 на рис. 1 (б) соответствует экспериментальной кривой 1 на рис. 1 (а), кривая 3–3 на рис. 1 (б) – кривой 2 на рис. 1 (а), кривая 4–4 с рис. 1 (б) – линии Френча 4 начала развития дефектов пятого уровня с рис. 1 (а).

Известные данные цикла работ (Л.Р. Ботвина, Г.В.Клевцов, М.Р.Тютин и др.) по развитию разрушения в двухфазном титановом сплаве АТ6 и результаты расчетов по модели при одноосном нагружении представлены на рис.3. Л.Р. Ботвина выделяла три стадии развития разрушения: образование дефектов среднего размера α – фазы (кривая 3 на рис.3 (а) и микроструктура на рис. 3(д),(а); образование дефектов размера β – фазы и начало интенсивного развития макротрещин среднего размера $l \geq 1\text{мм}$ (кривая 2 на рис. 3 (а) и микроструктура рис. 3 (д),

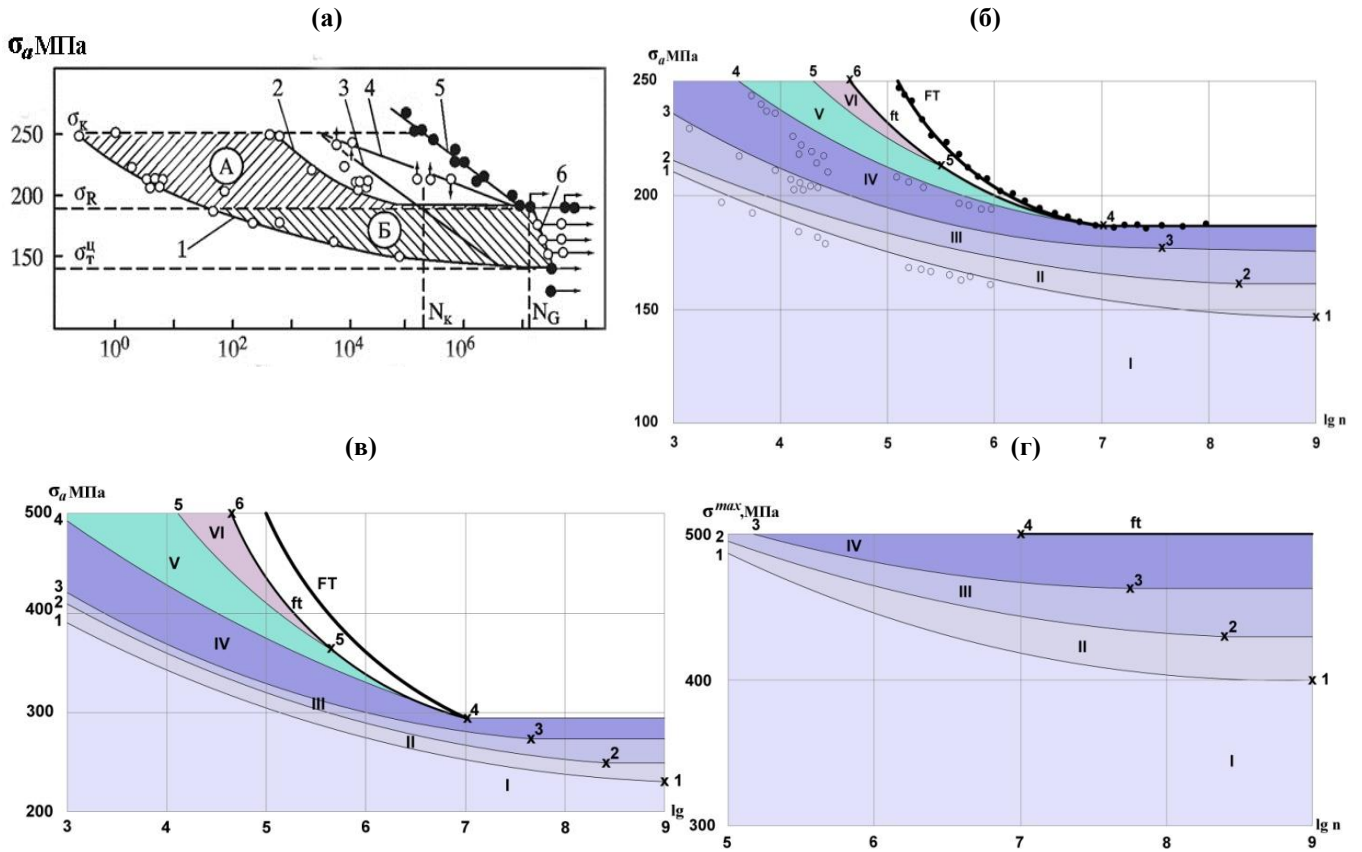


Рис.1 Развитие усталостного разрушения в Ст.3 при одноосном нагружении:

$$\sigma_s = 500 \text{ МПа}, \sigma_{-1} = 296 \text{ МПа}, \sigma_{-1}^0 = 186 \text{ МПа}, d = 18.5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

(а) стадии развития разрушения по данным Л.Р.Ботвиной, В.С.Ивановой и др.; $\alpha = 1$

(б) – (г) области I-VI и границы развития дефектов шести уровней, расчетная кривая усталости по дефектам мезоуровня ft по модели, опытные данные и кривые усталости FT: (б) $\alpha = 1$, (в) $\alpha = 0$, (г) $\alpha = 2.7$, 1-6 – базовые точки модели

(б,в) до полного разрушения кристаллическим сколом (кривая 1 на рис. 3(а) и на рис. 3(д),(г)). Из диаграммы на рис. 3(б) и опытных данных на рис. 3(г),(д) видно, что на первой стадии размеры дефектов типа микротрещин, меньших α -фазы, мало зависят от числа циклов и скорость их изменения вначале постоянна, а затем падает до нуля (по модели отнесены к первому и второму уровням); на второй стадии размеры дефектов (отнесены к третьему уровню) увеличиваются, в среднем, с одинаковой скоростью, а при размахе интенсивности напряжений $\Delta K \geq 5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ начинается интенсивный рост макротрещин на мезоуровне. Опытные данные в виде полых кружков попадают в область достижения предельных состояний дефектами первого уровня (размера α -фазы). Кривая 2 с рис. 3 (а) по модели определяется как кривая 3-3 начала роста макротрещин размера β -фазы на рис. 3(г). Полые треугольники на рис. 3(а) соответствуют наличию в материале дефектов третьего уровня и достижению ими предельного состояния с зарождением коротких трещин (дефектов четвертого уровня). Теоретически построены

ная по предложенной модели кривая усталости по дефектам мезоуровня (кривая б-4) хорошо описывает экспериментальные данные Л.Р.Ботвиной (кривая 1 и сплошные кружки на рис. 3(а), (г)).

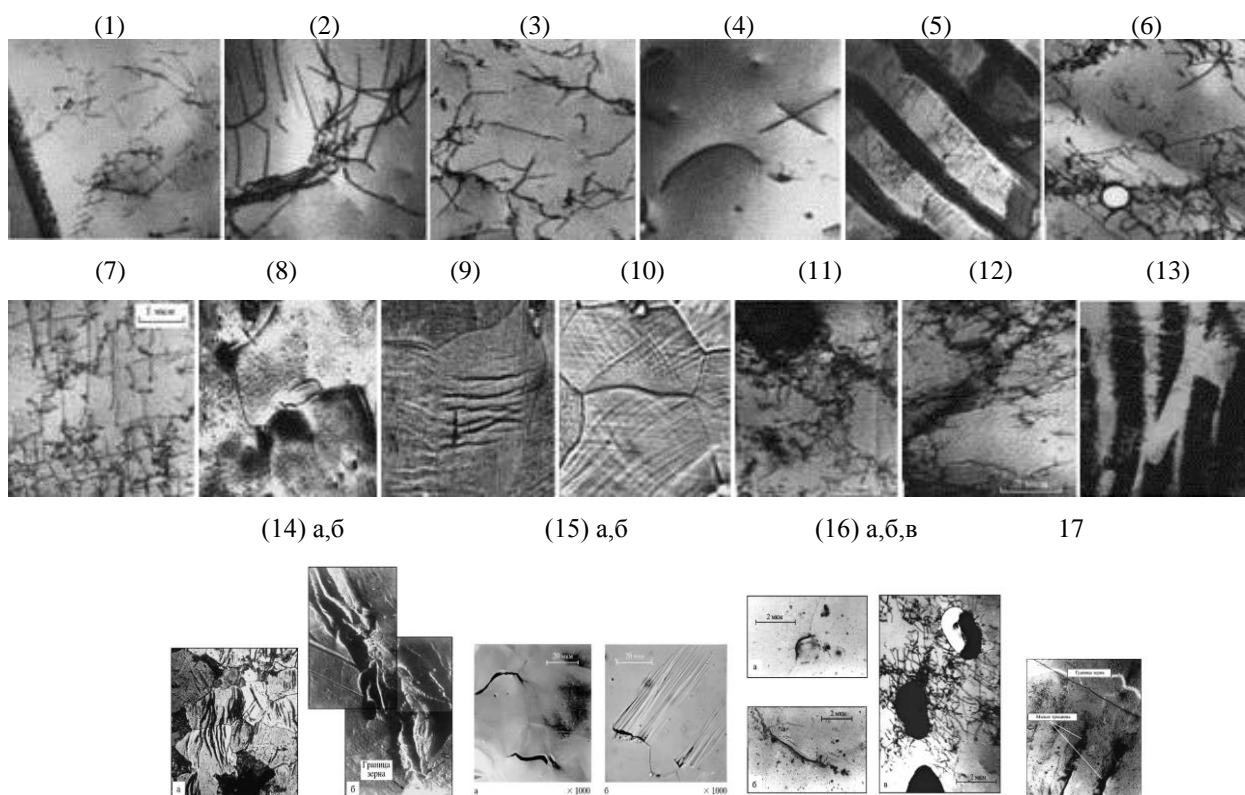


Рис. 2 Микроструктура стали Ст. 3 при пульсирующем одноосном нагружении

(1) – (6) первая стадия развития микроразрушения (по дефектам первого уровня) (рис.1(а), до кривой 1), *15000: (1) – (4) интенсивное зарождение пор и дислокаций, (5) зарождение субмикротрещин по границам феррит-цементит, (6) развитая дислокационная структура у неметаллических включений ;

(7) – (13) вторая стадия развития разрушения (до образования коротких трещин– дефектов четвертого уровня) (рис. 1 (а), до кривой 2) при $\sigma_{-1}^0 = 186 \text{ МПа}$: (7) – (10) микротрещины на границах ферритных зерен, (11) микротрещины на субграницах отжига, (12) у неметаллических включений, (13) на границах раздела феррит-цементит; (14) третья стадия разрушения (рис.1 (а), до линии Френча 4): развитие коротких трещин (дефектов четвертого уровня) до образования макротрещин размера, в среднем, до 0.5мм, *500; (15) короткие трещины в ферритных зернах на линии Френча; (16), (17) четвертая стадия разрушения (рис. 1 (а), до кривой усталости 5) при $\sigma^{\max} = 420 \text{ МПа}$: развитые макротрещины у неметаллических включений и в устойчивых полосах скольжения на границе зерна соответственно, *2820

Глава 3 посвящена построению определяющих соотношений в общем случае простого нагружения (1). Универсальность подхода делает возможным записать такие соотношения, при этом в качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения, а материальные функции определяются по результатам усталостных испытаний при симметричных одноосном и двухосном нагружениях и сдвиге и учитывают асимметрию цикла и отношение главных напряжений в соответствии с известными современными критериями усталостной прочности металлов. Таким образом, по аналогии с выражениями (20) мате-

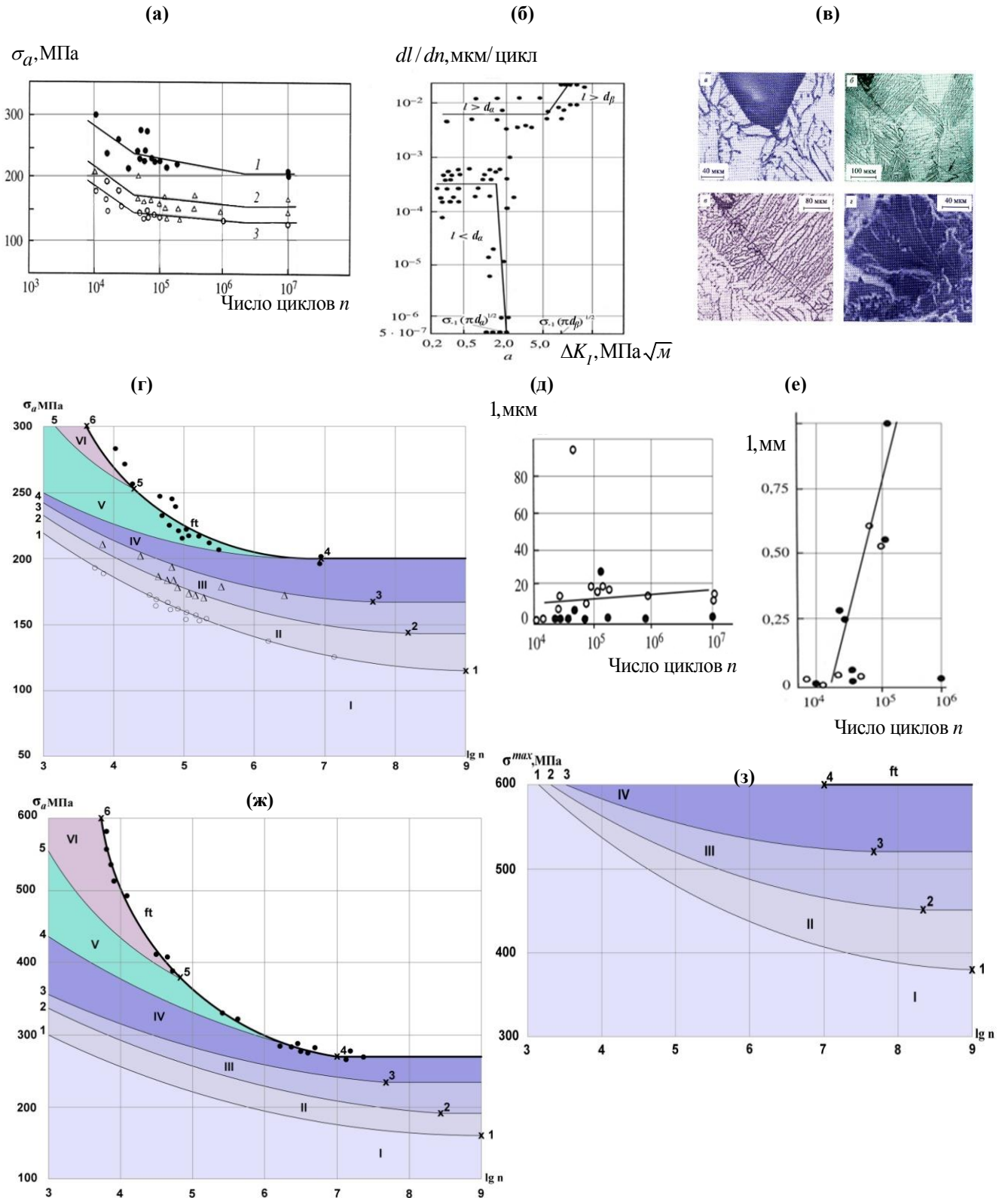


Рис.3 Анализ развития усталостного разрушения для сплава АТ6 при одноосном нагружении

$\sigma_s = 600 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 260 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1}^0 = 200 \text{ МПа}$, $d_\alpha = 0.02 \text{ мм}$, $d_\beta = [0.3 - 0.5] \text{ мм}$

(а) – опытные данные Л.Р. Ботвиной трех стадий разрушения при пульсирующем растяжении, $\alpha = 1$;

(б) – кинетическая диаграмма; (в) – микроструктура в устье надреза: (а) $\sigma_a = 131 \text{ МПа}$, $N = 1.35 \cdot 10^5$ циклов,

$l_{f,3} \approx d_\alpha$; (б), (в) $\sigma_a = 216 \text{ МПа}$, $N = 1.5 \cdot 10^5$ циклов, $l_{f,4} \approx d_\beta$, (г) – фасетки кристаллографического скола;

(д) – зависимость между длиной микротрещин и числом циклов, (•) $\sigma_a = [126, 144] \text{ МПа}$, (○) $\sigma_a = [147, 168] \text{ МПа}$;

(е) – зависимость между длиной макротрещин и числом циклов, (•) $\sigma_a = [192, 198] \text{ МПа}$, (○) $\sigma_a = [207, 210] \text{ МПа}$;

(г), (ж), (з) – опытные данные, области развития I-VI и границы образования дефектов шести уровней при $\alpha = 1$, $\alpha = 0$ и $\alpha = 2.43$ соответственно, кривая усталости по дефектам мезоуровня f_t , I-6 – базовые точки модели

риальные функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, \alpha_3, N_i, \omega)$ для процесса (1), $\alpha = 0$, предлагается

представлять в виде:

$$\sigma_i = \sigma_i(N_i, \omega) \tilde{\sigma}_i(\alpha_2, \alpha_3, \tilde{\eta}_i, \hat{\eta}_i) \quad i = 1, \dots, 6, \quad (22)$$

где
$$\tilde{\eta}_i = \frac{\sigma_i(N_i, \omega)}{\sigma_i(\alpha_2 = -1, N_i, \omega)}, \quad \hat{\eta}_i = \frac{\sigma_i(N_i, \omega)}{\sigma_i(\alpha_2 = 1, N_i, \omega)}, \quad \sigma_i(N_i, \omega) \equiv \sigma_i(\alpha_2 = 0, N_i, \omega)$$

Для дефектов первых трех уровней можно принять такие выражения:

$$\tilde{\eta}_i = \frac{1}{3}(\tilde{\eta}_4(i-1) + 4 - i), \quad \hat{\eta}_i = \frac{1}{3}(\hat{\eta}_4(i-1) + 4 - i), \quad i = 1, 2, 3$$

Функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, \alpha_3, N_i, \omega)$ в выражениях (22) выбираются так:

для хрупких материалов

при $-1 \leq \alpha_2 \leq 0$
$$\tilde{\sigma}_i = \left[6 - \tilde{\eta}_i - \alpha_2(2\tilde{\eta}_i - 6) + \alpha_0(3\tilde{\eta}_i - 15) \right]^{-1}, \quad (23)$$

при $0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha_3 \geq 0$
$$\tilde{\sigma}_i = \left[1 + \alpha_2(\hat{\eta}_i - 1) - \alpha_3(\hat{\eta}_i - 1) \right]^{-1}, \quad (24)$$

при $0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha_3 < 0$
$$\tilde{\sigma}_i = \left[6 - \tilde{\eta}_i - \alpha_3(2\tilde{\eta}_i - 6) + \alpha_0(3\tilde{\eta}_i - 15) \right]^{-1}; \quad (25)$$

для пластичных материалов

при $-1 \leq \alpha_2 \leq 0$
$$\tilde{\sigma}_i = \left[3\alpha_0(1 + \alpha_2) + \frac{1}{2}\tilde{\eta}_i^2(1 - \alpha_2 - 3\alpha_0) \right]^{-1/2}, \quad (26)$$

при $0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha_3 \geq 0$
$$\tilde{\sigma}_i = \left[3\alpha_0(1 + \alpha_3) + \frac{1}{2}\tilde{\eta}_i^2(1 - \alpha_3 - 3\alpha_0) \right]^{-1/2}, \quad (27)$$

при $0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha_3 < 0$
$$\tilde{\sigma}_i = \left[3\alpha_0(1 + \alpha_3) + \frac{1}{2}\tilde{\eta}_i^2(1 - \alpha_3 - 3\alpha_0) \right]^{-1/2}, \quad (28)$$

Такой выбор обеспечивается проведенным сравнением предсказаний по модели с известными критериями усталостной прочности и представительным объемом опытных данных для металлов и сплавов. Так, для симметричного одноосного нагружения с кручением ($-1 \leq \alpha_2 \leq 0, \alpha = \alpha_3 = 0$) хрупких материалов соотношение (23) преобразуется к виду: $\tilde{\sigma}_i = \left[1 - \alpha_2(\tilde{\eta}_i - 1) \right]^{-1}$, совпадает с известными критериями МакДиармида, Матаке, Финдли, Данг Вана, Зеннера Ли, Пападопулоса, Кенмена, Завойчинского и имеет удовлетворительное

соответствие следствиям подходов Сайнса, Кросслэнда, Какуно, Кавады, Деперо, имеющих широкое экспериментальное обоснование для большого класса материалов. Для двухосных нагружений ($0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha = \alpha_3 = 0$) хрупких

материалов выражение (24) имеет вид: $\tilde{\sigma}_i = [1 + \alpha_2(\hat{\eta}_i - 1)]^{-1}$, и совпадает со следствиями подходов МакДиармида, Данг Вана и др. Для симметричного одноосного нагружения с кручением соотношение (26) вида:

$\tilde{\sigma}_i = \left[(1 + \alpha_2)^2 - \alpha_2 \tilde{\eta}_i^2 \right]^{-1/2}$, совпадает с критериями Гафа, Полларда, Ли и удо-

влетворительно соответствует следствиям подходов Карпинтери, Спаньоли и др. для пластичных материалов. Для симметричных двухосных нагружений пла-

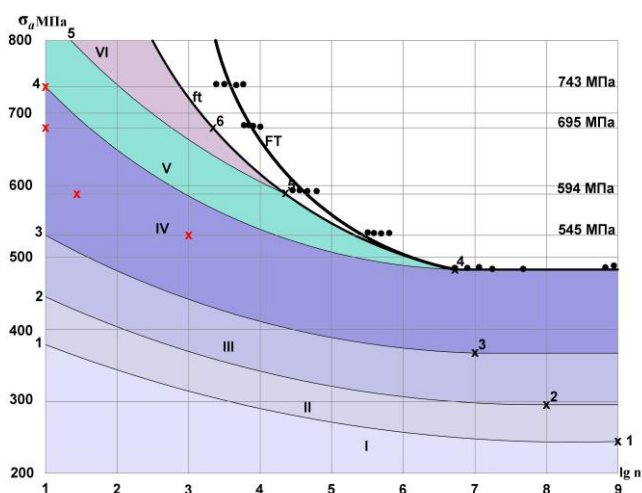
стичных материалов выражение (27) в виде: $\tilde{\sigma}_i = \left[(1 - \alpha_2)^2 + \alpha_2 \hat{\eta}_i^2 \right]^{-1/2}$, удовле-

творительно соответствует следствиям подходов Гафа, Завойчинского и др.

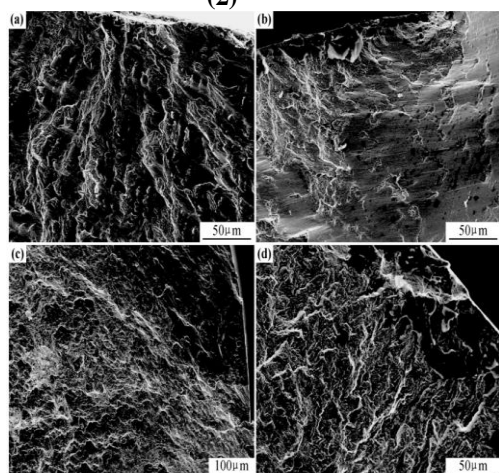
Выполняется теоретическое и экспериментальное обоснование достоверности предложенной модели и показывается соответствие опытным данным для ряда металлов и сплавов, применяемых в промышленности.

В качестве примера на рис.4 представлены опытные данные, результаты анализа микроструктуры и расчетов по предложенной модели трубной стали S135 при симметричном осевом нагружении с кручением, $\alpha_2 = -0.72$. Расчетная кривая усталости по хрупким дефектам ft лежит левее кривой усталости по полному разрушения FT , т.к. в материале развивается вязкое разрушение, которое тормозит развитие хрупких трещин и увеличивает долговечность стали. Получено, что опытные данные (красные крестики на рис. 4(1)) находятся в области развития IV дефектов четвертого уровня (соответствуют состояниям микроструктуры на рис. 4(2) (a) – (c) соответственно). При $\sigma_a = 743 \text{ МПа}$, $n = 10$ циклов достигается предельное состояние дефектами четвертого уровня и зарождаются дефекты пятого уровня (соответствующая структура представлена на рис.4 (2), (d)). При тех же

(1)



(2)



(3)

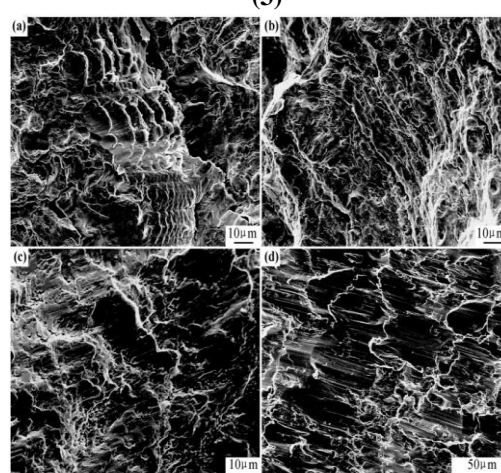


Рис.4 Анализ развития усталостного разрушения для стали S135 (0.32% C) при осевом нагружении с кручением, $\sigma_b = 1197 \text{ МПа}$, $\sigma_s = 1112 \text{ МПа}$, $d = 0.02 \text{ мм}$

(1) – опытные данные области развития I-VI и границы образования дефектов шести уровней, кривая усталости по дефектам мезоуровня ft, кривая усталости по полному разрушению FT, 1-6 – базовые точки модели
 (2),(3)–микроструктура стали (a) $\sigma_a = 545 \text{ МПа}$, $n = 10^3$ циклов (2), $0.9N_f = 1.06 \cdot 10^6$ циклов (3); (b) $\sigma_a = 594 \text{ МПа}$, $n = 40$ циклов (2), $0.9N_f = 3.13 \cdot 10^4$ циклов (3); (c) $\sigma_a = 695 \text{ МПа}$, $n = 10$ циклов (2), $0.9N_f = 8.64 \cdot 10^3$ циклов (3);
 (d) $\sigma_a = 743 \text{ МПа}$, $n = 10$ циклов (2); $0.9N_f = 5.63 \cdot 10^3$ циклов (3)

амплитудах на рис. 4 (3) (а), (в) представлено состояние микроструктуры перед разрушением, при котором по модели достигается предельное состояние дефектами пятого уровня; на рис. 4 (3), (с), (d) – микроструктура с предельным состоянием дефектов шестого уровня, что подтверждается опытными данными.

Экспериментальные данные, результаты расчетов по модели и сравнение с известными критериями усталостной прочности для хрупкой стали 12ХН2А приведены на рис. 5,6 и в табл. 1.

В таблице 2 приведены опытные данные, результаты расчетов по предложенной модели и по критерию Гафа, Полларда, Ли в зависимости от отношения α_2

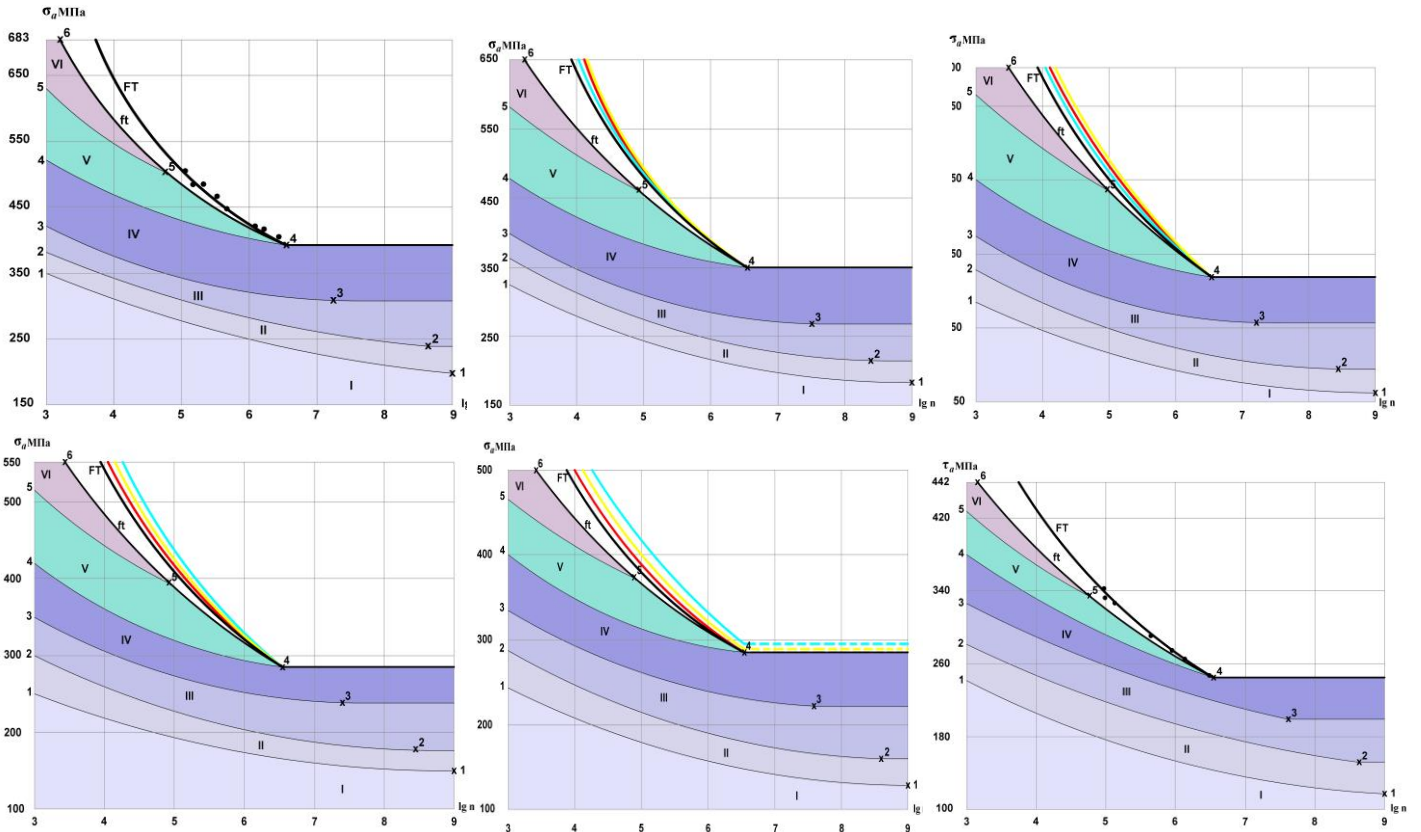


Рис.5 Анализ развития усталостного разрушения для стали 12ХН2А при осевом нагружении с кручением,

$\sigma_6 = 900\text{МПа}, \tau_6 = 581\text{МПа}, \sigma_s = 683\text{МПа}, \tau_s = 442\text{МПа}, \sigma_{-1} = 390\text{МПа}, \tau_{-1} = 252\text{МПа}$

ft – кривая усталости по дефектам мезоуровня, *FT* – кривая усталости по полному хрупкому разрушению (по модели, с учетом дороста хрупких трещин), красная линия – кривая усталости МакДиармида, Матаке и др., желтая линия – кривая усталости Гафа, Полларда, линия цвета морской волны – кривая усталости Сайнса, Кросслэнда и др.; (1) – $\alpha_2 = 0$, (2) – $\alpha_2 = -0.2$, (3) – $\alpha_2 = -0.4$, (4) – $\alpha_2 = -0.6$, (5) – $\alpha_2 = -0.8$, (6) – $\alpha_2 = -1$

N_f	$\alpha_2 = 0$			$\alpha_2 = -0.2$			$\alpha_2 = -0.4$			$\alpha_2 = -0.6$			$\alpha_2 = -0.8$			$\alpha_2 = -1$		
	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$
$5 \cdot 10^6$	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90	0,79	0,79	0,79	0,72	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73	0,65	0,65	0,65
$3 \cdot 10^6$	1,03	1,03	1,03	0,90	-	0,90	0,79	-	0,79	0,72	-	0,72	0,74	-	0,74	0,67	0,67	0,67
10^6	1,05	1,06	1,06	0,96	-	0,96	0,90	-	0,90	0,82	-	0,82	0,79	-	0,79	0,69	0,69	0,69
$5 \cdot 10^5$	1,13	1,15	1,15	1,03	-	1,05	1,00	-	1,00	0,85	-	0,87	0,82	-	0,83	0,72	0,72	0,72
$3 \cdot 10^5$	1,15	1,22	1,22	1,04	-	1,09	1,03	-	1,08	0,90	-	0,96	0,86	-	0,90	0,74	0,82	0,82
10^5	1,28	1,29	1,29	1,17	-	1,21	1,13	-	1,22	1,03	-	1,08	0,92	-	1,00	0,83	0,87	0,87
$5 \cdot 10^4$	1,31	1,38	1,38	1,22	-	1,28	1,23	-	1,35	1,13	-	1,18	1,00	-	1,10	0,87	0,87	0,87

Таблица 1. Результаты расчетов для стали 12ХН2А при симметричном осевом нагружении с кручением

$\sigma_{f,T}, \sigma_{f,\text{э}}, \sigma_{f,T}^*$ – амплитуда максимального главного напряжения по модели, опытным данным и критерию МакДиармида, Матаке и др. соответственно, отнесенная к пределу выносливости материала

для пластичной конструкционной стали.

Проведена верификация модели на представительном ряде углеродистых (Ст.3, Ст. 20, Ст.30, Ст.40, Ст.45), легированных (Ст.40Х, 15Г2АФДпс, 30Х10Г10, 0Х14АГ12М, ЭИ–612, 12ХН3А, 34CrMo4 (35ХМЛ), 19Г), нержавеющей (типа Х18Н9Т), коррозионно-стойких (30Х10Г10,1Х13, 20Х13), аустенит-

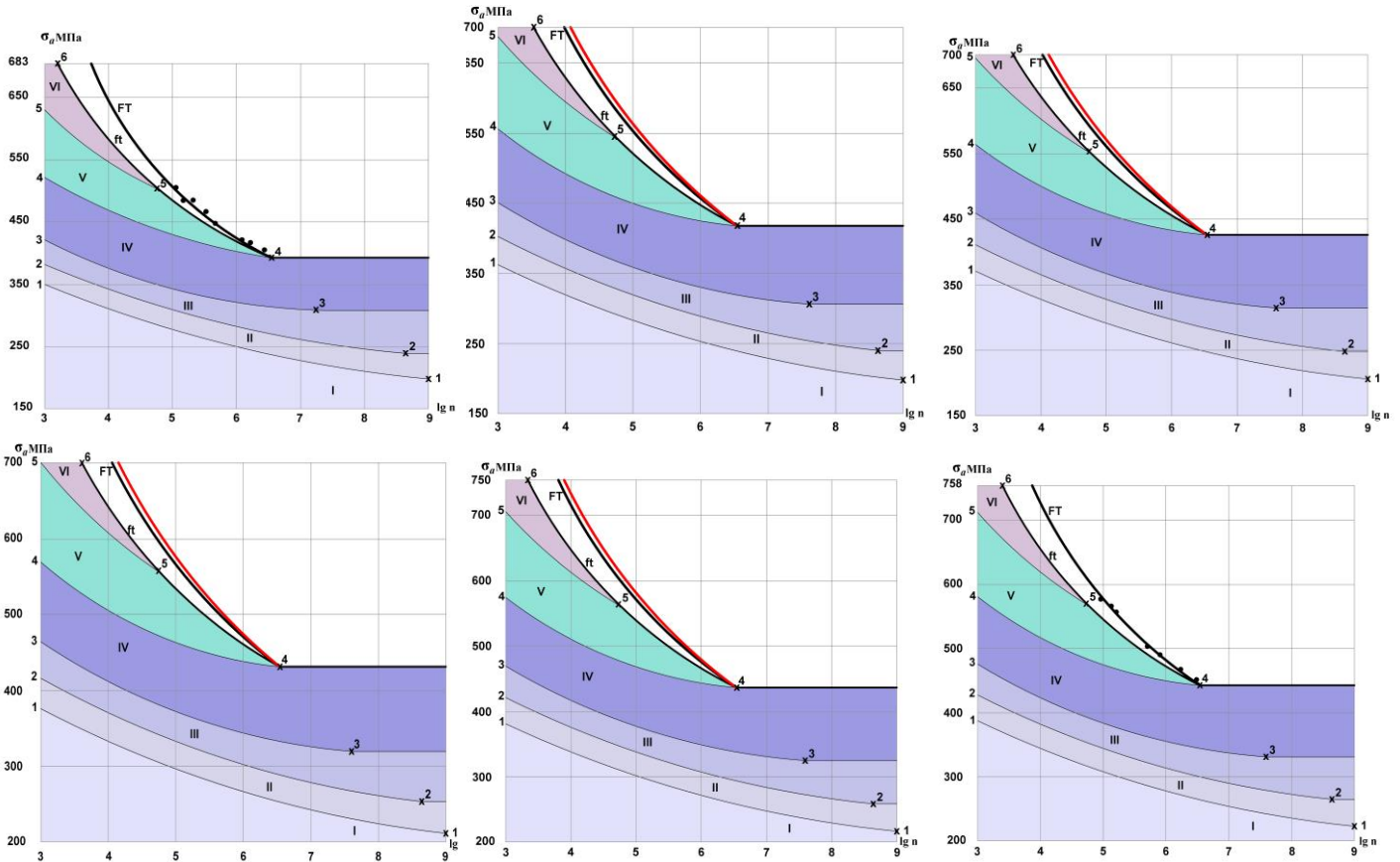


Рис.6 Анализ развития усталостного разрушения для стали 12ХН2А при двухосном симметричном нагружении, $\hat{\eta}_4 = 0.9$

ft – кривая усталости по дефектам мезоуровня, *FT* – кривая усталости по полному хрупкому разрушению, красная линия – кривая усталости МакДиармида, Данг Вана, Завойчинского; (1) – $\alpha_2 = 0$, (2) – $\alpha_2 = 0.2$, (3) – $\alpha_2 = 0.4$, (4) – $\alpha_2 = 0.6$, (5) – $\alpha_2 = 0.8$, (6) – $\alpha_2 = 1$

N_f	$\alpha_2 = 0$			$\alpha_2 = -0.2$			$\alpha_2 = -0.4$			$\alpha_2 = -0.6$			$\alpha_2 = -0.8$			$\alpha_2 = -1$		
	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\text{э}}$	$\sigma_{f,T}^*$
$5 \cdot 10^6$	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,74	0,74	0,74	0,64	0,64	0,64	0,60	0,60	0,60	0,55	0,55	0,55
$3 \cdot 10^6$	1,00	1,00	1,00	0,85	-	0,85	0,74	-	0,74	0,64	-	0,64	0,60	-	0,60	0,55	0,55	0,55
10^6	1,05	1,05	1,05	0,91	-	0,91	0,77	-	0,77	0,66	-	0,66	0,63	-	0,64	0,57	0,57	0,57
$5 \cdot 10^5$	1,09	1,09	1,09	0,95	-	0,95	0,80	-	0,80	0,67	-	0,67	0,65	-	0,66	0,59	0,59	0,59
$3 \cdot 10^5$	1,08	1,08	1,08	1,00	-	0,95	0,81	-	0,81	0,68	-	0,70	0,66	-	0,68	0,60	0,61	0,61
10^5	1,18	1,23	1,23	1,02	-	1,07	0,83	-	0,83	0,70	-	0,74	0,70	-	0,73	0,65	0,68	0,68
$5 \cdot 10^4$	1,23	1,30	1,30	1,08	-	1,11	0,86	-	0,86	0,73	-	0,77	0,73	-	0,77	0,68	0,73	0,73

Таблица 2. Результаты расчетов для пластичной стали при симметричном осевом нагружении с кручением, $\sigma_{-1} = 220 \text{ МПа}$; $\sigma_{f,T}$, $\sigma_{f,\text{э}}$, $\sigma_{f,T}^*$ – амплитуда максимального главного напряжения по модели, опытными данным и критерию Гафа, Полларда, Ли. соответственно, отнесенная к пределу выносливости стали но-мартенситных, трубных сталях; в черных и цветных металлах; чугунах; никелевых (ЭШЗ7БВД, Mar-M200, Udimet 700), алюминиевых (АК4–1, АЛ25, АК-4-Т1, ВИЗ, ВЭ5), титановых сплавах при различных простых процессах периодического нагружения с характерными средними линейными размерами зерен, лежащими в широком диапазоне, $d \in (10^{-3}, 5) \text{ мм}$. Дана классификация

наблюдаемых дефектов и исследована связь стадийности их развития с изменением физико-механических свойств в процессе нагружения. Найдены материальные константы модели, построены и проанализированы зависимости начала развития дефектов каждого уровня от отношения амплитуд напряжений и асимметрии цикла. Подтверждена схема расчета по предложенным определяющим соотношениям сравнением с известными критериями усталостной прочности. Имеющиеся базы данных по фактическим значениям длин и плотности наблюдаемых дефектов в зависимости от амплитуды и числа циклов нагружения и результаты по исследованию микроструктуры металлов физическими методами хорошо описываются в рамках данного подхода.

При сложном напряженном состоянии получены кривые усталости по определенному уровню хрупких дефектов, определяется остаточная долговечность с накопленным уровнем дефектов. Эти кривые определяют минимальную долговечность металла. До полного разрушения может происходить рост одиночных хрупких макротрещин, для описания которого необходимо привлекать механику разрушения. Во многих пластичных материалах развитие неупругого деформирования тормозит рост хрупких трещин и увеличивает долговечность в области многоциклового усталости. Для получения кривой усталости пластичных материалов необходимо рассматривать развитие процессов вязкого разрушения.

По идеологии развиваемого в диссертации подхода для описания процесса разрушения протяженных конструкций в **Главе 4** вводится непрерывная возрастающая функция поврежденности конструкции $\Omega = \Omega(\tau)$, $0 \leq \Omega \leq 1$, на интервале времени $\tau \in [0, t]$. В каждый момент времени τ поврежденность является случайной величиной, для которой определяется функция вероятности разрушения конструкции (конструкционный риск) $Q = Q(\tau)$ – вероятности, с которой повреждение $\Omega = 1$ в момент времени τ .

Протяженные конструкции типа нефте- и газопроводов разбивают на k участков, $k = 1, \dots, K$, по функционально-конструкторскому принципу, состоящих из $n_{k,q}$ типовых q -ых конструктивных элементов, $q = 1, \dots, Q$, и рассматриваются

соответственно функции поврежденности $\Omega_k = \Omega_k(\tau)$, $\Omega_{k,q} = \Omega_{k,q}(\tau)$ и вероятность разрушения $Q_k = Q_k(\tau)$, $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$ k -го участка и его q -го элемента.

Определяющие соотношения для вероятности $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$ задаются функцией типа распределения Пуассона в следующем виде:

$$Q_{k,q}(\tau) = \varphi_{k,q}(\tau) e^{1 - \varphi_{k,q}(\tau)}, \quad \varphi_{k,q}(\tau) = \lambda_q n_{k,q} \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,q}} \tau, \quad k=1, \dots, K, q=1, \dots, Q \quad (29)$$

где $t_{f,k,q}$ – срок службы q -го элемента k -го участка, который определяется по теории предельных процессов нагружения с учетом результатов Глав 2 и 3 настоящей работы, параметр \tilde{t} – назначаемый нормами проектирования экономически и социально приемлемый срок службы конструкции, λ_q – коэффициент интенсивности потока разрушений q -ого элемента, определяемый по статистике разрушений при эксплуатации аналогичных конструкций в аналогичных природно-климатических условиях.

Вероятность разрушения конструкции $Q = Q(\tau)$ определяется по одному из следующих выражений:

$$Q(\tau) = \sum_{k=1}^K \left(\frac{Q_k(\tau)}{1 - Q_k(\tau)} \right) \prod_{k=1}^K [1 - Q_k(\tau)], \quad Q_k(\tau) = \sum_{q=1}^Q \left(\frac{Q_{k,q}(\tau)}{1 - Q_{k,q}(\tau)} \right) \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,q}(\tau)] \quad (30)$$

$$\text{или} \quad Q(\tau) = 1 - \prod_{k=1}^K [1 - Q_k(\tau)], \quad Q_k(\tau) = 1 - \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,q}(\tau)] \quad (31)$$

Аналогичным образом определяется вероятность разрушения конструкции $Q_R = Q_R(\tau)$, $t_R \leq \tau$ (t_R – суммарное время всех R нормативных диагностик ее технического состояния), после проведения R диагностик и замене конструктивных элементов с недопустимыми дефектами через функцию вероятности разрушения q -ого элемента k -ого участка, обусловленного дефектами j -го вида, $j=1, \dots, J$, выявленными при r -ом диагностическом обследовании, $r=1, \dots, R$, $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$ такого вида:

$$Q_{k,r,q,j}(\tau) = \varphi(\tau) e^{1-\varphi(\tau)}, \quad \varphi(\tau) = \lambda_{r,q,j} n_{k,q} \frac{\tilde{t}}{\Delta t_{f,k,q,j}} \tau, \quad (32)$$

где $\lambda_{r,q,j}$ – коэффициент интенсивности потока разрушений q -ого элемента по дефекту j - го вида, выявленное r -ым диагностическим обследованием, или известные по статистике разрушений; $\Delta t_{f,k,q,j}$ – остаточный срок службы q -ого элемента k -ого участка по дефекту j -го вида, который находится по теории предельных процессов нагружения с учетом результатов Глав 2 и 3 и механики разрушения.

Для элементов трубопроводов в работе рассматриваются следующие виды наблюдаемых макродефектов: трещины определенных размеров в основном металле, кольцевых и продольных соединениях, днище ($j=1,2,3,4$ соответственно), в местах сварных соединений тройников, отводов и переходов ($j=5,6,7$); риски, вмятины, гофры ($j=8$); расслоение металла стенок конструктивных элементов ($j=9$). Суммирование по дефектам в функции вероятности разрушения конструкции $Q=Q(\tau)$ производится аналогично выражениям (30) или (31).

Критерий конструктивной надежности конструкции формулируется таким образом:

$$Q(\tau) \leq \tilde{Q}, \quad \text{при } t_{f,k,q} \geq \tilde{t}, \quad k=1,\dots,K, \quad q=1,\dots,Q, \quad (33)$$

где $Q=Q(\tau)$ – вероятность разрушения конструкции в интервале $\tau \in [0, t]$, определяемая по (29) – (31); \tilde{Q} – ее заданное приемлемое значение. Из равенства (33) определяется долговечность конструкции t_f .

Автором проанализировано значительное количество литературных источников и руководящих документов по проблеме безопасности эксплуатации газо- и нефтепроводов. На основе этого анализа в Главе 4 рассмотрена следующая классификация негативных факторов поражения при разрушении элементов продуктопроводов: токсическое воздействие от истечения перекачивающих токсических жидкостей и газов ($i=1$); термическое воздействие при возгорании струи газа, истекающего из сквозной трещины ($i=2$); термическое воздействие

при загорании облака газовой смеси ($i=3$); ударные воздушные волны, обусловленные расширением газа и продуктов его сгорания ($i=4$); поражение от разлета фрагментов разрушенных конструктивных элементов ($i=5$); поражение от разлива нефти с проникновением продукта на различные уровни грунтов и в водные бассейны ($i=6$). Эти факторы возникают с вероятностью J_i , $i=1, \dots, 6$, которая определяется в отрасли по статистике появления i -ых негативных факторов при разрушении аналогичных конструкций.

В диссертации формулируется система критериев безопасной эксплуатации протяженных конструкций с учетом антропогенного фактора как результат обобщения подходов, используемых в расчетной практике, в следующем виде:

$$Q(\tau)I_m(\tau) \leq \tilde{Q}\tilde{I}_m, \quad m=1, \dots, 4 \quad (34)$$

В (34) входят вероятности I_m поражения человека ($m=1$), промышленных объектов ($m=2$), флоры ($m=3$), фауны ($m=4$) от негативных факторов при разрушении конструкции в момент времени τ , $\tau \in [0, t]$, и их заданные приемлемые значения \tilde{I}_m . Из равенств (34) определяется долговечность $t_{f,m}$, $m=1, \dots, 4$, при которой эксплуатация конструкции становится опасной. На основе систематизации известных экспериментально-теоретических результатов по определению промышленных, социальных и экологических рисков от негативных факторов для вероятностей I_m выписываются следующие определяющие соотношения:

$$I_m = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{J_i I_{m,i}}{1 - J_i I_{m,i}} \right) \prod_{i=1}^6 [1 - J_i I_{m,i}] \quad \text{или} \quad I_m = 1 - \prod_{i=1}^6 [1 - J_i I_{m,i}] \quad (35)$$

$$I_{m,i} = \max \left\{ \int_0^R \int_0^{2\pi} \rho_m(r, \theta, \xi) I_{m,i}(r, \theta, \tau) r dr d\theta : 0 \leq \xi \leq t_p; 0 \leq \tau \leq t_i \right\}, \quad m=1, \dots, 4, \quad i=1, \dots, 6$$

$$\text{где } I_{m,1}(r, \theta, \tau) = a_m * \ln \left\{ \left(\frac{D(r, \theta, \tau)}{D_0} \right)^2 \frac{\tau}{t_1} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_1, \quad a_m, D_0 = \text{const}, \quad m=1, \dots, 4,$$

$$I_{m,i}(r, \tau) = b_m * \ln \left\{ \left(\frac{q(r, \tau)}{q_0} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_i} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_2, \quad b_m, q_0 = \text{const}, \quad m=1, \dots, 4, \quad i=1, 2,$$

$$I_{m,4}(r, \tau) = d_m * \ln \left(\left(\frac{p_0}{p(r, \tau)} \right)^{\alpha_m} + \left(\frac{I_0}{I(r, \tau)} \right)^{\beta_m} \right), \quad 0 \leq \tau \leq t_4, \quad d_m, p_0, \alpha_m, \beta_m, I_0 = const, \quad m = 1, \dots, 4,$$

$$I_{m,5}(r) = f_m + g_m \left(\frac{mv(r, \tau)^2}{I_0} \right), \quad 0 \leq \tau \leq t_4, \quad f_m, g_m, I_0 = const, \quad m = 1, \dots, 4,$$

$\rho_m = \rho_m(r, \theta, \xi)$ – функция распределения плотности людей, объектов, представителей флоры, фауны в зависимости от координат (r, θ, ξ) ; $D = D(r, \theta, \tau)$ – удельная концентрация токсического вещества; $q = q(r, \tau)$ – удельный тепловой поток горящего продукта; $p = p(r, \tau)$ и $I = I(r, \tau)$ – импульс и максимальное избыточное давление на фронте ударной волны; m и $v = v(r, \tau)$ – масса и скорость разлета фрагментов разрушенных участков.

В Приложении на основе анализа нормативной документации по рассматриваемой проблеме излагается метод оценки долговечности и сроков безопасной эксплуатации участков магистральных газо- и нефтепроводов, который включает: алгоритм расчета долговечности типовых конструктивных элементов по образованию дефектов определенного уровня по теории предельных процессов нагружения и теории разрушения, сформулированной в Главе 2 и 3 настоящей работы; расчет долговечности участка при сложном эксплуатационном нагружении с учетом механических, техногенных, геодинамических, сейсмических факторов и коррозионных воздействий; определение остаточной долговечности участка с дефектами определенного вида; расчет сроков безопасной эксплуатации с учетом антропогенного фактора по критерию безопасной эксплуатации конструкций, изложенному в Главе 4. Предложенный метод включен в ряд нормативных документов и использовался при подготовке Заключений о сроках службы и остаточной долговечности различных участков нефте- и газопроводов.

Согласно подходу Главы 4 и систематизации известных экспериментально-теоретических исследований предлагаются следующие определяющие соотношения для вероятности разрушения k – того участка $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$ при механических повреждениях от деятельности третьих лиц, техногенных воздействий при разрушении соседних объектов, аэрогидродинамических и геодинамических воздействий $j=10,11,12$ соответственно; при сейсмических воздействиях, $j=13$; коррозионных процессов: почвенной коррозии и коррозионной активности пере-

качиваемого продукта, $j=14$, биокоррозионных повреждений ($j=17$), коррозионных процессов от электромагнитных воздействий $j=15$, в т.ч. от стресс-коррозионного растрескивания под действием эксплуатационных напряжений и остаточных растягивающих напряжений в зонах сварных соединений ($j=16$):

$$Q_{k,j}(\tau) = \varphi_{k,j}(\tau) e^{1-\varphi_{k,j}(\tau)}, \quad j=10, \dots, 17 \quad (36)$$

$$\varphi_{k,j}(\tau) \equiv \begin{cases} \lambda_{k,j} \frac{\sigma_{z,k,j}^{\max} - R}{\sigma_{\sigma} - R} \frac{\tilde{t}}{\tilde{t} + t_j} \tau, & \text{при } \sigma_{z,k,j}^{\max} > R, \\ 0, & \sigma_{z,k,j}^{\max} \leq R, \end{cases} \quad j=10, 11, 12$$

$$\varphi_{k,13}(\tau) \equiv \begin{cases} \lambda_{k,13} (a^* - 1) \frac{\sigma_{z,k,13}^{\max} - R}{\sigma_{\sigma} - R} \frac{\tilde{t}}{\tilde{t} + t_{13}} \tau, & \text{при } a^* > 1, \sigma_{z,k,13}^{\max} > R, \\ 0, & a^* \leq 1, \sigma_{z,k,13}^{\max} \leq R, \end{cases}$$

$$\varphi_{k,j}(\tau) \equiv \lambda_{k,j} \frac{\tilde{t} v_{k,j}(\tau)}{\delta_k} \tau \quad j=14, 15, \quad \varphi_{k,j}(\tau) \equiv \lambda_{k,j} \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,j}} \tau, \quad j=16, 17,$$

где $\sigma_{z,k,j}^{\max}$ – максимальное растягивающее продольное напряжение в k -том участке от воздействий в течении времени t_j соответственно; R – расчетное сопротивление (СНиП 2.05.06-85*); σ_{σ} – временное сопротивление материала; $\lambda_{k,j}$ – известные по статистике коэффициенты интенсивности потока разрушений от соответствующих воздействий, $a^* \equiv a/a_0$, a – сейсмическое ускорение, δ_k – толщина основного металла k -того расчетного участка, $v_{k,j} = v_{k,j}(\tau)$, $j=14, 15$ – скорости развития почвенной коррозии и коррозионных процессов от блуждающих токов соответственно, $t_{f,k,j}$ – время разрушения k -того расчетного участка от стресс-коррозионных и биокоррозионных дефектов, $j=16, 17$.

Влияние рассмотренных факторов на вероятность разрушения конструкции $Q = Q(\tau)$ учитывается аналогично выражениям (30) или (31).

Определение долговечности $t_{f,k,q}$ и остаточного срока службы $\Delta t_{f,k,q,j}$, $j=1, \dots, 9$, в выражениях (29) и (32) производится по теории предельных процессов нагружения с учетом результатов Глав 2 и 3 диссертации.

Рассматриваются следующие типовые элементы: основной металл, $q=1$; кольцевое сварное соединение, $q=2$; продольное сварное соединение, $q=3$; тройниковое соединение, $q=4$; отвод, $q=5$; переходник, $q=6$; днище, $q=7$.

Процесс нагружения q -го элемента, $q=1, \dots, 7$, k -го расчетного участка на интервале времени $\tau \in [0, t]$ представляется кольцевым напряжением

$\sigma_{\theta\theta, k} = \sigma_{\theta\theta, k}(\zeta)$ и осевым напряжением $\sigma_{zz, k} = \sigma_{zz, k}(\zeta)$ в следующем виде:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta, k, q}(\tau) = K_{\theta, q} \sigma_{\theta} f(l_k) \left(\alpha + \sum_{s=1}^4 \sigma^s \sin \omega_s \tau \right), \\ \sigma_{zz, k, q}(\tau) = \frac{K_{z, q}}{K_{\theta, q}} \left(\nu \sigma_{\theta\theta, k, q}(\tau) + \sigma_z(k) \right) \end{cases} \quad k=1, \dots, K, \quad q=1, \dots, 7, \quad (37)$$

$$\sigma_{\theta} \equiv \frac{p(D-2\delta^*)}{2\delta^*}, \quad f(l_k) = 1 - C_k \frac{l_k}{L_0}, \quad \sigma_z(k) = E \left[-\alpha T_k \pm R \sqrt{\frac{1}{\rho_{1, k}^2} + \frac{1}{\rho_{2, k}^2}} \right], \quad T_k = T_0 \left(1 - \beta \frac{l_k}{L_0} \right)$$

Здесь введены обозначения: p – рабочее (нормативное) внутреннее давление перекачиваемого продукта, R – радиус основной трубы (СНиП «Магистральные трубопроводы»); C_k – коэффициент, учитывающий скорость падения средних значений внутреннего давления газа по длине участка, $0.25 \leq C_k \leq 0.35$; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент линейного расширения; T_k – рабочая температура и T_0 – начальная температура; β – коэффициент, учитывающий скорость падения температуры стенок конструктивных элементов по длине участка, $0 \leq \beta \leq 0.55$; $\rho_{i, k}$, $i=1, 2$ – радиусы технологического изгиба оси k -го расчетного участка трубопровода в горизонтальной и вертикальной плоскости при его укладке соответственно, $K_{\theta, q}$ и $K_{z, q}$ – коэффициенты концентрации напряжений в тангенциальном и осевом направлении для конструктивных элементов соответственно.

Функция поврежденности $\Omega_{k, q} = \Omega_{k, q}(\zeta)$, $0 \leq \Omega_{k, q} \leq 1$, определяется по теории предельных процессов нагружения, согласно которой:

для основного металла и переходника (индексы $q=1$ и $q=6$ опущены):

$$\Omega_k(\tau) = \frac{\sigma_{\theta} f(l_k) \alpha^2}{\Pi_1(\tau, k)} + \frac{|\sigma_z(k) + \nu \sigma_{\theta} f(l_k) \alpha| \alpha}{\sqrt{\Pi_1(\tau, k) \Pi_2(\tau, k)}} + \frac{\left(\sigma_z(k) + \nu k_p \sigma_{\theta} f(l_k) \alpha \right)^2}{\Pi_2(\tau, k)}, \quad (38)$$

$$\text{где } \Pi_1(\tau) = \alpha \sigma^*(\tau) + \sum_{s=1}^4 \sigma^s \sigma_{-1}(\tau, \omega_s), \quad \Pi_2(\tau, k) = \nu k_p \sigma_{\theta} f(l_k) \Pi_1(\tau, k) + |\sigma_z| \sigma^*(\tau), \quad (39)$$

для остальных конструктивных элементов ($q=2, \dots, 5$ и $q=7$) –

$$\Omega_{k, q}(\tau) = R_{1, q}(\tau, k) + \sqrt{R_{1, q}(\tau, k) R_{2, q}(\tau, k)} + R_{2, q}(\tau, k), \quad (40)$$

$$R_{1,q}(\tau,k) = K_{\theta,q} \sigma_{\theta} f(l_k) \left(\frac{\alpha}{\sigma_q^*(\tau, K_{\theta,q})} + \sum_{s=1}^4 \frac{\sigma^s}{\sigma_{-1,q}(\tau, \omega_s, K_{\theta,q})} \right), R_{2,q}(\tau,k) = \frac{K_{z,q}}{K_{\theta,q}} \left(\nu R_{1,q}(\tau,k) + \frac{|\sigma_z(k)|}{\sigma_q^*(\tau, K_{z,q})} \right)$$

В выражениях (39) $\sigma^* = \sigma^*(\tau)$ – кривая длительной прочности основного металла, $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\tau, \omega_s)$ – кривая усталости основного металла по макротрещинам мезоуровня, построенная по предложенной модели при симметричном одноосном нагружении. В выражениях (40) функции $\sigma_q^* = \sigma_q^*(\tau, K_{\theta,q})$ и $\sigma_q^* = \sigma_q^*(\tau, K_{z,q})$ – экспериментально определяемые кривые длительной прочности q -ого элемента при внутреннем давлении, функции $\sigma_{-1,q} = \sigma_{-1,q}(\tau, \omega_s, K_{\theta,q})$ – кривые усталости по дефектам мезоуровня в q -ом элементе, определяемые по модели в условиях симметричного внутреннего давления.

Параметр асимметрии α и амплитуды $\sigma^s, s=1, \dots, 4$, в (37) являются случайными величинами. Рассматриваются различные группы значений $(\alpha, \sigma^0 \dots \sigma^4)_g$,

$g=1, \dots, G$, для которых определяются долговечности $t_{f,k,q,g}$ по уравнениям:

$$\Omega_{k,q} \left(t_{f,k,q,g} \right) = 1, \quad g=1, \dots, G, \quad q=1, \dots, 7, \quad k=1, \dots, K, \quad (41)$$

где для $\Omega_{k,q} = \Omega_{k,q}(\zeta)$ имеем (38), (40). В качестве срока службы $t_{f,k,q}$ рас-

сматривается минимальное значение из $t_{f,k,q,g} : t_{f,k,q} = \min \{ t_{f,k,q,g}, g=1, \dots, G \}$.

Аналогично находится остаточный срок службы $\Delta t_{f,k,q,j}$ в выражениях (32).

Для иллюстрации метода приведены результаты расчетов проектных сроков службы и остаточной долговечности с допустимыми дефектами после проведения диагностики подземной линейной части магистрального газопровода на участке между компрессорными станциями с учетом сейсмических воздействий.

В **Заключении** сформулированы **Основные результаты работы**, которые заключаются в следующем:

1. Хрупкое усталостное разрушение металлов рассматривается как стадийный процесс последовательного образования, развития и слияния дефектов микро-, мезо- и макроуровней. Сформулирована система гипотез, отражающая физические закономерности усталостного масштабно-структурного разрушения при пропорциональных процессах нагружения. Введены понятия усредняющих функций, учитывающих плотность этих дефектов в представительном объеме и отражающих процесс разрушения от рассеянных повреждений до одиночных трещин конечной длины, и вероятности достижения предельных значений усредняющих функций для различных процессов нагружения.

2. Построена теория усталостного масштабно-структурного разрушения металлов при пропорциональном процессе нагружения с симметричным и асимметричным циклами напряжений, охватывающая весь поэтапный процесс разрушения с выделением типичных состояний – дефектов определенных масштабно-структурных уровней, и описывающая вероятность разрушения на каждом уровне системой рекуррентных определяющих соотношений. Универсальность этих соотношений состоит в том, что в качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения, а система материальных функций определяется по результатам усталостных испытаний при симметричных одноосном и двухосном равномерном нагружениях и сдвиге и учитывает асимметрию цикла и отношение главных напряжений по экспериментально обоснованным современным критериям усталостной прочности металлов.

3. Сформулирована система критериев безопасности, оценивающих конструкционные, социальные, промышленные и экологические риски при эксплуатации протяженных объектов, проходящих по различным природно-климатическим территориям. Введено понятие срока службы конструкции как случайной функции, отражающей случайное эксплуатационное нагружение, пуассоновское распределение вероятности разрушения типовых конструктивных элементов, случайное распределение механических, техногенных, аэрогидродинамических, геодинамических, сейсмических и коррозионных воздействий.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК

- [1]. Завойчинская Э.Б. Представление процессов несинхронного нагружения в пространстве напряжений // Вестник Московского ун-та, сер. Математика, механика. №4.1989. с.99 – 102.
- [2]. Завойчинская Э.Б., Сатаров А.Г. Взаимосвязь параметров асимметричного сложного нагружения при разрушении // Механика твердого тела, 1, 1997. с. 122-129.
- [3]. Zavoichinskaya E.B. , Sattarov A.G. The relationship between the parameters of asymmetric complex loading at failure//Mechanics of Solids. USA: Allerton Press Inc. 1997. Vol.32. N 1. p. 98– 104.
- [4]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. Теоретические основы и практические подходы анализа безопасности конструкций трубопроводов // Справочник. Инженерный журнал. № 5. 1998. ч.1. с. 48– 52.
- [5]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. Теоретические основы и практические подходы анализа безопасности конструкций трубопроводов // Справочник. Инженерный журнал. № 6. 1998. ч.2. с.41– 47.
- [6]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. Теоретические основы и практические подходы анализа безопасности конструкций трубопроводов // Справочник. Инженерный журнал. № 1. 1999. ч.3. с. 31– 41.
- [7]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. Теоретические основы и практические подходы анализа безопасности конструкций трубопроводов // Справочник. Инженерный журнал. № 4.1999. ч.4. с. 47– 51.
- [8]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов. Часть 1. Определение вероятности разрушения и сроков безопасной эксплуатации и очередного обследования участка трубопровода // Контроль. Диагностика. № 5 (95). 2006. с. 15–23.
- [9]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов. Часть 2. Промышленная безопасность и приемлемый конструкционный риск участка // Контроль. Диагностика. № 8 (98), 2006. с. 54–61.
- [10]. Zavoichinskaya E.B., Zavoichinskii B.I. Estimation of structure durability using the state diagnostic and safety requirements // Engineering & Automation problems, vol.5. № 1. 2006. p. 70-77.
- [11]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов. Часть 3. Классификация трубопроводов по продолжительности эксплуатации и принципиальная схема расчета их срока службы // Контроль. Диагностика. № 6 (108). 2007. с. 43–49.
- [12]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов. Часть 4. Теоретические основы метода прогнозирования ресурса трубопровода на стадиях проектирования и эксплуатации // Контроль. Диагно-

стика. № 8 (110). 2007. с.36–45.

[13]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Теоретические основы экспертной оценки сроков службы газопроводов на стадии проектирования. // Газовая промышленность. № 8. 2007. с.82–86.

[14]. Завойчинская Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения материалов в проблеме структурной диагностики физическими методами // Проблемы машиностроения и автоматизации, № 3. 2007. с.52–58.

[15]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика экспертной оценки срока службы газопроводов на стадии проектирования // Газовая промышленность, № 12. 2007. с. 35–38.

[16]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Прогнозирование долговечности конструкций магистральных газопроводов с учетом диагностики их технического состояния и условий безопасности // Газовая промышленность, № 9. 2008. с. 84–87.

[17]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Общая теория долговечности протяженных конструкций, эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях // Проблемы машиностроения и автоматизации, № 2. 2008. с.46–52.

[18]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Диагностика технического состояния и прогнозирование долговечности конструкций трубопроводов с учетом требований безопасности // Контроль. Диагностика. № 10. 2008. с. 41–47.

[19]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Прогнозирование долговечности конструкций МГ с учетом диагностики их технического состояния и условий безопасности // Газовая промышленность, № 12. 2008. с. 27–30.

[20]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Проектная оценка долговечности протяженных конструкций магистральных трубопроводов // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 1. 2009. с. 114–122.

[21]. Завойчинская Э.Б. Об одной модели описания микроразрушения металлов // Проблемы машиностроения и автоматизации, № 1. 2009. с. 60–65.

[22]. Завойчинская Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения металлов при полигармоническом нагружении // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 3. 2009. С.27–34.

[23]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б., Волчанин А.В. Вероятностная оценка сроков службы протяженных конструкций при проектировании // Справочник. Инженерный журнал. № 9. 2009. с. 18–26.

[24]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б., Волчанин А.В. Вероятностная оценка сроков службы протяженных конструкций при проектировании. Продолжение // Справочник. Инженерный журнал. № 11. 2009. с. 19–25.

[25]. Завойчинская Э.Б. К проблеме микроразрушения металлов при циклических нагрузках // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 1. 2010. с. 43–52.

[26]. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении // Справочник. Инженерный журнал. № 3. 2010. с. 41–46.

[27]. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении (продолжение). Часть 2 // Справочник. Инженер-

ный журнал. № 7. 2010. с. 16–22.

[28]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Механика субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин при сложном напряженном состоянии // Справочник. Инженерный журнал. № 10. 2010. с. 22–27.

[29]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Механика макроскопических трещин при сложном напряженном состоянии // Справочник. Инженерный журнал. № 3. 2011. с. 37–43.

[30]. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения металлов при гармоническом нагружении // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского, Н. Новгород.: Изд-во ННГУ им. Н.И.Лобачевского, № 4, часть 4. 2011. с. 1483–1484.

[31]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения металлов при сложном напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 2. 2011. с. 31–39.

[32]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Физическая механика микро- и макроразрушения сталей и сплавов при циклическом нагружении // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. 8(173). 2011. 32 с.

[33]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения металлов при сложном напряженном состоянии // Справочник. Инженерный журнал. № 3. 2012. с. 52–56.

[34]. Завойчинская Э.Б. Микро- и макромеханика разрушения элементов конструкций // Механика твердого тела, № 3. 2012. с. 54–77.

[35]. Zavoichinskaya E.B. Micro- and macromechanics of fracture of structural elements // Mechanics of Solids. USA: Allerton Press Inc. 2012. N 3. p. 304–323.

[36]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б., Волчанин А.В. Вероятностная оценка остаточных сроков безопасности эксплуатации протяженных конструкций // Справочник. Инженерный журнал. № 7. 2012. с. 41–46.

[37]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б., Волчанин А.В. Вероятностная оценка остаточных сроков безопасности эксплуатации протяженных конструкций // Справочник. Инженерный журнал. № 12. 2012. с. 33–36.

[38]. Завойчинская Э.Б. О теории поэтапного накопления усталостных повреждений в металлах при пропорциональном циклическом нагружении // Изв. МГТУ МАМИ. Естественные науки, т.4, № 2(24). 2015. с. 68–75.

[39]. Завойчинская Э.Б. Развитие микро- и макротрещин в металлах и сплавах при пропорциональном циклическом нагружении // Проблемы машиностроения и автоматизации, № 1. 2016. с. 98–108.

[40]. Zavoichinskaya E.B. Mechanics of micro- and macro fracture of metals. Safety and durability of constructions under simple periodic loading // Journal of Mathematical Sciences. Vol.227. N 4. 2017. p.392.

[41]. Завойчинская Э.Б. О теории поэтапного усталостного разрушения металлов при сложном напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 1, 2018. с. 76–85.

[42]. Zavoichinskaya E.B. On the theory of Stage-by-Stage Fatigue Failure of Metals upon a Complex Stress State // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. Vol. 47. N 1. 2018. p.1-9.

Публикации в других изданиях

- [1]. Завойчинская Э.Б. Об одном представлении несинхронного предельного нагружения при плоском напряженном состоянии// Численное моделирование в задачах механики. М.: Изд-во МГУ, 1991. с.21– 27.
- [2]. Завойчинская Э.Б. Предельные процессы циклического нагружения при плоском напряженном состоянии// Автореферат канд.дисс. Москва, 1991. 14с.
- [3]. Завойчинская Э.Б. Об одном обобщении классических теорий прочности при плоском напряженном состоянии// Тезисы докладов Конф. «Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии», Севастополь, 7 – 23 июня, 1992. с. 32.
- [4]. Завойчинская Э.Б. Предельные циклические процессы при плоском напряженном состоянии// Вопросы механики сплошных сред. М.: Изд-во МГУ, 1993. с.68– 71.
- [5]. Завойчинская Э.Б. Об одном описании предельного полигармонического нагружения при плоском напряженном состоянии// Тезисы докладов 8 Межд. Конф. по механике композиционных материалов, 20– 22 апреля, 1993. Латвия, Рига, 1993. с.71.
- [6]. Завойчинская Э.Б. Об одном представлении предельных процессов несинхронного нагружения // Упругость и неупругость. Ч.2, 1993. Изд-во МГУ. с.121– 136.
- [7]. Завойчинская Э.Б., Сатаров А.Г. Взаимосвязь параметров асимметричного сложного нагружения при разрушении // Доклад на Конф. молодых ученых Ломоносов – 1994, М.: МГУ, 1994.
- [8]. Завойчинская Э.Б. Об одном обобщении классических теорий прочности для простых циклических нагружений // Аналитические численные и экспериментальные методы в механике, МГУ, 1995. с. 90– 98.
- [9]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. Основы нормирования показателей безопасности участка газонефтепродуктопровода на стадии проектирования// Доклады участников Международной Конф. «Безопасность трубопроводов», 17– 21 сентября 1995. М.: 1995. с. 254– 263.
- [10]. Завойчинский Б.И., Федоров И.С., Завойчинская Э.Б. Проектная оценка долговечности и безопасности подземных трубопроводов // Доклады Второй Международной Конф.: “ Безопасность трубопроводов” 28 – 31 августа 1997г. М.: 1997. с.23 – 32.
- [11]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. Методика оценки сроков службы газопроводов. М.: ИРЦ Газпром. 1997. 84 с.
- [12]. Завойчинская Э.Б., Силаева Т.Ю. Циклические нагружения с круговым отверстием // Вестник Пермского ун-та. Серия Математика. Механика. Информатика. Пермь: Изд-во Пермского Госуд. Ун-та, 1998.
- [13]. Zavoichinskii B.I., Zavoichinskaya E.B. Design estimation of the underground piping safety // Reports of Int. Conf.: High pressure pipeline reliability after a long time operation, 17-18 March, 1998. Praha: 1998. 15 p.
- [14]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. О критериальных условиях оценки социальной, промышленной и экологической безопасности трубопроводов // Доклады участников Третьей Международной Конф. «Безопасность трубопрово-

дов», 06 – 10 сентября 1999. М.: 1999. том 1. с. 113 – 123.

[15]. Zavoichinskaya E. About an approach to an estimation of time of short crack origin at quasiperiodic complex loading // Reports of Int. Conf.: Physical aspects of fracture. 5-17 June, 2000. NATO Advanced Study Institute, Corsica, France.

[16]. Завойчинский Б.И., Тутнов И.А., Завойчинская Э.Б. Рекомендации по оценке безопасности магистрального газопровода при проектировании. М.: ИРЦ Газпром, 2000. 105 с.

[17]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. О сложных предельных процессах циклического нагружения материалов // 8 Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, 23-29 августа 2001 г., Пермь. Тезисы. Екатеринбург: УрО РАН, 2001.

[18]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. О гипотезе прочности материалов при сложных циклических процессах // Упругость и неупругость. 2001. Изд-во МГУ. с. 297–299.

[19]. Завойчинский Б.И., Гиллер Г.П., Завойчинская Э.Б. Рекомендации по оценке безопасности и долговечности газопроводов при проектировании. М.: ОАО «Газпром». 2002. 160 с.

[20]. Завойчинская Э.Б., Кийко И.А. Введение в теорию процессов разрушения твердых тел. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ. 2004. 168 с.

[21]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методические рекомендации по срокам эксплуатации газопроводов. М.: ООО «ВНИИГаз». 2005. 100 с.

[22]. Завойчинская Э.Б. Об одном подходе к описанию микроразрушения твердых тел. // Международный Научный Симпозиум по проблемам механики деформируемых твердых тел, посвященный 95-летию со дня рождения А.А.Ильюшина, Москва, 19-20 января 2006. Тезисы докладов. М.: 2006. с. 59–60.

[23]. Завойчинская Э.Б. Об одном подходе к описанию микроразрушения твердых тел. // Упругость и неупругость. М.: Ленанд, 2006. с. 321–331.

[24]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б., Сметана С.М., Свердлик Ю.М., Ячменник О.В. Прогнозирование проектных сроков службы конструкций газопроводов, эксплуатируемых в сложных условиях // Reports of Int. Conf., PITSO 2007 (Pipeline Integrity and technical state outlook), 10-11 October, 2007. VNIIGAS, Moscow.

[25]. Завойчинская Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения металлов при симметричном нагружении – Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Л75. 21–29 апреля 2007 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. М.: Изд-во МГУ, 2007. с. 82.

[26]. Завойчинская Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения металлов при симметричном нагружении – Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Л75. 21–26 апреля 2008 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. М.: Изд-во МГУ, 2008, 173 с. с. 82–83.

[27]. Завойчинская Э.Б. Современные теории разрушения при сложном нагружении. Учебно-методическое пособие к специальному курсу кафедры теории упругости "Прочность и разрушение материалов и элементов конструкций". М.: Изд-во МГУ, 2008. 63с.

[28]. Завойчинская Э.Б. Об одной модели описания микроразрушения метал-

лов – Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Л75. 16-25 апреля 2009 г., Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова. М.: Изд-во МГУ, 2009, 162 с. с. 76.

[29]. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения металлов при сложном напряженном состоянии// Ломоносовские чтения–2010. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Л75. 16-25 апреля 2010 г., Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова. М.: Изд-во МГУ, 2010. с. 86.

[30]. Завойчинская Э.Б. Моделирование процесса микроразрушения металлов при сложном напряженном состоянии// Механика – машиностроению: сб. науч. тр. Международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении» и VI Международного симпозиума по трибофатике МСТФ 2010 ОИМ НАН Беларуси, Минск, 26-29 окт. 2010. с. 248–251.

[31]. Завойчинская Э.Б. Микро- и макромеханика разрушения металлов при сложном напряженном состоянии //Сб.: Упругость и неупругость, М.: Изд-во МГУ, 2011, с. 346–352.

[32]. Завойчинская Э.Б. Процесс микроразрушения металлов при сложном напряженном состоянии //Механика машин, механизмов и материалов. № 3(16), 2011. с. 34–37.

[33]. Завойчинская Э.Б. Определяющие соотношения теории микро- и макро-разрушения для гармонического одномерного нагружения// сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике «Механика-2011», Минск, 26–28 октября 2011г.; в 2 т. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С.Высоцкий (и др.). Минск, 2011. т.2. с. 277–283.

[34]. Завойчинская Э.Б. Об определяющих соотношениях теории микро- и макроразрушения для гармонического одномерного нагружения// Научная конференция «Ломоносовские чтения» ноябрь 2011 г., к 300-летию со дня рождения М.В.Ломоно-сова, секция механики. 17 ноября 2011 г. Тезисы. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2011.

[35]. Завойчинская Э.Б. Об определяющих соотношениях теории микро- и макро-разрушения для гармонического одномерного нагружения// Сборник Упругость и неупругость. - М.: Издательство Московского университета, 2012. с. 89–108.

[36]. Завойчинская Э.Б. Хрупкое микро- и макроразрушение при полигармоническом нагружении// Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Л75. 16-25 апреля 2012 г., Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова. М.: Изд-во МГУ, 2012. с.77.

[37]. Завойчинская Э.Б. Механика микро- и макроразрушения при простом гармоническом нагружении// Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Л75. 17 апреля 2013 г., Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова. М.: Изд-во МГУ, 2013. 77 с.

[38]. Завойчинская Э.Б. Механика микро- и макроразрушения металлов при простом гармоническом нагружении// Научная конференция «Ломоносовские чтения», секция механики, 16 апреля 2014г. Тезисы. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2014. 71 с.

[39]. Завойчинская Э.Б. Развитие микро- и макротрещин в металлах и сплавах// Научные труды IV-й Международной научной конференции «Фундаментальные

исследования и инновационные технологии в машиностроении». М. Издательский дом «Спектр», 2015. с. 104–107.

[40]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. О теории поэтапного накопления усталостных повреждений в металлах// Сборник Упругость и неупругость. - М.: Издательство Московского университета, 2016. с.308–313.

[41]. Завойчинская Э.Б. Усталостное микро- и мезоразрушение металлов при пропорциональном нагружении// Материалы XXII Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А. Г. Горшкова. Т. 2. М.: ООО «ТРП», 2016. с. 70–73.

[42]. Завойчинская Э.Б. О критерии поэтапного усталостного разрушения металлов при плоском напряженном состоянии// Научная конференция «Ломоносовские чтения». Секция механики. 18–27 апреля 2016г. Тезисы. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2016. с.79.

[43]. Завойчинская Э.Б. О критерии поэтапного усталостного разрушения металлов на различных масштабных уровнях при одноосном нагружении с несимметричным циклом// Научные труды Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ-2016) (Москва, 26-28 окт.2016 г). М. Изд-во ИМАШ РАН, 2016. с. 67-70.

[44]. Завойчинская Э.Б. О критерии усталостного разрушения металлов на различных масштабных уровнях при одноосном нагружении с несимметричным циклом// Материалы XXIII Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А. Г. Горшкова. М.: ООО «ТРП», 2017. т.2. с. 119-127.

[45]. Завойчинская Э.Б. О теории поэтапного усталостного разрушения металлов при сложном напряженном состоянии// Научные труды IV-й Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». М. Издательский дом «Спектр», 2017. с. 99–101.

[46]. Завойчинская Э.Б. О теории поэтапного усталостного разрушения металлов при сложном напряженном состоянии// Вопросы прикладной математики и проблема взаимодействия твердых тел с жидкой и газовой средой: Сб. тр. Всероссийской Конф., посвященной 85-летию И.А.Кийко. М.: Диалог-МИФИ. 2017. с. 68–82.

[47]. Завойчинская Э.Б. О критерии поэтапного усталостного разрушения металлов при полигармоническом процессе нагружения// Научная конференция «Ломоносовские чтения». Секция механики. 18–27 апреля 2016г. Тезисы. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова. 2017. с. 83-84.

[48]. Завойчинская Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения металлов при симметричном нагружении //Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. 16–25 апреля 2007 г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. с. 82.