

На правах рукописи

Завойчинская

Завойчинская

Элеонора Борисовна

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

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация

на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва

2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Физическая механика хрупкого усталостного разрушения металлов	24
1.1 Особенности усталостного разрушения металлов и сплавов на микроскопическом уровне.....	26
1.2 Развитие усталостного разрушения на мезоскопическом и макроскопическом уровнях	43
1.3 О методах изучения кинетики усталостного разрушения.....	61
1.4 О моделях усталостного разрушения металлов	64
ВЫВОДЫ по первой главе.....	72
ГЛАВА 2. Теория усталостного масштабного-структурного разрушения металлов при симметричных одноосном и равномерном нагружениях и сдвиге	76
2.1 Система гипотез о развитии усталостного разрушения в металлах	79
2.2 Определяющие соотношения теории и кривая усталостного разрушения на мезоуровне	88
2.3 Методика идентификации материальных функций теории при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении с симметричным циклом.....	98
2.4 Анализ определяющих соотношений теории	106
2.5 Определяющие соотношения и материальные функции для пропорциональных нагружений с асимметричным циклом.....	115
2.6 О кривой усталости с учетом неупругого деформирования.....	118
2.7 О кривой усталости по полному хрупкому разрушению.....	120
2.8 Анализ экспериментальных данных по развитию усталостного разрушения при одноосном нагружении и сдвиге.....	122
ВЫВОДЫ по второй главе.....	160

ГЛАВА 3. Теория усталостного масштабного-структурного разрушения металлов при пропорциональном нагружении.....	164
3.1 Определяющие соотношения теории и кривая усталостного разрушения по дефектам мезоуровня	164
3.2 Система материальных функций для произвольного пропорционального нагружения.....	166
3.3 Анализ экспериментальных данных по развитию усталостного разрушения металлов при различных процессах плоского напряженного состояния.....	173
ВЫВОДЫ по третьей главе.....	188
ГЛАВА 4. Критерий безопасной эксплуатации протяженных конструкций.....	190
4.1 Конструкционный риск	194
4.2 Критерий конструктивной надежности.....	200
4.3 Критерий безопасной эксплуатации конструкций.....	201
ВЫВОДЫ по четвертой главе.....	219
ПРИЛОЖЕНИЕ. Метод экспертной оценки долговечности магистральных трубопроводов.....	221
П.1 Представление процесса эксплуатационного нагружения расчетного участка трубопровода.....	222
П.2 Определение долговечности обобщенных конструктивных элементов.....	228
П.3 Критерий безопасной эксплуатации участков трех классов в сложных эксплуатационных и природно-климатических условиях.....	231
П.4 Практическая реализация теоретических и прикладных результатов диссертационных исследований.....	242
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	268
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	271
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	282

ВВЕДЕНИЕ

1. 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.

В **Главе 1** проводится анализ результатов обширных экспериментально-теоретических исследований и теорий усталостного разрушения, полученных в физике твердого тела, материаловедении, механике деформируемого твердого тела для представительного ряда углеродистых, легированных, нержавеющей, коррозионно-стойких, аустенитно-мартенситных сталей; черных и цветных металлов; чугунов; никелевых, алюминиевых, титановых сплавов.

Глава 2 посвящена математическому моделированию процессов хрупкого усталостного разрушения металлов и сплавов на разных масштабных-структурных уровнях, формулировке системы гипотез о развитии разрушения и на их основе построению теории усталостного разрушения металлов при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении, охватывающей весь поэтапный процесс разрушения с выделением соответствующего типичного состояния – дефекта определенного масштабного-структурного уровня и описывающей вероятность разрушения на каждом уровне системой рекуррентных определяющих соотношений.

В **Главе 3** формулируются определяющие соотношения для функций вероятности разрушения при трехмерном пропорциональном нагружении,

материальные функции которых выбираются на основе современных теорий усталостной прочности.

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

В **Приложении** излагается метод оценки сроков безопасной эксплуатации конструкций нефте- и газопроводов, основанный на предложенном критерии конструктивной надежности, в котором представленная модель усталостного разрушения применяется при оценке долговечности конструктивных элементов. Для иллюстрации метода приводятся результаты расчетов проектных сроков службы и остаточной долговечности линейного участка подземного магистрального газопровода.

Тематически работа охватывает широкий круг современных проблем, связанных 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 успешного решения этой задачи возникает необходимость построить теорию усталостного разрушения на различных масштабных-структурных уровнях.

Объектом настоящего исследования являются металлы и сплавы. Предметом исследования являются процессы хрупкого усталостного разрушения металлов и сплавов, занимающие одно из основных мест в проблеме оценки долговечности конструкций, т.к. именно этот тип разрушения имеет место в практических случаях.

Хрупкому усталостному разрушению металлических конструкций предшествует процесс последовательного зарождения и развития хрупких микро- и макротрещин.

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, тепловых флуктуаций, обеспечивающих преодоление потенциальных барьеров при перестройке атомного масштаба, микро- и макротрещин и т.п., делают процесс усталостного разрушения стохастическим и возникает необходимость вероятностного подхода при его описании.

Если рассматривать процесс хрупкого усталостного разрушения с точки зрения металлофизиков как последовательный процесс зарождения, развития и слияние дефектов всех уровней, то появляется возможность разработать теорию усталостной прочности для всего временного диапазона до макроразрушения. Большинство существующих феноменологических теорий хрупкого разрушения строится по макротрещинам. Целью настоящей работы является построение феноменологической теории усталостного разрушения металлов при трехмерных пропорциональных (простых) нагружениях в рамках механики деформируемого твердого тела, в которой формулируются определяющие соотношения, позволяющие находить вероятность достижения дефектами каждого уровня

определенных предельных состояний с образованием дефектов последующих уровней, что дает возможность построить кривую усталости металла по определенному уровню накопленных дефектов. Этому посвящены вторая и третья главы диссертации.

Рассматриваемые в Главе 4 и Приложении вопросы мотивированы рядом прикладных задач по расчету долговечности и безопасной эксплуатации различных участков магистральных нефте- и газопроводов. Предложенная модель усталостного разрушения доведена до применения в расчетах долговечности конструктивных элементов газо- и нефтепроводов при реализации ряда Заключений о сроках службы участков трубопроводов.

Охарактеризуем кратко задачи, рассмотренные в каждой из глав настоящей работы.

Целью **Главы 1** является обоснование требования к современной теории усталостного разрушения учитывать развитие процесса последовательного усталостного разрушения на различных масштабно-структурных уровнях. Представлены результаты системных исследований стадийности развития процесса хрупкого разрушения, который характеризуется прохождением определенных стадий эволюции полосовой субструктуры, появления, роста и слияния хрупких микротрещин и нераспространяющихся трещин на микроуровне и коротких и макротрещин на мезоуровне, ведущим к образованию единичной макротрещины. На их основе дается классификация дефектов и выделяется шесть масштабно-структурных уровней разрушения. На первом (инкубационном) уровне в результате развития вакансионных кластеров и роста их плотности в полосах скольжения происходят их слияния с образованием субмикротрещин, и формируются упорядоченные самоорганизующиеся субструктуры двух категорий: полосовая структура и ячеистая структура. В результате развития полосовой при достижении критического значения плотности

дефектов первого уровня имеет место фазовый переход от полосовой структуры к хрупким микротрещинам (дефектам второго уровня), стабильность размеров которых создает возможность накопления высоких концентраций и слияния с переходом на третий уровень – к зарождению нераспространяющихся трещин внутри зерна и на границах зерен. С достижением плотности нераспространяющихся трещин характерного предельного значения происходят их слияния с переходом к четвертому уровню с образованием коротких трещин, выходящих на границу зерна. Достигаются линии необратимой повреждаемости Френча, образуются транскристаллитные и зернограничные макротрещины (дефектов пятого и шестого мезоуровней), возникает одна или несколько одиночных макротрещин, дальнейшую эволюцию которых изучает механика разрушения. При многоцикловой и гигацикловой усталости многих металлов и сплавов в интервале $N_f \in [5 \cdot 10^6, 10^{10}]$ циклов происходит упругое макродеформирование и образование коротких трещин по механизмам межзеренного или транскристаллитного скола. При числе $N_f \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов одновременно идут два процесса: развитие хрупких трещин и вязкое разрушение.

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. На наш взгляд, к настоящему времени не построены зависимости механических параметров определяющих соотношений механики деформируемого твердого тела, учитывающие структурные закономерности и физические механизмы разрушения.

В феноменологических теориях вводятся понятия поврежденности в тензорной форме, функционально определяемой процессом нагружения в детерминированном или вероятностном виде. Большинство феноменологических теорий рассматривают эволюцию поврежденности материала, но не учитывают архитектуру внутреннего строения металла, физические механизмы и стадийность процесса усталостного разрушения. При этом, согласно экспериментальным данным, различным уровням развития усталостного разрушения соответствуют определенные состояния структуры металла и свои физические механизмы разрушения. Механика хрупкого разрушения, в свою очередь, изучает развитие единичных хрупких макротрещин на макроуровне на основе деформационных, силовых и энергетических подходов.

С учетом вышеизложенного целью настоящей диссертации является построение теории хрупкого усталостного разрушения при сложном напряженном состоянии в рамках физико-механического подхода, как строятся в современных теориях пластичности, описывающей эволюцию микро- и мезодефектов в металлах и позволяющую находить долговечность металла и остаточный срок службы по определенному уровню накопленных дефектов.

Для решения поставленной задачи в **Главе 2** формулируется система гипотез о развитии дефектов в металле на микро-, мезо- и макроуровне (типа

хрупких микро- и макротрещин), базирующаяся на анализе результатов, проведенном в Главе 1. Предлагаемая модель описывает процессы хрупкого усталостного разрушения 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 до разрушения. Процесс разрушения рассматривается на шести масштабно-структурных уровнях в соответствии со стадиями эволюции структуры металла по разным физическим механизмам, строится классификация хрупкого разрушения по дефектам этих уровней и проводится систематизация известных опытных данных. Вводятся понятия усредняющей функции данного уровня, которая отражает процесс разрушения, и вероятности разрушения по дефектам данного уровня, связанной с процедурой его описания, что позволяет применить подходы механики деформируемого твердого тела к описанию процесса разрушения на микро- и мезоуровне. Полагается, что предельное состояние дефектами данного уровня характеризуется достижением усредняющей функцией этого уровня определенного предельного значения. Для трех видов нагружения (одноосного нагружения, сдвига и двухосного равномерного нагружения) с симметричным и несимметричным циклами предлагается система рекуррентных определяющих соотношений для вероятности разрушения на каждом уровне, описывающая процесс развития хрупкого разрушения в виде ограниченного числа шагов до макроусталостного разрушения с выходом на кривую усталости по дефектам мезоуровня и образованию единичной макротрещины. При этом особенностью построения этих соотношений является то, что в качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения, а материальные функции определяются по данным стандартных усталостных испытаний с учетом результатов физических исследований по развитию

хрупких трещин и учитывают асимметрию цикла напряжений в соответствии с экспериментально обоснованными известными критериями усталостной прочности металлов. По модели определяются моменты времени начала развития дефектов каждого уровня, а также долговечность металла по дефектам мезоуровня (по образованию единичных макротрещин). Выполняется теоретическое и экспериментальное обоснование достоверности предложенной математической модели и показывается соответствие опытным данным для большого класса металлов и сплавов.

Глава 3 посвящена решению задачи построения определяющих соотношений при сложном напряженно-деформированном состоянии в условиях пропорциональных одночастотных нагружений с симметричным и несимметричным циклами напряжений. Изложенный в Главе 2 подход делает возможным построить 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 по экспериментально обоснованным критериям усталостной прочности металлов. Это позволяет получить кривую усталости металла как результат последовательного зарождения, развития и слияния хрупких дефектов для сложного напряженного состояния. Достоверность полученных результатов обеспечивается сравнением расчетов по предложенной модели для ряда конструкционных сталей, алюминиевых, магниевых и титановых сплавов при различных плоских напряженных состояниях с известными подходами.

Автором проанализировано значительное количество литературных источников и руководящих документов по проблеме безопасности и рисков эксплуатации газо- и нефтепроводов. На основе этого анализа в **Главе 4**

решается задача определения вероятности разрушения конструкции (конструкционного риска) через вероятности разрушения ее большого количества однотипных конструктивных элементов. Нахождение срока службы конструктивного элемента производится с учетом результатов анализа вероятности разрушения металла по определенному уровню накопленных дефектов на основе предложенной в диссертации модели. В предположении, что вероятность разрушения конструкции не должна превышать ее заданного приемлемого значения (критерий конструктивной надежности), выписывается условие для нахождения срока службы конструкции.

Систематизируются известные экспериментальные данные и методы расчета промышленных, социальных и экологических рисков от негативных факторов поражения при разрушениях конструктивных элементов. Как обобщение известных подходов, используемых в расчетной практике, критерий безопасности представляется неравенством, в котором конструкционный риск не превышает приемлемого значения, определяемого по расчетным и приемлемым значениям промышленных, социальных и экологических рисков. Записывается уравнение для определения срока безопасной эксплуатации конструкций.

В **Приложении** излагается метод оценки сроков безопасной эксплуатации и остаточной долговечности участков магистральных газо-, нефте- и продуктопроводов при сложном эксплуатационном нагружении и находящихся под воздействием механических, техногенных, геодинамических, сейсмических факторов, а также различных видов коррозии и стресс-коррозии. Предлагаемый метод разработан на результатах анализа нормативно-регламентирующей документации по этой проблеме и основывается на критерии безопасной эксплуатации конструкций, изложенном в Главе 4 и теории разрушения их

конструктивных элементов, сформулированной в Главе 2 и Главе 3 настоящей работы. Для иллюстрации метода приведены результаты расчетов проектного срока службы подземного участка магистрального газопровода и остаточной долговечности этого участка с допустимыми дефектами конструктивных элементов после проведения технической диагностики.

2. Теоретическая и практическая значимость

Диссертация носит экспериментально-теоретический характер. Разработанная в ней модель расширяет границы применения механики разрушения металлов с включением области развития процесса усталостного разрушения на микро- и мезоуровнях. Теоретический вклад в развитие одного из разделов 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 масштабном-структурном уровне при простых процессах нагружения в условиях сложного напряженно-деформированного состояния.

Диссертационная работа выполнялась в Московском государственном университете им. 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).

Предложенная модель хрупкого разрушения доведена до применения в расчетах долговечности конструктивных элементов нефте- и газопроводов с учетом анализа образования и развития дефектов. Метод по оценке долговечности был разработан по заданию Управления проектирования и экспертизы ПАО Газпром 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.).

На основе предложенного метода подготовлен ряд Заключений о сроках службы и остаточной долговечности различных конструкций магистральных газо- и нефтепроводов с определенным уровнем накопленных дефектов, в их числе:

- «Заключение о техническом состоянии и остаточной работоспособности линейной части МНПП «Московский НПЗ» –ЛПДС «Володарская» по результатам их комплексной диагностики». Архив ОАО «Мостранснефтепродукт», Москва, 2003;
- «Заключение о техническом состоянии и остаточной работоспособности МНПП «Уфа - Камбарка» (ЛПДС «Черкасы» –НБ «Камбарка»)). Архив ОАО «Уралтранснефтепродукт», Москва, 2004;
- «Заключение о техническом состоянии и остаточной работоспособности МНПП «Ишинбай – Уфа» (ЛПДС «Салават» –ЛПДС «Черкасы») по результатам их комплексной диагностики». Архив ОАО «Уралтранснефтепродукт», Москва, 2004;
- «Заключение о техническом состоянии и остаточной работоспособности МНПП «Уфа – Омск» (ПС«Петропавловск»–ПС«Исык-Куль», ПС«Исык-Куль»–ПС«Омск») по результатам их комплексной диагностики». Архив ОАО «Уралтранснефтепродукт», Москва, 2004;
- «Заключение о техническом состоянии и остаточной работоспособности шести участков МНПП «Альметьевск – Нижний Новгород» по результатам их комплексной

- диагностики» Архив ОАО "Средне-Волжский Транснефтепродукт". Москва, 2004;
- «Заключение о сроке службы участка МГ КС «Сохрановка» – КС «Каменск–Шахтинская» – КС «Октябрьская». ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2006;
 - «Заключение о сроке безопасной эксплуатации ГИС на участке МГ КС «Сохрановка» – КС «Каменск–Шахтинская» – КС «Октябрьская». ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2006;
 - «Заключение о сроке безопасной эксплуатации УРГ-1 с МГ КС «Сохрановка» – КС «Октябрьская» на газопровод на г. Б.Калитву. ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2006;
 - «Заключение о сроке безопасной эксплуатации УРГ-2 с МГ КС «Сохрановка» – КС «Октябрьская» на газопровод на г. Волгодонск. ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2006;
 - «Заключение о сроке безопасной эксплуатации УРГ-3 с МГ КС «Сохрановка» – КС «Октябрьская» перед КС «Октябрьская». ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2006;
 - «Заключение о сроке безопасной эксплуатации станции ГИС КС «Артезиан» газопровода «Магат – Северный Кавказ». Архив ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2007;
 - «Заключение о сроках безопасной эксплуатации ГИС, УРГ, УОГ, ДКС-1 МГ ООО "Кавказтрансгаз": "Новопсков – Аксай – Моздок" и "Изобильный – Невинномысск». Архив ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2007;
 - «Заключение о сроках безопасной эксплуатации ГИС и ДКС-2 ООО «Кавказтрансгаз»: «Новопсков – Аксай – Моздок» и «Изобильный – Невинномысск» и Северо-Ставропольского подземного хранилища газа». Архив ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2007;
 - «Заключение о сроках безопасной эксплуатации конструкции ГИС «Бурмакино» МГ «Починки – Грязовец» и УРГ с МГ «Починки – Грязовец» на газопровод «Грязовец – КГМО» и газопровод «Горький – Череповец» на участке ООО «Севергазпром». Архив ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2007;
 - «Заключение о сроках безопасной эксплуатации УРГ с МГ «Починки – Грязовец» на МГ «Саратов – Горький», на МГ «Горький – Центр», на МГ «Горький – Череповец», на отвод к Костромской ГРЭС на участке ООО «Волготрансгаз». Архив ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2007;
 - «Заключение о сроках безопасной эксплуатации ГИС газопровода «Починки –

Изобильное – ССПХГ» ООО «Кавказтрансгаз». Архив ООО НПО «ЭТАН-Промгаз», Москва, 2008;

– «Заключение о сроках безопасной эксплуатации трубопроводов линейной части МГ «Сахалин – Хабаровск – Владивосток» на участке ГКС – КС-1 и на участке КС-1 – КС-2». Архив ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2009.

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 им. 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.»

3. Методы исследований

На наш взгляд, данная работа является вкладом в объединение методов 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 работы являются понятия вероятности разрушения по дефектам определенного масштабно-структурного уровня, вероятности разрушения конструктивного элемента (конструкционного риска) и вероятности разрушения конструкции с учетом социального, промышленного и экологического рисков (вероятностей поражения человека, объектов и экологии при разрушении конструкции).

Построение критериев усталостного разрушения основывается на анализе развития усталостного разрушения на разных масштабно-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.

4. Научная новизна

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 масштабно-структурных уровнях разрушения. Теория описывает вероятность хрупкого разрушения на каждом масштабном 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. В работе выписываются соответствующие выражения. 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 зависимости от структурных закономерностей и

физических механизмов усталостного разрушения на разных масштабных 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-, нефте- и продуктопроводов, основанный на разработанном критерии безопасности эксплуатации участков и предложенной теории поэтапного разрушения их конструктивных элементов.

5. Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- система гипотез, отражающая физические закономерности стадийного процесса изменения структуры материала 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, описывающая основные физические и механические закономерности процесса усталостного разрушения;
- критерий конструктивной надежности с учетом антропогенного фактора как теоретическое обобщение существующих научных подходов к оценке безопасности конструкций продуктопроводов;
- метод оценки сроков безопасной эксплуатации конструкций нефте- и газопроводов на основе предложенного критерия безопасности с учетом определения сроков службы по теории поэтапного усталостного разрушения металла конструктивных элементов. Практическая ценность метода определяется его использованием при разработке руководящих

документов и Заключений о сроках службы и остаточной долговечности различных участков магистральных трубопроводов.

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 масштабных-структурных уровнях.

Полнота системы утверждений соответствует тому, что прогнозируемые виды разрушений реализуются в экспериментах. Полнота системы утверждений 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.

6. Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность и достоверность результатов расчетов и теоретических выводов, сформулированных в настоящей 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.

7. Апробация результатов

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

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 – 2017 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, в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, на Международных симпозиумах и семинарах по проблемам безопасности трубопроводов ПАО «Газпром», ООО «Газпром ВНИИГаз», ОАО «Гипро-спецгаз», 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. (2015–2017 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 (2013–2017 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 Международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (2016г.,2017г.), на научно-исследовательском семинаре по механике деформируемого твердого тела под руководством академика РАН И.Г. Горячевой (2016 г.), на междисциплинарном семинаре с международным участием «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.

8. 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. 39 статей опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ.

Представленные в диссертации научные результаты получены лично автором. Вклад автора в публикации, выполненные в соавторстве, состоял в анализе известного экспериментально-теоретического материала, формулировке гипотез и критериев, выполнении аналитических исследований и численных расчетов. Во всех случаях использования результатов других исследований в работе приводятся ссылки на источники информации.

9. 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.

10. 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.

ГЛАВА 1. Физическая механика хрупкого усталостного разрушения металлов

В первой главе излагаются физико-механические основы хрупкого усталостного разрушения металлов и сплавов на микро-, мезо- и макроуровне, экспериментально–теоретические и исторические аспекты формирования которых содержатся в значительном количестве монографий и статей [4,13,14,16,18–23,27,28,33,35,42,44,46–50,56,58–66,70,72,74,78,84,88,92,98,100,101,111,113,114,119,120,129–134,137,140–145,151,159,163,171,174,176,179,183,187,190–195,197–202,204–208,210,214,217,220,222,231,233,240,244,248,255,258,260–267,270,272–274,279,281].

Автором проанализировано большое количество работ по физике твердого тела, металловедению, механике деформируемого твердого тела, проводимых различными научными школами в Институте материаловедения имени А.А. Байкова, ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, МГУ им. М.В. Ломоносова, МИСиС, МГТУ им.Н.Э. Баумана, МИФИ, СПбГУ, Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, МГТУ «МАМИ», Институте физики прочности и материаловедения СО РАН, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ФГУП ЦНИИ машиностроения, Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко, Институте проблем материаловедения НАН Украины, Институте металлофизики НАН Украины и др. Детальное рассмотрение известного экспериментально-теоретического материала в настоящей диссертации не представляется возможным. Здесь следует отметить основные работы Л.Р. Ботвиной, В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, А.А. Лебедева, В.И. Бетехтина, С.А. Головина, И.И. Новикова, А.М. Глезера, Г.В. Клевцова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н.Романова, С.Д.Волкова, С.Н.Журкова, В.В. Панасюка, В.Е. Панина, А.А. Шанявского, В.Т. Трощенко, В.А. Ермишкина, В.В. Шевеля,

А.Н. Гладченко, С.Я. Яремы, Г.П.Карзова, Б.Л. Авербаха, Дж. Богданоффа, Д. Броека, М.В. Брауна, Т. Екобори, Х. Зеннера, 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, Дж. Нотта, Й. Окамото, М. Онами, А. Пино, Р.П. Скелтона, С. Сонсино, Д. Соси, А. Спаньолли, Дж. Сиха, С. Сила, Р. Томсона, А. Фатеми, П. Форреста, С. Хоси.

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 (уровне 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, основополагающими в котором являются работы А.А. Гриффитса, Д.С. Дагдейла, Н.А.Махутова, Н.Ф. Морозова, Е.М.Морозова, Р.В. Гольдштейна, В.В. Болотина, Ю.Н. Работнова, Г.П. Черепанова, Дж.Р. Райса, Дж. Сиха, Дж. Нотта, Е.О.Орована, С.Таира, М.Танаки, К. Хеллана и др.

Настоящая вводная глава не содержит новых результатов, она систематизирует известные данные экспериментальных и теоретических исследований по развитию хрупкого усталостного разрушения металлов и сплавов.

Экспериментальные исследования процессов развития хрупкого усталостного разрушения металлов очень обширны, что связано с большим разнообразием физических механизмов этих процессов, особенностями в зависимости от физико-механических свойств материала, вида напряженно-деформированного состояния, температурных условий и т.п.

Ниже, в пунктах 1.1–1.3 этой Главы рассмотрены только наиболее общие закономерности развития усталостного разрушения в металлах и сплавах с целью выявить основные особенности этого процесса для построения гипотез предлагаемой в диссертации модели. В последующих Главах при анализе развития хрупкого усталостного разрушения на микро- и мезоуровне в рамках предлагаемого в данной работе подхода в качестве примеров также обсуждаются известные результаты экспериментально-теоретических исследований для ряда металлов и сплавов.

В п.1.4 дан краткий обзор основных современных направлений теоретических исследований усталостного разрушения по физике твердого тела, металлосведению и механике деформируемого твердого тела.

Весь материал изложен в трактовке автора диссертации.

1.1. Особенности усталостного разрушения металлов и сплавов на микроскопическом уровне

Предметом исследований данной работы являются поликристаллические тела, образующие в твердом состоянии упорядоченную структуру. В процессе кристаллизации группы кристаллов принимают неправильную форму зерен. Каждое зерно имеет свою ориентацию кристаллической решетки. Границы зерен определяются точками соприкосновения смежных кристаллов. О размерах, структуре и характере строения зерен можно судить по излому образца. Размер зерен в металлах, в среднем, варьируется от 10^{-3} мм до 1 мм. Известны литые крупнозернистые сплавы вольфрама и молибдена с размером

зерна до 5 мм и рекристаллизованные сплавы тех же металлов с размером зерна около 10^{-1} мм. В последнее время интенсивно исследуются микрокристаллические (со средним размером зерна, лежащем в диапазоне $[10^{-3}, 8 \cdot 10^{-3}]$ мм) и субмикрокристаллические (с размером зерна, в среднем, $0,5 \cdot 10^{-3}$ мм) материалы, например, никель и материалы на его основе, алюминиевые сплавы, высокохромистые стали в микроскопическом и субмикроскопическом состояниях, а также нанокристаллические материалы с размером зерна, меньшем 100 нм (10^{-4} мм) – нанокристаллические железо, палладий, никель, медь, титан и его сплавы [83,142-144,192,261,266]. Зерна разориентированы. На границах между зернами атомы не имеют правильного расположения. Существует переходная область шириной несколько атомных диаметров, в которой решетка одного зерна переходит в решетку другого зерна с другой ориентацией.

Изучение строения металлов с помощью рентгеноструктурного анализа и электронного микроскопа позволило выявить, что внутреннее строение кристаллов также не является правильным. Кристаллические решетки металлов имеют различные отклонения от их правильного строения – дефекты. Одним из первых инженеров, обративших внимание на то, что реальная прочность металла ниже его теоретической прочности на разрыв, которую можно рассчитать, был А. Гриффитс (в 20-х годах прошлого века). Он полагал, а эксперименты А.Ф. Иоффе, С.Н. Журкова и др. подтвердили, что металл, каким бы единым он ни казался, содержит в себе дефекты и микротрещины различных размеров, вследствие чего реальный предел прочности металла ниже. С наличием микротрещин связывали и относительно небольшую прочность исследованных хрупких материалов (кристаллов NaCl, стекла). Отметим, что в нитевидных кристаллах микротрещин практически нет, их прочность приближается к теоретической прочности кристалла.

Известная классификация дефектов твердых тел металлургического и технологического происхождения включает следующие виды:

- точечные дефекты – свободные места в узлах кристаллической решетки – вакансии и бивакансии; атомы, сместившиеся из узлов кристаллической решетки в межузельные промежутки (дефекты по Шоттки, дефекты по Френкелю); атомы других элементов, находящиеся как в узлах, так и в междоузлиях кристаллической решетки (примесные атомы и их комплексы, легирующие атомы замещения в узле и внедрения в междоузлие и т.п.); электронно-дырочные дефекты (например, при облучении);
- линейные дефекты – одномерные ростовые дислокации (образующиеся в процессе роста кристалла), дисклинации, цепочки вакансий или межузельных атомов, вакансионные кластеры;
- плоские дефекты – границы зерен (области в несколько атомных диаметров между зернами), субзерен и двойников, дефекты упаковки (отклонения от нормальной для кристалла последовательности в расположении атомных слоев), поверхности раздела фаз, плоскости двойникования, двухмерные дислокации;
- объемные дефекты – поры, включения, частицы легирующих, примесных или других элементов, трехмерные дислокации.

Точечные дефекты малы, наибольшие линейные размеры составляют, в среднем, не больше нескольких атомных диаметров. Они образуются в процессе кристаллизации под влиянием тепловых, механических, электрических воздействий, при облучении нейтронами, электронами, рентгеновскими лучами и т.п. Основными точечными дефектами являются тепловые вакансии (вследствие тепловых движений атомов), для их образования требуется гораздо меньшая энергия, чем, например, для образования дефектов Френкеля. Наличие вакансий позволяет атомам перемещаться на расстояния, превышающие средние межатомные расстояния для данного металла. Перемещения атомов осуществляется путем обмена с

вакансиями. Точечные дефекты приводят к локальным изменениям межатомных расстояний, и, отсюда к искажениям кристаллической решетки. При этом увеличивается сопротивляемость решетки перемещениям атомов.

Описанные дефекты присутствуют в металле в виде сетки дефектов, рядов дефектов в субграницах и т.п., возникших в процессе кристаллизации твердых тел [4,45,46,72,129,133,208].

Мерой искажения кристаллической решетки является известный вектор Бюргерса.

Линейные дефекты имеют, в среднем, атомные размеры в двух измерениях (порядка $1A = 10^{-7}$ мм), и значительно большем размере в третьем направлении, который может быть соизмерим с характерным линейным размером кристалла. Плоские дефекты, в среднем, атомных размеров только в одном направлении. Объемные дефекты во всех трех направлениях имеют размеры, в среднем, на порядок больше размера атома.

Происхождение дефектов связывается с возникновением микронапряжений, вызванных случайным и неоднородным зарождением центров кристаллизации, случайными процессами взаимодействия растущих кристаллов между собой и распределения частиц тугоплавких неметаллических включений, оксидов, примесей и др., что приводит к образованию зерен разных размеров, форм и ориентации кристаллических решеток. Например, в закаленных сталях после изготовления в результате мартенситного превращения кристаллы мартенсита, образованные в зерне аустенита, при своем росте сталкиваются под разными углами, что ведет к образованию дефектов [175].

В процессе нагружения с ростом числа циклов в металле происходит перераспределение точечных дефектов, увеличение их плотности, особенно, вблизи границ и включений. Вакансии и бивакансии объединяются в вакансионные кластеры. Число, размер и форма вакансионных кластеров

определяются требованием минимальности полной свободной энергии. На этом этапе начинается развитие имеющихся в металле дислокаций, они объединяются в линии скольжения и, затем, в полосы скольжения. В результате развития вакансионных кластеров и роста их плотности в полосах скольжения, особенно, вблизи границ зерен, происходит их слияние с образованием субмикротрещин. В результате возникает определенная субструктура тела со сдвигами по площадкам скольжения и субмикротрещинами в полосах скольжения. Это так называемый инкубационный уровень развития разрушения, наблюдающийся у большинства металлов и сплавов, алюминия, никеля, меди, золота и др. [4,129,141,191,193,235].

Автором настоящей работы инкубационный уровень полагается как первый масштабно-структурный уровень развития разрушения. Для большинства металлов и сплавов к нему отнесены дефекты (вакансионные кластеры, клубки субмикротрещин и др.) линейного размера, в среднем, $l_1 \leq 10^{-3}d$, где d – средний размер зерна в металле.

По данным М.Хемпеля (1963 г.) на рис. 1.1 (а) показаны полосы скольжения для стали с 0.09% С, которые выглядят как выпуклые пластинки скольжения, выступающие из не измененных частей ферритных зерен. Направления пластинок в трех зернах различны. На рис. 1.1 (б) также видны освещенные полосы скольжения, выступающие из затененных областей не измененного феррита, на изрытой поверхности которых наблюдается много тонких линий – зародившихся субмикроскопических трещин [4].

В монокристаллах α – железа, в углеродистых и аустенитных сталях и др. на поверхностях полос скольжения наблюдались плотные скопления дислокаций и ряды дислокационных петель с вытянутыми клубками субмикротрещин при симметричных и пульсирующих циклах одноосного и двухосного нагружений [4,13,137,191–195].

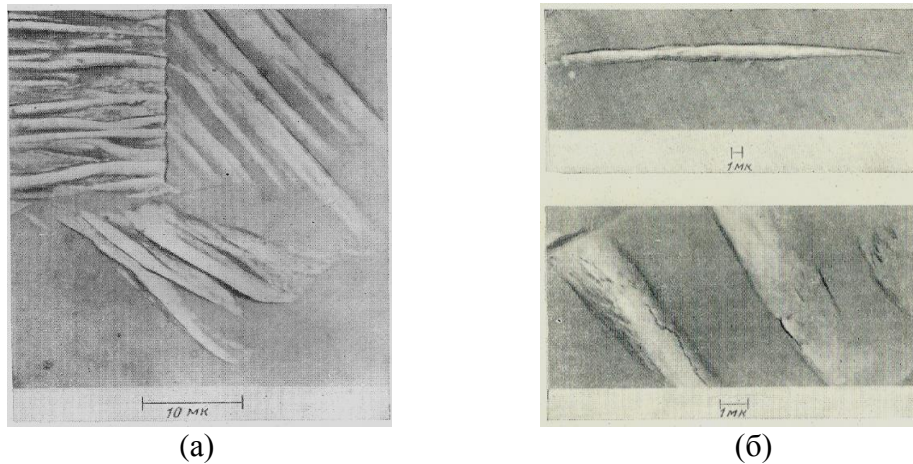


Рис. 1.1 (а) Полосы скольжения в смежных зернах стали 0.09% С при амплитуде одноосного нагружения $\sigma_a = 175 \text{ МПа}$ и числе циклов $N = 19 \cdot 10^6$ циклов; (б) субмикротрещины на поверхности полос скольжения в стали 0.09% С при $\sigma_a = 190 \text{ МПа}$, $N = 1.56 \cdot 10^6$ циклов [4]

Наличие дефектов первого уровня наблюдается различными физическими методами [49,128,164], например, по изменению плотности металла, по изменению объема при гидростатическом взвешивании образцов и др.

В работах по физике твердого тела и металловедению авторами устанавливается, что на инкубационном уровне развития разрушения формируются упорядоченные самоорганизующиеся субструктуры двух категорий: полосовая структура, связанная с единичным скольжением и накоплением дефектов первого уровня (вакансионных кластеров, субмикротрещин) и ячеистая структура, связанная с множественным скольжением (дислокационные сетки у границ зерен, дислокационные петли, венная структура и др.) [191–195]. Например, на рис. 1.2 представлены микрофотографии полосовой структуры железа. Для ГЦК-металлов и сплавов получено, что характерной является венная структура с высокой плотностью дефектов и наличием каналов, практически свободных от дефектов.

Во многих материалах в зависимости от величины амплитуды напряжения при одноосном нагружении наблюдается только полосовая структура, с увеличением амплитуды параллельно с ее развитием возникает ячеистая структура. Для пластичных металлов и сплавов существует уровень

амплитуды напряжений, начиная с которого развивается преимущественно ячеистая структура. В литературе есть результаты опытов для ряда металлов,

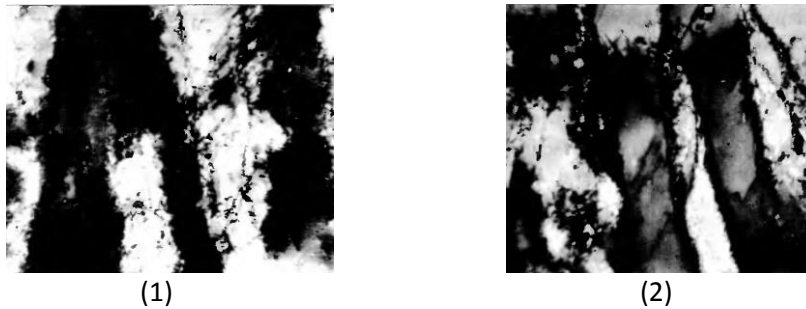


Рис. 1.2 Полосовая структура железа: (1) при $\sigma_a = 200 \text{ МПа}$, $N = 2 * 10^6$ циклов; (2) при $\sigma_a = 240 \text{ МПа}$, $N = 7 * 10^5$ циклов [39]

согласно которым при быстром увеличении амплитуды одноосного нагружения от величины, типичной для возникновения полосовой структуры, до величины, характерной для образования ячеек, после короткой переходной стадии начинает интенсивно развиваться ячеистая структура; обратное изменение амплитуды напряжений на начальную величину к структурным превращениям не приводит [180].

По данным опытов получено, что при амплитудах напряжений одноосного нагружения ниже предела чувствительности к циклическим напряжениям $\sigma_T^y = \sigma_T^y(N, \omega)$ (N – число циклов, ω – частота нагружения) [18-23, 58-66] для большого класса материалов имеет место накопление дефектов первого уровня, не происходит их насыщения и перехода на следующий структурный уровень.

Исследователями полагается, что поле микронапряжений, создаваемое скоплениями дефектов, находится в равновесии с полем сжимающих микронапряжений, возникающих как реакция материала на возникновение субмикротрещин. При этом состояние микроструктуры существенно не меняется. Дефекты первого уровня являются обратимыми дефектами и могут быть «залечены», что происходит, например, при рекристаллизационном

обжиге. Физико-механические свойства металла также практически не меняются.

При определенном уровне напряжений в результате эволюции полосовых структур с ростом числа циклов достигается определенное критическое значение плотности дефектов и путем разрыва атомных связей в кристаллографических плоскостях происходит фазовый переход, следствием которого является образование новой, более устойчивой фазы – хрупкой микротрещины [13,14,19-23,58-66,191-195]. При этом старая субструктура еще некоторое время развивается, но ее вклад убывает. На микрофотографиях материалов наблюдаются т.н. хрупкие усталостные бороздки вдоль кристаллографических плоскостей. (На рис. 1.3 приведены электронные микрофотографии усталостных бороздок для некоторых материалов, образованных при симметричном одноосном нагружении). Таким образом, происходит переход на новый уровень развития разрушения, который в данной работе определен как второй масштабно-структурный уровень. Для многих металлов и сплавов микротрещины отнесены к дефектам второго масштабного уровня линейного размера, в среднем, $l_2 \in (10^{-3}, 10^{-2}]d$.

Если на первом уровне наблюдаются тонкие линии скольжения, то на втором уровне уже происходят «грубые» скольжения с выраженным рельефом и увеличением стабильных полос скольжения с интенсивным накоплением микротрещин.

Описанию физических механизмов зарождения микротрещин посвящено много работ [4,13,14,27,28,78,82,137,151,163,193,211,225,272,281].

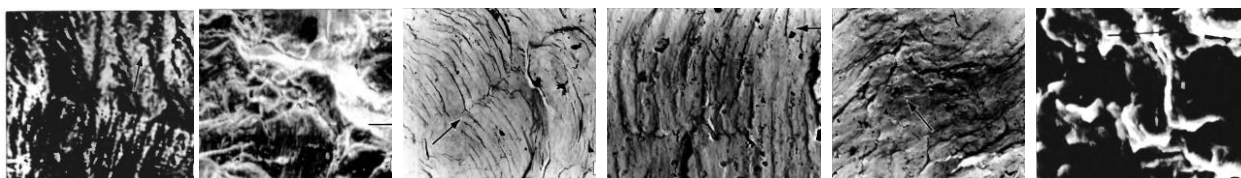


Рис. 1.3 Хрупкие усталостные бороздки на фасетках транскристаллитного скола кремнистого железа $\times 1000$ (1), технического железа, $\times 1600$ (2), стали 12ГН2МФАЮ, $\times 1800$ (3), стали 20 ХГСА, $\times 6000$, (4), стали 10ХСНД, $\times 2200$ (5), стали 08Г2ФБ, $\times 4200$ [39]

Источником зарождения микротрещин полагается концентрация микронапряжений вследствие развития дефектов первого уровня. В результате фазового перехода происходит релаксация микронапряжений, при этом запасенная внутренняя энергия полосовых структур преобразуется в поверхностную энергию образованных микротрещин [100,101,175]. Этот механизм объясняет так называемый «взрывной» характер образования микродефектов в металлах типа микротрещин сразу «внушительных» (по сравнению с размерами атомов) размеров. Размер наблюдаемых зародышевых микротрещин в большом количестве поликристаллических металлов и сплавов примерно лежит в диапазоне $l_2 \in (10^{-4}, 3 \cdot 10^{-4})$ мм, а их максимальная плотность $q_{f,2}$ распределена неравномерно, при движении вглубь тела она становится на 2 – 3 порядка меньше. Методами малоугловой рентгеновской дифракции и электронной микроскопии [182–186] в металлах обнаружены микротрещины характерных линейных размеров, в среднем, $l_2 = 10^{-4}$ мм, шириной $(10^{-6}, 10^{-5})$ мм и радиусом острия примерно 10^{-6} мм. Исследования процессов симметричного нагружения полимеров [166,181] также показывают, что микротрещины образуются сразу же определенных линейных размеров, зависящих от материала и не зависящих ни от процесса деформирования образца, ни от времени деформирования.

В общем, для ОЦК-металлов и сплавов при предельной плотности дефектов $q_{f,1}$ в полосах скольжения, в среднем, $q_{f,1} = 10^8 \text{ мм}^{-2}$, имеет место неравновесный переход от полосовой структуры к микротрещине.

Н. Томпсон (1956 г.) наблюдал на поверхности образцов из отожженной меди (с размером зерна около 0.1мм) множество характерных полос скольжения, в которых возникали микротрещины. При нагружении с амплитудой $\sigma_a = 62 \text{ МПа}$ до числа $N = 1.5 \cdot 10^7$ циклов на поверхности

образца возникали несколько не удаляемых следов скольжения, при $\sigma_a = 73 \text{ МПа}$ наблюдались полосы скольжения и микродефекты в них, и при амплитуде напряжения $\sigma_{-1} = 80 \text{ МПа}$ (предел выносливости меди) и числе циклов $N_f = 10^7$ циклов происходило хрупкое разрушение по макротрещинам.

В результате исследований процесса хрупкого разрушения в пластичных металлах (Fe, Ni, Al, Cu) методами малоугловой рентгеновской дифракции и при помощи электронного микроскопа обнаружено, что на стенках ячеек (особенно на границах раздела между основным металлом и включениями) дислокационные структуры объединяются в субмикротрещины длиной, в среднем, $l_1 \in (10^{-5} - 2 \cdot 10^{-5})$ мм и шириной, в среднем, $5 \cdot 10^{-6}$ мм, с ростом числа циклов резко увеличивается их плотность и они начинают разрушать перемычки, разделяющие соседние субмикротрещины, происходит их объединение с образованием хрупких микротрещин шириной, в среднем, $8 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм и длиной до, в среднем, $l_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ мм.

Формирование микротрещин происходит как внутри зерна, так и на границах зерен. Например, в пластичных сталях с гексагональной и объемно-центрированной решетками хрупкие микротрещины зарождаются в результате пересечений нескольких плоскостей скольжения внутри зерна (например, для ОЦК-металлов при пересечении плоскостей $\{100\}$ и $\{101\}$), которые вызывают активное генерирование дефектов и их слияния. В кремнистом железе наблюдаются хрупкие усталостные бороздки в плоскости $\{100\}$.

В большинстве случаев микротрещины в металлах и сплавах зарождаются в полосах скольжения у границ зерен по вакансионному механизму. Строение границ зерен способствует скольжениям вдоль них, при переходе через

границы ориентация полос скольжения меняется. Например, в крупных зернах микротрещины зарождаются по границам аустенитного зерна, что связано с адсорбцией углерода в приграничных областях исходного зерна [35].

По результатам исследований алюминиевых сплавов [27] получено, что вблизи границ зерен микротрещины распространяются вдоль направлений, которые определяются кристаллографической текстурой материала, внутри зерен направления распространения трещин определяется видом напряженного состояния.

Областями зарождения микротрещин в низкоуглеродистых сталях являются границы зерен (при их взаимном скольжении), кромки неметаллических включений (образование т.н. «рыбьего глаза» [174]), границы раздела между перлитом и ферритом [63,262,263]. В мартенситностареющих и высокопрочных сталях областями зарождения микротрещин являются кромки неметаллических включений, границы зерен остаточного аустенита, границы пакетов, границы блоков внутри пакетов, выделения по границам пакетов. Обнаружено, что во всех металлах с повышенной твердостью и малой пластичностью источником зарождения хрупких микротрещин являются неметаллические включения. Для некоторых сплавов, содержащих включения средних размеров порядка 10^{-3} мм, микротрещины возникают на межфазной границе включения и матрицы. Чем выше уровень статической прочности или твердости черных металлов и сплавов, тем более вероятно зарождение усталостных микротрещин в зоне неметаллических включений. Чем ниже уровень статической прочности или твердости металла, тем вероятнее зарождение усталостных микротрещин у границ матричной структуры.

В сталях с гетерогенной структурой (перлитных сталях) обнаруживается два независимых источника микроразрушения – зарождение микротрещин на границах зерен и в срезах цементитных пластин. У трип-сталей типа C-Si-Mn, характеризующихся повышенной пластичностью при высокой прочности,

микротрещины усталости зарождаются в полосах скольжения на границах раздела феррит-мартенсит. В ориентированных кристаллических полимерах микротрещины появляются вследствие разрывов межатомных связей во внутри фибриллярных аморфных прослойках, в аморфных неориентированных полимерах – на межглобулярных границах, в кристаллических неориентированных полимерах – в аморфных прослойках, разделяющих границы кристаллов.

Результатом эволюции ячеистой структуры по механизмам двойникования и скольжения является движение ансамблей зерен характерных линейных размеров $(4,10)d$ (d – средний размер зерна) и развитие неупругого микродеформирования, в результате которого происходит зарождение вязкой микротрещины. Одна часть кристалла перемещается целиком вдоль кристаллографической плоскости (при двойниковании) или путем последовательных соскальзываний относительно другой части вдоль действующих плоскостей скольжения (в направлении действия наибольших касательных напряжений и в соответствии с геометрией структуры). Возникают т.н. пластичные усталостные бороздки, образующие различные пилообразные рельефы с чередованием гребней и впадин [39,63,111,130-132,142-144,159,240,248,255,260,261].

Развитие усталостного разрушения при пластическом деформировании происходит по 2 стадиям [115-117]: на первой стадии при действии напряжения дислокации растут и наталкиваются на препятствия (границы зерен, разных фаз, субзерен и т.п.), около которых накапливаются, увеличивается их плотность (накопление разностного вектора Бюргерса), достигает критического значения, и второй стадии, в которой в результате слияния дислокаций образуется зародышевый дефект – вязкая микротрещина (исчезновение вектора Бюргерса).

Литература по изучению развития вязких микротрещин обширна, ее анализ выходит за рамки настоящей работы. Здесь отметим схематично, как развивается вязкая микротрещина по результатам исследований циклического деформирования на образцах из молибдена, вольфрама, железа, кремнистого железа и алюминия [28,124–128]. Перед фронтом вязкой микротрещины формируются вторичные вязкие микротрещины, ориентированные в том же направлении, и происходит их слияние с первичной трещиной с образованием вязкой макротрещины. При этом в пластической зоне перед ее вершиной идут процессы хрупкого микроразрушения, зарождаются, развиваются и сливаются микротрещины с образованием в дальнейшем хрупких макротрещин. Эти два процесса ведут к макроразрушению металла.

Отметим, что с развитием ячеистой структуры в местах пересечения двойников или столкновения их с границей зерна образуется т.н. «факел» дефектов (как, например, представлено на рис. 1.4), являющийся источником зарождения хрупких микротрещин.



(1)



(2)

Рис. 1.4 Электронные микрофотографии после столкновения двух двойников с границей зерен феррита, $\times 14000$ (1), и образования хрупкой микротрещины в месте столкновения двойника с границей зерна феррита, $\times 500$, (2) для технического железа [39]

На втором микроуровне меняются физико-механические свойства металлов и сплавов. В литературе [28,46,56,58-66,78,100,101,180,197,211] имеются сведения об изменении структуры металла (дефекты второго уровня являются необратимыми дефектами), удельного электросопротивления (опытные данные для меди и латуни), микротвердости, внутреннего трения, магнитных

характеристик, модуля упругости. Также возможны изменения химического состава фаз за счет процессов диффузии, растворения фаз и т.п.

Большой цикл работ посвящен исследованиям микронапряжений, возникающих в металле при развитии дефектов первого уровня и их релаксацией с образованием дефектов второго уровня внутри зерна, на границе зерен, создаваемых примесными атомами и их скоплениями, взаимодействием дефектов с дислокациями и двойниками, выделениями второй фазы, зонами Гинье-Престона [35,47,131-133,175,191-195].

При описании хрупкого усталостного микроразрушения основными параметрами структуры, характеризующими развитие дефектов первого и второго уровней на интервале времени $\tau \in [0, t]$, определяют наибольшие линейные размеры дефектов $l = l(\tau)$ и их плотность $q = q(\tau)$ в некотором представительном объеме тела. В работах Ботвиной Л.Р. [19-23] полагается, что скорость изменения плотности дефектов контролирует кинетический процесс развития микроразрушения.

Согласно нашему анализу при построении модели в диссертации вводится определенная усредняющая функция $l_i^* = l_i^*(\tau)$, $\tau \in [0, t]$, от характерных линейных размеров дефектов и их плотности (см. Главу 2, п.2.1), предельное значение которой соответствует достижению дефектом определенного предельного состояния и переходу на следующий масштабно-структурный уровень. Так, предельное значение усредняющей функции $l_{f,1}^*$ соответствует фазовому переходу от полосовых субструктур к микротрещинам.

Стабильность размеров микротрещин создает возможность накопления их высоких концентраций, особенно вблизи поверхности тела в соответствии с принципом минимизации свободной энергии [28,129–133,190]. Развитие микротрещин сопровождается последовательностью актов разрыва связей между атомами, находящимися на противоположных сторонах вдоль

траектории распространения трещины, при этом фронт трещины продвигается путем зарождения парных перегибов и обеспечивает поступательное продвижение микротрещины вперед, или посредством поглощения фронтом трещины вакансий. Идет локализация процесса разрушения твердого тела с неравномерным накоплением микротрещин и наибольшей концентрацией в поверхностных слоях. При определенном уровне напряжений в процессе взаимодействия соседних микротрещин расстояния между ними становятся соизмеримыми с характерными размерами самих трещин [166,181,191], что ведет к их слиянию и зарождению нераспространяющихся трещин внутри зерна и на границах зерен (так называемых трещин, не способных распространяться на соседние зерна). Имеет место переход к третьему масштабному уровню развития разрушения.

К. Танаки [70] исследовал нераспространяющиеся микротрещины в сталях и получил, что их средние размеры примерно на порядок меньше размера зерна. В классификации настоящей работы нераспространяющиеся трещины отнесены к дефектам третьего масштабного уровня линейного размера $l_3 \in (10^{-2}, 10^{-1}]d$.

В экспериментах на монокристаллах наблюдались нераспространяющиеся трещины размеров, в среднем, $l_3 \approx 10^{-1}d$, и плотностью $q_{f,3} \approx 10^6 \text{ мм}^{-2}$, при этом довольно большие объемы кристалла от них свободны и они подвижны. В табл. 1.1 приведены предельные характерные линейные размеры нераспро-страняющихся трещин $l_{f,3}$ для различных сталей [193].

При теоретическом описании процесса развития разрушения на третьем уровне в литературе рассматриваются эволюционные уравнения для плотности нераспространяющихся трещин в виде : $\frac{dq_3}{d\tau} = f_1(\Delta K, \tau)$ (ΔK - размаха коэффициента интенсивности напряжений при одноосном

нагружении) и выражения для зависимостей их предельных размеров вида:

$$l_{f,3} = f_2 \left(\frac{dq_3}{dt} \right) [199-201].$$

В последнее время при изучении гигацикловой усталости (при числе $N_f \geq 5 \cdot 10^8$ циклов) обнаружена вторичная ветвь кривой усталости, и макроразрушение металлов по дефектам третьего уровня. Описание этих процессов составит последующие работы автора. Здесь только отметим, что предлагаемая в диссертации модель может быть распространена на эти случаи.

В материаловедческой литературе выделяют следующие стадии хрупкого усталостного разрушения материалов при одноосном нагружении (рис.1.5), которые в нашей классификации состоят в следующем. Первая стадия – образование полосовой структуры вдоль плоскостей максимальных напряжений сдвига с накоплением дефектов первого уровня, их слияния и

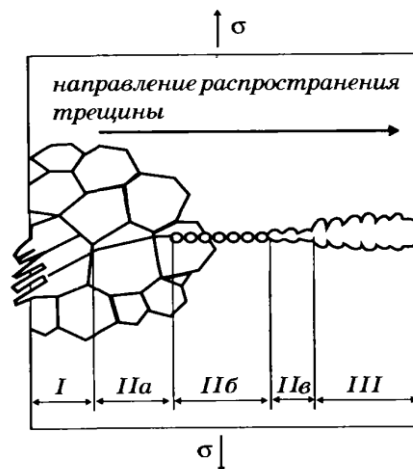


Рис. 1.5 Схема стадий развития усталостного разрушения при одноосном нагружении [39]

зарождения дефектов второго уровня (микротрещин); вторая стадия – II а – развитие дефектов второго уровня преимущественно в плоскостях, перпендикулярных максимальному главному напряжению, их слияние и образование дефектов третьего уровня, II б – развитие дефектов третьего уровня с образованием в конце стадии дефектов четвертого уровня, II в –

развитие на дне хрупких бороздок макродефектов четвертого уровня, третья стадия – эволюция макродефектов.

Развитие дефектов первых трех уровней не ведет к макроразрушению и происходит при макроупругом деформировании.

Для многих металлов и сплавов большую часть долговечности при одноосных нагружениях с амплитудой, близкой к пределу выносливости металла σ_{-1} , занимает период зарождения макротрещин (развитие микроразрушения на первом, втором и третьем уровнях). Для многих высокопрочных, инструментальных сталей в области многоциклового

Сталь, режим обработки	ΔK_{th} , МПа · м ^{1/2}	σ_{-1} , МПа	$l_{f,3}$, мкм
Железо техническое	7,4	130	1000
15Х25Т, легированный феррит	12,5	250	800
20Х13, отжиг, закалка, отпуск 710 °С	5,9	180	340
Дисперсноупрочняемая ферритная	11,0	260	570
06Х2Н2М, мартенсит-феррит	12,8	300	580
14Х17Н2, закалка, отпуск 580 °С	6,01	464	210
15012Н2ВМФ, закалка, отпуск 690 °С	6,15	503	190
08Х17Н6Т, закалка, отпуск 750 °С	5,5	414	230
Сталь 45, состояние поставки	3,3	220	290
75ХГСТ, закалка, отпуск 400–600 °С	6,9	480	66
20Х13	4,7	670	16
30ХГСН2А, закалка, отпуск 250 °С	5,0	600	22
45ХН2МФА, закалка, отпуск 700 °С	5,0	740	15
12ХН3А, нормализация, отпуск 180 °С	1,7	395	24
	1,7	240	64
40ХС, закалка, отпуск 200 °С	5,1	625	21
60ХС, закалка, отпуск 200 °С	4,2	525	20
60ХС, закалка, отпуск 300 °С	4,2	570	17
60ХС, закалка, отпуск 500 °С	4,2	560	18
ШХ15, закалка, отпуск 150 °С	3,9	800	7,6

Табл. 1.1 Предельные характерные размеры нераспространяющихся трещин ΔK_{th} – пороговые значения размаха коэффициента интенсивности напряжений, σ_{-1} – пределы выносливости сталей, $l_{f,3}$ – предельные значения длин нераспространяющихся трещин при одноосном нагружении ряда сталей

усталости ($N_f \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов) показано, что в диапазоне до 70-85% общей долговечности не обнаруживалось поверхностных макротрещин и доминирующим является период зарождения макротрещин.

1.2. Развитие усталостного разрушения на мезоскопическом и макроскопическом уровнях

В литературе [46,47,180,200,201] условно выделяют четыре области хрупкого разрушения: четвертого типа с характерными линейными размерами дефектов $l: l \leq 10^{-1} d$; третьего типа, для которого $l \in (10^{-1}, 1] d$, второго типа – $l \in (1, 10) d$ и первого типа (область развития одиночных трещин конечной длины) – $l > 10 d$. В п.1.1 рассмотрены особенности микро-разрушения в областях четвертого типа (в классификации автора по дефектам первых трех масштабных уровней). В этом пункте представлены результаты для областей третьего и второго типов развития разрушения на мезоуровне. Изучением областей первого типа на макроуровне занимается механика разрушения.

Исследователями [191–195] обнаруживается, что при некотором уровне напряжений с ростом числа циклов в устойчивых полосах скольжения определенной ширины плотность нераспространяющихся трещин достигает некоторого предельного значения $q_{f,3}$, они начинают сливаться и происходит переход к новой структуре – зарождаются короткие (распространяющиеся) трещины, в дальнейшем выходящие за границы зерна и способные распространяться на другие зерна. По классификации данной работы разрушение переходит на четвертый масштабно-структурный уровень развития дефектов характерных линейных размеров $l_4 \in (10^{-1}, 1] d$.

На рис. 1.6 приведены микрофотографии структуры стали СтЗсп и стали 08Г2ФБ на стадии зарождения коротких макротрещин (рис.1.6(1),(2)) и технического железа на стадии распространения коротких трещин (рис.1.6(3)).

Отметим, что развитие дефектов на микроуровне характеризуется кристаллографической направленностью, на мезо- и макроуровнях кристаллографическая ориентация существенной роли не играет [39,180].

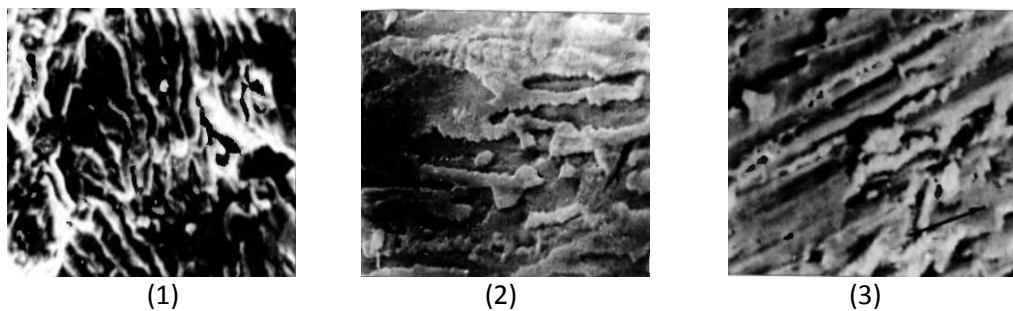


Рис. 1.6 Микроструктура стали СтЗсп (1) и стали 08Г2ФБ (2) на стадии зарождения макротрещин и технического железа (3) на стадии распространения макротрещин [39]

В малоуглеродистых сталях средний линейный размер коротких макротрещин достигает $l_{f,4} = 0.1\text{мм}$ [58–66], в алюминии возникают короткие трещины характерной длины $l_{f,4} = 0.02\text{мм}$.

В таблице 1.2 приведены предельные линейные размеры коротких трещин при разрушении в условиях выносливости [159,199–202] (σ_B – предел статической прочности, σ_{-1} и τ_{-1} – пределы выносливости при одноосном растяжении и сдвиге с симметричными циклами соответственно).

В большинстве исследуемых материалов при амплитуде одноосного нагружения, равной пределу выносливости металла σ_{-1} , происходит хрупкое макроразрушение по коротким трещинам (дефектам 4 уровня) при упругом макродеформировании [58,60,80,84,85,102,111,140,141,159,199,244,256,257,270]. Это является отличительной особенностью циклических нагружений: максимальное напряжение, меньшее предела текучести материала, приводит к макроразрушению без образования неупругих макродеформаций. Например, на рис. 1.7 представлены данные зависимости между средним размером

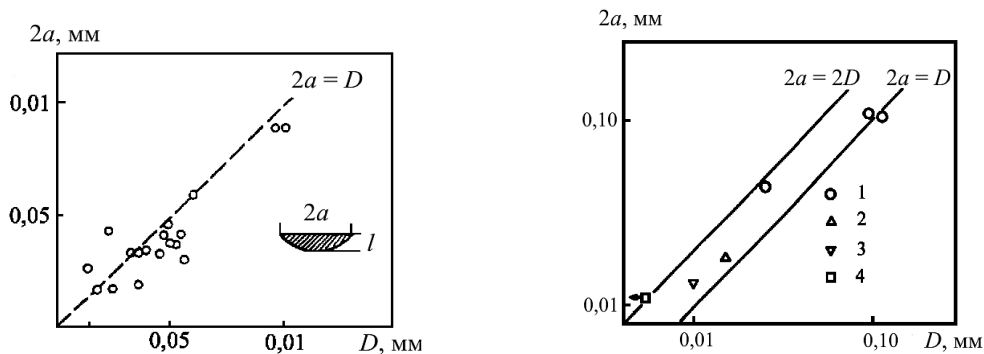
макротрещин, соответствующих пределу выносливости σ_{-1} и размерами зерен для ряда сталей. Из рисунков видно, что при осевом нагружении с амплитудой σ_{-1} происходит разрушение по коротким трещинам.

В ряде работ [199-202] получено, что средний размер трещин при разрушении в условиях выносливости равен размеру одного или нескольких ферритных зерен, линейному размеру группы полос бейнита и мартенсита, размерам определенных фазовых составляющих сплавов и др. В целом, размеры трещин, соответствующих пределу выносливости на базе

	Наименование сталей	d , мм	τ_{-1} , МПа	$2l_{f,4,\tau}$, мм	σ_{-1} , МПа	$2l_{f,4,\sigma}$, мм
1	Сталь 45 $\sigma_B = 516$ МПа $\sigma_S = 339$ МПа	0.03	125	0.17	220	0.055
2	Сталь 12ХНЗА $\sigma_B = 950$ МПа $\sigma_S = 700$ МПа	0.01	240	0.085	395	0.028
3	Сталь 40Х $\sigma_B = 803$ МПа $\sigma_S = 683$ МПа	0.01	245	0.06	430	-
4	Малоуглеродистая сталь (0.11% С) мелкозернистая $\sigma_B = 433$ МПа $\sigma_S = 286$ МПа	0.024	-	-	220	0.051
	крупнозернистая $\sigma_B = 402$ МПа $\sigma_S = 233$ МПа	0.084	-	-	190	0.348
5	Малоуглеродистая сталь 1020 $\sigma_B = 441$ МПа $\sigma_S = 280$ МПа	0.023	-	-	226	0.03
6	Легированная сталь $\sigma_B = 652$ МПа $\sigma_S = 616$ МПа	0.01	-	-	340	0.092

7	Малолегированная сталь мелкозернистая $\sigma_{\sigma} = 1011 \text{ МПа}$ $\sigma_s = 900 \text{ МПа}$	0.015	-	-	500	0.02
	крупнозернистая $\sigma_{\sigma} = 965 \text{ МПа}$ $\sigma_s = 847 \text{ МПа}$	0.091	-	-	460	0.057
8	Углеродистая сталь (0.21% С) мелкозернистая $\sigma_{\sigma} = 498 \text{ МПа}$ $\sigma_s = 324 \text{ МПа}$	0.025	-	-	245	0.06
	среднезернистая $\sigma_{\sigma} = 467 \text{ МПа}$ $\sigma_s = 263 \text{ МПа}$	0.04	-	-	225	0.105
	крупнозернистая $\sigma_{\sigma} = 460 \text{ МПа}$ $\sigma_s = 225 \text{ МПа}$	0.07	-	-	205	0.195

Табл. 1.2 Предельные значения размеров коротких трещин при выносливости металлов

Рис. 1.7 Зависимость длины усталостных трещин $2a$, соответствующей пределу выносливости, от линейного размера зерен D : (1) – ферритных зерен малоуглеродистой стали; (2) – для сталей: 1 – 0.15%С; 2 – 0.35%С; 3 – 0.45%С; 4 – 0.81%С [202]

$N=10^7$ циклов, для различных металлов и сплавов лежат, в основном, в диапазоне $l_{f,4} \in [0.01, 0.1] \text{ мм}$. Для пластичных материалов (например, для малоуглеродистых сталей) эти размеры могут быть больше. Средние размеры коротких трещин при кручении значительно больше, чем при одноосном нагружении. В табл. 1.3 приведены экспериментально найденные (по измерениям внутреннего трения, рассеянной энергии и др.) для различных сплавов на основе железа, меди и алюминия, а также для серых чугунов

значения неупругих макродеформаций при разрушении в условиях выносливости. Из таблицы видно, что макроразрушение происходит практически при упругом макродеформировании.

Отметим, что размеры, форма и распределение зерен – одни из основных структурных факторов, влияющих на физико-механические характеристики металла. Так, в субмикро- и нанокристаллических металлических материалах макроразрушение по коротким трещинам наблюдалось при амплитудах напряжений выше соответствующих пределов выносливости поликристаллических материалов [191–195]. Например, предел выносливости сплава $Ni-20Cr$ после обычнойковки со средним размером зерна $d \approx 0.07$ мм равен $\sigma_{-1} = 337$ МПа, а после многоступенчатого одноосного прессования со сменой оси при $T = 700^\circ C$ и размером зерна $d \approx 0.001$ мм – $\sigma_{-1} = 865$ МПа.

Тип структуры металла также оказывает влияние на характеристики выносливости. Например, сталь со структурой мартенсита или нижнего бейнита имеет характеристики усталостной прочности выше той же стали со структурой перлита или верхнего бейнита [4]. У сталей с мартенситной структурой размер аустенитного зерна не влияет на усталостные свойства, с перлитной структурой – увеличение аустенитного зерна ведет к снижению сопротивления усталости.

При низких температурах и больших скоростях деформирования вероятность наступления хрупкого разрушения по коротким трещинам увеличивается.

Схематично картину разрушения по коротким трещинам представляют следующим образом. В результате слияния нераспространяющихся микротрещин образуются короткие трещины, которые формируют своеобразный рельеф поверхности тела (у мест выхода полос скольжения на поверхность «выдавливаются» или «втягиваются» тонкие слои (ступеньки скола) – экструзии (выступы) и интрузии (впадины)). Такой рисунок

разрушения называют речным узором, один из которых представлен на рис.1.8 (1), (2) [4]. При этом линии «речного узора» ориентированы практически перпендикулярно хрупким бороздкам (рис.1.8 (2) (а), (4), (6)). Короткая трещи-

	Наименование материала	Размах неупругих макродеформаций $\Delta\varepsilon_V, \%$
1	углеродистые и низколегированные стали	0.0004 – 0.01
2	аустенитные стали	0.02 – 0.05
3	коррозионно-стойкая сталь 30X10Г10 $\sigma_{-1} = 320 \text{ МПа}$, $\sigma_T^y = 207 \text{ МПа}$	0.02
4	легированная сталь 0X14АГ12М $\sigma_{-1} = 310 \text{ МПа}$, $\sigma_T^y = 175 \text{ МПа}$	0.02
5	легированная сталь 15ГАФДпс $\sigma_{-1} = 260 \text{ МПа}$, $\sigma_T^y = 226 \text{ МПа}$	0.04
6	серый чугун	0.006
7	никелевые сплавы	0.0005 – 0.0028
8	медь и ее сплавы	0.0009 – 0.01
9	алюминий и его сплавы	0.005 – 0.006

Табл.1.3 Предельные неупругие деформации $\Delta\varepsilon_V, \%$ при выносливости металлов [159,199-201]

на разбивается дефектами и дислокациями на отдельные части и превращается в целую систему почти параллельных трещин, распространяющихся и соединяющихся вдоль линий, где они перекрываются путем вторичного скола либо среза тонких полос кристалла, которые составляют различные уровни поверхности скола, как изображено на рис.1.8 (1), (2). У многих материалов наблюдались винтовые дислокации, пронизывающие плоскость скола, после прохождения которых фронтом трещины ее уровни по разные стороны от дислокации сдвигаются и дальше фронт двигается в двух различных уровнях, которые соединены ступенькой скола (высотой порядка длины вектора Бюргера). Несколько ступенек скола могут объединиться и образовать более

крупную составную ступеньку. Объединение противоположных ступенек приводит к их исчезновению. Оба эти процесса можно видеть в структуре ступеней на рис.1.8 (1). Интрузии двигаются внутрь образца, и на поверхности зарождается начальная макроскопическая хрупкая трещина усталости. Основания ступенек, впадин и дно интрузий являются концентраторами, у

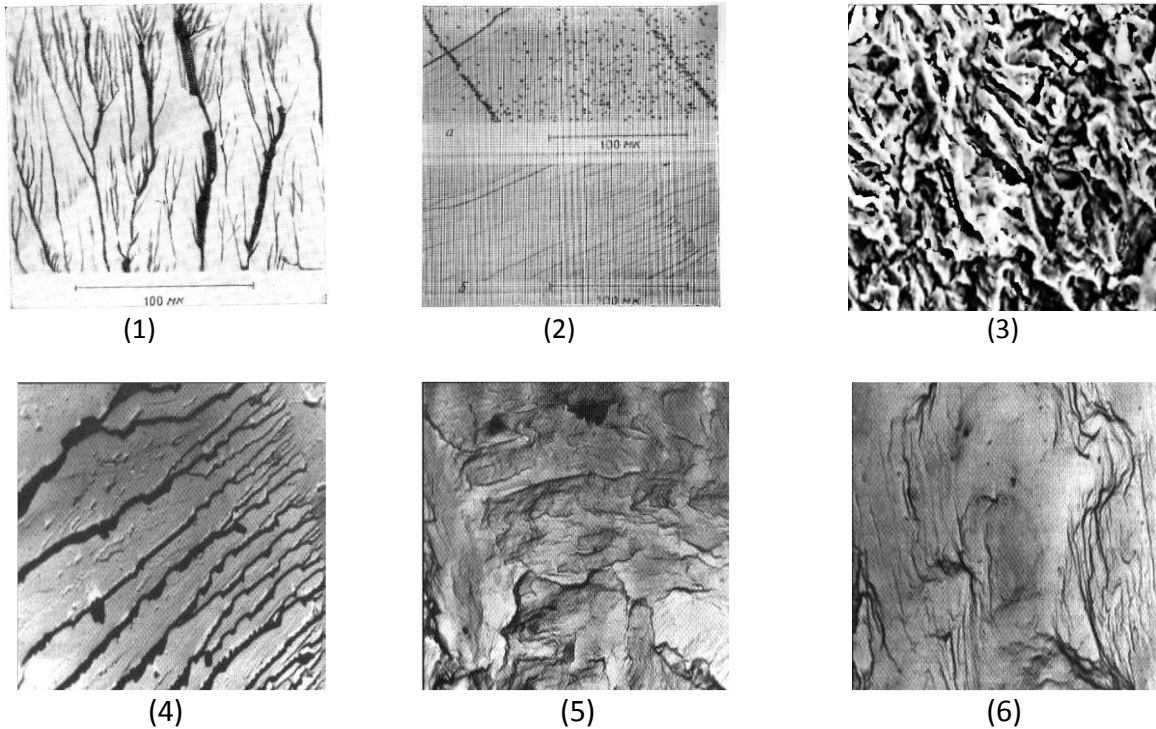


Рис. 1.8 поверхности хрупкого разрушения сколом: ступени скола в структуре речного узора монокристалла $Fe-3\%Si$ (скол при $T = -194^{\circ}C$) при распространении хрупкой трещины сверху вниз (1), поверхности скола кристалла LiF (2): (а) – после травления для выявления дислокаций, (б) – без травления; поверхность разрушения стали 30X2NMФА, $\times 1200$ (3) [39]; «речной узор» на поверхности хрупкого излома сталит 0.67% С, $\times 4000$ (4) [180]; субтранскристаллические фасетки (квазискол) в стали 0.22% С $\times 4000$ (5); плато, окруженное усталостными бороздками, для стали 0.22% С $\times 4000$ (6) [180]

которых развиваются новые микродефекты. На рис. 1.8 (2) представлены поверхности скола кристалла, на котором видны ступеньки скола и дислокации (рис. 1.8 (2), (а)).

На рис.1.9 а,д,е и (1)–(4) представлены возможные механизмы разрушений по коротким трещинам, наблюдаемые в экспериментах.

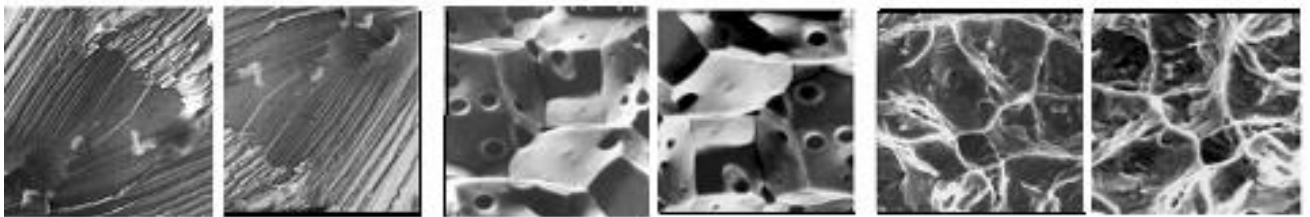
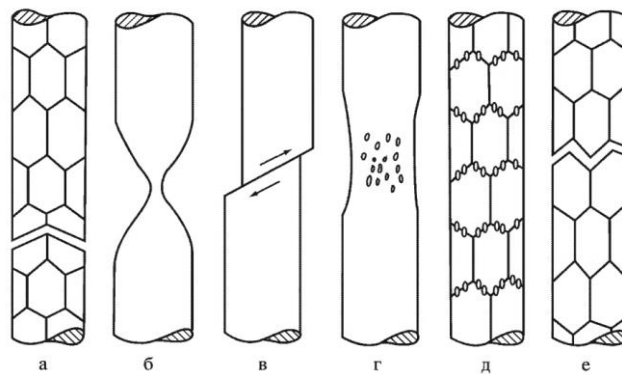
Хрупкий излом образован относительно плоскими фасетками хрупкого транскристаллитного скола, расположенными под наклоном к смежным участкам разрушения с типичным «речным узором» [34,37,39,111,173,174,180,

200,272]. Зерна металлов раскалываются по определенным кристаллографическим плоскостям, для феррита, например, это плоскость $\{100\}$. На рис.1.9 представлены обнаруженные квадратные впадины между двумя хрупкими усталостными бороздками, что говорит о распространении усталостной макротрещины по плоскости $\{100\}$.

Плоскости скола – относительно гладкие поверхности, называемые фасетками скола (рис.1.8 (5)). Как правило, одна фасетка представляет собой скол одного зерна. Фасетки скола при разрушении являются отпечатком процесса развития дефектов. Так, в железе, низкоуглеродистых и низколегированных сталях с ферритно-перлитной структурой и средними линейными размерами зерен в диапазоне 0.01–0.1мм, а также в ряде сталей с ферритно-перлитной структурой: 3СП, 3КП, 09СП, 09Г2, 09Г2ФБ, 09Г2МФБ, обнаружены фасетки размеров зерна (дефекты 4 уровня), 0.5–0.7d (дефекты 3 уровня), и меньших размеров. В высокопрочных сталях в ряде случаев на поверхности разрушения формируется рельеф, называемый «мозговой структурой», в котором наблюдаются дефекты всех четырех уровней, разрушение происходит по дефектам 4 уровня без дальнейшего развития макротрещин (рис. 1.8 (3),(4)). Размер фасетки межзеренного скола в металлах, в среднем, в 2-4 раза больше размера фасетки транскристаллитного скола.

В низколегированных и низкоуглеродистых сталях большая доля направлений хрупкого транскристаллитного скола ориентирована навстречу магистральной хрупкой трещине, что подтверждает действие описанных микромеханизмов хрупкого разрушения, а именно, зарождение впереди магистральной трещины микротрещин и в результате их последовательных слияний ее развитие [39,111].

Развитие усталостного разрушения в области второго типа на мезоуровне [46,47,180] связано с увеличением размеров и плотности коротких трещин, с



(1) (2) (3) (4) (5) (6)

Рис. 1.9 Основные механизмы разрушения и типичные фрактографии поверхностей разрушения металлических материалов

а – транскристаллитный скол, б – отрыв, в – сдвиг, г – порообразование, д – межзеренное порообразование, е – межзеренный скол

(1), (2) – внутриверенное хрупкое разрушение,

(3), (4) – межзеренное хрупкое разрушение с присутствием пор на границах зерен

(5),(6) – вязкое ямочное разрушение [191–195]

их слиянием с образованием хрупких макротрещин линейных размеров, лежащих в диапазоне от размера зерна до начальной длины единичных макротрещин. Короткие макротрещины располагаются в активных системах скольжения, в которых действуют максимальные сдвиговые напряжения. Далее отдельные короткие трещины сливаются, по мере роста ориентируются по направлению перпендикулярному главному нормальному напряжению. Отметим, что скорость распространения усталостных макротрещин велика, порядка скорости звука в металлах (примерно 1800 м/с).

Существует большое количество работ, посвященных исследованию особенностей хрупкого усталостного разрушения в этой области [18–23,243,262,263]. При оценке структурного состояния металлов строятся линии необратимой повреждаемости Френча [58–66,74,158,191–195]. Серии образ-

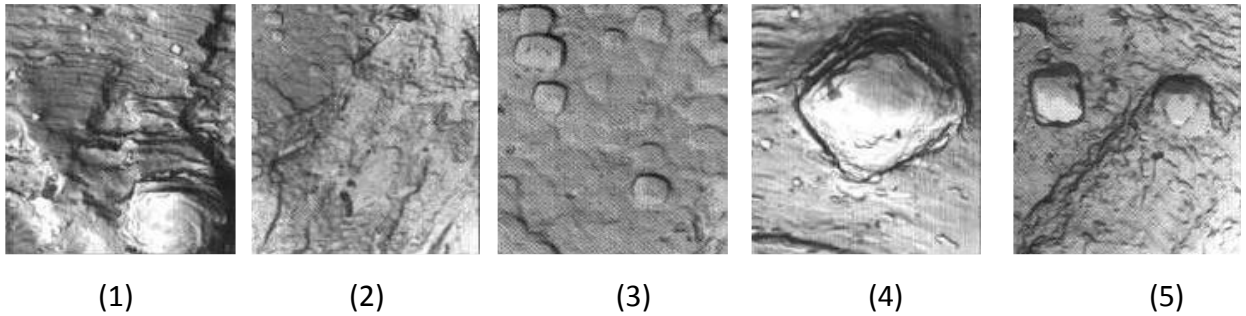


Рис. 1.10 Микроструктура поверхности бороздчатого усталостного излома армко-железа: (1), (2) – увеличение $\times 4000$, (3) – увеличение $\times 8000$, (4), (5) – увеличение $\times 10000$

цов нагружают до различного числа циклов (меньших долговечности при выносливости N_f) с амплитудой выше предела выносливости σ_{-1} с последующим догружением с амплитудой, равной σ_{-1} , до числа циклов N_f .

Если при этом образец разрушился, полагается, что он получил необратимое повреждение. Физический смысл линии Френча в том, что она соответствует окончанию процесса развития разрушения в пределах зерна и начала активного процесса роста макротрещин на мезоуровне.

По классификации, предложенной в диссертации, области второго типа развития разрушения зеренных ансамблей [47,180] относятся к пятому и шестому масштабно-структурным уровням.

На рис. 1.11, 1.12 приведены результаты исследований [199-202] для ряда сталей при симметричном изгибе с различными амплитудами в виде зависимостей характерных размеров наблюдаемых макродефектов в нашей классификации четвертого (в среднем, размера зерна), пятого (в среднем, на порядок больше размера зерна) и шестого (размера, в среднем, на два порядка больше размера зерна) уровней от числа циклов нагружения (отнесенного к соответствующей долговечности стали N_f). Для приведенных материалов опытные данные хорошо описываются единой кривой. Существенно рассеяние результатов в областях пятого и шестого уровней.

В [202] обобщено большое количество опытных данных для представительного ряда материалов по оценке зависимости между числом

циклов начала образования макротрещин n_4 (п нашей классификации дефектов 4 уровня), в среднем, размера зерна диапазоне 0.05–0.07 мм и долговечностью материала N_f при осевом симметричном нагружении (см. рис. 1.13). При $N_f \geq 10^6$ циклов стадия зарождения этих дефектов составляет около 90% общей долговечности материала.

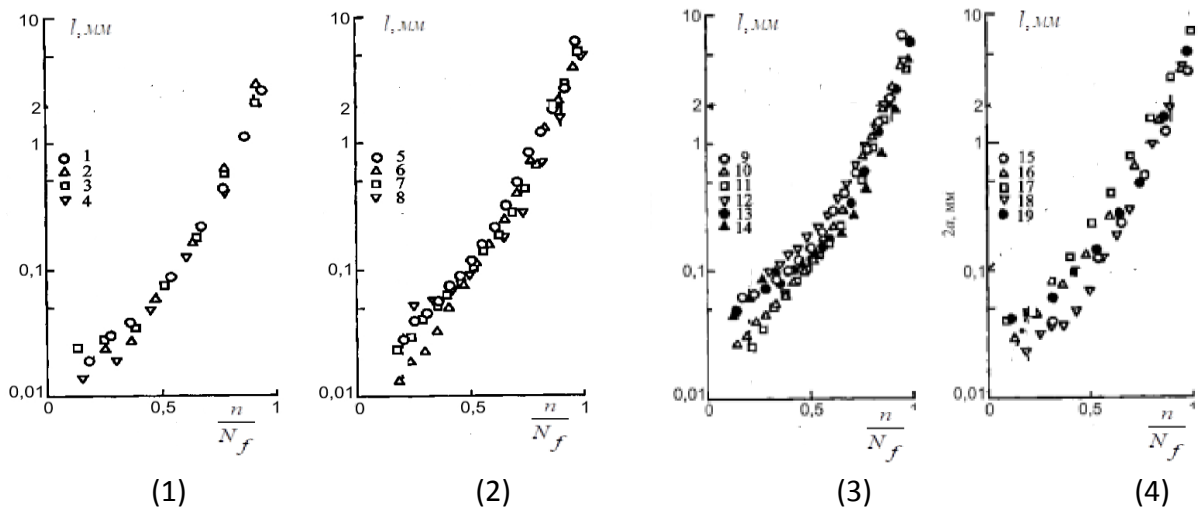


Рис. 1.11 Зависимость размеров наблюдаемых дефектов от числа циклов нагружения для сталей: S45C ($\sigma_S = 830 \text{ МПа}$) (1), SCr440 ($\sigma_S = 780 \text{ МПа}$) (2), SCM435 ($\sigma_S = 800 \text{ МПа}$) (3), SNCM439 ($\sigma_S = 930 \text{ МПа}$) (4) 1,7,11,16 - $\sigma_a = 700 \text{ МПа}$; 2,13,18 - $\sigma_a = 600 \text{ МПа}$; 3,14,19 - $\sigma_a = 500 \text{ МПа}$; 4 - $\sigma_a = 480 \text{ МПа}$; 5,9 - $\sigma_a = 800 \text{ МПа}$; 6,10,15 - $\sigma_a = 750 \text{ МПа}$; 8 - $\sigma_a = 520 \text{ МПа}$; 12,17 - $\sigma_a = 650 \text{ МПа}$

В результате исследований на ряде сталей (малоуглеродистые стали, сталь 45, сталь 12ХН3А, сталь 40Х) получено, что стадия зарождения дефектов 4 уровня при симметричном кручении гораздо короче, чем при симметричном одноосном нагружении. На рис. 1.14 представлены зависимости среднего размера дефектов, образующихся в малоуглеродистой стали при симметричном осевом нагружении и симметричном кручении с амплитудами, приводящими к полному разрушению на базе $N_f = 9 \cdot 10^5$ циклов. Из рисунка

видно, что достижение дефектами 4 уровня размера, в среднем, $l_{f,4} = 0.06 \text{ мм}$, при кручении происходит существенно раньше, чем при одноосном нагружении.

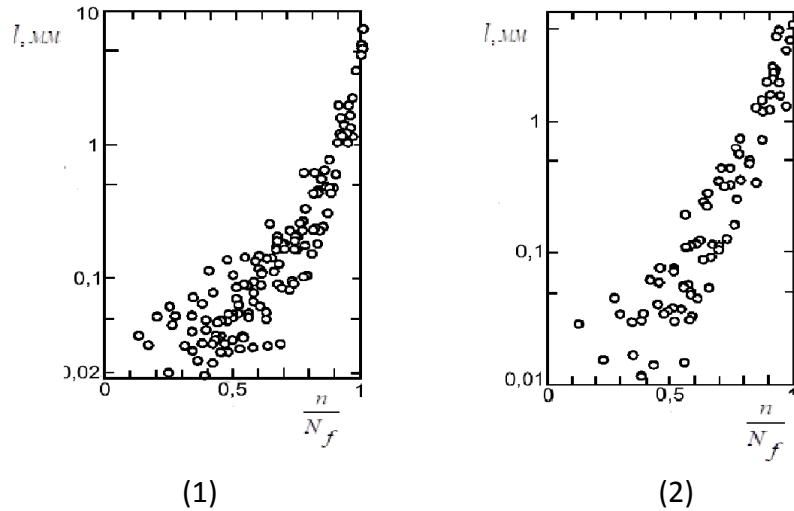


Рис. 1.12 Зависимость размеров наблюдаемых дефектов от числа циклов нагружения для углеродистой нормализованной 0.21%С стали при $\sigma_a = 1.06\sigma_{-1} = 260 \text{ МПа}$ (1) и углеродистой 0.45% С стали после закалки и отпуска $\sigma_a = 1.14\sigma_{-1} = 500 \text{ МПа}$ (2)

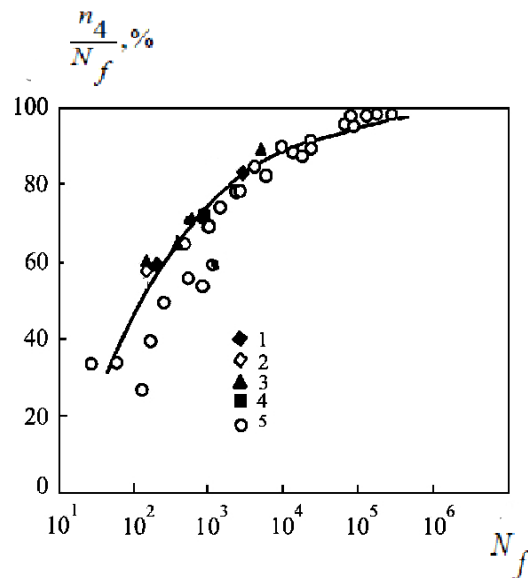


Рис. 1.13 Зависимость отношения $\frac{n}{N_f}$ от N_f для материалов: 1,2 – малолегированная сталь, 3 – алюминиевый сплав, 4 – высокопрочная сталь, 5 – чистый алюминий и никель

В ряде работ [18–23,243,262,263] получены экспериментальные зависимости размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th} , $\Delta K_{th} = \sigma_f \sqrt{\pi l}$ (σ_f – амплитуда одноосного нагружения при разрушении) от наблюдаемых линейных размеров трещин при разрушении (рис. 1.15).

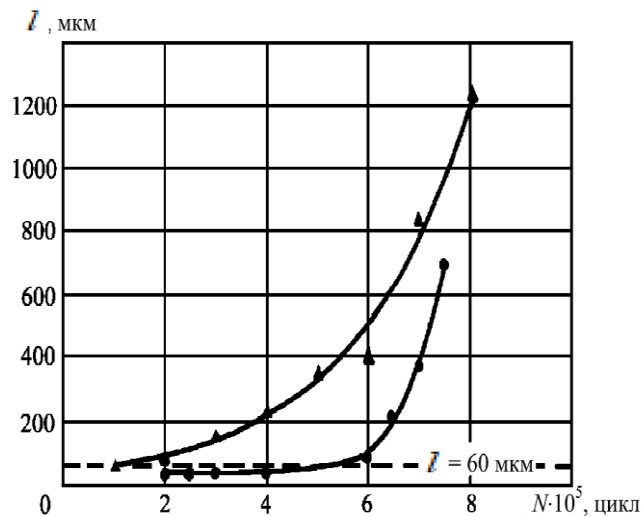


Рис. 1.14 Зависимость среднего размера дефектов от числа циклов нагружения при одноосном нагружении (●) и кручении (▲)

Например, для четырех марок сталей макротрещины линейного размера, в среднем, 0.01мм (в нашей классификации дефекты 4 уровня) наблюдаются при $\Delta K_{th} = 3\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$. Представленные данные для этих сталей хорошо ложатся на единую кривую зависимости $\Delta K_{th} = \Delta K_{th}(l)$.

Методами фрактографического анализа установлены и в обширной литературе описаны механизмы макроразрушений [50,58–66,77,191–195]. В зависимости от распространения коротких макротрещин по телу зерна или по границам зерен различают транскристаллитное (рис. 1.9 (а), (1),(2), рис. 1.16 (а-в)) и межзеренное (межкристаллитное) разрушение (рис.1.9 (е), рис.1.16 (г), рис.1.17 (1),(2)), при которых отсутствуют неупругие макродеформации или они сосредоточены в тонком приповерхностном слое – так называемый механизм квазискола, как например, для закаленных, низко- и среднеотпущенных сталей (рис. 1.18).

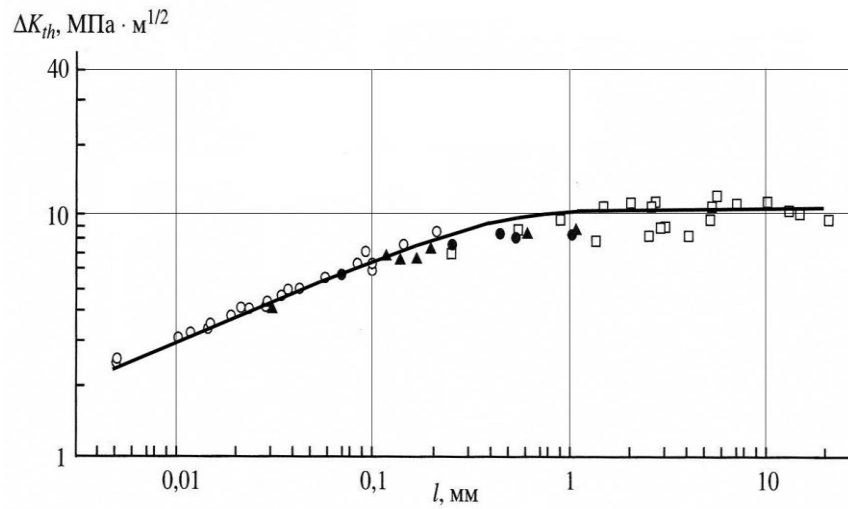


Рис. 1.15 Зависимость размаха порогового коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th} от предельных линейных размеров трещин для четырех марок сталей: \circ – сталь 0.45% С, \blacktriangle – сталь 0.47% С, \square – малоуглеродистые стали, \bullet – эвтектидная сталь

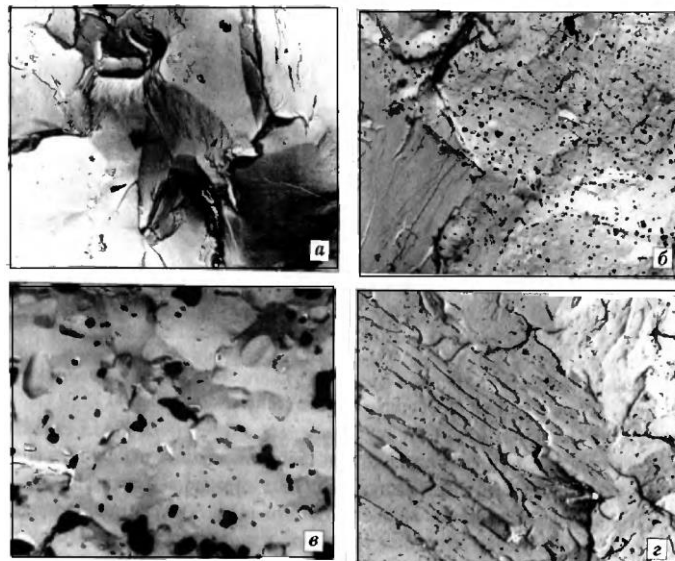


Рис. 1.16 Строение хрупких изломов в стали 09Г2С (а), стали 10ХСНД (б,в), хрупкое разрушение по границам бывшего пакета реек мартенсита (г). а,б – x2200, в- X14000, г – X2100 [39]

Различные механизмы формирования усталостного разрушения в поликристаллических материалах связаны с размерами зерен. В крупнозернистом металле макротрещина состоит из участков транскристаллитных и зернограничных трещин и имеют место как

внутризеренное, так и межзеренное разрушения (рис.1.19 (а),(б)); в мелкозернистом металле она формируется преимущественно из зернограничных трещин в результате межзеренного проскальзывания, и происходит межзеренное разрушение (рис.1.19 в). У субмикро- и нанокристаллических тел [83,192,193, 267], состоящих от 10 до 50% объема из межзеренных границ, основную роль в усталостном разрушении играет развитие зернограничных дефектов в результате увеличения плотности примесных и легирующих элементов в области границ зерен. Межзеренное разрушение происходит за счет зернограничных сдвигов и образованных пустот в стыках зерен.

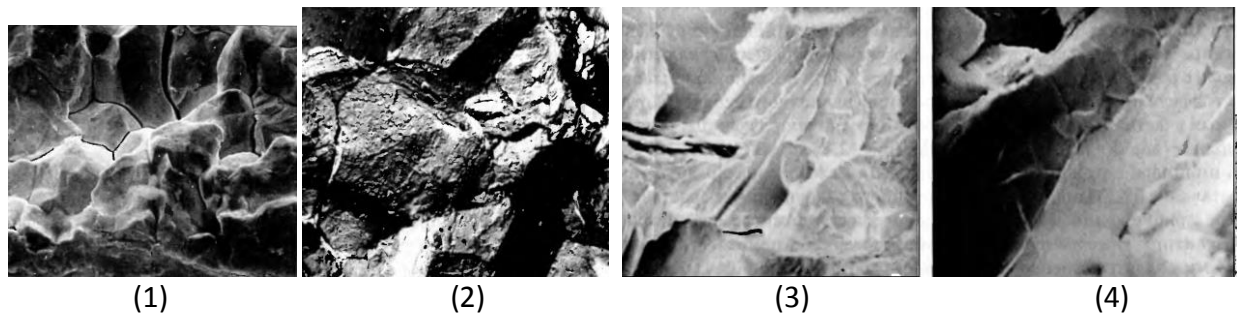


Рис. 1.17 Хрупкое межзеренное разрушение в молибдене, $\times 1200$ (1); разрушение по границам бывших зерен аустенита в стали 10XCHD, $\times 1600$ (2); фасетки транскристаллитного скола с развитым «речным узором» в чугуна (3) , $\times 500$, и граница раздела перлит-перлит и графит-матрица при межзеренном разрушении чугуна (4), $\times 300$ [39]

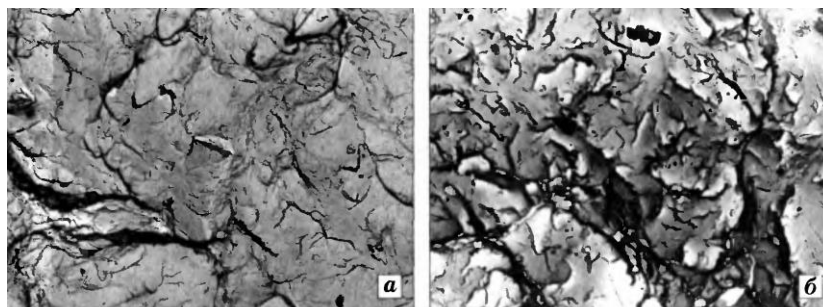


Рис. 1.18 Хрупкое разрушение сталей 40X и 40XФА по механизму квазискола, $\times 3200$ (а), $\times 1600$ (б)

результате увеличения плотности примесных и легирующих элементов в области границ зерен. Межзеренное разрушение происходит за счет зернограничных сдвигов и образованных пустот в стыках зерен.

К основным механизмам вязкого макроразрушения пластичных материалов отнесены разрушения с образованием шейки (рис. 1. 9 б) или сдвига (рис. 1.9в)

после существенного неупругого деформирования образца. Пластическое деформирование на парных плоскостях скольжения ведет к уменьшению поперечного сечения образца и образованию шейки с ямками. Процесс вязкого макроразрушения реализуется, в основном, вследствие интенсивного скольже-

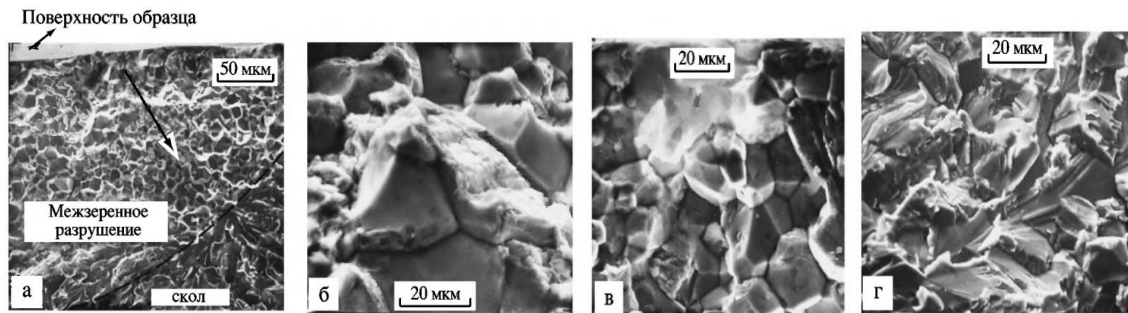


Рис. 1.19 Фрактографическая картина усталостного разрушения хромового сплава: а – переход от межзеренного разрушения к транскристаллитному сколу, б – смешанное вязкое и межзеренное разрушения, в – межзеренное хрупкое разрушение, г – хрупкое разрушение сколом [193]

ния по плоскостям действия максимальных напряжений сдвига и имеет ямочный микрорельеф (см рис.1.9 (5),(6)). Теоретико-экспериментальные результаты исследований процессов вязкого разрушения можно найти в обширной литературе, например, [4,100,114,137–139,169,184–186,197,228, 239,251]. Анализ механизмов развития вязких трещин и неупругого деформирования выходит за рамки настоящей работы.

Результаты многочисленных исследований показывает, что распространение усталостных магистральных трещин обуславливается комбинацией вязкого и хрупкого механизмов. Большинство металлов и сплавов имеет смешанный тип разрушения. По фрактограммам усталостных разрушений пластичных металлов и сплавов в области многоциклового усталости на поверхности макроизлома можно выделить как зону сдвигового характера разрушения – область развития неупругих деформаций и вязких трещин с характерными ямками, так и зону хрупкого разрушения отрывом. Поверхность излома можно представить совокупностью микроплощадок, лежащих как в плоскости действия максимальных касательных, так и в

плоскости действия максимальных нормальных напряжений. Их количественное соотношение зависит от металла, процесса нагружения, условий нагружения: температуры (например, охрупчивание при пониженных температурах), агрессивной внешней среды и т.п. В литературе рассматриваются два вида сопротивляемости разрушению: сопротивляемость отрыву и сопротивляемость сдвигу [204,205,209], которые описываются классическими механическими теориями прочности – теорией максимальных нормальных и теорией максимальных касательных напряжений.

Обратимся к анализу типичной кривой усталости металлов при одноосном симметричном (или пульсирующем) нагружении. Традиционно в материаловедческой литературе выделяют следующие три участка по числу циклов напряжения.

На третьем участке кривой усталости при числе $N_f \in [5 \cdot 10^6, 10^{10}]$ циклов до разрушения, значениях амплитуд напряжений ниже или равных пределу выносливости, частоте нагружения, лежащей в диапазоне $10-100 \text{ Гц}$, в большинстве металлов и сплавов неупругие макроскопические деформации практически отсутствуют. Петля гистерезиса если и возникает, то с увеличением числа циклов нагружения исчезает (как, например, для меди). Кристаллический излом, образующийся в результате распространения хрупких макротрещин, имеет атомно-гладкую поверхность.

На втором участке кривой усталости при числе $N_f \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов до разрушения и значениях амплитуды напряжений в диапазоне между пределом текучести и пределом выносливости для пластичных материалов имеет место неупругое деформирование, при этом в большинстве исследований обнаружено, что неупругие деформации порядка упругих деформаций (на рис. 1.20 представлены уровни неупругих деформаций для некоторых сталей) и тормозят развитие хрупких трещин [88,159,180,199,201].

На этом участке в пластичных материалах идут одновременно два процесса: вязкое разрушение и развитие хрупких усталостных микро- и макротрещин. На поверхности макроизлома можно выделить как зону сдвигового характера разрушения – область развития неупругих деформаций и вязких трещин, так и зону хрупкого разрушения. В хрупких материалах эволюция хрупких микро- и макротрещин приводит к хрупкому (квазихрупкому) разрушению.

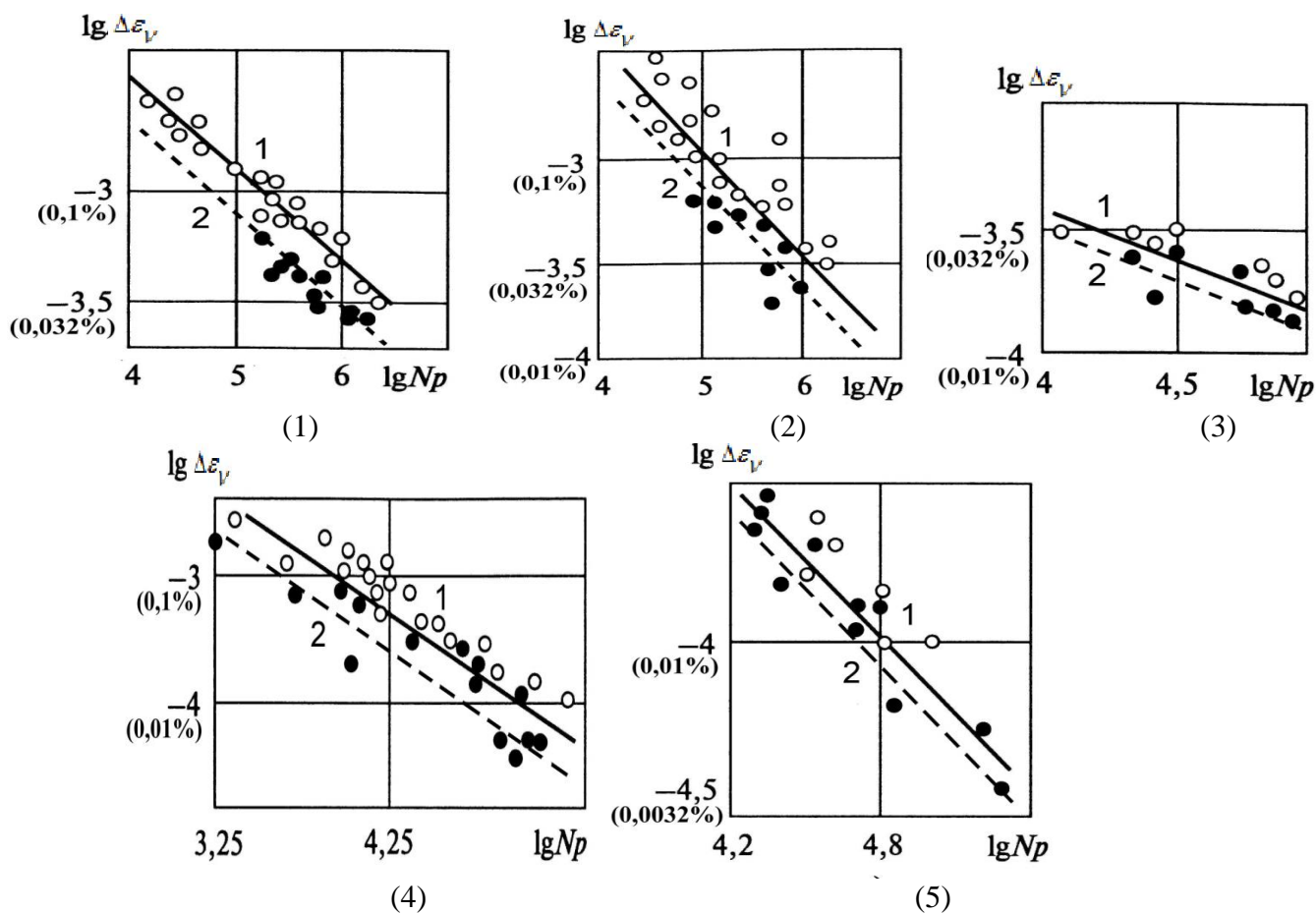


Рис. 1.20 Зависимость $\Delta\varepsilon_V \sim N_p$ между неупругой деформацией и числом циклов до полного разрушения (кривая 1) и неупругой деформацией и соответствующем числе циклов до образования макротрещины (кривая 2) при симметричном одноосном нагружении сталей:

(1) – сталь 15Г2АФДпс, (2) – сталь 45, (3) – сталь 1Х13, (4) – сталь 40Х, (5) – сталь ЭИ-612

На первом участке кривой усталости пластичных материалов при числе $N_f \in [10,5 \cdot 10^3]$ циклов до разрушения определяющим является вязкое разрушение с волокнистым изломом ямочного микрорельефа при значениях амплитуд напряжений в диапазоне от временного сопротивления до предела текучести металла. При этом величина размаха неупругой деформации близка

к предельной неупругой деформации металла при монотонном увеличении нагрузки. Энергия, соответствующая площади петли гистерезиса, расходуется на необратимые процессы возникновения неупругих деформаций.

Происходит деформация всего объема зерен вследствие интенсивных скольжений. Исследования развития разрушения на этом участке кривой усталости выходят за рамки настоящей работы.

1.3. О методах изучения кинетики усталостного разрушения

Методы механических испытаний твердых тел позволяют находить различные характеристики усталостной прочности тела и исследовать процессы зарождения и развития структурных дефектов микро-, мезо- и макроскопических уровней. Однако такие методы являются разрушающими. На практике для контроля за процессом разрушения натуральных конструкций применяют методы неразрушающего контроля, основанные на различных физических принципах. К методам неразрушающего контроля относятся ультразвуковой анализ, магнитная дефектоскопия, рентгеноструктурный анализ, электронная дефектоскопия, вихре – токовый анализ, акустико-эмиссионный анализ, радиационная дефектоскопия и др. [2,55,57,66,74,108,111,128,164]. Современное многообразие методов и обширная литература по их использованию позволяет сделать выбор того или иного метода исходя из поставленных задач исследований.

Анализ методов неразрушающего контроля выходит за рамки этой работы. Результатом данной диссертации является модель, позволяющая определять долговечность материала по заданному уровню накопленных дефектов, выявляемых диагностическими исследованиями в рамках этих методов. По модели можно находить остаточную долговечность материала с определенным уровнем накопленных дефектов, информация о которых также может быть получена в результате применения методов неразрушающего контроля.

Наиболее простым и доступным является визуально-оптический метод – прямое визуальное наблюдение за исследуемым деформируемым материалом.

Одним из наиболее информативных методов является метод акустической эмиссии, при которой в процессе нагружения тела регистрируется излучение упругих волн напряжений развивающимися дефектами. Акустические волны содержат информацию о происходящих физических процессах и распространяются на большие расстояния без значительного затухания. Применение акустической эмиссии позволяет выявлять микротрещины и контролировать процесс кинетики их роста [2,57,111,128].

Одним из основных применяемых методов обнаружения и измерения дефектов является метод ультразвуковой дефектоскопии, основанный на излучении ультразвуковыми датчиками импульсов, отражении этих сигналов от дефектов и поверхностей в теле и дальнейшей фиксации этими датчиками величины отраженного сигнала, по которому проводят диагностику дефектов. В качестве источников ультразвуковых колебаний используют пьезоэлектрические магнитострикционные преобразователи, вибрирующие с ультразвуковой частотой тока, поданного на электроды, между которыми они располагаются. Этот метод особенно эффективен при проверке различных элементов на расслоение, когда неоднородности характеризуются большой протяженностью в направлении по нормали к звуковому лучу, для получения коррозионной карты повреждений, а также для обнаружения неглубоких произвольно ориентированных трещин у поверхности тела.

Магнитный метод дефектоскопии основан на искривлении линий магнитного поля около трещины или дефекта из-за местного изменения магнитной проницаемости. Магнитные дефектоскопы оснащены постоянными магнитами, которые создают в теле мощное магнитное поле, или источниками переменного или импульсного напряжения. Высокочувствительные индуктивные датчики, установленные между магнитными полюсами, регистрируют уровень магнитного потока, изменяющийся из-за повышения магнитного

сопротивления или преломления магнитных силовых линий вследствие наличия различных особенностей, дефектов, трещин и т.п., имеющих в теле. Для обнаружения поверхностных трещин используют магнитно – порошковый метод с применением магнитного порошка в виде черных, цветных или флюоресцирующих ферромагнитных частиц размером около 0.01 мм, взвешенных в жидкой эмульсии или газовой взвеси. Этот порошок притягивается на поверхность трещины в результате действия больших градиентов магнитного поля в ее зоне, создавая некоторый рисунок. Этот метод позволяет выявить поверхностные макротрещины длиной от 0.01 мм и шириной раскрытия от 0.001 мм, а также подповерхностные нарушения сплошности на глубине до 0.3 мм.

Электронная дефектоскопия основана на сканировании поверхности разрушения электронным лучом высокой интенсивности и возбуждении электронами этого луча на трещинах вторичных электронов, которые дают изображение трещины. Этот метод позволяет измерять поверхностные макротрещины длиной от 0.1 мм.

Метод проникающих веществ используется для выявления поверхностных трещин при вытекании из них жидкости. Например, исследуемое тело погружается в горячее масло, затем его поверхность очищается и покрывается мелом. По мере выделения масла из трещин на меловой поверхности тела образуется пятно.

Радиационная дефектоскопия обеспечивает фиксацию изображений различных дефектов (непроваров, пор, трещин, раковин, включений) при просвечивании тела на рентгеновской пленке или на флюоресцирующем экране. Размеры дефектов определяют по распределению интенсивности просвечивания в виде почернений на рентгеновской пленке. При радиометрическом контроле производят сканирование узким пучком излучения с фиксацией данных в цифровом виде.

Объемную долю дефектов и изменения плотности дефектов изучают методами рассеяния рентгеновских лучей под малыми углами и гидростатического взвешивания [135,136]. Поры и микротрещины наблюдают с помощью растровой и просвечивающей микроскопии.

1.4 О моделях хрупкого усталостного разрушения металлов

Систематические теоретические исследования усталостного разрушения проводятся в физике твердого тела, металловедении и механике деформируемого твердого тела методами соответствующих научных направлений. К таким работам относятся [4,13,14,16–25,27,29,35,42,46,47,58–66,70,71,81,83,89,92,100–103,111,113–117,119–121,124,137,140–145,159,163,175,179,180–182,193-195,199–202,222–225,231,240,248,255-258,260-263,265–267,271,272–279].

Большинство подходов [4,13,14,18–23,27,35,42,46,47,58–66,92,100,129–133,151,163,179–181,203,207,222,229,231,240,248,256–259,260,274] описывает физическую природу усталостных разрушений с учетом механизмов структурных взаимодействий при действии напряжения, используя методологию структурных, энергетических и статистических теорий. С этих позиций подход к задаче усталостного разрушения характеризуется рассмотрением атомно-кристаллического строения металлов, исследованием эволюции дефектов и дислокаций и установлением законов их взаимодействия с элементами внутренней структуры металла: границами зерен, включениями, частицами второй фазы и т.п., с помощью энергетического анализа, с точки зрения принципов термодинамики, синергетических позиций, структурно-скейлинговых переходов. Одной из целей физических моделей является создание новых конструкционных и функциональных материалов с определенными заданными механическими свойствами.

В этой области широко известны работы В.С.Ивановой, Л.Р.Ботвиной, А.М.Глезера, С.Д.Волкова, С.Н.Журкова, В.Е.Панина, А.А.Шанявского,

В.И.Бетехтина, О.Б.Наймарка, В.Ф.Терентьева, С.А.Головина, Ю.Г.Матвиенко, А.Н.Романова, Б.Л.Авербаха, Э.Смит, Дж.Барнби, Т.Екобори, Й.Мураками, А. Коттрелла, У.Делингера, П.Шауба, Д.Лидтке, К.Собчик, Л. Кубина, Дж.Эшелби, М.Онами, А.Фрейденталя, Х.Гхонема и Дж.Прована и др.

В рамках этих исследований построены структурно-дислокационные теории вязкого разрушения, например, модель Зинера-Стро-Петча и ее развитие Смитом, Барнби, Авербахом, Луи, модели Коттрелла и Баллафа-Гилмана, Акулова, Мак-Лина и др.; структурно-энергетические теории Ивановой, Закржевского, Голаского, Хайдзеля, Вейнера, Лии и Ито, Томаси и др., а также статистические модели Екобори, Фрейденталя, Волкова, Гхонема и Прована, Мак-Картни, Галя, Собчика и др.

Известные структурные модели хрупкого усталостного разрушения [4,27,42,92,137,163,181,193,266,272,279] определяют начало образования микротрещины концентрацией дефектов в местах взаимодействия полос скольжения или предельной концентрацией вакансий, а ее развитие – результатом диффузии и оседания вакансий под действием микронапряжений на поверхности микротрещин. Предлагаются кинетические уравнения, например, связывающие остаточные микронапряжения с плотностями дефектов.

В физической и металловедческой литературе механизмы эволюции структур хрупких дефектов, определяемых как фазово-структурные неоднородности, исследуются на разных масштабных уровнях. Выделяют этапы искажения кристаллической решетки в результате увеличения плотности дефектов, зарождения микротрещин в элементарных объемах с критической плотностью дефектов и развития хрупких усталостных микро- и макротрещин.

В работах А.М.Глезера [42] развитие хрупкого разрушения связывается с формированием «сетчатой структуры», в которой увеличение плотности дефектов и их размеров приводит к слияниям и образованию хрупкой

микротрещины, а развитие вязкого разрушения – с образованием «ячеистой структуры», которая ведет к развитию неупругого деформирования и вязкому разрушению. Определяются разные физические механизмы эволюции структур дефектов на разных масштабных уровнях внутри зерна – на стадии формирования «сетчатой структуры» и на стадии развития микротрещин.

Структурно-энергетические теории зарождения, развития и слияния хрупких усталостных трещин базируются: на оценке энергии искажения кристаллической решетки; на анализе энергии, необходимой для разрыва напряженных межатомных связей в металлах; на оценке энергии дефектов упаковки; на исследованиях потери устойчивости кристаллической решеткой, обусловленной критической плотностью вакансий и др.

Например, В.С.Ивановой предложена теория, связывающая накопление повреждаемости тела с его состоянием в энергетическом фазовом пространстве [58–66].

Строятся дилатонно-фрустронные модели описания усталостного разрушения, имеющие начало в работах А.А.Кусова, С.Н.Журкова, В.А.Петрова. В соответствии с кинетической концепцией С.Н.Журкова, разрушение определяется термофлуктуационным разрывом межатомных связей. В общем процесс образования трещин происходит по такому сценарию. В единичном объеме возникает флуктуация плотности трещин $(i-1)$ вида, перемычки между которыми соответствуют $(i-1)$ корреляционному радиусу. В процессе дальнейшего деформирования перемычки разрушаются. В результате этого образуются трещины i – ого вида.

В работах Л.Р. Ботвиной [18–23] построение критериев разрушения при циклических нагружениях развивалось с позиций теории подобия и теории фазовых переходов, единых для разных физических процессов: ползучести, усталости, ударной вязкости, внутреннего трения, кристаллизации, радиационного распухания и т.п.

Некоторые современные подходы связаны с исследованиями эволюции дефектов методами термодинамики. Например, В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев и др. [13,14,222] рассматривают эволюцию врожденных и приобретенных «субмикронесплошностей», «микронесплошностей» и «макронесплошностей» и описывают физические механизмы развития этих несплошностей с точки зрения принципов термодинамики.

В последнее время развивается фрактальная физика и синергетика – теория самоорганизации в системах различной природы. Полагается, что движущей силой процессов самоорганизации является стремление системы к минимуму производства энтропии. Синергетический метод описывает деградацию твердого тела в связи с его эволюцией от сплошной среды к дискретной (фрактальной) среде [18-23,58-64,130-132,149,181,182,244,245,270]. Фрактал определяется как геометрическая фигура, обладающая свойством самоподобия, т.е. состоящая из частей, подобных всей фигуре в целом. В деформируемом твердом теле выделяются объекты, обладающие свойствами фрактальных структур. Разрушение рассматривается как локальный процесс, последняя стадия эволюции внутренней структуры материала, когда единственным способом диссипации подводимой к материалу энергии является образование дефектов разных масштабов после того, как материал исчерпал свои возможности по подстройке элементов структуры друг к другу.

В ряде работ термодинамика процесса разрушения рассматривается с позиций структурно-скейлинговых переходов в ансамблях мезодефектов. Основной гипотезой является масштабная инвариантность (или скейлинг) – свойства уравнений сохранять вид при изменении всех расстояний и промежутков времени в одинаковое число раз. Формулируется кинетическое уравнение для введенного параметра структурного скейлинга.

В работах О.Б. Наймарка с коллегами отмечалась универсальность в поведении ансамблей дефектов при различных физических процессах: усталости, ползучести, монотонном пластическом деформировании,

динамическом нагружении [145]. Авторами вводится макроскопический тензор плотности дефектов, который входит в определяющие соотношения в качестве деформации, обусловленной дефектами. Выписывается выражение для собственной энергии дефектов. Формулируется соотношение для свободной энергии среды с дефектами на различных масштабных уровнях с учетом собственной энергии дефектов. В качестве параметра структурного скейлинга для процессов усталостного разрушения предлагается рассматривать отношение характерного расстояния между дефектами к характерному размеру дефектов. Переход от одного уровня к другому определяется эволюционным уравнением для этого параметра.

К стохастическим моделям усталостного разрушения можно отнести подход Т. Екобори [46,47], согласно которому случайное появление и слияние микротрещин описывается энергией активации с учетом концентрации микронапряжений.

Согласно модели А. Фрейденталя, процесс развития усталостных повреждений обусловлен стохастическим характером распределения размеров зерен, случайным распределением полос скольжения и т.п. Для одноосного нагружения вероятность усталостного разрушения после n циклов действия амплитуды напряжений σ_a выражается формулой:

$$F(\sigma_a)_n = 1 - [1 - p(\sigma_a)]^{mn}, \quad \text{где} \quad p(\sigma_a) = \int_0^{\infty} \phi(y) \left(\int_0^{\sigma_a} \varphi(r) dr \right) dy,$$

m – число межатомных связей, нарушение которых приводит к разрушению образца, $p(\sigma_a)$ – вероятность разрушения на одном цикле нагружения, $\varphi = \varphi(r)$ – функция распределения пределов прочности межатомных связей после приложения амплитуды σ_a , $\phi = \phi(y)$ – функция распределения сил межатомных связей.

По концепции С.Д. Волкова, распределение микронапряжений в неоднородном элементарном объеме подчиняется распределению Гаусса.

Разрушение характеризуется инвариантами тензора микронапряжений.

Х. Гхонем и Дж. Прован рассматривали зарождение микротрещин как интерференцию гауссовых функций распределения микроструктурных повреждений, развитие микротрещин – как эволюцию этого распределения на основе марковских случайных процессов.

Литература по моделированию механизмов развития усталостного разрушения обширна, детальное ее рассмотрение в настоящей диссертации не представляется возможным. В целом, известные теории описывают физические закономерности возникновения и роста микро- и макротрещин усталости. При этом физика твердого тела не выходит на инженерный уровень, физические теории содержат параметры структуры и физических механизмов разрушения, не идентифицируемые в макроэкспериментах, и не позволяют определять прочностные макрохарактеристики материала и влияние на них технологических, эксплуатационных и конструктивных факторов. Построение критериев разрушения в зависимости от процессов нагружения физическими теориями не рассматривается. На наш взгляд, к настоящему времени не построены зависимости механических параметров определяющих соотношений механики деформируемого твердого тела, учитывающие структурные закономерности и физические механизмы разрушения.

В механике деформируемого твердого тела развивается феноменологический подход к изучению усталостного разрушения материалов в условиях сложного напряженного состояния и программных нагружений и построению теорий детерминированных и стохастических процессов нагружения и макроразрушения материалов и элементов конструкций [17,18,25,29,33,35,36,50,56,57,77,87,92,102,103,111,114–117,161, 162,199–203,212,220,259,264,268– 270,273,275–278].

В настоящее время в предлагаемых континуальных теориях поврежденности материала (в т.ч. градиентных, нелокальных, микроморфных

континуумов [27]), ведущих начало в работах А.А.Ильюшина и Ю.Н. Работнова, в структуру определяющих соотношений явным образом вводятся определенные внутренние параметры поврежденности, описывающие процесс развития разрушения в материале. Поврежденность рассматривается в скалярном или в наиболее общем тензорном виде, функционально определяемом процессом нагружения.

Ю.Н.Работнов полагал, что «состоянию растресканности материала» можно приписать некоторую монотонно возрастающую функцию поврежденности $\omega = \omega(\tau)$, $\tau \in [0, t]$, принимающую значения для неповрежденного материала $\omega(0) = 0$ и для момента времени $\tau = t_f$ возникновения единичной или нескольких макротрещин $\omega(t_f) = 1$, причем в любом эксперименте определенные состояния следуют одно за другим в одной и той же последовательности. Значения этой функции в каждый момент времени можно полагать структурными параметрами, определяющими состояние материала. Если для двух разных моментов времени значения функции поврежденности окажутся одинаковыми, то им соответствует одно и то же состояние поврежденности.

В работах В.П.Тамужа [172,190] вводилась функция поврежденности не некоторой представительной сфере в окрестности материальной точки, для которой формулируются эволюционные уравнения. Критерием разрушения является достижение этой функцией определенных предельных значений. В работах А.А. Мовчана [115–117] рассматривались тензоры поврежденности, связанные с видом микродефектов. Предложенные эволюционные уравнения учитывают процессы зарождения и развития микродефектов.

К вероятностным феноменологически моделям усталостного разрушения можно отнести подход Дж. Богданоффа и Ф.Козина, согласно которому критерий накопления поврежденности строился на основе цепей Маркова [16].

К.Собчик предложил описывать процесс разрушения как диффузионный марковский процесс при стохастическом нагружении. Также известно интегральное уравнение Мак-Картни-Галя для определения распределения долговечности образца при представлении случайного процесса развития трещин как марковского процесса с привлечением гипотезы линейного накопления повреждений.

В рамках исследований по механике деформируемого твердого тела в разделе «механика разрушения» проводятся обширные экспериментально-теоретические исследования закономерностей развития хрупких усталостных трещин конечной длины в металлах при различных циклических процессах нагружения, начиная с 1886 г. (работы И. Баушингера) и до настоящего времени [25,71,89,101,111,119–124,134,140,141,146–149,152,217,223,224,265, 267,274,279]. Разрабатываются деформационные, силовые и энергетические критерии разрушения.

Большинство феноменологических теорий рассматривают эволюцию поврежденности материала, но не учитывают архитектуру внутреннего строения металла, физические механизмы и стадийность процесса усталостного разрушения. При этом, согласно экспериментальным данным, различным уровням развития усталостного разрушения соответствуют определенные состояния структуры металла и свои физические механизмы разрушения. Механика хрупкого разрушения, в свою очередь, исследует развитие единичных хрупких макротрещин на макроуровне на основе деформационных, силовых и энергетических подходов.

ВЫВОДЫ по первой главе

1. Проанализированы результаты обширных экспериментально-теоретических исследований развития хрупкого усталостного разрушения на микро-, мезо- и макроскопическом масштабно-структурных уровнях в 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), аустенитно-мартенситных (типа 08Х14АН4МД) и трубных сталях; в черных и цветных (алюминии, цинке, свинце, никеле (в т.ч. в микрокристаллическом состоянии), олове, меди, титане) металлах; чугунах; никелевых (ЭШ37БВД, Mar-M200, Udimet 700), алюминиевых (АК4–1, АК4–1 Т1, АЛ25, ВИЗ, ВЭ5, в т.ч. в микрокристаллическом состоянии), титановых (Ti–6Al–6V–2Sn, АТ6) сплавах с характерными средними линейными размерами зерен, лежащими в широком диапазоне, $d \in (10^{-3}, 5) \text{ мм}$.

2. Стадийность развития процесса хрупкого усталостного разрушения металлов характеризуется прохождением определенных стадий эволюции полосовой субструктуры, появлением, ростом и слиянием хрупких микротрещин и нераспространяющихся трещин на микроуровне и коротких и макротрещин на мезоуровне, завершающихся образованием единичных макротрещин. В соответствии с результатами этого анализа в диссертации введена система из шести масштабно-структурных уровней и дана классификация дефектов по ним.

Рассмотрены механизмы развития усталостного разрушения на разных масштабно-структурных уровнях.

С ростом числа циклов нагружения на микроуровне эволюция дефектов, имеющих в твердых телах после кристаллизации (вакансионные кластеры, замещения и внедрения атомов, дефекты по Шоттки, междоузельные частицы, дефекты по Френкелю, включения чужеродных атомов, ионов, молекул,

электронно-дырочные дефекты, субмикротрещины и др.) приводит к формированию упорядоченной самоорганизующейся полосовой структуры, связанной с их накоплением (Л.Р. Ботвина, В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев и др.). При достижении критического значения плотности дефектов имеет место фазовый переход к хрупким микротрещинам, стабильность размеров которых создает возможность значительного увеличения их плотности. Последующие слияния микротрещин ведут к зарождению коротких трещин размеров зерна, которые формируют «речной узор» на поверхности образца. В результате слияния коротких трещин с достижением линий необратимой повреждаемости Френча на мезоуровне образуются транскристаллитные и зернограничные макротрещины, эволюция которых приводит к возникновению одиночных макротрещин. В пластичных материалах вместе с развитием хрупких дефектов 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.

3. Усталостное разрушение определяется независимыми процессами вязкого и хрупкого разрушений по различным физическим механизмам. Хрупкое макродеформирование сопровождается эволюцией полосовой субструктуры, приводящей к хрупкому макроразрушению. При неупругом макродеформировании развивается эволюция ячеистой структуры, приводящей к вязкому макроразрушению.

4. Развитие процесса разрушения металле в интервале $N_f \in [5 \cdot 10^6, 10^{10}]_{\text{циклов}}$ происходит при упругом макродеформировании. Разрушение металла при достижении предела выносливости характеризуется механизмами межзеренного или транскристаллитного скола и является хрупким макроразрушением по коротким трещинам. Процесс усталостного разрушения хрупких материалов в диапазоне $N_f \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]_{\text{циклов}}$

приводит к образованию хрупких единичных макротрещин при упругом деформировании и хрупкому макроразрушению. В пластичных материалах развиваются неупругие деформации величины порядка упругих деформаций, и тормозят развитие хрупких трещин.

5. Анализ многочисленных экспериментов по усталостному разрушению металлов при различных программах нагружения и напряженно-деформированных состояниях показал, что этот процесс функционально связан с процессом нагружения как во времени, так и в пространстве напряжений.

6. 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.

7. В феноменологических теориях вводятся понятия поврежденности в тензорной форме, функционально определяемой процессом нагружения в детерминированном или вероятностном виде. Большинство феноменологических теорий рассматривают эволюцию поврежденности материала, но не учитывают архитектуру внутреннего строения металла, физические механизмы и стадийность процесса усталостного разрушения. Согласно экспериментальным данным, различным уровням развития

усталостного разрушения соответствуют определенные состояния структуры металла и свои физические механизмы разрушения. Механика хрупкого разрушения, в свою очередь, изучает развитие единичных хрупких макротрещин на макроуровне на основе деформационных, силовых и энергетических подходов.

8. Многие металлофизики рассматривают процесс разрушения как поэтапный процесс зарождения, развития и слияние дефектов всех уровней. Следуя этому появляется возможность построить теорию усталостного разрушения для всего временного диапазона до разрушения и пространства напряжений. В диссертации формулируется система определяющих соотношений для всех масштабных уровней, позволяющая находить вероятность достижения дефектами предельных состояний, что позволяет построить кривую усталости металла по определенному уровню накопленных дефектов для различных процессов пропорционального нагружения.

ГЛАВА 2. Теория усталостного масштабного-структурного разрушения металлов при симметричных одноосном и равномерном нагружениях и сдвиге

В диссертации изучаются процессы усталостного разрушения металлов на разных структурно-масштабных уровнях при простых циклических нагружениях следующего вида:

$$\sigma_{kk}(\tau) = \alpha_k \sigma_a f(\tau), f(\tau) = \alpha + \sin(\omega\tau + \theta), k = 1, 2, 3, \tau \in [0, t] \quad (2.1)$$

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

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

Согласно результатам многочисленных исследований, развитие усталостного разрушения зависит от вида напряженно-деформированного состояния. Построение модели для произвольного простого нагружения (2.1) базируется на характеристиках разрушения материалов при трех базовых видах нагружения в условиях плоского напряженного состояния:

1. одноосном симметричном нагружении: $\alpha_1 = 1, \alpha = \alpha_2 = \alpha_3 = 0;$ (2.2)

2. симметричном сдвиге: $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = -1, \alpha = \alpha_3 = 0;$ (2.3)

3. двухосном равномерном нагружении: $\alpha_1 = \alpha_2 = 1, \alpha = \alpha_3 = 0.$ (2.4)

Эта глава посвящена формулировке основных гипотез предлагаемой модели усталостного разрушения и построению определяющих соотношений для этих трех базовых видов нагружения.

В п. 2.5 главы обсуждаются определяющие соотношения модели для одноосного нагружения ($\alpha_2 = \alpha_3 = 0$), сдвига ($\alpha_2 = -1, \alpha_3 = 0$) и двухосного нагружения ($\alpha_2 = 1, \alpha_3 = 0$) с несимметричным циклом ($\alpha \neq 0$).

Основные понятия и обозначения

σ_a – амплитуда максимального главного напряжения

ω – частота изменения напряжений

n – число циклов нагружения

$a_m, m = 1, 2, 3$ – отношения главных напряжений

α – параметр асимметрии цикла напряжений

d – характерный средний размер зерна

l – характерный линейный размер дефекта

q – характерная средняя плотность дефекта

L – минимальная длина трещины, дальнейшее развитие которой под действием нагружения описывается механикой разрушения

$V_c = L^3$ – представительный объем твердого тела, в котором возможно зарождение начальной трещины механики разрушения

$l_i = l_i(\tau), l_{f,i}, i = 1, \dots, 6, \tau \in [0, t]$ – линейный размер дефекта i -го масштабного уровня и его предельное значение соответственно

$q_i = q_i(\tau), q_{f,i}, i = 1, \dots, 6, \tau \in [0, t]$ – плотность дефектов i -го масштабного уровня и ее предельное значение соответственно

σ_f – амплитуда наибольшего главного напряжения при разрушении по дефектам мезоуровня или по полному разрушению

t_f – долговечность по дефектам мезоуровня или по полному разрушению материала

n_f – число циклов разрушения по дефектам мезоуровня

N_f – число циклов до полного разрушения материала

$l_i^* = l_i^*(\tau), l_{f,i}^*, i = 1, \dots, 6, \tau \in [0, t]$ – усредняющая функция i -го уровня и ее предельное значение соответственно

$t_i = t_i(\sigma_a), n_i = n_i(\sigma_a), i = 1, \dots, 6$ – моменты времени и числа циклов начала развития дефектов i -го уровня при амплитуде максимального главного напряжения σ_a

$t_7 = t_7(\sigma_a), n_7 = n_7(\sigma_a)$ – моменты времени и числа циклов достижения дефектами шестого уровня предельного состояния

$N_i, i = 1, \dots, 6, N^1, N^2$ – базовые числа циклов i -ого масштабного уровня

$\Omega_i = \Omega_i(\tau), i = 1, \dots, 6, \tau \in [0, t]$ – функция поврежденности на i -ом уровне

$Q_i = Q_i(\tau), i = 1, \dots, 6, \tau \in [0, t]$ – вероятность разрушения на i -ом уровне

$Q = Q(\tau)$, $\tau \in [0, t]$ – вероятность разрушения по дефектам мезоуровня

$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(N, \omega)$, $\tau_{-1} = \tau_{-1}(N, \omega)$, $\hat{\sigma}_{-1} = \hat{\sigma}_{-1}(N, \omega)$ – кривые усталости материала при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении с симметричным циклом соответственно

$\sigma_0 = \sigma_0(N, \omega)$, $\tau_0 = \tau_0(N, \omega)$, $\hat{\sigma}_0 = \hat{\sigma}_0(N, \omega)$ – кривые усталости материала при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении с симметричным циклом соответственно

$\sigma_s = \sigma_s(N, \omega)$, $\tau_s = \tau_s(N, \omega)$, $\hat{\sigma}_s = \hat{\sigma}_s(N, \omega)$ – циклические пределы текучести материала

при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении с симметричным циклом соответственно

σ_s , τ_s , $\hat{\sigma}_s$ – пределы текучести при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном нагружении соответственно

σ_B , τ_B , $\hat{\sigma}_B$ – временное сопротивление при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном нагружении соответственно

σ_T^u , τ_T^u , $\hat{\sigma}_T^u$ – предел чувствительности к циклическим нагружениям при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном нагружении с симметричным циклом соответственно

ε_B , E – относительное удлинение при статическом разрушении и модуль Юнга

$\Delta\varepsilon_V = \Delta\varepsilon_V(n)$ – размах наибольшей неупругой осевой деформации при числе циклов n

$Q_V = Q_V(\Delta\varepsilon_V, n)$ – вероятность вязкого разрушения

ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений

2.1 Система гипотез о развитии усталостного разрушения в металлах

Проблема деформирования и разрушения металлов изучается на различных масштабно-структурных уровнях методами физики твердого тела и методами механики деформируемого твердого тела. По оси абсцисс на рис. 2.1 представлен диапазон характерных размеров элементарных структур $(10^{-15} - 10^2)$ мм, эволюция которых изучается в теоретической физике и механике деформируемого твердого тела. В данной Главе закономерности поведения металлов при трех базовых видах нагружения (2.1) – (2.4) исследуются на уровне физики разрушения металлов в рамках феноменологического подхода (см. рис. 2.1).

Предлагаемая модель описывает процессы хрупкого разрушения при различных процессах нагружения вида (2.1) в областях многоцикловой и гигацикловой усталости при $N_f \in [5 \cdot 10^3, 10^{10}]_{\text{циклов}}$ (см. рис.2.2) металлов и сплавов, первоначально имеющих дефекты кристаллической решетки (точечные, двухмерные или трехмерные), особенно, в субграницах, вблизи границ зерна, на границах включений и т.п., но не имеющих макротрещин. На основе анализа экспериментально-теоретических результатов исследований усталостного разрушения металлов по физике разрушения, металловедении, механике деформируемого твердого тела, проведенного в Главе 1, формулируются следующие гипотезы предлагаемой теории.

1. *Усталостное разрушение металлов определяется независимыми процессами хрупкого и вязкого разрушений.*

На основе анализа, проведенного в п.1.1 Главы 1, получено, что эволюция дефектов металлургического и технологического происхождения после кристаллизации в твердых телах с ростом числа циклов нагружения приводит к формированию «упорядоченной самоорганизующейся полосовой структуры», связанной с единичным скольжением и их накоплением. При достижении критического значения плотности дефектов имеет место переход от этой структуры к хрупким микротрещинам, стабильность размеров которых создает возможность значительного увеличения их плотности. Последующие слияния микротрещин ведут к зарождению хрупких нераспространяющихся трещин внутри зерна и на границах зерен. С достижением плотности последних предельного значения происходят их слияния с образованием коротких трещин размеров зерна, которые формируют известный «речной узор» на поверхности образца с образованием экструзий и интрузий (п.1.2 первой главы). В результате слияния коротких трещин с достижением линий необратимой повреждаемости Френча

образуются транскристаллитные и зернограничные макротрещины. Дальнейшая эволюция приводит к возникновению одиночных макротрещин и окончательному хрупкому разрушению металла. В пластичных материалах независимо от развития хрупких дефектов 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 которых приводит к вязким макротрещинам и вязкому макроразрушению.

Особенностью циклических нагружений является то, что развитие процесса разрушения при одноосном нагружении в области $N_f \in [5 \cdot 10^6, 10^{10}]$ циклов происходит при упругом макродеформировании; при амплитуде, равной пределу выносливости металла, приводит к хрупкому макроразрушению по коротким трещинам и механизмам межзеренного или транскристаллитного скола. При $N_f \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов в хрупких материалах процесс усталостного разрушения приводит к образованию хрупких единичных макротрещин при упругом деформировании и хрупкому макроразрушению. В пластичных материалах развиваются неупругие деформации величины порядка упругих деформаций, и тормозят развитие хрупких трещин. Усталостный излом имеет хрупкую кристаллическую и вязкую волокнистую составляющие.

Развитие хрупкого разрушения определяется процессом упругого макродеформирования. Развитие вязкого разрушения определяется процессом неупругого макродеформирования. Согласно походу механики деформируемого твердого тела полная деформация материала определяется суммой упругой и неупругой деформаций.

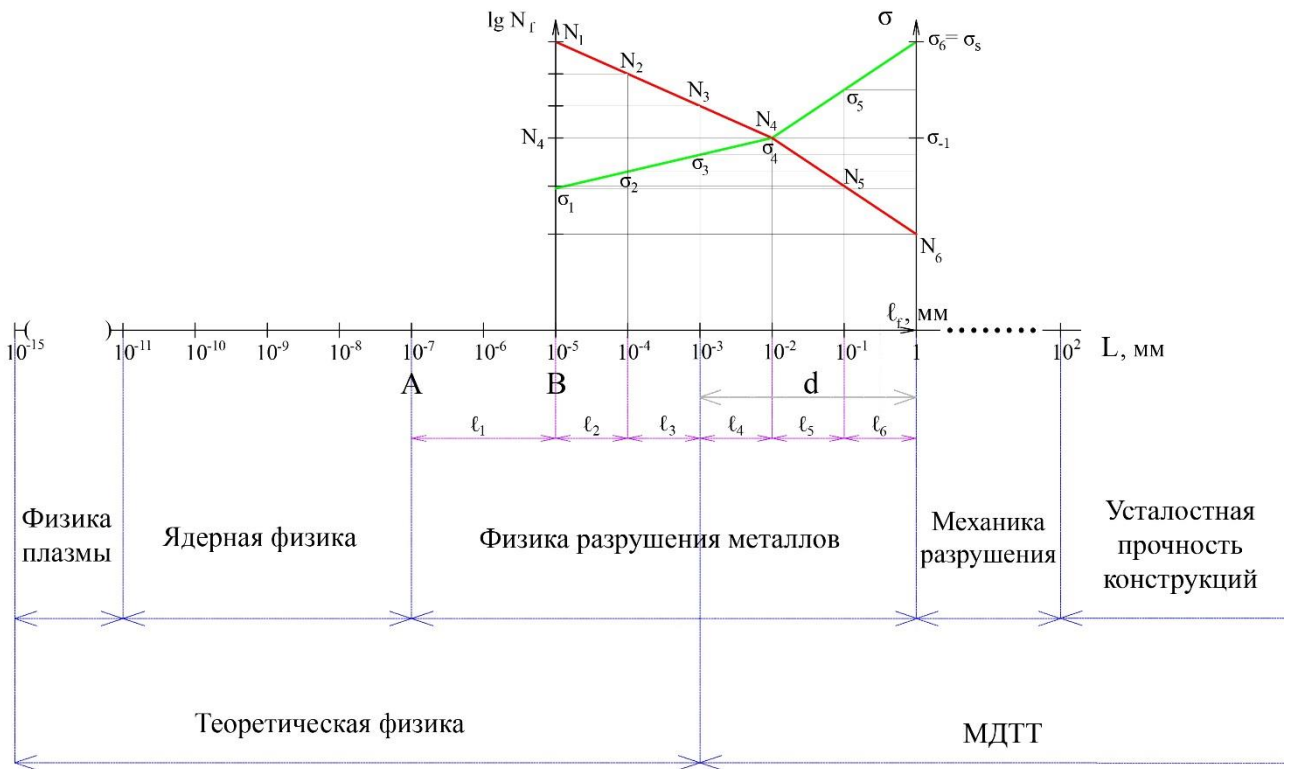


Рис. 2.1 Зависимость базовых амплитуд σ_i и чисел циклов N_i от предельного значения линейного размера дефекта l_f при достижении предельной плотности дефектов q_f в условиях симметричного одноосного нагружения; точка А – радиус атома, точка В – вектор Бюргерса, d – характерный средний линейный размер зерна в металле, L – длина начальной трещины в механике разрушения

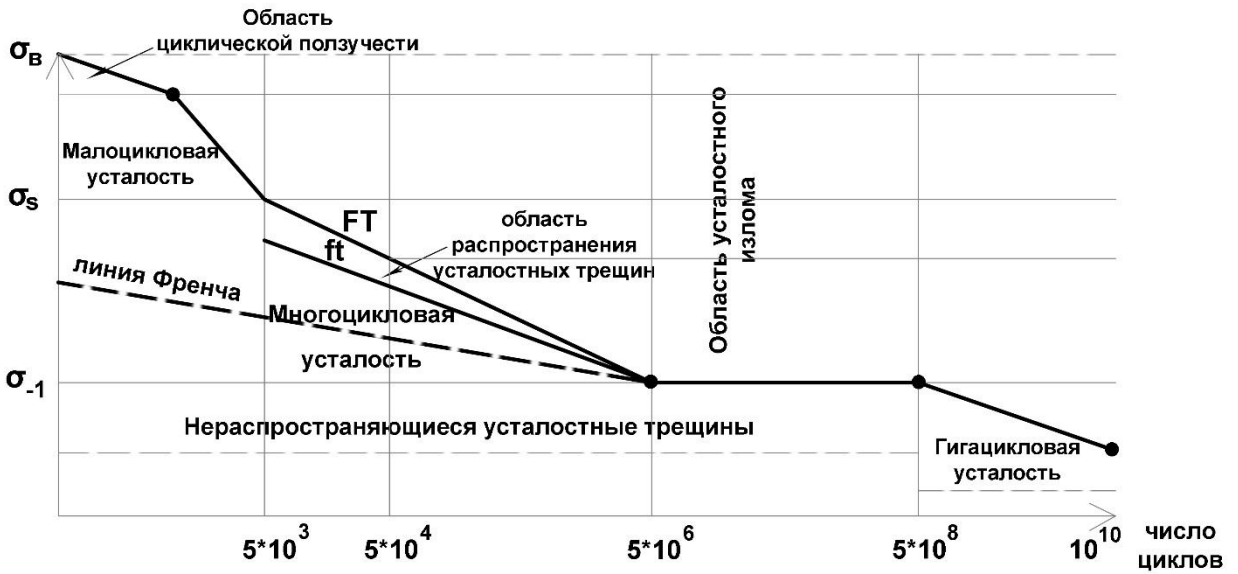


Рис. 2.2 Области развития усталостных трещин [193]

2. Процесс хрупкого усталостного разрушения рассматривается на шести масштабно-структурных уровнях. Вводится классификация хрупкого разрушения по дефектам i -ого масштабного уровня, $i = 1, \dots, 6$.

Наблюдаемые дефекты, хрупкие микро- и макротрещины материаловеды относят к разным структурным уровням, характеризующимся определенными состояниями структуры и механизмами разрушения. В физической литературе дефекты определяют как фазово-структурные неоднородности, и переход с одного масштабного уровня на другой называют фазовыми переходами.

На основе анализа известных экспериментально-теоретических данных, проведенному в Главе 1, вводится система из шести масштабно-структурных уровней, отвечающих разным стадиям развития хрупкого разрушения по разным физическим механизмам и классификация хрупкого разрушения по дефектам (разрушениям) i -ого масштабного уровня, $i = 1, \dots, 6$.

Дефект i -ого масштабного уровня в некотором представительном объеме V_c тела в момент времени τ , $\tau \in [0, t]$, может быть охарактеризован характерным линейным размером дефекта $l_i = l_i(\tau)$ и плотностью потока

дефектов $q_i = q_i(\tau)$, задаваемой формулой: $q_i(\tau) = \lim_{\Delta V \rightarrow V_c} \frac{\Delta q_i(\tau)}{\Delta V}$, $i = 1, \dots, 6$,

$\tau \in [0, t]$, где $\Delta q_i = \Delta q_i(\tau)$ – среднее количество дефектов в объеме ΔV в момент времени $\tau \in [0, t]$, $V_c = L^3$ – представительный объем твердого тела, в котором возможно зарождение начальной трещины механики разрушения длины L , $i = 1, \dots, 6$. Предельное состояние дефекта i -ого уровня определяется предельным линейным размером $l_{f,i}$ и предельной плотностью $q_{f,i}$ в объеме V_c , $i = 1, \dots, 6$.

Физическими образами дефектов первого уровня, развивающихся при действии нагружения в полосовых структурах, являются вакансионные

кластеры, несплошности, поры, сетки у границ зерен, субмикротрещины и т.п. длины, в среднем, $l_1 \leq 10^{-3}d$ (см. п.1.1 Главы 1). При амплитуде одноосного нагружения выше предела чувствительности к циклическим напряжениям и критической плотности дефектов первого уровня происходит переход от полосовой структуре к микротрещине, определяемой как микродефект второго уровня длины $l_2 \in (10^{-3}, 10^{-2}]d$. С дальнейшим увеличением амплитуды напряжения в результате слияния микротрещин зарождаются нераспространяющиеся трещины – дефекты третьего уровня, $l_3 \in (10^{-2}, 10^{-1}]d$, слияния которых ведут к образованию коротких (распространяющихся) трещин – дефектов четвертого уровня, $l_4 \in (10^{-1}, 1]d$, и переходу с микро- на мезоуровень. При амплитуде напряжений, равной пределу выносливости, имеет место хрупкое макроразрушение по дефектам четвертого уровня при макроупругом деформировании.

С последующим увеличением амплитуды дефекты четвертого уровня растут, выходят за границы зерна на мезоуровень, пересекают три–четыре зерна, зарождаются дефекты пятого и шестого уровней – транскристаллитные и зернограничные макротрещины (см. п.1.2 Главы 1). В результате дальнейшего развития разрушения формируются одна или несколько одиночных хрупких макротрещин, эволюция которых с ростом числа циклов приводит к хрупкому макроразрушению. Кинетика этих макротрещин изучается в механике разрушения.

Результаты экспериментов позволяют полагать (см. Главу 1), что статистические размеры микродефектов ($i = 1, 2, 3$), в среднем, стабильны и практически не меняются в процессе нагружения. Стабильность размеров микродефектов сопровождается значительным увеличением их плотности. На микроуровне механические свойства меняются незначительно при

макроупругом деформировании, с ростом числа циклов имеет место стабилизация свойств. На каждом из микроуровней возможно появление дефектов других уровней, но в силу постоянных слияний их вкладом в вероятность разрушения можно пренебречь. Дефекты мезоуровня отсутствуют.

На каждом из масштабных мезоуровней ($i = 4, 5, 6$) возможно появление дефектов других уровней. На мезоуровне изменения размеров и плотности макродефектов ($i = 4, 5, 6$) определяются процессом нагружения. Происходит интенсивное изменение механических свойств металла и осуществляется переход от накопления рассеянных повреждений к развитию локализованного разрушения на макроуровне. В пластичных материалах параллельно с процессом развития хрупкого усталостного разрушения по макротрещинам происходит процесс развития вязкого разрушения.

Отметим, что предложенная классификация по уровням дефектов является в определенной мере условной и зависит от структуры материала. При исследовании конкретных материалов, возможно, возникнет необходимость ее уточнения (например, объединение уровней).

Аналогичная классификация может быть также проведена для материалов подобной внутренней структуры сталей и сплавов.

3. Образование дефектов каждого масштабного уровня происходит вследствие последовательного зарождения, развития и слияния дефектов предыдущих уровней.

Анализ экспериментально-теоретического материала по усталостному разрушению показывает, что хрупкое усталостное разрушение носит стадийный характер (см. Главу 1). Смена стадий его развития характеризуется сменой физических механизмов разрушения.

Эта гипотеза является основной гипотезой предлагаемой модели, позволяющей построить рекуррентные определяющие соотношения в виде ограниченного числа шагов до макроусталостного разрушения.

4. Вводится непрерывная возрастающая усредняющая функция i -ого уровня $l_i^* = l_i^*(\tau)$, $\tau \in [0, t]$, имеющая размерность длины, и определяемая выражением:

$$l_i^*(\tau) = l_i(\tau) (q_i(\tau) V_c)^\gamma, \quad \gamma = \text{const}, \quad i = 1, \dots, 6. \quad (2.5)$$

Предельное состояние дефектов i -ого уровня определяется достижением усредняющей функцией $l_i^* = l_i^*(\tau)$ своего предельного значения $l_{f,i}^*$, $i = 1, \dots, 6$.

В качестве усредняющей функции можно рассматривался концентрационный параметр k , следуя Л.Р.Ботвиной, представив его для процесса нагружения в таком виде:

$$k(\tau) = \frac{1}{l(\tau) \sqrt[3]{q(\tau)}},$$

где l – некоторый характерный линейный размер дефекта, q – средняя плотность потока дефектов.

В соответствии со структурно-скейлинговыми подходами (см. п. 1.4 Главы 1) усредняющую функцию можно рассматривать в качестве параметра структурного скейлинга для процессов хрупкого усталостного разрушения.

Полагается, что образование дефекта i -ого масштабного уровня начинается с достижения усредняющей функцией $(i-1)$ -ого уровня предельного значения в момент времени $t_i = t_i(\sigma_a)$, $i = 1, \dots, 6$.

Статистическая природа процесса усталостного разрушения предопределяет рассеяние характеристик усталости. Значения функции $l_i^* = l_i^*(\tau)$ в момент времени τ , $\tau \in [0, t]$, являются случайными величинами даже при условии испытаний идентичных образцов, изготовленных из

материала одной плавки при одинаковой механической обработке и высокой точности задаваемых нагрузок. Неустранимыми причинами такого рассеяния являются случайные различия в микроструктуре, различия поверхностных слоев, различия по химическому составу различных образцов, ориентации зерен, случайные значения концентрации напряжений у границ зерен и включений и т.п.

В соответствии с теорией Ю.Н. Работнова вводится поврежденность как монотонно возрастающая функция структуры, определяющая состояние материала, принимающая при различиях в микроструктуре (по данным со шлифов) разные значения в моменты τ , $\tau \in [0, t]$.

Поврежденность на i -ом масштабном уровне (усталостное разрушение на i -ом уровне) $\Omega_i = \Omega_i(\tau)$ определяется через функции $l_i^ = l_i^*(\tau)$ таким образом:*

$$\Omega_i(\tau) = \frac{l_i^*(\tau)}{l_{f,i}^*}, \quad 0 \leq \Omega_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, 6, \quad (2.6)$$

и является случайной величиной в момент времени τ , $\tau \in [0, t]$.

5. Так как поврежденность $\Omega_i = \Omega_i(\tau)$ является случайной величиной в каждый момент времени τ , $\tau \in [0, t]$, то возникает необходимость ввести функцию вероятности разрушения по дефектам i -ого масштабного уровня (вероятности разрушения на i -ом масштабном уровне), которая является основной определяющей функцией предлагаемой математической модели усталостного разрушения.

Под вероятностью разрушения на i -ом масштабном уровне $Q_i = Q_i(\tau)$, $i = 1, \dots, 6$, понимается вероятность события, при котором усредняющая функция i -ого уровня достигает предельного значения в момент времени τ (дефекты i -го уровня – предельного состояния), $\tau \in [0, t]$.

Согласно постулату макроскопической определенности А.А.Ильюшина, процесс усталостного разрушения на интервале времени $\tau \in [0, t]$ функционально определяется процессом деформирования металла. Развитие хрупкого усталостного разрушения определяется процессом упругого деформирования, и вероятность хрупкого усталостного разрушения $Q_i = Q_i(\tau)$, $i = 1, \dots, 6$, можно рассматривать как функционал от процесса нагружения. В данной работе предлагается система определяющих соотношений для функций $Q_i = Q_i(\tau)$, $i = 1, \dots, 6$.

По литературным данным [18–23] установлено, что имеет место зависимость между произведением плотности трещин на их средний размер в некотором представительном объеме от процесса нагружения. Известны соотношения, связывающие параметры структуры (средние значения плотности и линейных размеров дефектов, площади дефектов на выбранных поверхностях, углы наклона кривых распределения усталостных трещин по длине и др.) с характеристиками процессов одноосного нагружения для разных групп материалов. Например, выражения вида:

$$qV_c = f_1(\sigma_a) e^{-a_2 l},$$

где $f_1 = f_1(\sigma_a)$ – некоторая материальная функция от σ_a , параметр $a_2 = const$, размерности длины; или

$$qV_c = f_3(\sigma_a) \left(\frac{l}{l_0} \right)^{-a_4},$$

где $f_3 = f_3(\sigma_a)$ – материальная функция от σ_a , параметр $a_4 = const$. Эти выражения являются разными частными случаями предлагаемой модели.

По построению в определяющие соотношения модели входят моменты времени начала образования дефектов всех предыдущих уровней t_i , которые находятся как решение следующих уравнений:

$$Q_i(t_{i+1})=1, \quad i=1,\dots,5. \quad (2.7)$$

2.2 Определяющие соотношения теории и кривая усталостного разрушения на мезоуровне

В общем случае вероятность усталостного разрушения является функционалом от процесса нагружения. В данной работе рассматриваются некоторые частные случаи этой зависимости для нагружений (2.1).

Для трех видов напряженного состояния (2.1), (2.2) – (2.4) в предположении равномерного распределения дефектов i -го масштабного уровня в объеме V_c определяются 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, в виде (2.8) – (2.19) таблицы 2.1.

Из анализа развития хрупкого разрушения металлов на микроуровне следует, что переход к следующему уровню происходит, в основном, через слияние трещин предыдущего уровня; с образованием дефектов последующего уровня вероятность разрушения от дефектов предыдущего уровня мала и ее вкладом можно пренебречь (дефекты предыдущего уровня служат постоянным источником образования дефектов последующего уровня). Вследствие этого полагается, что вероятность разрушения по дефектам i -го уровня, $i=1,2,3,4$, определяется как результат объединения дефектов $(i-1)$ -го уровня согласно выражениям (2.8)– (2.11).

i -тый уровень дефектов	вероятность разрушения i -того уровня $Q_i = Q_i(n)$	Уравнение начала роста дефектов i -того уровня
$i = 1, 2, 3$ $\sigma_a \geq \sigma_{i-1}$ $\lg n \geq \lg n_i(\sigma_a)$ $\sigma_0 = 0, n_1 = 1$	$Q_i = F_i \left(\frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}}{\sigma_i - \sigma_{i-1}} \right) R_i \left(\frac{\lg n - \lg n_i(\sigma_a)}{\lg N_i - \lg n_i(\sigma_i)} \right)$ (2.8) $0 \leq Q_i \leq 1$	$Q_i(n_{i+1}) = 1$ (2.9)
$i = 4$ $\sigma_3 \leq \sigma_a$ $\lg n \geq \lg n_4(\sigma_a)$	$Q_4 = F_4 \left(\frac{\sigma_a - \sigma_3}{\sigma_4 - \sigma_3} \right) R_4 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)} \right)$ (2.10) $0 \leq Q_4 \leq 1$	$Q_4(n_5) = 1$ (2.11)
$i = 5$ $\sigma_4 \leq \sigma_a$ $\lg n \geq \lg n_5(\sigma_a)$	$Q_5 = F_5 \left(\frac{\sigma_a - \sigma_4}{\sigma_5 - \sigma_4} \right) R_5 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)} \right)$ (2.12) $Q_4 = G_4 \left(\frac{\sigma_5 - \sigma_a}{\sigma_5 - \sigma_4} \right) R_4 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)} \right)$ (2.13) $0 \leq Q_i \leq 1, i = 4, 5$ $Q_6 = 0$ (2.14)	$Q_5(n_6) = 1$ (2.15)
$i = 6$ $\sigma_5 \leq \sigma_a$ $\lg n \geq \lg n_6(\sigma_a)$	$Q_6 = F_6 \left(\frac{\sigma_a - \sigma_5}{\sigma_6 - \sigma_5} \right) R_6 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_6 - \lg n_4(\sigma_6)} \right)$ (2.16) $Q_5 = G_5 \left(\frac{\sigma_6 - \sigma_a}{\sigma_6 - \sigma_5} \right) R_5 \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)} \right)$ (2.17) $0 \leq Q_i \leq 1, i = 5, 6$ $Q_4 = 0$ (2.18)	$Q_6(n_7) = 1$ (2.19)

Табл. 2.1 Определяющие соотношения теории усталостного разрушения металлов

Известные данные по развитию хрупкого разрушения на мезоуровне показывают, что вместе с развитием макродефектов последующего уровня как результата слияния дефектов предыдущего уровня развиваются и дефекты предыдущего уровня, что отражается в определяющих соотношениях для

дефектов пятого (2.12) – (2.15) и шестого (2.16) – (2.19) уровней. Для дефектов четвертого, пятого и шестого уровней характерно как слияние, так и увеличение их характерных размеров в диапазоне от размера зерна до одиночной трещины конечных размеров.

В рекуррентной системе (2.8) – (2.19) последующее уравнение связано с предыдущим через числа циклов $n_{i+1} = n_{i+1}(\sigma_a)$, при котором функция $l_i^* = l_i^*(n)$ достигает предельного значения $l_{f,i}^*$, дефект i -го уровня предельного состояния и зарождаются дефекты $(i+1)$ -го уровня, $i=1, \dots, 5$. Для них формулируются уравнения (2.9), (2.11), (2.15). При числе циклов $n_7 = n_7(\sigma_a)$ (уравнение (2.19)) функция $l_6^* = l_6^*(n)$ достигает предельного значения $l_{f,6}^*$ и дефекты шестого уровня – предельного состояния.

Предлагаемая модель позволяет подбирать вид функций $F_i = F_i(\sigma_a)$ и $R_i = R_i(n)$, $i=1, \dots, 6$, в выражениях (2.8) – (2.19) для конкретных материалов. В данной работе рассмотрение ограничено функциями следующего вида:

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

$$F_i = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}}{\sigma_i - \sigma_{i-1}} \right)^{\chi_i}, R_i = \left(\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_i - \lg n_4(\sigma_i)} \right)^{\phi_i}, i=5, 6; G_i = \left(\frac{\sigma_{i+1} - \sigma_a}{\sigma_{i+1} - \sigma_i} \right)^{\chi_i}, i=4, 5, (2.20)$$

где для нагружений (2.1) – (2.4) функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, \omega)$, $\beta_i = \beta_i(\alpha_2, \omega)$, $\phi_i = \phi_i(\alpha_2, \omega)$, $\chi_i = \chi_i(\alpha_2, \omega)$, $\alpha_2 = 0, 1, -1$ – материальные функции модели.

Блок-схема алгоритма расчета по модели усталостного разрушения представлена на рис.2.3 и строится следующим образом. Если амплитуда одноосного нагружения σ_a равна базовой амплитуде σ_1 , то при числе циклов

N_1 дефекты первого уровня достигают предельного состояния и происходит микроразрушение первого уровня (см. рис.2.4 (1)); если $\sigma_a < \sigma_1$, полагается, что формируются только дефекты первого уровня (отмечены зеленым цветом на рис. 2.4) и они не достигают предельного состояния. Если $\sigma_2 > \sigma_a > \sigma_1$, то вначале развиваются дефекты первого уровня, существует число циклов $n_2 = n_2(\sigma_a)$ (согласно уравнения (2.9)), при котором в результате слияния дефектов первого уровня зарождаются и затем развиваются дефекты второго масштабного уровня (отмечены розовым цветом на рис.2.4(2)). При амплитуде напряжений σ_a , равной базовой амплитуде σ_2 , вначале развиваются дефекты первого уровня, при числе циклов $n_2 = n_2(\sigma_2)$ они сливаются с образованием дефектов второго уровня, которые в свою очередь достигают предельного состояния и имеет место микроразрушение второго уровня (см. рис. 2.4(2)). При амплитуде напряжений $\sigma_3 > \sigma_a > \sigma_2$ зарождаются и сливаются дефекты первых двух уровней (отмечены зеленым и розовым цветом на рис. 2.4 (2)), при числе циклов $n_3 = n_3(\sigma_a)$ (определяются из уравнения (2.9)) зарождаются и далее развиваются дефекты третьего масштабного уровня (отмечены желтым цветом на рис.2.4 (2)). Далее процесс развития усталостного разрушения протекает таким же образом вплоть до достижения дефектами шестого уровня предельного состояния.

Определяющие соотношения для вероятности разрушения по дефектам i -го масштабного уровня записаны в предположении равномерного распределения дефектов в объеме V_C . Учесть неравномерность распределения дефектов можно, задав, например, для одноосного нагружения дополнительно функции: $F = F(\sigma_j / \sigma_i)$ и $R = R(N_j / N_i)$ на i -ом уровне,



Рис. 2.3 Блок-схема алгоритма расчета по модели усталостного разрушения металлов при одноосном нагружении

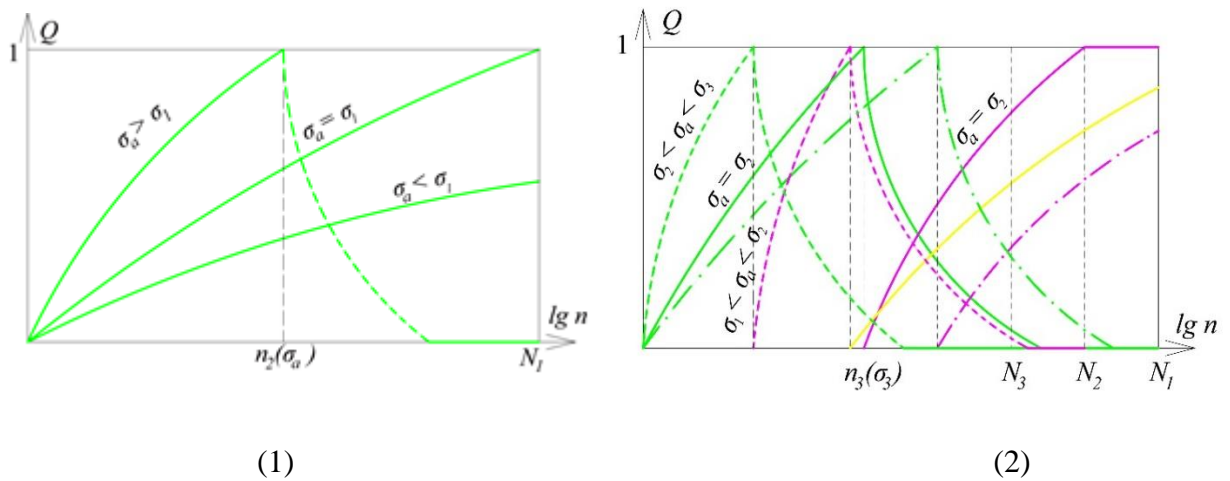


Рис. 2.4 Схема модели развития микродефектов первого, второго и третьего уровней при одноосном нагружении

$i = 1, \dots, 6$, и определить вероятность разрушения $Q_{j,i} = Q_{j,i}(n) \left(Q_{j,i} \ll Q_i \right)$ на i -ом уровне, $i = 1, \dots, 6$, по дефектам j -го уровня $j \neq i = 1, \dots, 6$, в таком виде:

$$Q_{j,i} = Q_i F\left(\sigma_j/\sigma_i\right) R\left(N_j/N_i\right).$$

В предположении $\beta_i = \chi_i = 1, \phi_i = 1/2, i = 1, \dots, 6$, для зависимостей (2.20) вероятности разрушения по дефектам i -го уровня $Q_i = Q_i(\sigma_a, n)$ описываются следующими соотношениями ($0 \leq Q_i(\sigma_a, n, n_i) \leq 1, i = 1, \dots, 6$):

$$Q_1 = \frac{\sigma_a}{\sigma_1} \sqrt{\frac{\lg n}{\lg N_1}}, \quad (2.21)$$

$$Q_2 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1}\right) \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_2(\sigma_a)}{\lg N_2 - \lg n_2(\sigma_2)}}, \quad \sigma_1 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_2(\sigma_a), \quad (2.22)$$

$$Q_3 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_2}{\sigma_3 - \sigma_2}\right) \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_3(\sigma_a)}{\lg N_3 - \lg n_3(\sigma_3)}}, \quad \sigma_2 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_3(\sigma_a), \quad (2.23)$$

$$Q_4 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_3}{\sigma_4 - \sigma_3}\right) \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)}}, \quad \sigma_3 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_4(\sigma_a), \quad (2.24)$$

$$Q_4 = \left(\frac{\sigma_5 - \sigma_a}{\sigma_5 - \sigma_4}\right) \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)}}, \quad \sigma_4 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_5(\sigma_a), \quad (2.25)$$

$$Q_5 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_4}{\sigma_5 - \sigma_4}\right) \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)}}, \quad \sigma_4 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_5(\sigma_a), \quad (2.26)$$

$$Q_5 = \left(\frac{\sigma_6 - \sigma_a}{\sigma_6 - \sigma_5}\right) \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)}}, \quad \sigma_4 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_6(\sigma_a), \quad (2.27)$$

$$Q_6 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_5}{\sigma_6 - \sigma_5}\right) \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_6 - \lg n_4(\sigma_6)}}, \quad \sigma_5 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_6(\sigma_a). \quad (2.28)$$

Из уравнений (2.9), (2.11), (2.15) находятся числа циклов $n_i = n_i(\sigma_1), i = 2, \dots, 6$, начала образования дефектов i -го уровня:

$$\lg n_2(\sigma_a) = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_a}\right)^2 \lg N_1, \quad (2.29)$$

$$\lg n_3(\sigma_a) = \lg n_2(\sigma_a) + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_a - \sigma_1} \right)^2 \left(\lg N_2 - \lg n_2(\sigma_2) \right), \quad \sigma_a \geq \sigma_1, \quad (2.30)$$

$$\lg n_4(\sigma_a) = \lg n_3(\sigma_a) + \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_2}{\sigma_a - \sigma_2} \right)^2 \left(\lg N_3 - \lg n_3(\sigma_3) \right), \quad \sigma_a \geq \sigma_2 \quad (2.31)$$

$$\lg n_5(\sigma_a) = \lg n_4(\sigma_a) + \left(\frac{\sigma_4 - \sigma_3}{\sigma_a - \sigma_3} \right)^2 \left(\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4) \right), \quad \sigma_a \geq \sigma_3, \quad (2.32)$$

$$\lg n_6(\sigma_a) = \lg n_4(\sigma_a) + \left(\frac{\sigma_5 - \sigma_4}{\sigma_a - \sigma_4} \right)^2 \left(\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5) \right), \quad \sigma_a \geq \sigma_4, \quad (2.33)$$

$$\lg n_7(\sigma_a) = \lg n_4(\sigma_a) + \left(\frac{\sigma_6 - \sigma_5}{\sigma_a - \sigma_5} \right)^2 \left(\lg N_6 - \lg n_4(\sigma_6) \right), \quad \sigma_a \geq \sigma_5 \quad (2.34)$$

Таким образом, в случае (2.20), $\beta_i = \chi_i = 1$, $\phi_i = 1/2$, $i = 1, \dots, 6$, для нагружений (2.1) – (2.4) вероятность разрушения по дефектам первого уровня $Q_1 = Q_1(\sigma_a, n)$ представляется согласно (2.21). В это выражение входит материальная функция $\sigma_1 = \sigma_1(\alpha_2, N_1, \omega)$, $\alpha_2 = 0$ для одноосного нагружения (2.2), $\alpha_2 = 1$ для сдвига (2.3), $\alpha_2 = -1$ для двухосного нагружения (2.4) соответственно, определение которой дается в п.2.3 настоящей главы. В зоне развития дефектов первого уровня возможно образование незначительного количества дефектов второго уровня, макроразрушения образца не происходит. Значение числа циклов $n_2 = n_2(\sigma_a)$ начала микроразрушения по дефектам второго уровня определяется по (2.29). Для базовых видов нагружения (2.1), (2.2) – (2.4) при амплитуде σ_a , равной константе материала σ_1 , и числе циклов $n = N_1$ дефекты первого уровня достигают предельного состояния, происходит микроразрушение по дефектам первого уровня.

Вероятность разрушения по дефектам второго уровня $Q_2 = Q_2(\sigma_a, n, n_2)$ определяется выражением (2.22), в которое входят функции материала $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_2, \omega)$, $i = 1, 2$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, и число циклов $n_2 = n_2(\sigma_a)$ (по (2.29)). В зоне развития дефектов второго уровня (типа микротрещин) дефекты первого уровня зарождаются и интенсивно сливаются. Вследствие этого на втором уровне плотность дефектов первого уровня небольшая, и вероятностью разрушения от дефектов первого уровня можно пренебречь. Для базовых видов нагружения при амплитуде $\sigma_a = \sigma_2$ и числе циклов $n = N_2$ дефекты второго уровня достигают предельного состояния, и происходит микроразрушение по дефектам второго уровня. Значение числа циклов $n_3 = n_3(\sigma_a)$ начала микроразрушения по дефектам третьего уровня определяется по (2.30). В выражение (2.23) для вероятности разрушения третьего уровня $Q_3 = Q_3(\sigma_a, n, n_3)$ входят функции материала $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_3, \omega)$, $i = 2, 3$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, и число циклов $n_3 = n_3(\sigma_a)$ (начала микроразрушения по дефектам третьего уровня согласно выражению (2.30)). Физическими образами дефектов третьего уровня являются нераспространяющиеся трещины, которые не приводят к макроразрушению металла. Для базовых видов нагружений при амплитуде напряжения, равной базовому значению σ_3 , и числе циклов $n = N_3$ достигается предельное состояние дефектами третьего уровня, и имеет место микроразрушение третьего уровня, макроразрушения образца не происходит. Значение числа циклов $n_4 = n_4(\sigma_a)$ начала разрушения по дефектам четвертого уровня определяется выражением (2.31), в которое входят материальные функции и константы всех предыдущих уровней.

Вероятность разрушения по дефектам четвертого уровня $Q_4 = Q_4(\sigma_a, n, n_4)$, т.е. вероятность достижения функцией $l_4^* = l_4^*(n)$ своего предельного значения $l_{f,4}^*$, задается соотношением (2.24), в которое входят функции материала $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_4, \omega)$, $i = 3, 4$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, и число циклов $n_4 = n_4(\sigma_a)$ (по выражению (2.31)). В области развития дефектов четвертого уровня (типа коротких трещин) могут возникать единичные дефекты пятого и шестого уровней (их вклад в процесс усталостного разрушения незначителен). Дефекты всех предыдущих уровней интенсивно сливаются. Число циклов $n_5 = n_5(\sigma_a)$, определяющее начало процесса макроразрушения по дефектам последующего, пятого уровня удовлетворяет выражению (2.32). Для базовых видов нагружения при амплитуде напряжения σ_4 имеет место макроразрушение по дефектам четвертого уровня при числе циклов N_4 . Вероятность макроразрушения по дефектам пятого уровня $Q_5 = Q_5(\sigma_a, n, n_5)$ находится по соотношению (2.26), в которое входят функции материала $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_5, \omega)$, $i = 4, 5$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, и число циклов $n_4 = n_4(\sigma_a)$ (согласно (2.31)). При этом в области развития дефектов пятого уровня продолжают формироваться и дефекты четвертого уровня, вероятность разрушения по которым определяется по (2.25) и падает с ростом амплитуды напряжения (с увеличением вероятности разрушения по дефектам пятого уровня). Число циклов $n_6 = n_6(\sigma_a)$, характеризующее начало процесса макроразрушения по дефектам шестого уровня, удовлетворяет выражению (2.33). Для базовых видов нагружения при амплитуде напряжения σ_5 имеет место макроразрушение образца по дефектам пятого уровня при числе циклов N_5 . Для числа циклов начала процесса макроразрушения по дефектам шестого

уровня $n_6 = n_6(\sigma_a)$ имеем выражение (2.33). И, наконец, вероятность макроразрушения по дефектам шестого уровня $Q_6 = Q_6(\sigma_a, n, n_6)$ находится по выражению (2.28), в которое входят функции материала $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_6, \omega)$, $i = 5, 6$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, и число циклов $n_4 = n_4(\sigma_a)$ по (2.31). В области развития дефектов шестого уровня продолжают формироваться дефекты пятого и четвертого уровней, вероятность разрушения по дефектам пятого уровня определяется по (2.27) и вносит вклад в процесс разрушения, вероятность разрушения от развития дефектов четвертого уровня мала. Для базовых видов нагружения при амплитуде напряжения σ_6 имеет место макроразрушение образца по дефектам шестого уровня при числе циклов N_6 . Число циклов $n_7 = n_7(\sigma_1)$ по соотношению (2.34) определяет ситуацию, при которой дефекты шестого уровня достигают предельного состояния.

Отметим, что для некоторых материалов возникает необходимость построения функций F_i , $i = 1, \dots, 6$, и G_4, G_5 в (2.8) – (2.18) от других аргументов, например, рассматривать разности квадратов напряжений. По физическому смыслу это соответствует разности упругой энергии деформирования в текущем состоянии и в базовых значениях.

Обратимся к формулировке кривой усталости по дефектам четвертого, пятого и шестого мезоуровней.

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

$$Q(\tau) = \sum_{i=4}^6 \frac{Q_i(\tau)}{1 - Q_i(\tau)} \prod_{j=4}^6 (1 - Q_j(\tau)), \quad (2.35)$$

где функции $Q_i = Q_i(\tau)$ – вероятности разрушения по дефектам i -го

мезоуровня, $i=4,5,6$.

Для нагружений (2.1), (2.2)–(2.4) в выражении для вероятности разрушения $Q = Q(\sigma_a, n)$ по (2.35) входят выражения для $Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$, $i=4,5,6$, которые рассматриваются в виде (2.12)–(2.14), (2.16)–(2.18) и по уравнениям (2.9), $i=4$, (2.11) и (2.15) определяются числа циклов $n_i = n_i(\sigma_a)$, $i=4,5,6$.

Долговечность по дефектам мезоуровня определяется как решение уравнения:

$$Q(t_f) = 1 \quad (2.36)$$

Из этого уравнения находится долговечность металла по дефектам мезоуровня $n_f = n_f(\sigma_f)$ для процессов (2.1), (2.2) – (2.4).

По построению модели материальные функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_6, \omega)$, $i=4,5,6$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, характеризуют усталостное макроразрушение по дефектам четвертого, пятого и шестого уровней соответственно и принадлежат кривой усталости для базовых нагружений, $\alpha_2 = 0, -1, 1$.

2.3 Методика идентификации материальных функций теории при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении с симметричным циклом

В определяющие соотношения (2.8) – (2.19) для процессов (2.1), (2.2) – (2.4) входят материальные функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $i=1, \dots, 6$, $\alpha_2 = 0, 1, -1$, при которых дефект i -го уровня достигает предельного состояния. Необходимо дать метод их определения.

Гипотеза макрофизической определенности в теории пластичности А.А. Ильюшина вводит понятия М-образца и совокупности М-опытов над ним, в которых могут быть изучены физические и механические состояния и

процессы, развивающиеся в любом представительном объеме ΔV произвольно нагружаемого тела при неоднородных состояниях. Механические свойства усталостного разрушения, описываемые физическими теориями, могут быть изучены в испытаниях на усталость М-образцов по специальным программам нагружения. В частности, для определения материальных функций $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $i = 1, \dots, 6$, $\alpha_2 = 0, 1, -1$, требуются серии макро-экспериментов с обработкой шлифов методами анализа микроструктуры. Для некоторых материалов известны зависимости плотности микро- и макротрещин от амплитуды нагружения и их размеров. В целом, в силу необходимости проведения большого количества экспериментов и недостаточности имеющихся в литературе экспериментальных данных такое определение в большинстве случаев не представляется возможным. В настоящей работе высказывается ряд предположений, на основании которых находятся материальные функции модели по данным стандартных испытаний на усталостную прочность металлов с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин. Здесь эти функции строятся для трех видов нагружений (2.1), (2.2) – (2.4). Далее в п. 2.5 устанавливаются зависимости материальных функций от асимметрии цикла ($\alpha \neq 0$) для одноосного нагружения, сдвига и двухосного равномерного нагружений с асимметричным циклом. В Главе 3 изучаются зависимости материальных функций от отношений α_2, α_3 для произвольного симметричного процесса (2.1).

Для одноосного симметричного нагружения (2.1), (2.2), $\alpha_2 = 0$, определяющие соотношения (2.8) – (2.19), (2.20) содержат материальные константы (σ_i, N_i) (при заданной частоте ω), при которых дефект i -го масштабного уровня достигает предельного состояния, функция $l_i^* = l_i^*(n)$ –

предельного значения $l_{f,i}^*$ и происходит разрушение по дефекту i -го масштабного уровня, $i=1, \dots, 6$. В случае $\beta_i = \chi_i = 1$, $\phi_i = 1/2$, $i=1, \dots, 6$, полная система материальных констант состоит из шести троек констант $(\sigma_i, N_i, l_{f,i}^*)$, $i=1, \dots, 6$. На рис.2.1 схематично изображены графики зависимости амплитуды напряжения σ_i и числа циклов N_i от среднего характерного предельного линейного размера наблюдаемых трещин в диапазоне длин $(10^{-7} - 10^2)$ мм в металлах.

Аналогично для описания сдвига (2.1), (2.3), $\alpha_2 = -1$, и двухосного нагружения (2.1), (2.4), $\alpha_2 = 1$ необходимо также иметь наборы материальных констант $(\sigma_i(\alpha_2), N_i, l_{f,i}^*(\alpha_2))$, $i=1, \dots, 6$.

Центральной точкой построения материальных констант модели для трех базовых видов нагружений выбираются пределы выносливости $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(N_4, \omega)$, $\tau_{-1} = \tau_{-1}(N_4, \omega)$ и $\hat{\sigma}_{-1} = \hat{\sigma}_{-1}(N_4, \omega)$ при одноосном нагружении (2.1), (2.2), $\alpha_2 = 0$, сдвиге (2.1), (2.3), $\alpha_2 = -1$, и двухосном нагружении (2.1), (2.4), $\alpha_2 = 1$, определяемые в стандартных опытах на усталостную прочность для каждого класса металлов (для малоуглеродистых сталей, среднеуглеродистых сталей, легированных сталей, алюминиевых сплавов, магниевых сплавов, титановых сплавов и т.д.). В этих испытаниях имеет место макроразрушение по коротким макротрещинам (см. п. 1.2 Главы 1).

Моделью полагается, что по соответствующим пределам выносливости металла $(\sigma_{-1}, N_4, l_{f,4}^*(\alpha_2=0))$, $(\tau_{-1}, N_4, l_{f,4}^*(\alpha_2=-1))$, $(\hat{\sigma}_{-1}, N_4, l_{f,4}^*(\alpha_2=1))$ при заданной частоте ω определяются базовые константы для дефектов четвертого масштабного уровня $(\sigma_4(\alpha_2), N_4, l_{f,4}^*(\alpha_2))$; при этом функция

$l_4^* = l_4^*(n)$ достигает предельного значения $l_{f,4}^*$ и имеет место макроразрушение по дефектам четвертого уровня.

В экспериментах по усталостной прочности металлов обнаружено, что заметное изменение микро- и макроструктуры металла (средних размеров и плотности микро- и макротрещин), а также изменение картины хрупкого макроразрушения наблюдается при изменении чисел циклов нагружения на десятичные порядки. Следуя этому, для базовых чисел циклов N_i , $i = 1, \dots, 6$, выбираются выражения:

$$\lg N_i = \lg N_4 + 4 - i, \quad i = 1, \dots, 4, \quad \lg N_i = \lg N_4 + 3 - i, \quad i = 5, 6. \quad (2.37)$$

Отметим, что при наличии опытных данных в конкретных расчетах в качестве базовых чисел циклов могут рассматриваться другие значения (это можно видеть на некоторых результатах расчетов, приведенных ниже в п.2.8 этой Главы).

В результате проведенного автором анализа известных данных по развитию усталостного разрушения на микроуровне для многих металлов и сплавов с достаточной степенью точности можно считать, что вероятность разрушения по дефектам первого, второго и третьего уровней описывается соотношениями (2.9), (2.21) – (2.23), (2.29), (2.30), (2.31). В областях многоциклового и гигациклового усталости (см. рис.2.2), для металлов при числе $N \in [5 \cdot 10^6, 10^{10}]$ циклов развитие процесса разрушения приводит к образованию дефектов первых четырех уровней при упругом макродеформировании. Исходя из имеющихся данных для металлов и сплавов можно полагать, что амплитуда напряжения, при которой достигается предельное состояние дефектами первого уровня при числе циклов N_4 , является базовой амплитудой σ_1 , при которой на базе числа циклов N_1 происходит усталостное микроразрушение по дефектам первого уровня.

Амплитуда напряжений, при которой достигается предельное состояние дефектами второго уровня при числе циклов N_4 , является базовой амплитудой σ_2 , при которой на базе числа циклов N_2 происходит микроразрушение по дефектам второго уровня. И, наконец, амплитуда напряжений, при которой достигается предельное состояние дефектами третьего уровня при числе циклов N_4 , является базовой амплитудой σ_3 , при которой на базе числа циклов N_3 происходит микроразрушение по дефектам третьего уровня. Отсюда по рассматриваемой модели с учетом (2.37), подставив в уравнение (2.9) вероятность разрушения $Q_1 = Q_1(\sigma_2, n)$ по (2.21), находим выражение амплитуды σ_2 через σ_1 , далее из (2.9) выражаем амплитуду σ_3 через σ_1 , подставив выражение для $Q_2 = Q_2(\sigma_3, n)$ в виде (2.22), и, наконец, определяем амплитуду σ_1 через σ_4 из уравнения (2.9) для $Q_3 = Q_3(\sigma_4, n)$ (2.23) с учетом (2.30).

Из расчетов следует, что при числе $N_4 = 10^6$ циклов базовые амплитуды для дефектов микроуровня примерно равняются следующему:

$$\sigma_1 \approx 0.5\sigma_4, \sigma_2 \approx 0.604\sigma_4, \sigma_3 \approx 0.75\sigma_4. \quad (2.38)$$

Если для материала по данным физических исследований (см. п.2.1.2) известны значения пределов чувствительности к циклическим напряжениям σ_T^u , ниже которых не наблюдается структурных изменений, что соответствует по модели наличию дефектов только первого уровня, не достигающих предельного состояния, то они полагаются базовыми константами для дефектов первого уровня $\left(\sigma_1(\alpha_2) = \sigma_T^u, N_1\right)$ (при $\alpha_2 = 0, -1, 1$ для одноосного нагружения, сдвига и двухосного нагружения соответственно). Из расчетов, рассмотренных выше, для такого материала можно определить предел

выносливости, или, если он известен, проверить правильность выбора базовых чисел циклов, вид функций для вероятностей разрушения и подтвердить расчет по модели.

Серии поверочных экспериментов для системы базовых характеристик $(\sigma_i(\alpha_2), N_i, l_{f,i}^*(\alpha_2))$, $i=1, 2, 3, 4$ (для одноосного нагружения (2.1), (2.2), $\alpha_2 = 0$, сдвига (2.1), (2.3), $\alpha_2 = -1$, двухосного нагружения (2.1), (2.4), $\alpha_2 = 1$), (при заданной частоте ω) могут быть построены следующим образом. Рассмотрим одноосное нагружение (для двух других базовых нагружений метод такой же). Выбираем партию образцов, проводим их нагружение с амплитудой σ_i , $i=1, 2, 3$, до числа циклов N_i , по фотографиям микроструктуры измеряем фактические длины наблюдаемых дефектов, относимых к дефектам i -го уровня, находим их плотность. По партии образцов вычисляем значение функции $l_i^*(N_i)$, далее догружаем образец до числа циклов $10N_i$, обрабатываем шлифы и вычисляем значение функции $l_i^*(10N_i)$, если $l_i^*(10N_i) \leq l_i^*(N_i) \equiv l_{f,i}^*$, то базовые константы $(\sigma_i, N_i, l_{f,i}^*)$ определены, если $l_i^*(N_i) < l_i^*(10N_i)$, то ведем нагружение дальше аналогичным образом, и в качестве числа циклов N_i выбираем то, при котором достигается максимальное значение функцией $l_i^*(n)$ с вероятностью Q_i^* . Аналогичные серии опытов проводим для дефектов всех микроуровней, $i=1, 2, 3$. В результате находим базовые характеристики $(\sigma_i, N_i, l_{f,i}^*)$, $i=1, 2, 3$. При амплитуде, равной пределу выносливости, доводим партию образцов до макроразрушения, определяем число циклов N_4 , в хрупком изломе измеряем фактические размеры дефектов, классифицируемых как дефекты четвертого

уровня, находим их плотность и значение $l_{f,4}^*$ (по партии разрушенных образцов).

Для хрупких материалов в области многоциклового усталости при числе $N \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов (см. рис.2.2) согласно результатам анализа усталостных испытаний в качестве базовых амплитуд для дефектов шестого уровня $\sigma_6 = \sigma_6(\alpha_2)$ (при которых функция $l_6^* = l_6^*(n)$ достигает предельного значения $l_{f,6}^*$ и имеет место макроразрушение по дефектам шестого уровня) с хорошей степенью точности можно выбрать соответствующие пределы усталости $\sigma_6 = \sigma_6(N_6, \omega)$, $\sigma_6 = \tau_6(N_6, \omega)$, $\sigma_6 = \hat{\sigma}_6(N_6, \omega)$ при одноосном нагружении (2.1), (2.2), $\alpha_2 = 0$, сдвиге (2.1), (2.3), $\alpha_2 = -1$, и двухосном нагружении (2.1), (2.4), $\alpha_2 = 1$, и в качестве базового числа $N_6 = 5 \cdot 10^3$ циклов.

В пластичных материалах при $N \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов развивается неупругая деформация, уменьшает скорость роста хрупких трещин, и, соответственно, влияет на скорость изменения функции l_i^* , $i = 5, 6$. В этом случае в качестве базовой характеристики $\sigma_6 = \sigma_6(\alpha_2)$ полагается соответствующий циклический предел текучести при N_6 : $\sigma_6 = \sigma_s(N_6, \omega)$, $\sigma_6 = \tau_s(N_6, \omega)$, $\sigma_6 = \hat{\sigma}_s(N_6, \omega)$ при одноосном нагружении (2.1), (2.2), $\alpha_2 = 0$, сдвиге (2.1), (2.3), $\alpha_2 = -1$, и двухосном нагружении (2.1), (2.4), $\alpha_2 = 1$.

По результатам поверочных испытаний для партии образцов на усталостную прочность при амплитуде напряжений, равной пределу текучести, и числе циклов N_6 устанавливаются средние линейные размеры образовавшихся дефектов, классифицируемых как дефекты шестого

масштабного уровня и значение функции $l_{f,6}^*$, которое определяется как предельное значение для дефектов шестого уровня. При этом возможно как полное хрупкое макроразрушение образца, так и образование одной или нескольких одиночных трещин начальной длины, в среднем, равной $L = l_{f,6}^*$ и их дальнейшее развитие, исследуемое механикой разрушения.

По данным серии опытов по нагружению партии образцов различными амплитудами напряжений из диапазона $\sigma_a \in [\sigma_{-1}, \sigma_6]$ и исследованиям микроструктуры экспериментально определяется амплитуда напряжений σ_5 , при которой на базе $N_5 \in [5 \cdot 10^4]$ циклов функция $l_5^* = l_5^*(n)$ достигает своего предельного значения $l_{f,5}^*$. При этом возможно как полное хрупкое макроразрушение образца, так и образование одной или нескольких одиночных макротрещин длины, в среднем, $L = l_{f,5}^*$, и ее дальнейшее развитие, изучаемое методами механики разрушения.

Таким образом, описан некоторый возможный метод определения материальных функций $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, \omega)$, $\alpha_2 = 0, 1, -1$, и чисел циклов N_i , $i = 1, \dots, 6$, входящих в определяющие соотношения (2.8) – (2.19) для процессов (2.1), (2.2) – (2.4). При этом учитываются различия в физических механизмах развития дефектов на разных масштабных уровнях (см. Главу 1).

Если развитие усталостного разрушения на микроуровне для многих материалов хорошо описывается соотношениями (2.9), (2.21) – (2.23), (2.29), (2.30), (2.31), то для описания эволюции дефектов на мезоуровне необходимо привлекать более сложные функции вида (2.20), в которых надо определять материальные функции $\beta_4 = \beta_4(\alpha_2, \omega)$, $\phi_i = \phi_i(\alpha_2, \omega)$, $\chi_i = \chi_i(\alpha_2, \omega)$, $i = 4, 5, 6$. В этих случаях требуется дополнительно задавать амплитуды

напряжений $\sigma_i^j = \sigma_i^j(\alpha_2, N^j)$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, $i = 4, 5, 6$, при числе N^j циклов, $j = 1, 2$, при которых функция $l_i^* = l_i^*(n)$ достигает предельного значения $l_{f,i}^*$; таким образом, полная система базовых констант следующая: $(\sigma_i(\alpha_2), \sigma_i^1(\alpha_2), \sigma_i^2(\alpha_2), N_i, N^1, N^2, l_{f,i}^*(\alpha_2))$, $i = 4, 5, 6$.

2.4. Анализ определяющих соотношений теории

Рассмотрим вероятность разрушения по дефектам первого масштабного уровня $Q_1 = Q_1(\sigma_a, n)$ для базовых нагружений (2.1) в некотором общем виде:

$$Q_1 = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_1} \right)^{\beta_1} \sqrt{\frac{\lg n}{\lg N_1}}, \quad 0 \leq Q_1 \leq 1, \quad (2.39)$$

$$\beta_1 = \lg \left(\frac{\lg N^1}{\lg N_1} \right) \left(2 \lg \frac{\sigma_1}{\sigma_1^1} \right)^{-1} \quad (2.40)$$

где $\sigma_1 = \sigma_1(\alpha_2)$, $\sigma_1^1 = \sigma_1^1(\alpha_2)$ – базовые амплитуды и N_1, N^1 – базовые числа циклов соответственно, метод задания которых изложен в п.2.3. Отметим, что согласно анализа усталостного разрушения для некоторых металлов является целесообразным рассматривать вероятность микроразрушения на первом уровне в виде (2.39).

Значение числа циклов $n_2 = n_2(\sigma_a)$ достижения дефектом первого уровня предельного состояния и функцией $l_1^* = l_1^*(n)$ предельного значения $l_{f,1}^*$ находится из уравнения (2.9) с учетом (2.20) в следующем виде:

$$\lg n_2(\sigma_a) = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_a} \right)^{2\beta_1} \lg N_1, \quad (2.41)$$

где β_1 определяется по (2.40).

На рис. 2.5 (1) изображена поверхность (2.39) в координатах $(\sigma_a/\sigma_{-1}, n, P_1 \equiv Q_1)$ для стабильных и упрочняющихся материалов при одноосном нагружении (2.1), (2.2) с амплитудой σ_a . Базовые точки выбраны таким образом: $\sigma_1 = 0.7\sigma_{-1}$, $\sigma_1^1 = 1.1\sigma_{-1}$, $\beta_1 = 3.87$, $\lg N_1 = 9$, $\lg N_1^1 = 1$, начало координат в точке $O_1 = (0.7, 10, 0)$ (σ_{-1} – предел выносливости материала). Кривая (2.41) – сечение поверхности по плоскости $P_1 = 1$. При $\sigma_a = 0.7\sigma_{-1}$ предельным состоянием по дефектам первого уровня является $N_1 = 10^9$ циклов (базовая точка “а”), если $\sigma_a = 1.1\sigma_{-1}$ – 10 циклов (базовая точка “б”). Точка “с” имеет координаты $(0.7, 10, 0.2)$. Из расчетов следует, что, например, при $\sigma_a = 0.75\sigma_{-1}$ дефекты второго уровня зарождаются при $n_2 = 1.05 \cdot 10^5$ циклов; если $\sigma_a = 0.8\sigma_{-1}$, то $n_2 = 5 \cdot 10^3$ циклов; при $\sigma_a = 0.9\sigma_{-1}$ дефекты второго уровня образуются на 182 цикле и при $\sigma_a = \sigma_{-1}$ на тридцать первом цикле нагружения. Для разупрочняющихся материалов на рис. 2.6 (1) представлена поверхность (2.39) ($\sigma_1 = 0.7\sigma_{-1}$, $\sigma_1^1 = 1.5\sigma_{-1}$, $\beta_1 = 0.8$, $N_1 = 1.6 \cdot 10^8$, $\lg N_1^1 = 3$) в координатах $(\sigma_a/\sigma_{-1}, n, P_1 \equiv Q_1)$ с центром в точке $O_1 = (0.7, 10^3, 0)$. Отмечена базовая точка “а” с координатами $(0.7, 1.6 \cdot 10^8, 1)$ и базовая точка “б” с координатами $(1.5, 10^3, 1)$; при $\sigma_a = 0.8\sigma_{-1}$ микроразрушение по дефектам второго уровня начинается с $n_2 = 6,8 \cdot 10^5$ циклов; при $\sigma_a = 0.9\sigma_{-1}$ – с

$n_2 = 10^5$ циклов. Для предела выносливости число $n_2 = 2,8 \cdot 10^4$ циклов; при $\sigma_a = 1.1\sigma_{-1}$ достижение дефектами первого уровня предельного состояния происходит на первом цикле. Точка “с” имеет координаты $(0.7, 10^3, 0.54)$.

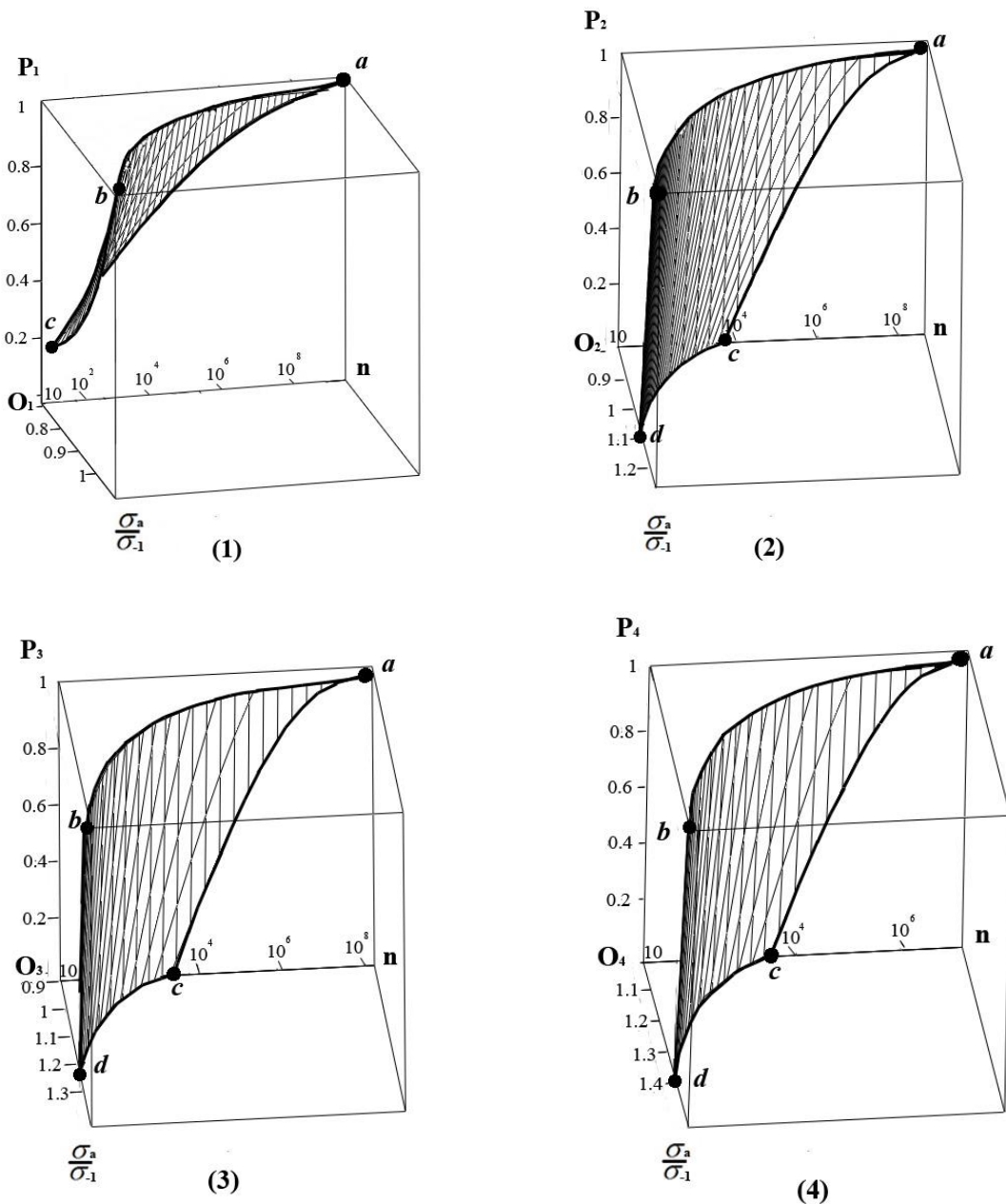


Рис. 2.5 Поверхность $P_i = P_i(\sigma_a/\sigma_{-1}, n)$ для стабильных и упрочняющихся материалов для дефектов первого (1), второго (2), третьего (3) и четвертого (4) уровней при одноосном нагружении

$(0.7, 10^3, 0.54)$. При амплитуде напряжений $\sigma_a < 0.7\sigma_{-1}$ дефекты первого уровня не достигают предельного состояния, идет процесс изменения физической структуры материала.

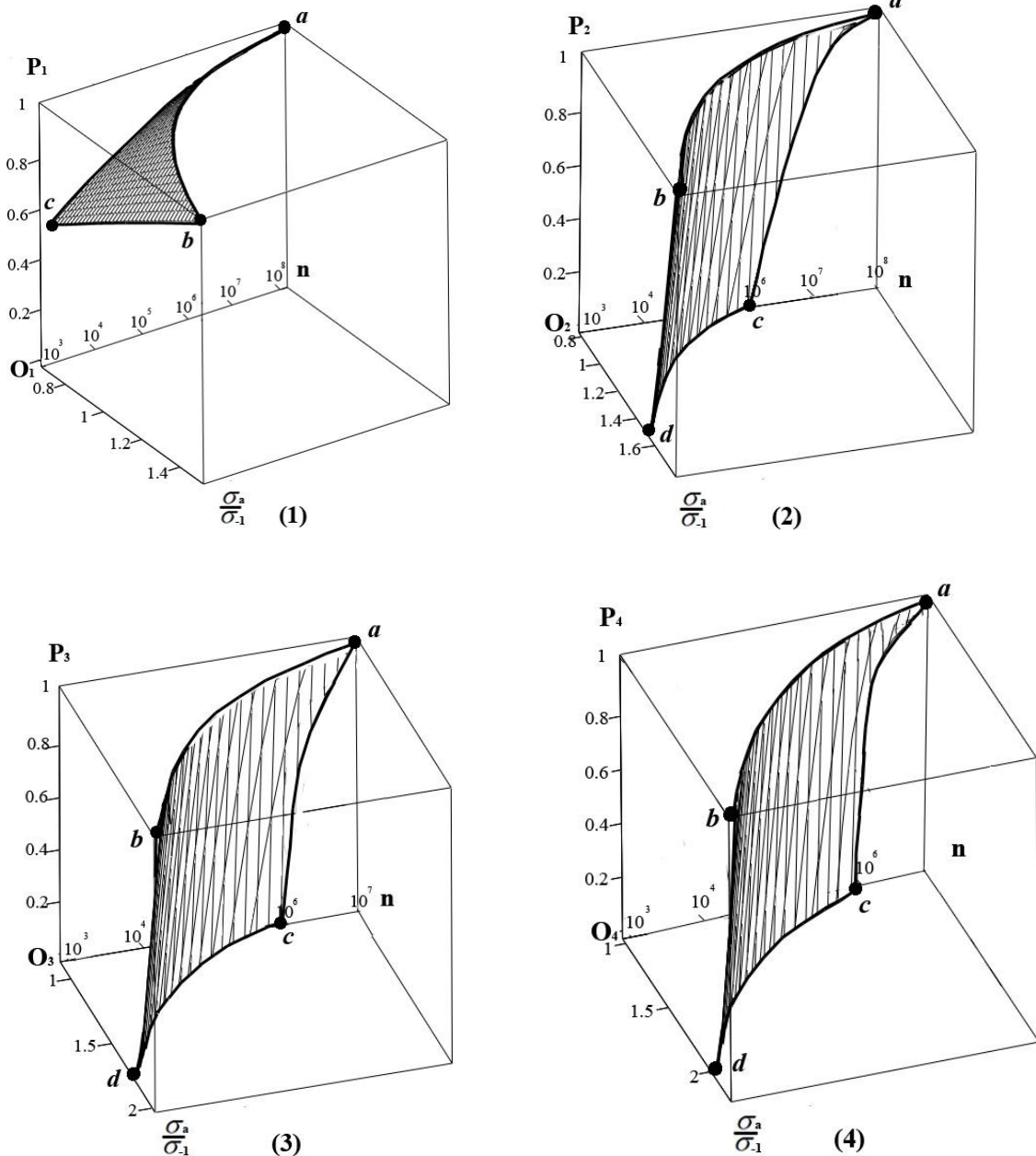


Рис. 2.6 Поверхность $P_i = P_i(\sigma_a/\sigma_{-1}, n)$ для разупрочняющихся материалов для дефектов первого (1), второго (2), третьего (3) и четвертого (4) уровней при одноосном нагружении

Определим вероятность разрушения по дефектам второго масштабного

уровня $Q_2 = Q_2(\sigma_a, n, n_2)$ для базовых нагрузений (2.1) по (2.8) в таком виде:

$$Q_2 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1} \right)^{\beta_2} \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_2(\sigma_a)}{\lg N_2 - \lg n_2(\sigma_2)}}, \quad 0 \leq Q_2 \leq 1, \sigma_a \geq \sigma_1, \lg n \geq \lg n_2(\sigma_a), \quad (2.42)$$

$$\beta_2 = \lg \left(\frac{\lg N^1 - \lg n_2(\sigma_2^1)}{\lg N_2 - \lg n_2(\sigma_2)} \right) \left(2 \lg \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2^1 - \sigma_1} \right)^{-1} \quad (2.43)$$

где $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2)$, $i=1,2$, $\sigma_2^1 = \sigma_2^1(\alpha_2)$ – базовые амплитуды и N_2, N^1 –

базовые числа циклов соответственно, выбор которых обсуждается в п. 2.3.

Функция $n_2 = n_2(\sigma_a)$ в (2.42), (2.43) определяется согласно (2.41).

Значение числа циклов образования дефектов третьего уровня $n_3 = n_3(\sigma_a)$ находится согласно (2.9), (2.20) по соотношению:

$$\lg n_3(\sigma_a) = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_a - \sigma_1} \right)^{2\beta_2} \left[\lg N_2 - \lg n_2(\sigma_2) \right] + \lg n_2(\sigma_a), \quad \sigma_a > \sigma_1 \quad (2.44)$$

На рис. 2.5 (2) представлена поверхность (2.42) для стабильных упрочняющихся материалов ($\sigma_2 = 0.8\sigma_{-1}$, $\sigma_2^1 = 1.25\sigma_{-1}$, $\beta_2 = 1.2$, $N_2 = 2.5 \cdot 10^8$, $N^1 = 10$), а на рис. 2.6 (2) – для разупрочняющихся материалов ($\sigma_2 = 0.8\sigma_{-1}$,

$\sigma_2^1 = 1.75\sigma_{-1}$, $\beta_2 = 0.49$, $N_2 = 5 \cdot 10^7$, $N^1 = 1$) в тех же координатах с началом

координат в точках $O_2 = (0.8, 10, 0)$ и $O_2 = (0.8, 10^3, 0)$ соответственно. На

плоскости $P_2 = 1$ изображена зависимость числа циклов $n_3 = n_3(\sigma_a)$ вида

(2.44). Точка “с” имеет координаты $(0.8, 10^{3.6}, 0)$. Точка “d” на рисунке

скоординатами $(1.1, 10, 0)$. Из рис. 2.5 (2) следует, что для стабильных и

упрочняющихся материалов при $\sigma_a = 0.8\sigma_{-1}$ базовое число $N_2 = 2.5 \cdot 10^8$

циклов (базовая точка “а”), при $\sigma_2^1 = 1.75\sigma_{-1} - 10$ циклов (базовая точка “b”). При амплитуде напряжений $\sigma_a = 0.9\sigma_{-1}$ число циклов достижения дефектами второго уровня предельного состояния равно $n_3 = 4.1 \cdot 10^3$ циклов; при $\sigma_a = \sigma_{-1}$ – двести четыре цикла, при $\sigma_a = 1.1\sigma_{-1}$ – сорок один цикл. Для разупрочняющихся материалов на рис. 2.6 (2) отмечена базовая точка “а” при $\sigma_a = 0.8\sigma_{-1}$ с координатами $(0.8, 5 \cdot 10^7, 1)$ и базовая точка “b” с координатами $(1.75, 10^3, 1)$. При амплитуде $\sigma_a = 0.9\sigma_{-1}$ значение $n_3 = 10^6$ циклов соответствует достижению дефектами второго уровня предельного состояния; на пределе выносливости – $n_3 = 1.5 \cdot 10^5$ циклов; при $\sigma_a = 1.5\sigma_{-1}$ – $n_3 = 2.8 \cdot 10^3$ циклов. Точки “с” и “d” имеют координаты $(0.8, 10^{5.8}, 0)$ и $(1.5, 10^3, 0)$. При $\sigma_a < 0.8\sigma_{-1}$ дефекты второго уровня не достигают предельного состояния, вероятность образования дефектов третьего уровня мала.

Для вероятности микроразрушения по дефектам третьего уровня $Q_3 = Q_3(\sigma_a, n, n_3)$ для базовых нагружений (2.1) согласно (2.8) определено такое выражение:

$$Q_3 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_2}{\sigma_3 - \sigma_2} \right)^{\beta_3} \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_3(\sigma_a)}{\lg N_3 - \lg n_3(\sigma_3)}}, \quad 0 \leq Q_3 \leq 1, \sigma_2 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_3(\sigma_a), \quad (2.45)$$

$$\beta_3 = \lg \left(\frac{\lg N_3^1 - \lg n_3(\sigma_3)}{\lg N_3 - \lg n_3(\sigma_3)} \right) \left(2 \lg \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{\sigma_3^1 - \sigma_2} \right)^{-1} \quad (2.46)$$

Здесь введены базовые константы: $\sigma_i, i = 1, 2, 3, \sigma_3^1, N_3, N_3^1$, при которых достигается предельное состояние дефектами третьего уровня, что приводит к необратимым структурным изменениям металла, понижающим их цикли-

ческую прочность. Функции числа циклов $n_3 = n_3(\sigma_a)$ задаются по (2.44).

Из уравнения (2.9) с учетом (2.20) находим зависимость числа циклов начала роста дефектов четвертого уровня $n_4 = n_4(\sigma_a)$ в следующем виде:

$$\lg n_4(\sigma_a) = \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_2}{\sigma_a - \sigma_2} \right)^{2\beta_3} \left[\lg N_3 - \lg n_3(\sigma_3) \right] + \lg n_3(\sigma_a), \quad \sigma_a > \sigma_2 \quad (2.47)$$

Отметим, что при $\lg n \geq \lg n_4(\sigma_a)$ происходят необратимые структурные изменения металла, понижающие их циклическую прочность.

Поверхность (2.45) в рассматриваемых координатах для дефектов третьего уровня, возникающих в стабильных и упрочняющихся материалах

($\sigma_3 = 0.9\sigma_{-1}$, $\sigma_3^1 = 1.4\sigma_{-1}$, $\beta_3 = 1.19$, $N_3 = 5 \cdot 10^7$, $N^1 = 10$) и

разупрочняющихся материалах ($\sigma_3 = 0.9\sigma_{-1}$, $\sigma_3^1 = 2\sigma_{-1}$, $\beta_3 = 0.38$,

$N_3 = 1.6 \cdot 10^7$, $N^1 = 10^3$) с началом координат в точках $O_3 = (0.9, 10, 0)$ и

$O_3 = (0.9, 10^3, 0)$, координатами точек "с" $(0.9, 10^{3.6}, 0)$ и $(0.9, 10^{5.9}, 0)$ и "д"

$(1.25, 10, 0)$ и $(1.75, 10^3, 0)$ представлена на рис.2.5 (3) и 2.6 (3) соответственно.

Сечения поверхности (2.45) плоскостью $P_3 = 1$ представляет кривую (2.47).

Вероятность разрушения по дефектам четвертого уровня

$Q_4 = Q_4(\sigma_a, n, n_4)$ при базовых нагружениях (2.1), (2.2) – (2.4) определяется

согласно выражениям (2.10), (2.13) с учетом (2.20) в следующем виде:

$$Q_4 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_3}{\sigma_4 - \sigma_3} \right)^{\beta_4} \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)}}, \quad 0 \leq Q_4 \leq 1, \quad \sigma_3 \leq \sigma_a, \quad \lg n \geq \lg n_4(\sigma_a) \quad (2.48)$$

$$\alpha_4 = \lg \left(\frac{\lg N^1 - \lg n_4(\sigma_4^1)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)} \right) \left(2 \lg \frac{\sigma_4 - \sigma_3}{\sigma_4 - \sigma_3} \right)^{-1} \quad (2.49)$$

$$Q_4 = \left(\frac{\sigma_5 - \sigma_a}{\sigma_5 - \sigma_4} \right)^{\chi_4} \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)}}, \quad 0 \leq Q_4 \leq 1, \sigma_4 \leq \sigma_a, \lg n \geq \lg n_5(\sigma_a) \quad (2.50)$$

$$\chi_4 = \lg \left(\frac{\lg N^1 - \lg n_4(\sigma_4^1)}{\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4)} \right) \left(2 \lg \frac{\sigma_5 - \sigma_4}{\sigma_5 - \sigma_4^1} \right)^{-1} \quad (2.51)$$

В выражения (2.49) – (2.51) входят базовые точки: $\sigma_i, i = 3, 4, 5, \sigma_4^1, N_4, N_l$.
 Функция $n_4 = n_4(\sigma_a)$ определяется по (2.47). Поверхность (2.48), описывающая вероятность разрушения с ростом дефектов четвертого уровня для стабильных и упрочняющихся материалов ($\sigma_4 = \sigma_{-1}, \sigma_4^1 = 1.5\sigma_{-1}, \beta_4 = 1.37, N_4 = 5 \cdot 10^6, N_l = 10$) и для разупрочняющихся материалов ($\sigma_4 = \sigma_{-1}, \sigma_4^1 = 2.25\sigma_{-1}, \beta_4 = 0.3, N_4 = 5 \cdot 10^6, N^1 = 10^3$) в введенной системе координат с началом в точках $O_4 = (1, 10, 0)$ и $O_4 = (1, 10^3, 0)$, с точками “с” с координатами $(1, 10^{3.5}, 0)$ и $(1, 10^{5.9}, 0)$ и точками “d” с координатами $(1.4, 10, 0)$ и $(2, 10^3, 0)$ представлена на рис. 2.5 (4) и 2.6 (4) соответственно.

Из уравнения (2.11) с учетом (2.20) находим зависимость числа циклов начала роста дефектов пятого уровня $n_5 = n_5(\sigma_a)$ в следующем виде:

$$\lg n_5(\sigma_a) = \left(\frac{\sigma_4 - \sigma_3}{\sigma_a - \sigma_3} \right)^{2\beta_4} \left[\lg N_4 - \lg n_4(\sigma_4) \right] + \lg n_4(\sigma_a), \quad \sigma_a \geq \sigma_3, \quad (2.52)$$

которая изображена на рис.2.5 (4) и рис.2.6 (4) в виде сечения поверхности (2.48) плоскостью $P_4 = 1$ для стабильных и упрочняющихся и для разупрочняющихся материалов соответственно.

Вероятность макроразрушения по дефектам пятого масштабного уровня $Q_5 = Q_5(\sigma_a, n, n_5)$ для базовых нагружений (2.1), (2.2) – (2.4) задается по

соотношениям (2.12), (2.17) с учетом (2.20) следующим образом:

$$Q_5 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_4}{\sigma_5 - \sigma_4} \right)^{\beta_5} \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)}}, \quad 0 \leq Q_5 \leq 1, \quad \sigma_4 \leq \sigma_a, \quad \lg n \geq \lg n_5(\sigma_a) \quad (2.53)$$

$$\beta_5 = \lg \left(\frac{\lg N^1 - \lg n_4(\sigma_5^1)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)} \right) \left(2 \lg \frac{\sigma_5 - \sigma_4}{\sigma_5^1 - \sigma_4} \right)^{-1} \quad (2.54)$$

$$Q_5 = \left(\frac{\sigma_6 - \sigma_1}{\sigma_6 - \sigma_5} \right)^{\chi_5} \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)}}, \quad 0 \leq Q_5 \leq 1, \quad \sigma_5 \leq \sigma_a, \quad \lg n \geq \lg n_6(\sigma_a) \quad (2.55)$$

$$\chi_5 = \lg \left(\frac{\lg N^1 - \lg n_4(\sigma_5^1)}{\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5)} \right) \left(2 \lg \frac{\sigma_6 - \sigma_5}{\sigma_6 - \sigma_5^1} \right)^{-1} \quad (2.56)$$

в которых функции $n_4 = n_4(\sigma_a)$ и $n_5 = n_5(\sigma_a)$ определяются по (2.47) и (2.52)

соответственно; базовые точки $\sigma_i, i = 4, 5, 6, \sigma_5^1, N_5, N^1$ – в пункте 2.3 этой

главы. Из уравнения (2.15) с учетом (2.53) определяется число циклов

$n_6 = n_6(\sigma_a)$ достижения дефектами пятого уровня предельного состояния:

$$\lg n_6(\sigma_a) = \left(\frac{\sigma_5 - \sigma_4}{\sigma_a - \sigma_4} \right)^{2\beta_5} \left[\lg N_5 - \lg n_4(\sigma_5) \right] + \lg n_4(\sigma_a), \quad \sigma_a \geq \sigma_4 \quad (2.57)$$

Вероятность макроразрушения по дефектам шестого уровня

$Q_6 = Q_6(\sigma_a, n, n_6)$ для базовых нагрузений (2.1), (2.2) – (2.4) имеет вид по

(2.16) с учетом (2.20):

$$Q_6 = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_5}{\sigma_6 - \sigma_5} \right)^{\beta_6} \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_4(\sigma_a)}{\lg N_6 - \lg n_4(\sigma_6)}}, \quad 0 \leq Q_6 \leq 1, \quad \sigma_5 \leq \sigma_a, \quad \lg n \geq \lg n_6(\sigma_a) \quad (2.58)$$

$$\beta_6 = \lg \left(\frac{\lg N^1 - \lg n_4(\sigma_6^1)}{\lg N_6 - \lg n_4(\sigma_6)} \right) \left(2 \lg \frac{\sigma_6 - \sigma_5}{\sigma_6^1 - \sigma_5} \right)^{-1} \quad (2.59)$$

Функции $n_4 = n_4(\sigma_a)$ и $n_6 = n_6(\sigma_a)$ определяются соответственно по (2.47) и (2.52). Базовые характеристики $\sigma_i, i = 5, 6, \sigma_6^1, N_6, N^1$ обсуждаются в пункте 2.3. Из уравнения (2.19) справедливо следующее выражение для числа циклов $n_7 = n_7(\sigma_a)$, характеризующее достижение дефектами шестого уровня предельного состояния:

$$\lg n_7(\sigma_a) = \left(\frac{\sigma_6 - \sigma_5}{\sigma_a - \sigma_5} \right)^{2\beta_6} \left[\lg N_6 - \lg n_4(\sigma_6) \right] + \lg n_4(\sigma_a), \sigma_a \geq \sigma_5 \quad (2.60)$$

Кривая усталости по дефектам мезоуровня для базовых нагружений (2.1), (2.2) – (2.4) описывается согласно (2.35), (2.36) уравнением следующего вида:

$$\sum_{i=4}^6 \frac{Q_i(\sigma_f, n_f)}{1 - Q_i(\sigma_f, n_f)} \prod_{j=4}^6 \left(1 - Q_j(\sigma_f, n_f) \right) = 1 \quad (2.61)$$

где функции $Q_i = Q_i(n)$, $i = 4, 5, 6$, имеют выражения (2.50), (2.53) и (2.55), (2.58) соответственно. Из уравнения (2.61) определяется долговечность по дефектам мезоуровня $n_f = n_f(\sigma_f)$.

2.5 Определяющие соотношения и материальные функции для пропорциональных нагружений с асимметричным циклом

Согласно предлагаемому подходу для описания процесса усталостного хрупкого разрушения металлов при одноосном нагружении, $\alpha_2 = \alpha_3 = 0$, сдвиге, $\alpha_2 = -1, \alpha_3 = 0$, и двухосном нагружении, $\alpha_2 = 1, \alpha_3 = 0$, с произвольным параметром α также справедливы определяющие соотношения (2.8) – (2.19). В этих случаях под переменной σ_a также понимается амплитуда максимального главного напряжения, а от параметра асимметрии цикла α зависят материальные функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha, \alpha_2, N_i, \omega)$.

При этом для базовых чисел циклов N_i , $i=1, \dots, 6$, справедливы выражения (2.37), (2.38).

Методика определения функций $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, \omega)$ для трех видов симметричных нагружений (2.1), (2.2) – (2.4) (при $\alpha = 0$) представлена в п. 2.3. Здесь предлагается методика определения зависимости материальных функций от параметра α .

В соответствии с известными подходами к описанию усталости для нагружений с асимметричным циклом автором сделано предположение, что для таких нагружений помимо пределов выносливости $\sigma_4 = \sigma_{-1}(N_4, \omega)$ при $\alpha_2 = 0$, $\sigma_4 = \tau_{-1}(N_4, \omega)$ при $\alpha_2 = -1$, и $\sigma_4 = \hat{\sigma}_{-1}(N_4, \omega)$ при $\alpha_2 = 1$, которые являются базовыми характеристиками для дефектов четвертого уровня (см. п.2.3), необходимо задавать пределы выносливости при пульсирующем цикле (максимальные значения напряжений), $\alpha = 1$: $\sigma_0 = \sigma_0(N_4, \omega)$ при одноосном пульсирующем нагружении, $\tau_0 = \tau_0(N_4, \omega)$ при пульсирующем сдвиге и $\hat{\sigma}_0 = \hat{\sigma}_0(N_4, \omega)$ при пульсирующем двухосном нагружении, которые полагаются базовыми функциями для дефектов четвертого масштабного уровня $\sigma_4^0 = \sigma_4^0(\alpha_2, N_4, \omega)$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, $\alpha = 1$, соответственно, при этом функция $l_4^* = l_4^*(n)$ достигает предельного значения $l_{f,4}^*$ и имеет место макроразрушение по дефектам четвертого уровня. Пределы выносливости при пульсирующем цикле также определяются в стандартных испытаниях на усталостную прочность. Для многих металлов в этих опытах имеет место макроразрушение по коротким макротрещинам.

Следуя п. 2.3, можно построить базовые характеристики $\left(\sigma_i^0(\alpha_2), N_i, l_{f,i}^*(\alpha_2)\right)$, $\alpha_2 = 0, -1, 1$, $i = 1, \dots, 6$ (при заданной частоте ω) для пульсирующих одноосного нагружения, сдвига и двухосного нагружения.

Определяющие соотношения для произвольных пропорциональных нагружений (2.1) строятся, как это принято в механике деформируемого твердого тела. Вероятность разрушения по дефектам различных масштабных уровней описывается системой рекуррентных автомодельных соотношений (2.8) – (2.19), в которых в качестве переменной процесса рассматривается наибольшее значение модуля максимального главного напряжения. Материальные функции определяются по результатам усталостных испытаний при симметричных и пульсирующих одноосном нагружении, сдвиге и двухосном нагружении с учетом вида нагружения в соответствии с экспериментально обоснованными критериями усталостной прочности металлов.

Для произвольных одноосного нагружения, сдвига и двухосного нагружения с асимметричным циклом материальные функции, входящие в соотношения (2.8) – (2.19), предлагается представлять в виде:

$$\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega) \bar{\sigma}_i(\alpha, \eta_i(\alpha_2)), \eta_i(\alpha_2) \equiv \frac{\sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)}{\sigma_i^0(\alpha_2, N_i, \omega)}, \alpha_2 = 0, -1, 1, i = 1, \dots, 6 \quad (2.62)$$

где $\sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $\sigma_i^0(\alpha_2, N_i, \omega)$ – базовые функции для симметричного и пульсирующего ($\alpha = 1$) одноосного нагружения, $\alpha_2 = 0$, сдвига, $\alpha_2 = -1$, и двухосного нагружения, $\alpha_2 = 1$ соответственно, методика определения которых изложена в п. 2.3 настоящей главы.

На основе анализа экспериментальных данных по влиянию асимметрии цикла на характеристики усталостной прочности и известных критериев

усталостной прочности зависимость функции $\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i(\alpha, \eta_i(\alpha_2))$ от η_i с хорошей степенью точности можно выбрать в виде:

$$\bar{\sigma}_i(\alpha, \eta_i) = \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right) |\alpha| + 1, \quad \eta_i(\alpha_2) \equiv \frac{\sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)}{\sigma_i^0(\alpha_2, N_i, \omega)}, \quad \alpha_2 = 0, -1, 1, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2.63)$$

При наличии дополнительных опытных данных выражение (2.63) можно уточнять.

Кривая усталости по дефектам мезоуровня для одноосного нагружения, сдвига и двухосного нагружения с асимметричным циклом описывается уравнением (2.36) с учетом (2.35), в котором функции $Q_i = Q_i(n)$, $i = 4, 5, 6$, определяются по (2.12) – (2.14), (2.16) – (2.18), функции $n_i = n_i(\alpha_a)$ – по (2.9), базовые характеристики N_i – по (2.37), (2.38), базовые функции σ_i по (2.62), (2.63) и значениям $\sigma_i(\alpha_2)$ и $\sigma_i^0(\alpha_2)$, $i = 1, \dots, 6$, методика нахождения которых изложена в п.2.3.

В качестве обоснования достоверности предлагаемого подхода в п. 2.8 проводится анализ известных данных по развитию дефектов на разных масштабно-структурных уровнях для ряда материалов. Выбираются базовые характеристики и строятся области последовательного образования и развития дефектов с выходом на кривую усталости для частных случаев пропорциональных нагружений, в том числе с несимметричными циклами напряжений.

2.6 О кривой усталости с учетом неупругого деформирования

Основываясь на экспериментальных данных для металлов и сплавов, можно полагать, что в силу практического отсутствия неупругих деформаций в областях развития дефектов микроуровня, и их малости в области развития дефектов четвертого уровня (типа коротких трещин) вплоть до разрушения,

вклад неупругих деформаций в вероятность разрушения по этим дефектам незначителен и поэтому его можно не учитывать.

На мезоуровне в области многоциклового усталости пластичных материалов идут одновременно два процесса: развитие хрупких трещин и развитие вязкого разрушения при неупругом макродеформировании (см. п.2.1 настоящей главы). Для многих пластичных материалов в диапазоне чисел циклов, в среднем, при $N \in [5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6]$ циклов неупругая деформация не превышает упругую деформацию и тормозит развитие макротрещин. Изучение процессов вязкого усталостного разрушения выходит за рамки настоящей работы. Здесь кратко изложен некоторый возможный путь учета развития вязкого разрушения в областях многоциклового усталости по идеологии, принятой в данной работе.

Положим, что вероятность вязкого разрушения $Q_V = Q_V(\Delta\varepsilon_V, n)$ (см. рис.2.3) является следующей функцией процесса одноосного нагружения (2.1), (2.2):

$$Q_V(\Delta\varepsilon_V, n) = \frac{\Delta\varepsilon_V(n)n^\alpha}{\varepsilon_{\sigma, g} - \sigma_{\sigma, g}/E} \quad (2.64)$$

В числителе выражения (2.64) стоит размах $\Delta\varepsilon_V = \Delta\varepsilon_V(n)$ наибольшей неупругой осевой деформации при текущем числе циклов n , умноженный на степенную функцию от n (по закону Коффина-Мэнсона), в знаменателе – остаточная (пластическая) деформация при статическом нагружении. Константы ε_{σ} и σ_{σ} – относительное удлинение и временное сопротивление при статическом разрушении металла, E – модуль Юнга.

Пусть в металле протекают процессы хрупкого и вязкого разрушений, рассматриваемые как независимые события. В этом случае вероятность усталостного разрушения $Q = Q(\sigma_a, \Delta\varepsilon_V, n)$ полагается суммой вероятностей событий, при которых произойдет хрупкое (при отсутствии вязкого) или вязкое (при отсутствии хрупкого) разрушение в таком виде:

$$Q(\sigma_a, \Delta\varepsilon_V, n) = Q(\sigma_a, n)(1 - Q_V(\Delta\varepsilon_V, n)) + Q_V(\Delta\varepsilon_V, n)(1 - Q(\sigma_a, n)), \quad (2.65)$$

где для $Q = Q(\sigma_a, n)$ имеем выражение (2.35), функция вероятности $Q_V = Q_V(\Delta\varepsilon_V, n)$ определяется по (2.64).

Тогда среднее значение долговечности образца N_f , обусловленной независимым развитием хрупкого и вязкого разрушений, удовлетворяет следующему уравнению:

$$Q(\sigma_a, N_f) \left(1 - Q_V(\Delta\varepsilon_V, N_f) \right) + Q_V(\Delta\varepsilon_V, N_f) \left(1 - Q(\sigma_a, N_f) \right) = 1 \quad (2.66)$$

Уравнение (2.66) является кривой усталости металла по дефектам мезоуровня с учетом величины неупругой осевой деформации при одноосном нагружении в указанных выше предположениях. Аналогично можно построить кривые усталости для других базовых видов симметричного нагружения (2.1), (2.3) или (2.4).

2.7 О кривой усталости по полному хрупкому разрушению

В области многоциклового усталости в диапазоне $N \in \left[5 \cdot 10^3, 5 \cdot 10^6 \right]$ циклов долговечность металла по дефектам мезоуровня $n_f = n_f(\sigma_a)$ в зависимости от амплитуды нагружения определяется уравнением (2.36) с учетом (2.35). Дальнейшее развитие хрупкого усталостного разрушения до полного разрушения образца (разделения на части) определяется эволюцией одной или нескольких одиночных макротрещин длины $l = l(n - n_f)$. Существует большое количество моделей описания развития хрупких макротрещин по классической линейной или нелинейной механике разрушения. Их изучение в настоящей работе не проводится, предлагается некоторый возможный алгоритм построения кривой усталости по полному хрупкому разрушению на основе известного соотношения Пэриса для роста трещины.

Рассмотрим одноосное нагружение образца кругового сечения радиуса R с амплитудой σ_a . По предложенной в работе модели в качестве начальной длины макротрещины рассматривается предельное значение функции $l_f^* = l_{f,5}^*(n_f, \sigma_a)$ или $l_f^* = l_{f,6}^*(n_f, \sigma_a)$ (в зависимости от амплитуды напряжений исследуемое нагружение попадает в область преимущественного развития дефектов пятого или шестого уровней, что по модели известно). По соотношению Пэриса изменение длины трещины $l = l(n - n_f)$ в зависимости от числа циклов нагружения задается в следующем виде:

$$\frac{dl}{d \lg n} = \beta (\sigma_a \sqrt{2\pi l})^{2\gamma} \quad (2.67)$$

где β и γ – константы материала. Соотношение (2.67) преобразуется к виду:

$$l^{-\gamma} dl = \beta (2\pi)^\gamma (\sigma_a)^{2\gamma} d \lg n, \quad (2.68)$$

интегрируя которое в пределах $l \geq l_f^*$ и $n \geq n_f$, получаем следующее:

$$l^{1-\gamma} - (l_f^*)^{1-\gamma} = \beta_1 (\sigma_a)^{2\gamma} (\lg n - \lg n_f), \quad \beta_1 = \beta (2\pi)^\gamma / (1-\gamma) \quad (2.69)$$

Предельное число циклов N_f (при $l=R$) деления на части круглого макрообразца радиуса R в предположении движения трещины к центру образца находится из зависимости (2.67) в виде:

$$\lg N_f = \lg n_f + \left(R^{1-\gamma} - (l_f^*)^{1-\gamma} \right) \sigma_a^{-2\gamma} \beta_1^{-1}, \quad (2.70)$$

где долговечность образца по дефектам мезоуровня $n_f = n_f(\sigma_a)$ рассчитывается по предложенной теории.

Учитывая неравенство $l_f^* \ll R$, формулу (2.70) можно упростить так:

$$\lg N_f = \lg n_f + R^{1-\gamma} \sigma_a^{-2\gamma} \beta_1^{-1} \quad (2.71)$$

Выражение (2.71) представляет кривую усталости по полному хрупкому разрушению образца при одноосном нагружении с амплитудой σ_a (см рис.2.3). По аналогии можно построить кривую хрупкого усталостного разрушения для других базовых видов нагружения (2.1), (2.3) или (2.4).

В разных работах встречаются разные зависимости скорости роста усталостных макротрещин типа (2.67) для различных групп материалов. Например, выражения вида [20]:

$$\frac{dl}{dn} = \beta_1 (l-d)^{\gamma_1},$$

где d – размер структурного элемента материала, β_1 и γ_1 – константы материала.

2.8 Анализ экспериментальных данных по развитию усталостного разрушения при одноосном нагружении и сдвиге

Автором проведен анализ развития хрупкого усталостного разрушения на широком классе металлов и сплавов с различной структурой и механическими свойствами со средними размерами зерен в диапазоне $d \in (10^{-3}, 1) \text{ мм}$, от литых крупнозернистых сплавов с размерами зерен, в среднем, 0.1 мм до рекристаллизационных сплавов с размером до 5 мм. По предложенной модели были обработаны известные экспериментально-теоретические данные для некоторых микроструктурных металлов и сплавов (на основе никеля, алюминиевые сплавы, высокохромистые стали со средними размерами зерен $d \in (10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}) \text{ мм}$; большого ряда конструкционных сталей: углеродистых (Ст.3, Ст.20, Ст.30, Ст.40, Ст.45), аустенитно-мартенситных (08X14АН4МД), коррозионно-стойких (30X10Г10, 1X13, 20X13, S135),

нержавеющих (X18H9T), легированных (Ст.40X, 15Г2АФДпс, 30X10Г10, 0X14АГ12М, ЭИ–612, 12ХН3А, 34СгМо4) сталей, применяемых при изготовлении труб для нефте- и газопроводов; чугунов; металлов: молибдена, никеля (в т.ч. субмикроструктурного), свинца, титана и др.; никелевых (ЭШЗ7БВД, Mar-M200, Udimet 700), магниевых (МА5-Т6, АМ100А), алюминиевых (АК4–1, АК4–1 Т1, АЛ25, ВИЗ, ВЭ5, В95Т6, 7005-Т6, АД33-Т6, Д16Т в т.ч. в микроструктурном состоянии), титановых сплавов (Ti–6Al–6V–2Sn, АТ6) при различных простых процессах пропорционального симметричного нагружения.

Физические закономерности развития усталостного разрушения в широком классе исследованных материалов, представленные ниже на некоторых примерах, послужили основой для формулировки гипотез модели. По известным экспериментальным данным были проведены расчеты и проверены следствия предложенной модели для широкого класса металлов и сплавов.

На рис. 2.9, 2.10 показаны экспериментальные данные и результаты расчетов для пластичной конструкционной стали, имеющей указанные прочностные характеристики, при симметричном растяжении-сжатии и симметричном сдвиге. Согласно метода п.2.3 и известным опытным данным найдены базовые характеристики модели (отмечены крестиками и цифрами 1–6 на рис. 2.9 и 2.10). Границы начала роста дефектов каждого масштабного уровня определяются по выражениям (2.29) – (2.31), (2.52) и (2.57) с учетом определяющих соотношений (2.21) – (2.23), (2.50), (2.53), (2.55) и (2.58). Построена кривая усталости по дефектам мезоуровня по уравнению (2.36) с учетом (2.35). В экспериментах в области развития дефектов пятого уровня при $N_f \in [10^5, 5 \cdot 10^6]$ циклов наблюдалось преимущественно хрупкое разрушение (на рис. 2.9, 2.10 представлены опытные данные по разрушению в этой области), что соответствует расчету.

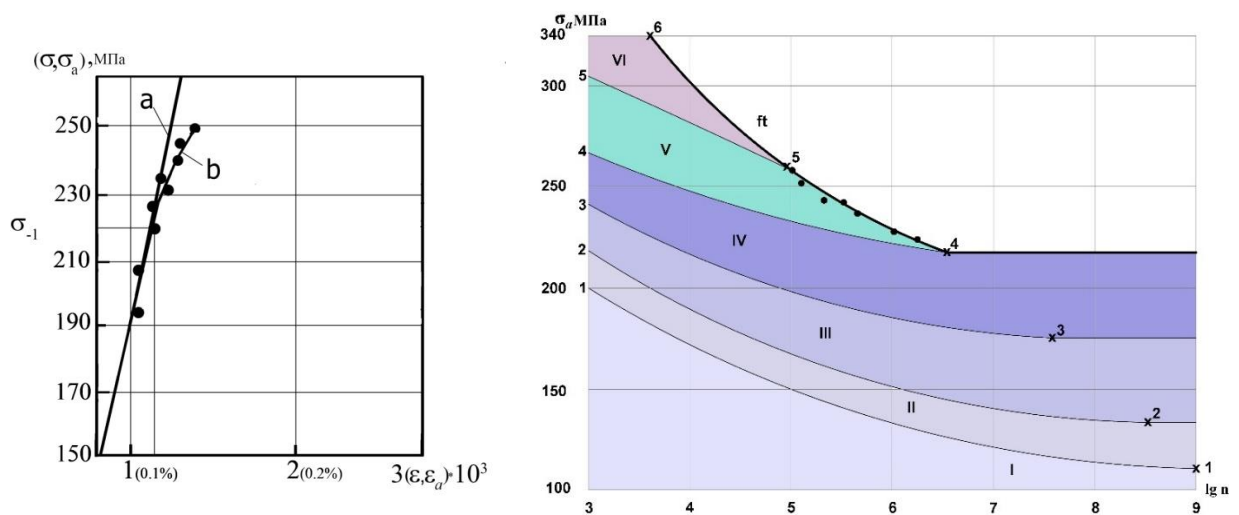


Рис. 2.9 Диаграммы статического (а) и циклического (б) деформирования; расположение областей I-VI и границ развития дефектов шести уровней и кривая усталости по дефектам мезоуровня ft при одноосном симметричном нагружении конструкционной стали:

$$\sigma_{\sigma} = 480 \text{ МПа}, \sigma_s = 339 \text{ МПа}, \sigma_{-1} = 220 \text{ МПа}$$

1-6 – базовые точки модели, ● – опытные данные по усталостному разрушению [158]

На рис. 2.11, 2.12 в координатах $(\sigma_a, \lg n)$ (или $(\tau_a, \lg n)$) при симметричном растяжении-сжатии и симметричном сдвиге соответственно для конструкционной стали 12ХН2А (механические характеристики приведены на рисунках) изображены области развития дефектов шести масштабных уровней, рассчитанные по выражениям (2.21), (2.22), (2.23), (2.48), (2.50), (2.53), (2.55), (2.58); границы достижения дефектами i -го уровня предельного состояния и их слияния с образованием дефектов $(i+1)$ -го уровня по выражениям (2.29), (2.30), (2.31), (2.52), (2.57). Базовые константы 1–6 найдены по методике п. 2.3 с учетом известных опытных данных для этой стали [152]. Кривая усталости по дефектам мезоуровня ft построена по уравнению (2.36) с учетом (2.35).

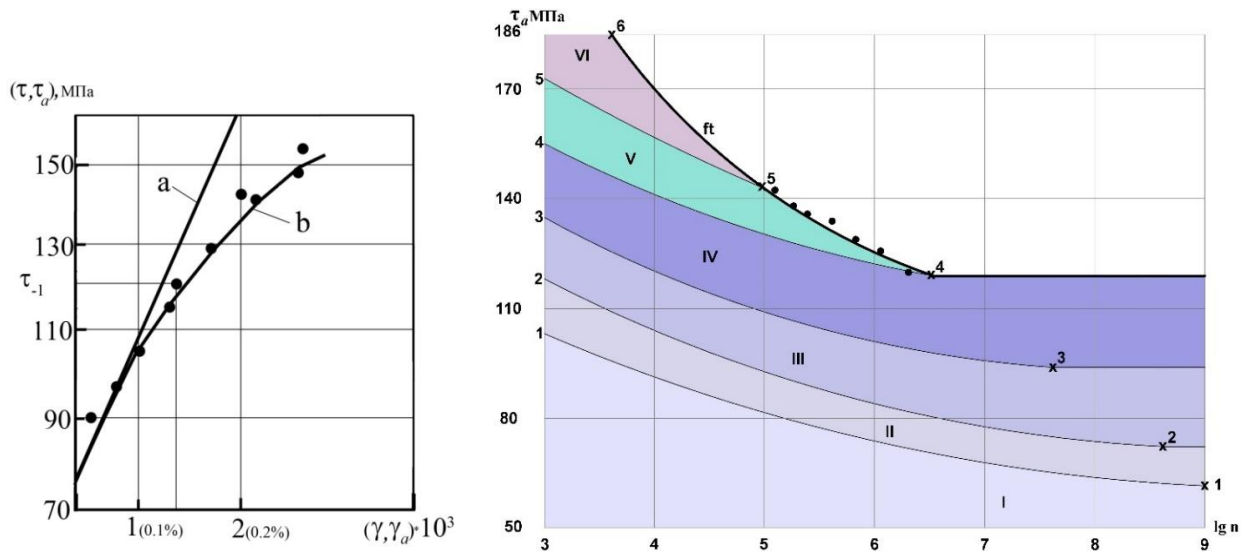


Рис. 2.10 Диаграммы статического (а) и циклического (б) деформирования; расположение областей I-VI и границ развития дефектов шести уровней и кривая усталости по дефектам мезоуровня ft при симметричном сдвиге для конструкционной стали:

$$\tau_{\sigma} = 260 \text{ МПа}, \tau_s = 185 \text{ МПа}, \tau_{-1} = 120 \text{ МПа}$$

1-6 – базовые точки модели, ● – опытные данные по усталостному разрушению [158]

По имеющимся данным для этой стали в диапазоне $N_f \in [10^5, 5 \cdot 10^6]$ циклов разрушение происходило по хрупким макротрещинам (данные представлены сплошными кружочками на рис.2.7 и рис. 2.8) и экспериментальная кривая усталости хорошо соответствует теоретической кривой ft по дефектам пятого и четвертого уровней. По предложенной модели дана классификация наблюдаемых в эксперименте макротрещин. Так, в точке 4 на пределе выносливости стали наблюдалось макроразрушение по коротким трещинам, отнесенным по классификации к дефектам четвертого уровня. Особенностью анализа этой стали являлось то, что при расчетах кривой усталости учитывался дорост макротрещин по выражению (2.71) (кривая усталости FT). Построенная кривая FT удовлетворительно описывает наблюдавшееся в опытах преимущественно хрупкое усталостное разрушение в диапазоне чисел $N_f \in [5 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^6]$ циклов.

Анализ данных по усталостному разрушению другой конструкционной стали представлен на рис. 2.13 [158]. Известная кривая Велера изображена кривой FT . Для этой стали характерно развитие неупругого деформирования, что увеличивало долговечность материала; при амплитудах одноосного нагружения выше $\sigma_a \approx 220 \text{ МПа}$ наблюдалось смешанное хрупкое и вязкое разрушения. Вследствие этого макроразрушение происходит существенно позже, чем по теоретической кривой усталости ft , построенной по модели.

Автором проведен анализ многочисленных исследований и сформулированы физические закономерности усталостного разрушения монокристаллических образцов из молибдена, никеля, вольфрама, железа, кремнистого железа и алюминия.

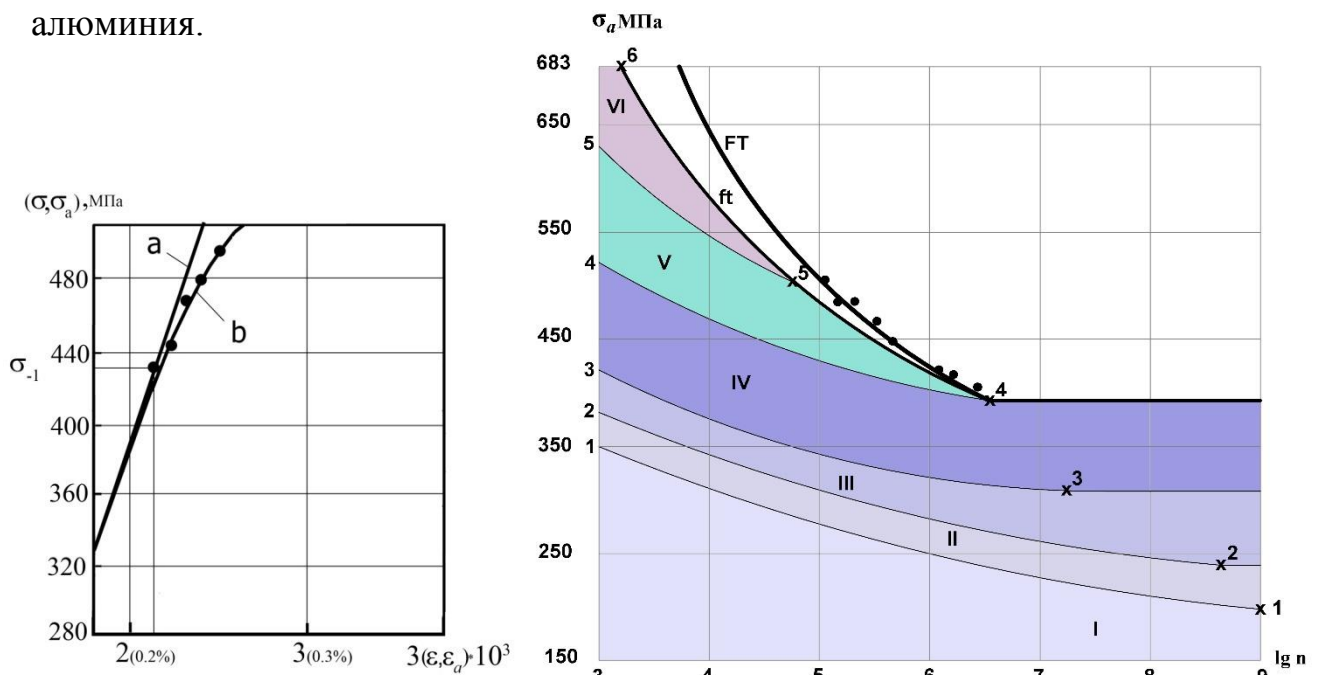


Рис. 2.11 Диаграммы статического (а) и циклического (б) деформирования; расположение областей I-VI и границ развития микродефектов шести уровней и кривые усталости по дефектам мезоуровня ft и по полному хрупкому разрушению FT при одноосном симметричном нагружении конструкционной стали 12ХН2А: $\sigma_B = 900 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 683 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 390 \text{ МПа}$

1-6 – базовые точки модели, ● – опытные данные по усталостному разрушению [158]

В работах [152] выявлена стадийность развития усталостного разрушения образцов из молибдена. Были исследованы множественные микротрещины линейных размеров, в среднем, $(10^{-4}, 5 \cdot 10^{-3})$ мм при симметричном одноосном нагружении и получено, что их размеры (по предложенной классификации отнесены к дефектам второго уровня) в процессе нагружения менялись незначительно, при этом резко росла их плотность. На мезоуровне в области $N_f \in [10^5, 5 \cdot 10^6]$ циклов наблюдалось преимущественно хрупкое разрушение по дефектам четвертого и пятого уровней. В области меньших чисел циклов развивались неупругие деформации [128,129]. Экспериментальные данные по усталостному разрушению (на рис. 2.14 представлены сплошными точками) хорошо описываются кривой усталости (2.36), полученной как результат последовательного развития дефектов шести уровней.

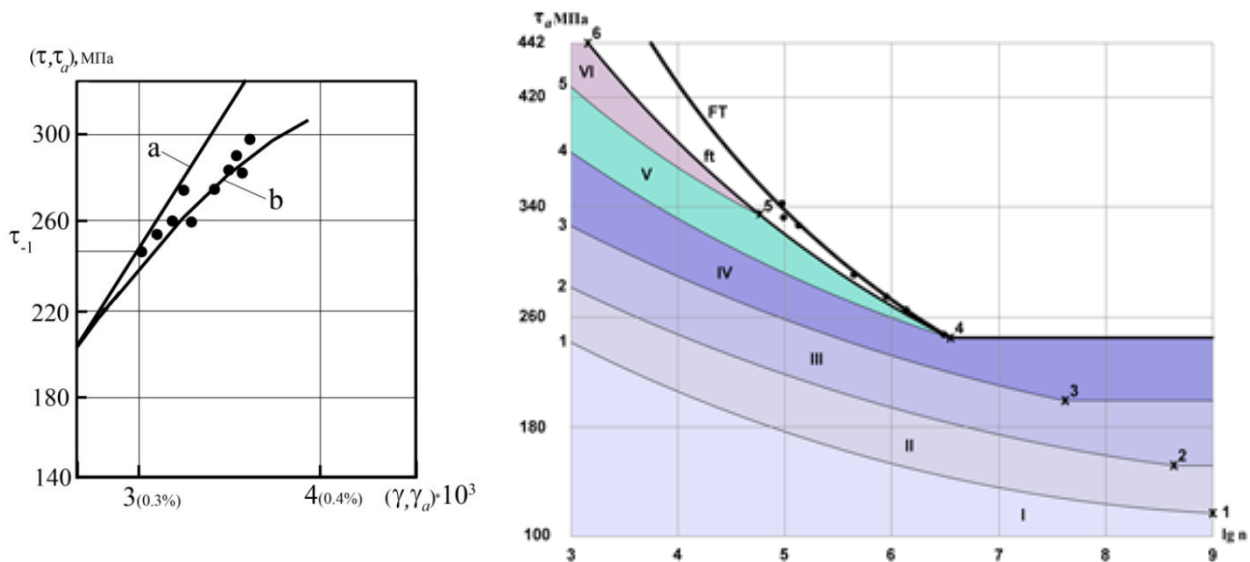


Рис. 2.12 Диаграммы статического (а) и циклического (б) деформирования; расположение областей I-VI и границ развития микродефектов шести уровней и кривые усталости по дефектам мезоуровня ft и по полному хрупкому разрушению FT при симметричном сдвиге для конструкционной стали 12ХН2А: $\tau_a = 581$ МПа, $\tau_s = 442$ МПа, $\tau_{-1} = 252$ МПа

1-6 – базовые точки модели, ● – опытные данные по усталостному разрушению [158]

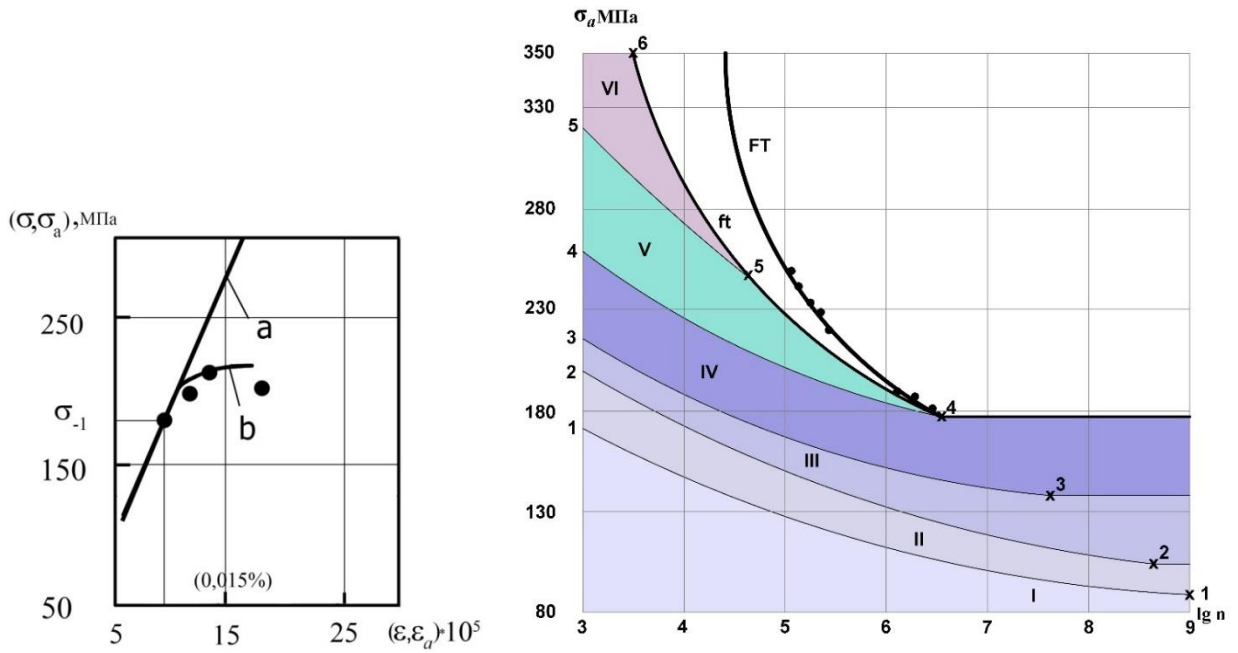


Рис. 2.13 Диаграммы статического (а) и циклического (б) деформирования; расположение областей I-VI и границ развития микродефектов шести уровней и кривая усталости по дефектам мезоуровня ft при симметричном растяжении-сжатии конструкционной стали:

$$\sigma_{\theta} = 440 \text{ МПа}, \sigma_s = 350 \text{ МПа}, \sigma_{-1} = 175 \text{ МПа}$$

1-6 – базовые точки модели, ● – опытные данные по усталостному разрушению [158]

Экспериментальные данные по усталостному разрушению крупнозернистого никеля (размер зерна, в среднем, $d = 0.1 \text{ мм}$) на рис. 2.15 представлены сплошными точками. При статическом нагружении в материале развиваются неупругие деформации. При циклическом нагружении и $N_f > 5 \cdot 10^6$ циклов наблюдались хрупкие трещины, начинающиеся в полосе скольжения, пересекавшей наиболее крупное зерно [4]. В области $N_f \in [10^5, 5 \cdot 10^6]$ циклов разрушение носит преимущественно хрупкий характер. По модели кривая усталости ft по дефектам четвертого и пятого уровней удовлетворительно описывает опытные данные, представленные на рис. 2.15. При числе $N_f \in [10^3, 10^5]$ циклов развиваются неупругие деформации [158] и при расчетах долговечности необходимо привлекать модели вязкого разрушения.

В последнее время много работ, связанных с эксплуатацией летательных аппаратов, посвящено исследованию процессов зарождения и развития усталостного разрушения в алюминиевых сплавах, в т.ч. в нано- и микрокристаллическом состоянии. Особое внимание уделяется изучению процесса разрушения на микро- и мезоуровне (на этапе зарождения макротрещин).

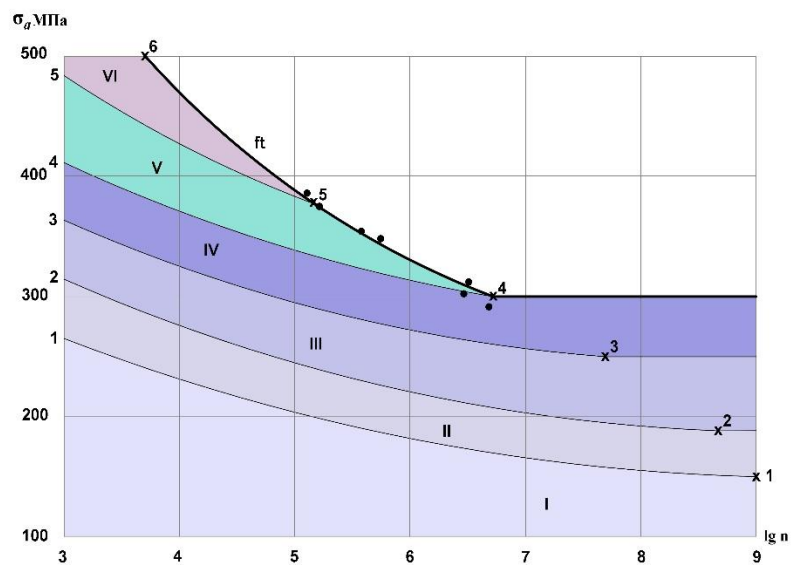
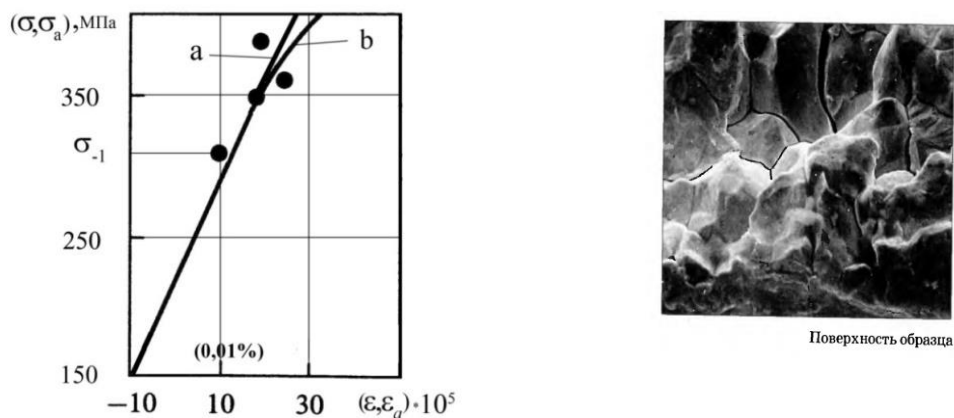


Рис. 2.14 Диаграммы статического (а) и циклического (b) деформирования; хрупкое межзеренное разрушение [39]; расположение областей I-VI и границ развития дефектов шести уровней и кривая усталости по дефектам мезоуровня ft при симметричном растяжении-сжатии монокристалла молибдена: $\sigma_B = 720 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 500 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 300 \text{ МПа}$
1-6 – базовые точки модели, ● – опытные данные по усталостному разрушению [158]

Для чистого алюминия ($\sigma_{-1} = 15 \text{ МПа}$, $N_f = 10^8$ циклов) при напряжениях около 60% от предела выносливости возникают широкие следы скольжения, в которых с дальнейшим увеличением амплитуды зарождаются многочисленные глубокие микротрещины [4].

Для различных алюминиевых сплавов существует представительная база данных линейных размеров и плотности наблюдаемых дефектов при различных видах нагружения [18–23, 158]. Так, для алюминиевого сплава АК4-1Т1 (размер зерна $d = 10^{-2} \text{ мм}$) в диапазоне $N_f \in [2.6 \cdot 10^6, 5.2 \cdot 10^6]$ циклов при амплитуде напряжения около предела выносливости в процессе нагружения производились измерения (методом электрического сопротивления) наименьших из наблюдаемых дефектов, линейный размер которых, в среднем, составил $l_2 = 10^{-3} \text{ мм}$, что позволяет отнести их к дефектам второго уровня. Скорость роста их размеров лежит в диапазоне $(2.6 \cdot 10^{-6}, 5.2 \cdot 10^{-6}) \text{ мм/цикл}$, т.е. практически не меняется со временем, при этом в процессе нагружения резко увеличивается их концентрация. В этом диапазоне чисел циклов разрушение сплава происходило по коротким трещинам (дефектам четвертого уровня). На рис. 2.16 (б) показана короткая макротрещина (размера зерна), обнаруженная на изломе образца, развившаяся из многочисленных микротрещин (пор) (дефектов второго и третьего уровней по модели). На рис. 2.16 (а) представлена кинетическая диаграмма зависимости скорости роста макротрещин dl/dn от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK . Из рисунка видно, что характерный размер коротких трещин (дефектов четвертого уровня) мало меняется со временем, скорость его изменения составляет около $6 \cdot 10^{-3} \text{ мм/цикл}$. Медленный рост макротрещин заканчивается при достижении размаха ΔK некоторого

порогового для данного сплава коэффициента интенсивности напряжений $K_{th} = 5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, при котором уже сформированы одна или несколько быстро развивающихся одиночных макротрещин, изучаемых механикой разрушения при $\Delta K > K_{th}$.

Такое поведение характерно для многих алюминиевых сплавов как при симметричном, так и при пульсирующем одноосном нагружении [18–23,158]. По предложенной модели оно хорошо описывается в областях $\Delta K < K_{th}$, в которых образуются мезодефекты четвертого и пятого уровней и по ним, в основном, происходит макроразрушение. Характерные микрографии рельефа поверхности разрушения в этой области при пульсирующем растяжении представлены на рис.2.16 (в)-(ж) (для сплавов типа 2020, 2024) [190–194,212].

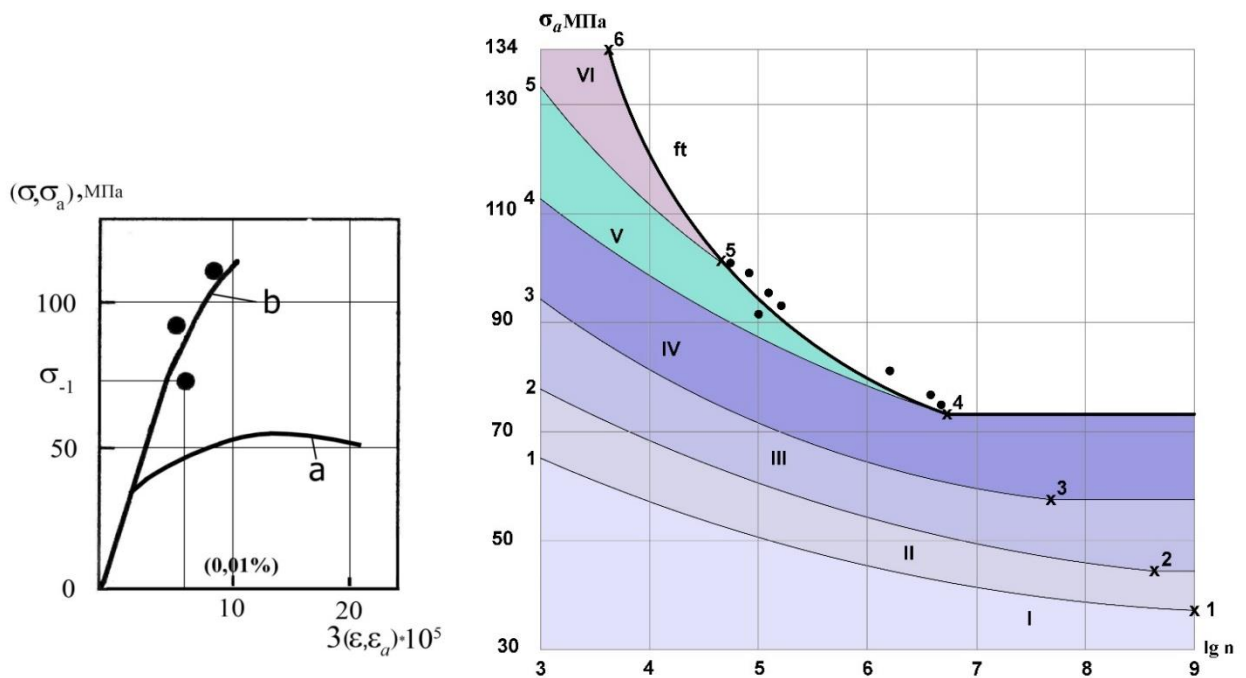


Рис. 2.15 Диаграммы статического (а) и циклического (б) деформирования; расположение областей I-VI и границ развития дефектов шести уровней и кривая усталости по дефектам мезоуровня ft при симметричном растяжении-сжатии крупнозернистого никеля:

$$\sigma_B = 200 \text{ МПа}, \sigma_S = 134 \text{ МПа}, \sigma_{-1} = 75 \text{ МПа}$$

1-6 – базовые точки модели, ● – опытные данные по усталостному разрушению [158]

На рис. 2.16 (в) контуры макротрещин подчеркнуты наличием микротрещин (дефектов ниже уровней). Типичные макротрещины с рассеянными зонами отрыва (разрушение по дефектам четвертого и пятого уровней) показаны на рис. 2.16 (г). На рис. 2.16 (д) на поверхности излома видно несколько участков макротрещин и языкообразные интрузии. На рис. 2.16 (ж) наблюдаются зоны отрыва образующихся при слиянии микропор (микродефектов третьего уровня), рассеянных среди нерегулярных усталостных макротрещин. На рис. 2.16 (е) представлена микроструктура элемента лопасти пропеллера из сплава 2025-T6, где отчетливо виден внутризеренный характер излома (на профиле излома справа), что соответствует развитию хрупких макротрещин. Такое разрушение является типичным для многих элементов конструкций из алюминиевых сплавов.

Одними из первых работ, в которых обсуждались вопросы стадийности усталостного разрушения, являются работы М.Хунтера и В.Фрике (1954 г.). В них для алюминиевого сплава 2004Т3 представлены области развития усталостного разрушения (схематично на рис. 2.17). Первая стадия развития микроразрушения характеризуется изменениями микроструктуры (область на рис. 2.17 до экспериментальной кривой 1), что соответствует по модели первому масштабному уровню. Вторая стадия определяется до появления нераспространяющихся трещин (до кривой 2 на рис. 2.17), что по модели отвечает второму и третьему уровням. Третья стадия характеризуется ростом и слиянием нераспространяющихся трещин с зарождением коротких трещин, их развитием до предельного состояния на кривой 3 (линии Френча) рис. 2.17. По модели эта стадия соответствует четвертому уровню развития дефектов. На четвертой стадии макроразрушения образуются глубокие макротрещины (кривая 4 на рис. 2.17), что отвечает пятому и шестому масштабному уровню. Далее процесс развивается вплоть до окончательного разрушения (кривая усталости 5 на рис.2.17).

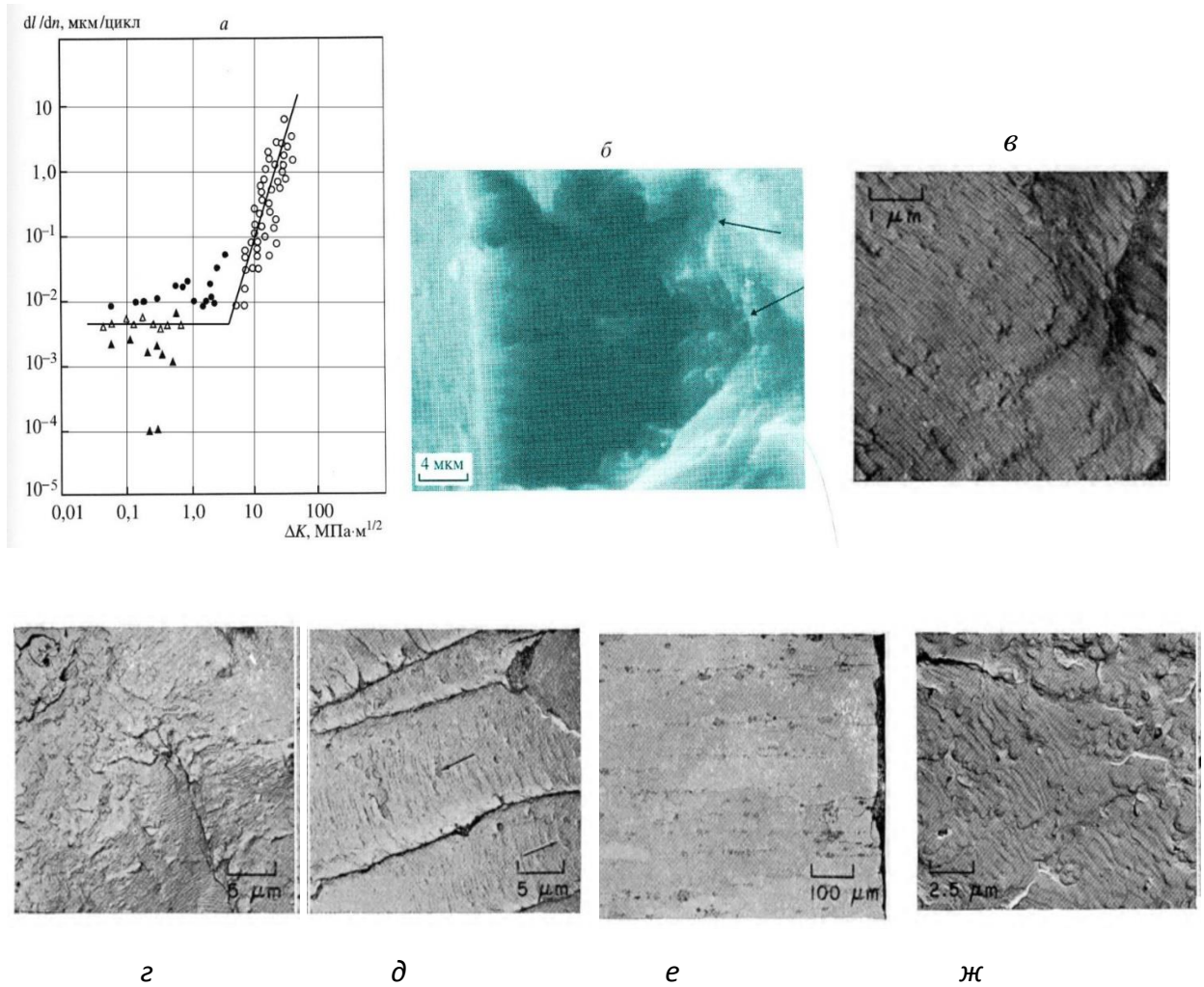


Рис. 2.16 Кинетическая диаграмма усталостного разрушения образцов с надрезом из сплава АК4-1Т1 при симметричном нагружении (а); короткая макротрещина на поверхности излома для сплава АК4-1Т1 (б)
 Фрактографии поверхности разрушения для сплавов типа 2020, 2024 при пульсирующем растяжении (в), (г), (д), (ж)
 Микроструктура усталостного излома элемента лопасти пропеллера из сплава 2025-Т6 (е)

Много работ посвящено исследованию усталостного разрушения алюминиевых сплавов при несимметричных циклах нагружения. Выявлены общие закономерности при различных параметрах α , стадийность, особенности развития дефектов на разных масштабных уровнях. На рис. 2.18 представлены фотографии микроструктуры соответствующих состояний сплава 2024Т3 при различных асимметричных нагружениях (данные для $\alpha = 1$ и $\alpha = 0.43$). Авторами полагается, что на участке инициализации

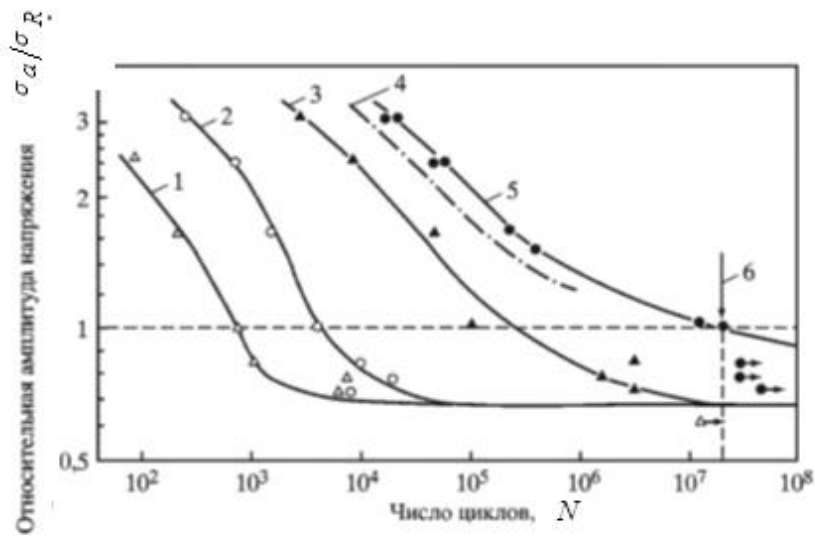


Рис. 2.17 Стадии развития усталостного разрушения алюминиевого сплава 2024Т3 при одноосном симметричном нагружении [193]:

1 – линия появления первых полос скольжения, 2 – линия появления микротрещин обнаруживаемых методом реплик, 3 – линия Френча, 4 – линия первых глубоких трещин, обнаруживаемых методом окраски, 5 – кривая усталости, 6 – предел выносливости на базе $N_f = 2 \cdot 10^7$ циклов

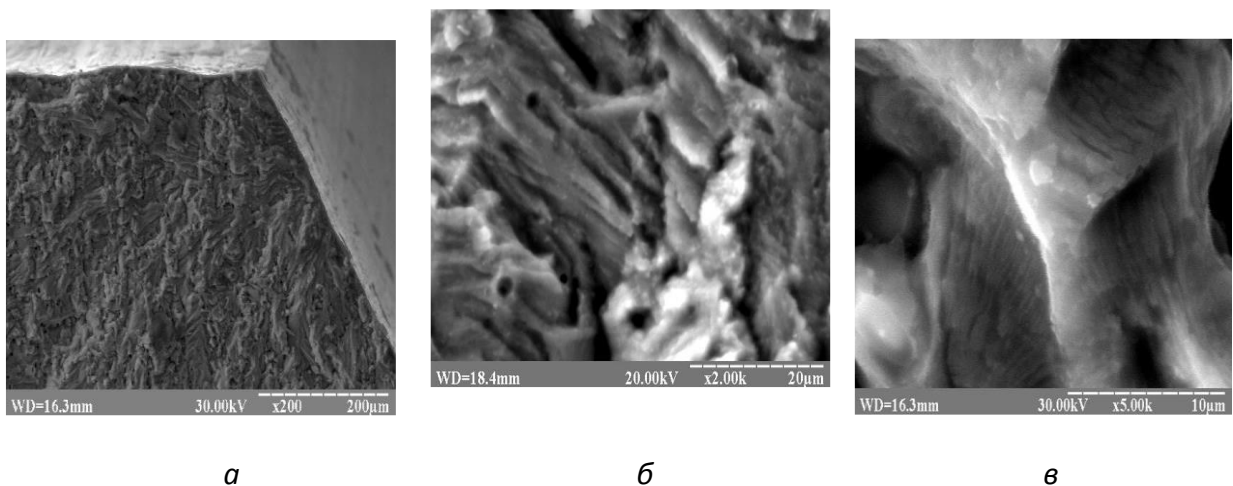


Рис. 2.18 Фотографии микроструктуры алюминиевого сплава 2024Т3 при одноосном нагружении, $\alpha=0.43$ и $\alpha=1$, $\sigma_a = 100 \text{ МПа}$, частота нагружения 15 Гц

(а) – участок инициализации усталостной трещины, (б) – вторичные микротрещины в местах включений, (в) – разориентация усталостных бороздок

макротрещины происходят процессы микроразрушения с образованием микротрещин (рис. 2.18 б) и зарождение макротрещины является следствием целой системы микроструктурно коротких трещин, которые объединяются в единую сеть.

На рис. 2.19 представлены фрактографии хрупкого разрушения образца из алюминиевого сплава 2024-T851 при пульсирующем растяжении, $\alpha = 1$ [213]. Поверхность разрушения плоская и блестящая, с зонами среза по обоим сторонам. Усталостные террасы содержат четко выраженные макротрещины (рис. 2.19 (б)), свидетельствующие по модели об образовавшихся в процессе нагружения дефектах четвертого уровня. На рис. 2.19 (в) отчетливо виден локальный фронт макротрещины, а на рис. 2.19 (г) – многочисленные микротрещины (дефекты второго и третьего уровней) между террасами. На несплошностях террасы разделяются, что локально меняет картину развития дефектов.

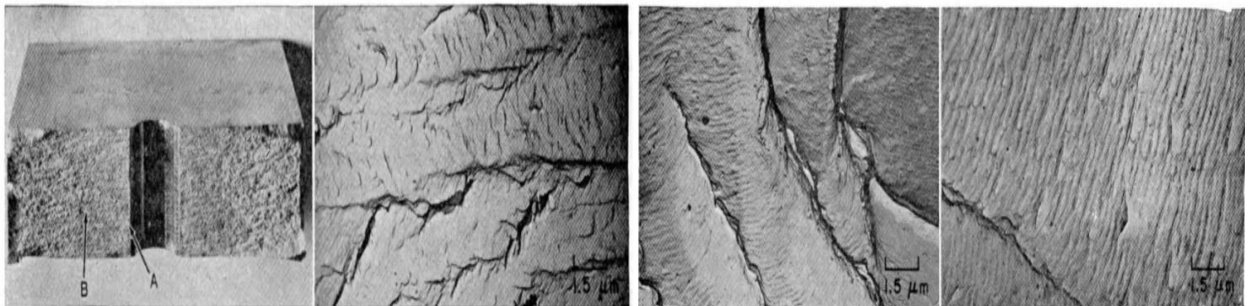


Рис. 2.19 Фрактографии усталостного разрушения алюминиевого сплава 2024Т851, $\sigma_{\theta} = 490 \text{ МПа}$, $\sigma_a = 23-65 \text{ МПа}$, при пульсирующем одноосном нагружении, $N_f = 229700$ циклов

(а) – излом образца с отверстием и надрезами справа и слева от отверстия, (б) – участок поверхности в т.А, (в), (г) – участки поверхности вблизи т.В

В работе [281] представлены результаты подробных микрофрактографических исследований усталости алюминиевого сплава АА7076-T561, представляющего собой алюминиевую матрицу (размер зерна около 0.1мм) с беспорядочно расположенными включениями вторичной фазы

размера в среднем, около 0.001мм . При исследуемых уровнях амплитуд одноосного нагружения показано, что наибольшая плотность наблюдалась у микроотслоений по границам фаз, а также плотность микродефектов во вторичной фазе в 4-9 раз превышала их плотность в матрице. По модели наблюдаемые дефекты относятся к дефектам первого, второго и третьего масштабных уровней.

Расчеты по модели были произведены для всех обсуждаемых в работе алюминиевых сплавов при одноосных нагружениях с различными параметрами α . На рис. 2.20 в качестве примера представлены расчетные области развития дефектов каждого из шести уровней I-VI для двух алюминиевых сплавов при симметричном цикле одноосного нагружения и пульсирующем растяжении, типичные и для выше рассмотренных алюминиевых сплавов. Базовые характеристики рассчитывались по методике п.2.3 с учетом известных опытных данных для сплавов (для приведенных материалов обозначенные крестиком точки 1-6). Кривые 1-1–3-3 находились из соотношений (2.29), (2.30) и (2.31) соответственно, кривые 4-4, 5-5 – по (2.52), (2.57). Кривая усталости по дефектам мезоуровня ft как решение уравнения (2.36) с учетом (2.35), (2.49) – (2.51), (2.53).

Аналогично по приведенным выше соотношениям автором построены базовые функции, области развития дефектов и кривые усталости для других алюминиевых сплавов. По результатам расчетов, например, для сплава 2024Т3 экспериментальная кривая 1 с рис. 2.17 соответствует расчетной кривой 1-1 и является началом развития дефектов второго уровня, кривая 2 – началом развития дефектов третьего уровня по модели. Кривая 3 с рис. 2.17 (линия Френча) согласована с кривой 4-4 по модели, на которой дефекты четвертого уровня достигают предельных состояний, кривая 4 с рис. 2.17 – с началом роста дефектов шестого масштабного уровня. Кривая усталости 5 с рис.2.17 отвечает кривой усталости ft по (2.36) с учетом соответствующих

выражений для вероятностей разрушения по дефектам. Получено, что построенные теоретические кривые усталости позволяют предсказывать хрупкое разрушение в областях по числу $N_f \in (5 \cdot 10^6, 10^9)$ циклов.

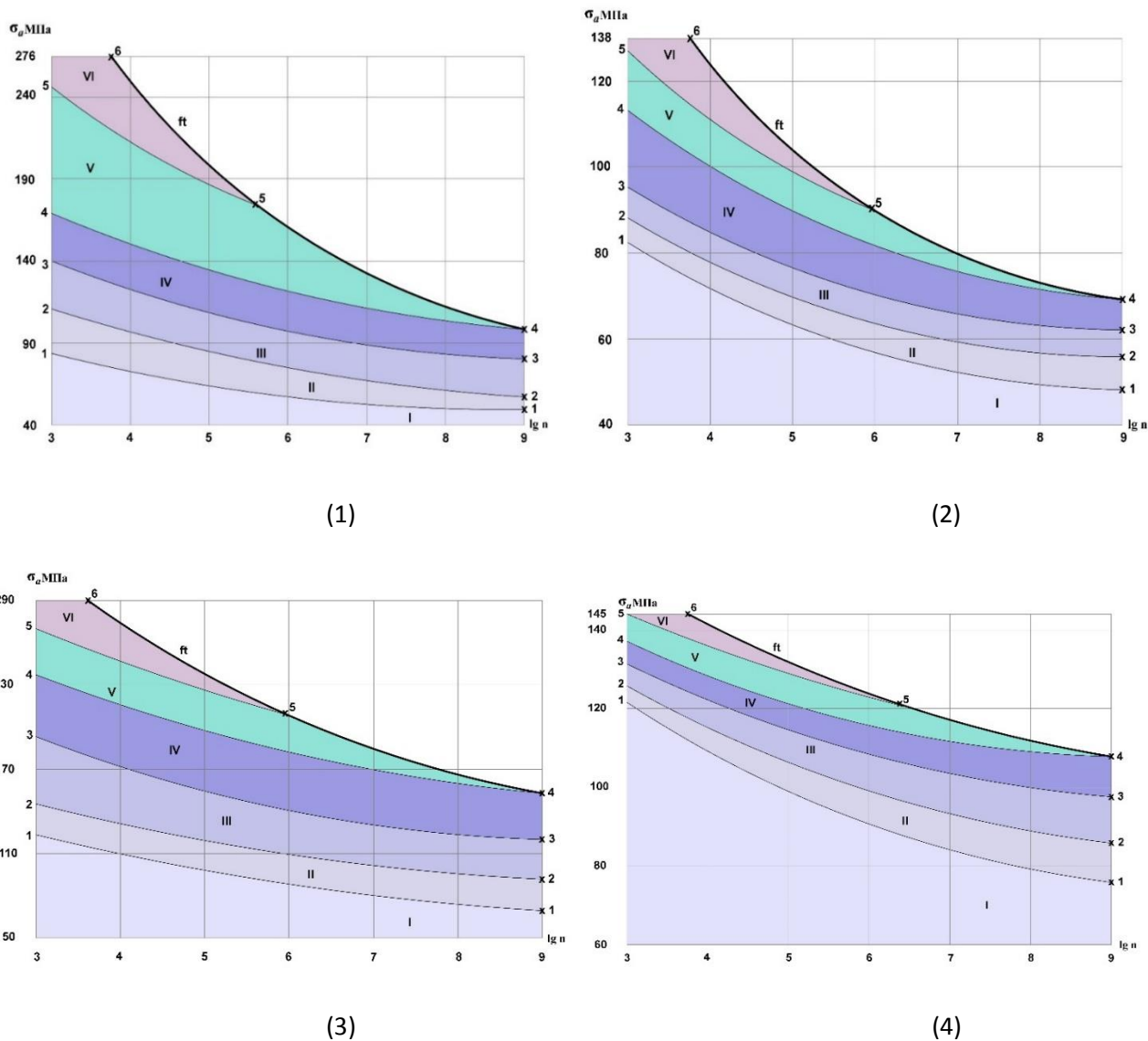


Рис. 2.20 Расположение областей I-VI и границ развития дефектов шести уровней и кривая усталости по дефектам мезоуровня ft при одноосном нагружении алюминиевых сплавов: АД33-Т6 – $\sigma_{\theta} = 310 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 276 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 96,5 \text{ МПа}$; $\sigma_0 = 138 \text{ МПа}$ (1) $\alpha = 0$, (2) $\alpha = 1$
7005-Т6 – $\sigma_{\theta} = 350 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 290 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 150 \text{ МПа}$; $\sigma_0 = 212 \text{ МПа}$ (3) $\alpha = 0$, (4) $\alpha = 1$
1-6 – базовые точки модели

Систематизация известных данных о фактических длинах, плотностях и особенностях поведения дефектов в алюминиевых сплавах позволили

обосновать гипотезы модели. Впервые кривая усталости построена как последовательное зарождение, развитие и слияние последовательно дефектов шести масштабных уровней.

Большой цикл известных работ посвящен исследованиям процессов накопления повреждаемости в железе, малоуглеродистой стали Ст.3 и углеродистой стали 45 (Ботвина Л.Р., Бэрстоу Л., Иванова В.С., Терентьев В.Ф., Пойда В.Г., Танаки К. и др., 1910-1988 гг.) На рис.2.21 представлены данные по пульсирующему одноосному нагружению для образцов из Ст.3 и стали 45. Автором проведены расчеты по модели для этих материалов.

На рис.2.21 – 2.23 представлены результаты для малоуглеродистой Ст.3, состоящей из α -железа – кристаллов феррита, имеющих объемно-центрированную кубическую решетку с ребром, равным $3 \cdot 10^{-7}$ мм и

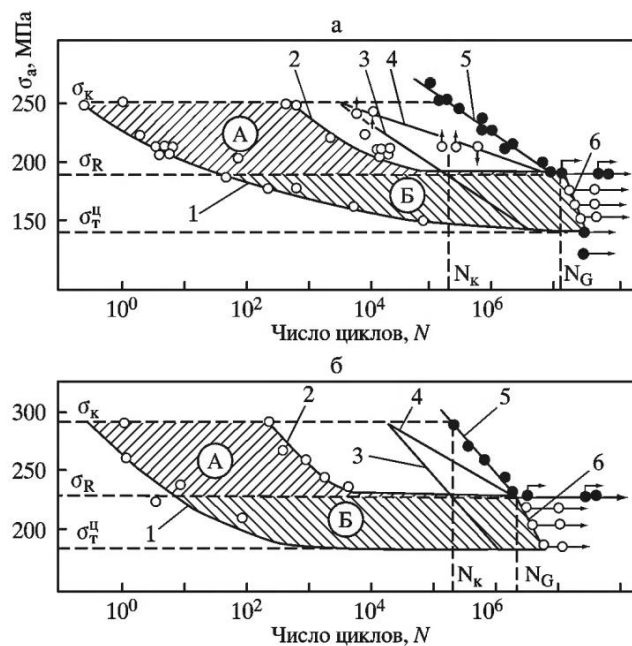


Рис. 2.21 Анализ усталости образцов из Ст.3 (а) и стали 45 (б) при пульсирующем цикле одноосном нагружении: $\sigma_R \equiv \sigma_{-1}$ – предел выносливости, σ_T^H – предел чувствительности к циклическим напряжениям, $\sigma_K \equiv \sigma_S$ – предел текучести, 1 – линия начала циклической текучести, 2 – линия окончания циклической текучести (линия слияния микротрещин), 3 – линия обнаруживаемых микротрещин, 4 – линия необратимой повреждаемости (линия Френча), 5 – кривая усталости, 6 – линия стабилизации структурных изменений [63]

образующих зерна диаметром $d \approx 18.5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$, и небольшого количества зерен цементита, расположенных по стыкам ферритных зерен. При статическом растяжении у стали имеется площадка текучести до 2.5% осевой деформации.

В результате экспериментальных исследований микроструктуры Ст.3 Ивановой В.С. были выявлены четыре стадии хрупкого усталостного разрушения (рис. 2.21 (а), рис. 2.22 (а)), для каждой из которых приведены микрографии рельефа распространения дефектов (рис. 2.23) и экспериментальные зависимости амплитуды напряжений от числа циклов (2.22(а)). Первая стадия развития микроразрушения характеризуется изменениями микроструктуры (по модели отнесены к дефектам первого уровня): во внутренних объемах и по границам ферритных зерен генерируются поры и дислокации, резко увеличивается их плотность (фотографии микроструктуры представлены на рис.2.23 (1)-(4)), интенсивно зарождаются субмикротрещины по границам феррит-цементит (рис. 2.23 (5)), образуется развитая дислокационная структура у неметаллических включений (рис.2.23 (6)). На рис. 2.22 (а) первая стадия соответствует области до экспериментальной кривой 1. На второй стадии развития разрушения в результате слияния субмикротрещин появляются и развиваются микротрещины (дефекты второго уровня) на границах ферритных зерен (фрактографии микроструктуры при напряжении, равном пределу выносливости $\sigma_0 \equiv 2\sigma_R = 372 \text{ МПа}$, представлены на рис.2.23 (7)-(10)), происходит обрастание микротрещинами первоначальных субграниц отжига и неметаллических включений, границ раздела феррит-цементит (изображены на рис. рис. 2.23 (11), (12), (13) соответственно); в дальнейшем они сливаются с образованием нераспространяющихся микротрещин (дефектов третьего уровня) вдоль плоскостей скольжения дислокаций; вследствие слияний последних зарождаются короткие трещины размера зерна феррита (дефекты

четвертого уровня) в области до кривой 2 на рис.2.21 (а), рис. 2.22 (а). Параллельно происходят скольжения ансамблей зерен по преимущественным плоскостям с зарождением вязких микротрещин. На третьей стадии развития разрушения до линии Френча 4 на рис.2.21 (а) (фотографии структуры на рис. 2.23 (14) (а,б) и 15 (а,б)) растут короткие трещины. На четвертой стадии макроразрушения растут макротрещины параллельно с развитием вязкого разрушения до окончательного разделения образца на части (кривая 5 на рис.2.20 (а)). При максимальном пульсирующем растяжении $\sigma^{\max} = 420 \text{ МПа}$ на рис.2.23 (16) а,б,в и 2.23 (17) представлены развитые макротрещины у неметаллических включений и в устойчивых полосах скольжения на границе зерна соответственно. Линии 6 на рис.2.21 (а) и 2.22 (а) – линии стабилизации структурных изменений.

На рис. 2.22 (б) – (г) представлены данные расчетов по предложенной модели. Базовые характеристики модели при симметричном нагружении находились по методике п.2.3, учет параметра α при нагружениях с несимметричным циклом – по соотношения (2.62), (2.63) п.2.5. Известный предел чувствительности к циклическим напряжениям для стали $\sigma_T^U = 148 \text{ МПа}$ (при пульсирующем изгибе, $N = 2 \cdot 10^7$ циклов) соответствует по модели достижению дефектами первого уровня предельного состояния. Кривые 1-1– 3-3 находились из соотношений (2.29), (2.30) и (2.31) соответственно, кривые 4-4, 5-5 – по (2.52), (2.57). Кривая усталости по дефектам мезоуровня f_t как решение уравнения (2.36) с учетом (2.35), (2.49) – (2.51), (2.53). Результаты расчетов по развитию каждого вида дефектов для пульсирующего нагружения представлены на рис. 2.22 (б). Кривая 1–1 на рис. 2.22 (б) соответствует кривой 1 на рис. 2.22 (а) (кривой 1 на рис.2.21(а)), кривая 3–3 на рис. 2.22 (б)– кривой 2 на рис. 2.21 (а), кривая 4–4 с рис. 2.22 (б) – линии Френча 4 на рис. 2.22 (а) начала развития дефектов пятого уровня.

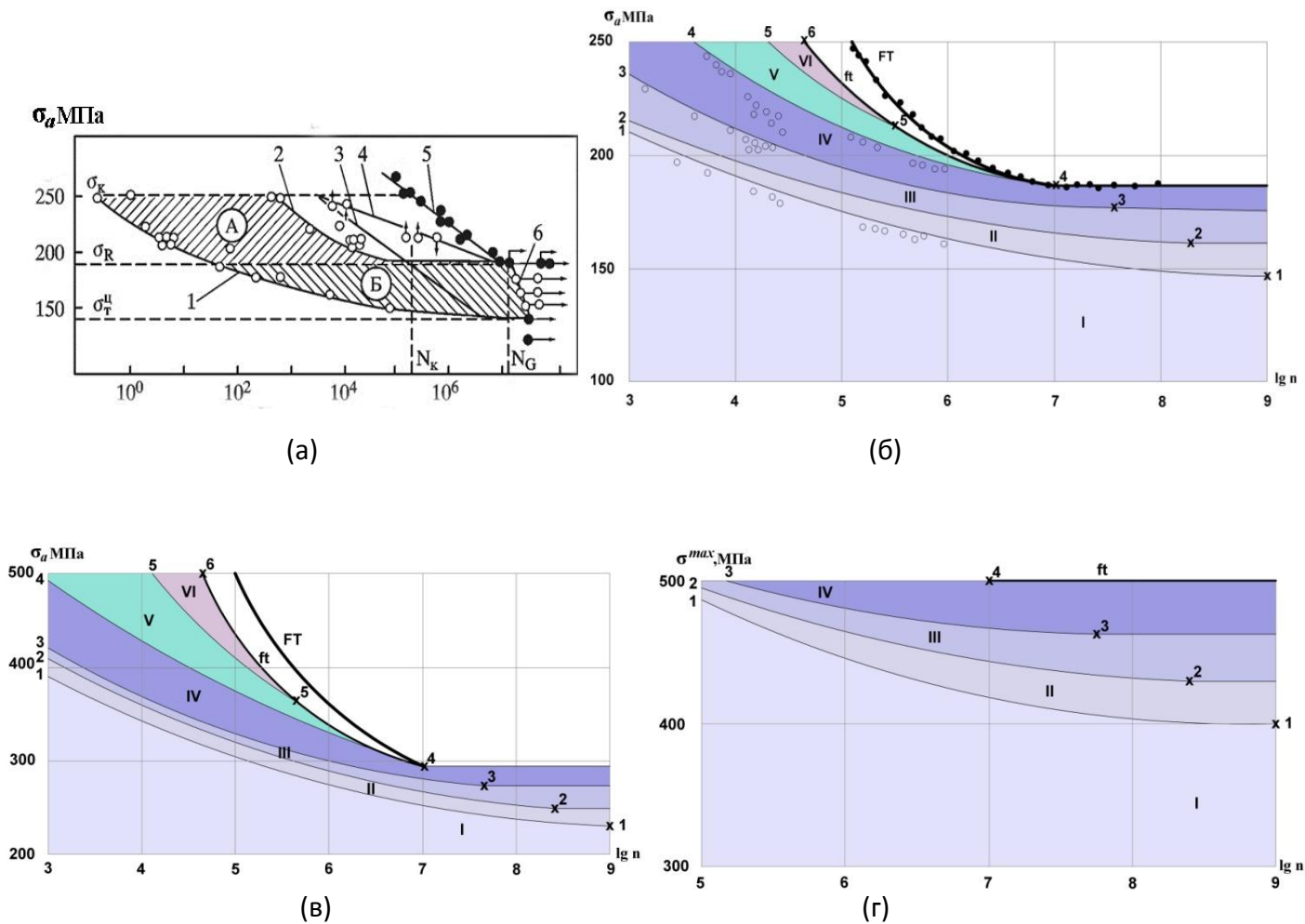


Рис.2.22 (а) Стадии развития усталостного разрушения Ст.3: $\sigma_{\sigma} = 740 \text{ МПа}$, $\varepsilon_{\sigma} = 11\%$, $\sigma_s = 500 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 296 \text{ МПа}$, $\sigma_0 = 2\sigma_R = 372 \text{ МПа}$ при пульсирующем изгибе, $\alpha = 1$ [63]

Области I-VI и границы развития дефектов шести уровней, кривая усталости по дефектам мезоуровня ft и кривая усталости по полному разрушению FT при одноосном нагружении Ст. 3, (б) $\alpha = 1$, (в) $\alpha = 0$, (г) $\alpha = 2.7$, 1-6 – базовые точки модели

Для расчета характеристик окончательного разрушения стали (приведена экспериментальная кривая усталости FT) необходимо привлекать механику разрушения и критерии вязкого разрушения. Для симметричного одноосного нагружения на рис.2.22(в) представлены: расположение областей развития дефектов каждого уровня, кривые начала интенсивного накопления каждого вида дефектов, кривая усталости по дефектам мезоуровня ft и экспериментальная кривая усталости FT .

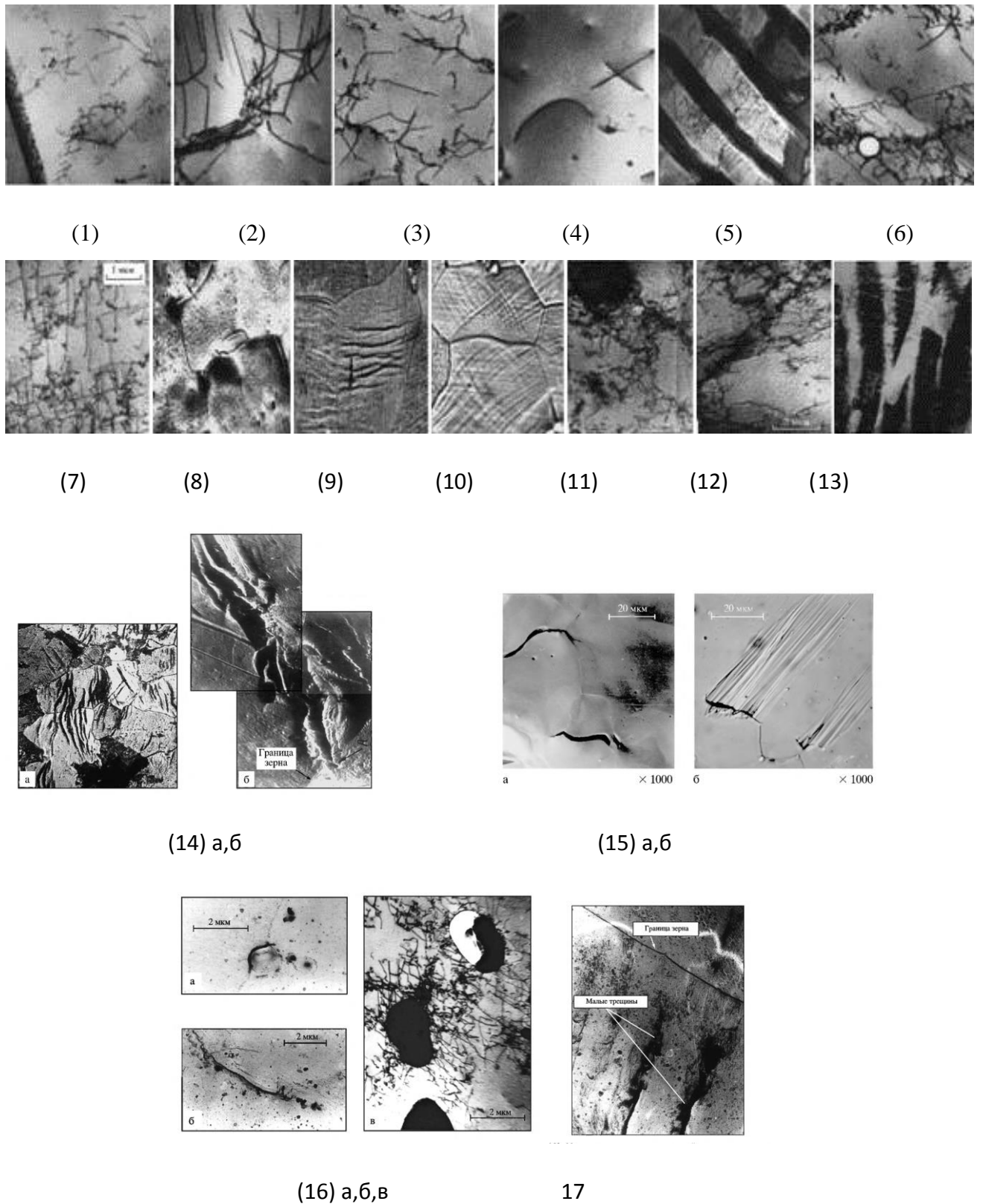


Рис. 2.23 Микроструктура стали Ст. 3 при пульсирующем одноосном нагружении на разных стадиях развития усталостного разрушения

(1) – (6) первая стадия развития микроразрушения (по дефектам первого уровня) (рис.1(а), до кривой 1), $\times 15000$: (1) – (4) интенсивное зарождение пор и дислокаций, (5) зарождение

субмикротрещин по границам феррит-цементит, (6) 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 $\sigma_0 = 372 \text{ МПа}$: (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 – развитие коротких трещин до линии Френча 4, $\times 500$; (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, $\times 2820$

Из анализа опытных данных следует, что в условиях одноосного симметричного растяжения-сжатия также наблюдается стадийность процесса разрушения, протекание начальных стадий развития разрушения имеет свои особенности, наблюдается более развитая дислокационная структура, чем в условиях повторного растяжения, достижение дефектами предельных состояний происходит при меньших максимальных напряжениях цикла.

По представленной модели производятся расчеты областей развития дефектов для одноосного нагружения стали с произвольным параметром асимметрии цикла. При этом физический смысл имеют значения параметра асимметрии α , лежащие в диапазоне: $|\alpha| \leq 2.7$. На рис. 2.22 (г) представлены результаты расчетов для одноосного нагружения с параметром $\alpha = 2.7$ (с учетом выражений (2.62), (2.63)), при котором базовая характеристика $\sigma_4 = \sigma_s$. Разрушение по дефектам четвертого уровня происходит при максимальном значении напряжения, равном пределу текучести.

Результаты большого цикла работ по развитию разрушения в титановом сплаве АТ6, имеющего двухфазную $\alpha - \beta$ структуру (Ботвина Л.Р., Клевцов Г.В., Тютин М.Р. и др., 1989-2016 гг.), кратко представлены на рис. 2.24. Средний характерный размер α -фазы составляет $d_\alpha = 0.02 \text{ мм}$, и она состоит из кристаллов гексагональной плотноупакованной решетки. Кристаллы β -фазы

имеют кубическую объемно-центрированную решетку, их средний размер лежит в диапазоне $d_{\beta} = [0.3-0.5]_{\text{мм}}$.

Л.Р. Ботвина выделяла три стадии развития разрушения: образование дефектов среднего размера α -фазы (кривая 3 на рис.2.24 (а)), образование дефектов размера β -фазы и начало интенсивного развития макротрещин среднего размера $l \geq 1$ мм (кривая 2) до полного разрушения (кривая 1). Первая стадия разрушения характеризуется образованием кластеров, субмикротрещин от включений; вдоль плоскостей скольжения дислокаций вблизи границ и по границам α -фазы многократно повторяющаяся нагрузка приводит к высокой концентрации этих дефектов стабильных размеров с образованием нераспространяющихся трещин размера α -фазы (кривая 3). Микроструктура сплава на первой стадии изображена на рис.2.24 (д-а)).

С развитием процесса разрушения наблюдается выход микротрещин за границы α -фазы, образование нераспространяющихся трещин, в результате слияния которых зарождаются короткие трещины размера β -фазы и формируется так называемый речной узор с образованием интрузий и экструзий (кривая 2). Микроструктура второй стадии разрушения представлена на рис.2.24 (д-(б),(в)). Далее короткие трещины растут, пересекают 3-4 зерна и образуются транскристаллитные и зернограничные макротрещины, по которым происходит полное разрушения образца (рис. 2.24 (д-(г))). Исследование изломов образцов из сплава АТ6 на растровом микроскопе показало, что развитие трещин приводит к кристаллографическим сколам (рис.2.24 (д-(г))).

Закономерности поведения трещин на трех стадиях разрушения для сплава АТ6 представлены на кинетической диаграмме на рис.2.24 (б), на рис. 2.24 (г), (е) изображены экспериментальные зависимости между длиной наблюдаемых хрупких трещин и числом циклов нагружения на первой и второй стадиях разрушения. Из этих рисунков видно, что размер наблюдаемых дефектов типа

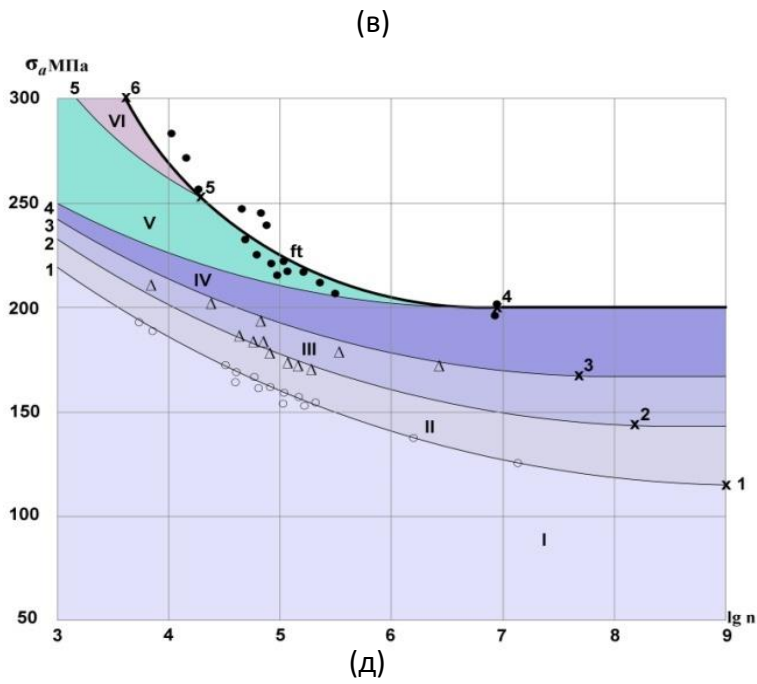
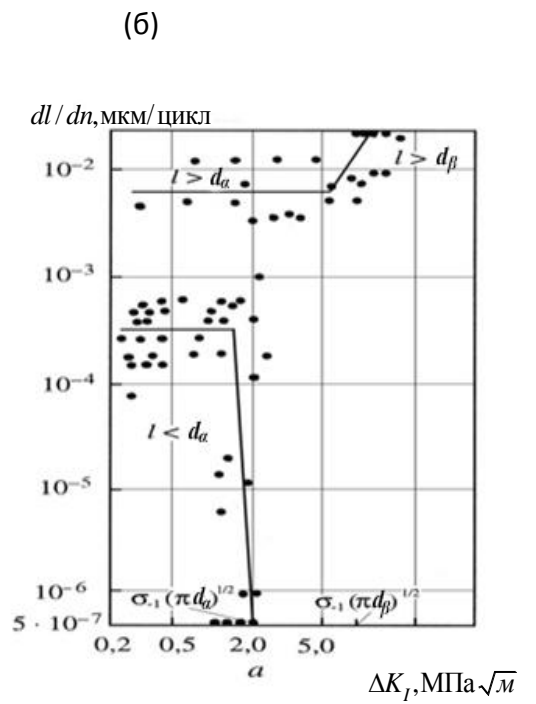
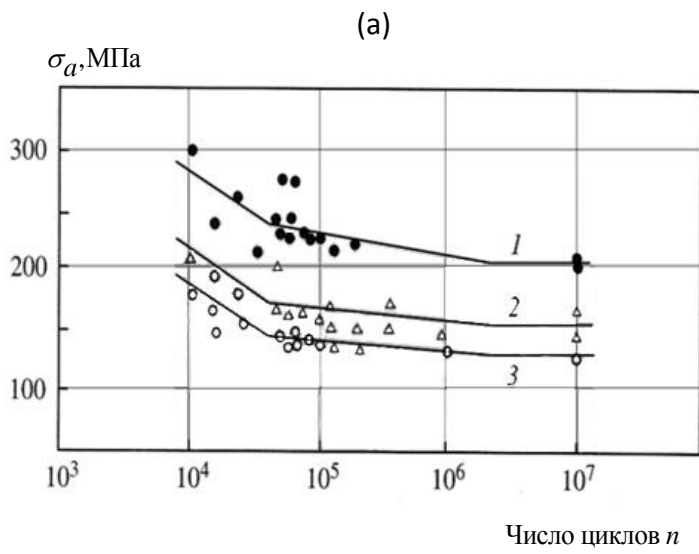
микротрещин, меньших α – фазы, мало зависит от числа циклов и скорость его изменения вначале постоянна (на рис. 2.23(б) при коэффициенте интенсивности напряжений $0.2 < \Delta K < 1.5(MПа\sqrt{м})$), а потом падает до нуля (рис.2.24 (г)) и рис. 2.24(б), $1.5 \leq \Delta K < 2(MПа\sqrt{м})$). Эти дефекты в модели отнесены к первому и второму уровню. На второй стадии дефекты, размером меньшим β – фазы, подрастают примерно с одинаковой скоростью (рис.2.24 (б), $2 \leq \Delta K < K_{th} = 5(MПа\sqrt{м})$ и рис.2.24 (е)). Эти дефекты отнесены к третьему уровню. При размахе интенсивности напряжений $\Delta K \geq 5 MПа\sqrt{м}$, начинается интенсивный рост макротрещин на мезоуровне (размеров, в среднем, больше размера β –фазы) (как показано на участке кривой на рис. 2.24 (б)). На рис. 2.24 (ж) изображены зависимости размеров наблюдаемых авторами трещин в зависимости от амплитуды пульсирующего растяжения.

На рис. 2.24 построены области развития дефектов шести уровней, границы которых подсчитаны по соотношениям (2.41), (2.44), (2.47), (2.52), (2.57) соответственно для разных отношений амплитуды напряжения к среднему значению. Кривая усталости по дефектам мезоуровня ft определялась как решение уравнения (2.36) с учетом (2.35), (2.49) – (2.51), (2.53). Для пульсирующего растяжения в расчетах приняты базовые характеристики σ_1 , σ_2 по данным на рис.2.24 (а) при $N=10^7$ циклов циклов с кривых 3 и 2 соответственно, базовые значения σ_4 , σ_5 и σ_6 – по кривой 3 на рис.2.24. По предложенной модели кривая 3 на рис. 2.24 (а) соответствует кривой 1-1 на рис. 2.24 (в). Полые кружки с рис.2.24 (а) на рис. 2.24 (в) попадают в область достижения предельных состояний дефектами первого уровня и образования дефектов второго уровня (размера α – фазы). Кривая 2 с рис. 2.24 (а) по модели определяется как кривая 3-3 начала роста макротрещин размера β –фазы. Полые треугольники на рис. 2.24 (а) соответствуют наличию в материале

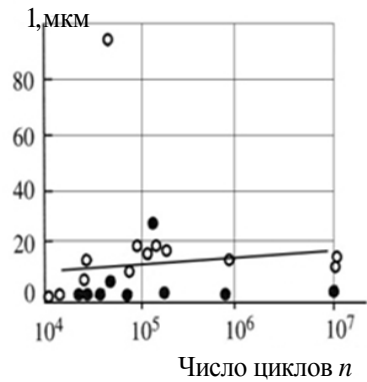
дефектов третьего уровня, а также достижению ими предельного состояния с зарождением коротких трещин. Теоретически построенная по предложенной модели кривая усталости по дефектам мезоуровня (кривая 6-4) хорошо описывает экспериментальные данные Л.Р.Ботвиной (кривая 3 и сплошные кружки на рис. 2.24 (а), (в)).

Для симметричного одноосного нагружения по методике п 2.3 найдены базовые характеристики. На рис.2.24 (з) представлено расположение областей развития дефектов каждого уровня, кривые начала интенсивного накопления дефектов второго и третьего уровня соответственно и кривая усталости по дефектам мезоуровня ft , рассчитанные по модели для симметричного нагружения. На рис. 2.24 (и) представлены результаты расчетов для одноосного нагружения с предельно возможным для использования предложенных выражений параметром $\alpha = 2.43$ (с учетом (2.62), (2.63)), при котором для данной стали базовая характеристика $\sigma_4 = \sigma_s$. Модель предсказывает существование области развития дефектов четырех уровней, дефектов пятого и шестого уровней не образуется. Разрушение по дефектам четвертого уровня происходит при максимальном значении напряжения, равном пределу текучести.

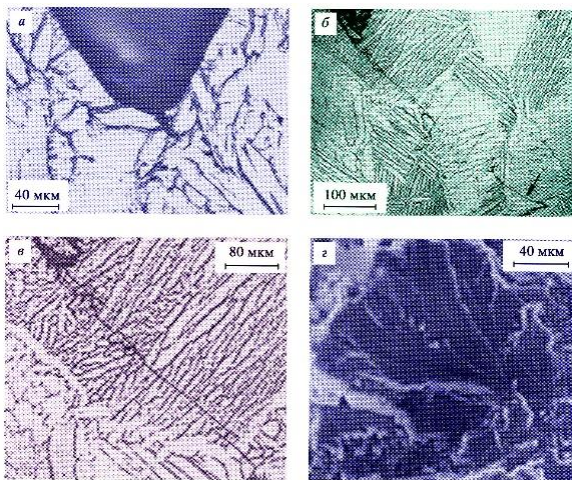
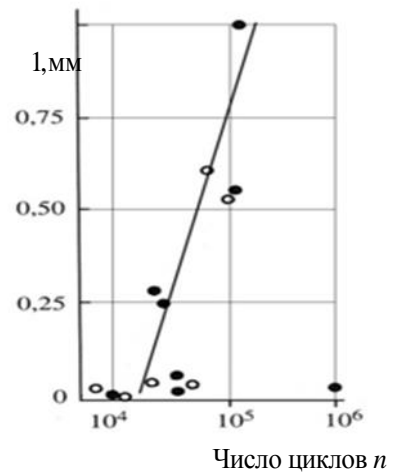
Цикл работ (Терентьев В.Ф., Хемпель М. и др., 1967-2016 гг.) посвящен исследованиям усталостного поведения легированной стали 34CuMo4 в условиях циклического симметричного изгиба (механические характеристики даны на рис.2.25). При оценке структурного состояния металлов строятся линии необратимой повреждаемости Френча (см. п.1.2 Главы 1). Серии образцов нагружают до различного числа циклов (меньших числа циклов N_f) с амплитудой выше предела выносливости σ_{-1} с последующим догружением с амплитудой, равной σ_{-1} , число циклов N_f . Если при этом образец разрушился, полагается, что он получил необратимое повреждение.



(г)



(е)



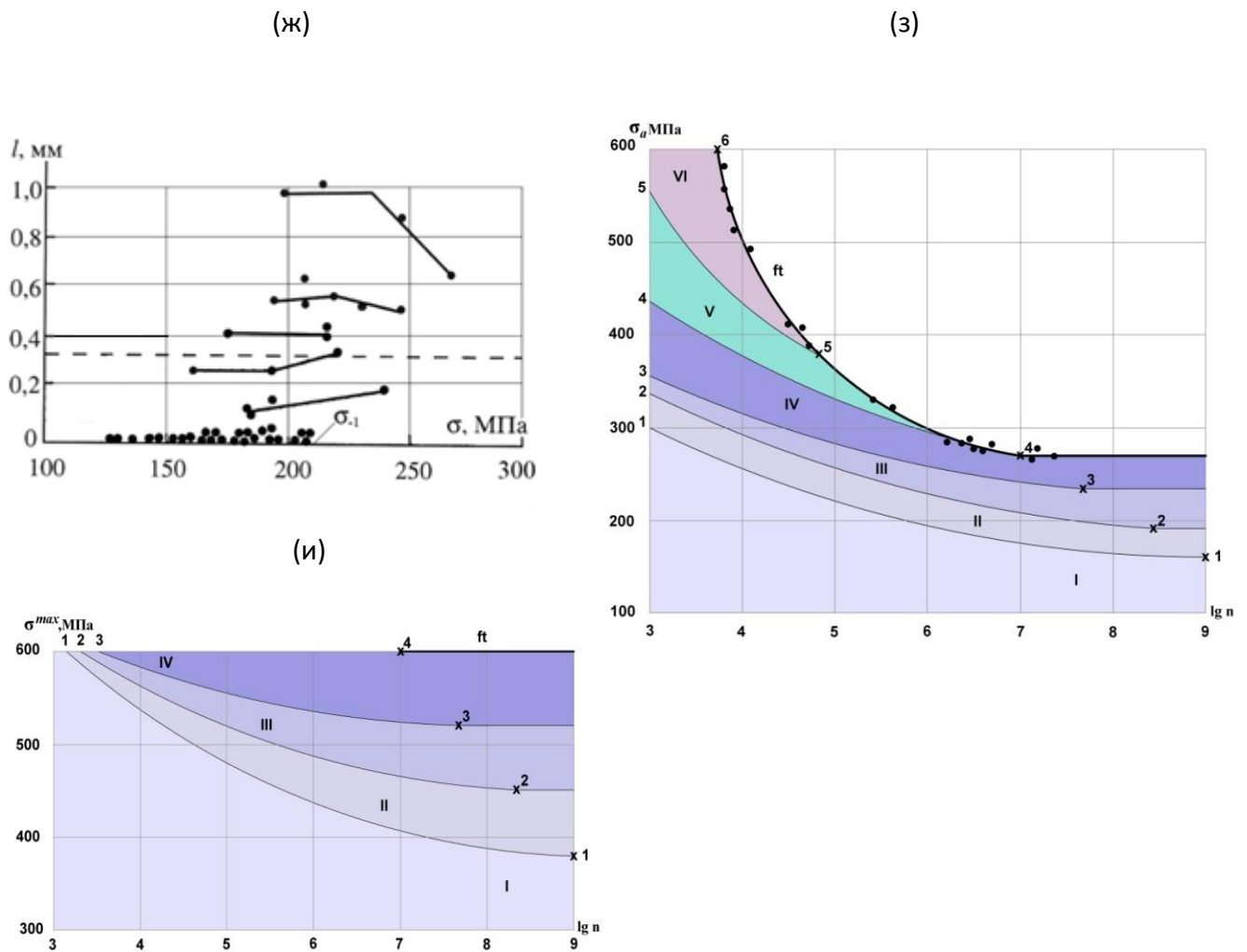


Рис. 2.24 Анализ развития усталостного разрушения для сплава АТ6, $\sigma_B = 650 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 600 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 260 \text{ МПа}$, $\sigma_0 = 400 \text{ МПа}$, $d_\alpha = 0.02 \text{ мм}$, $d_\beta = [0.3 - 0.5] \text{ мм}$

(а) – Стадии развития усталостного разрушения [19,21-24]; (б) – кинетическая диаграмма; (в) – Области I-VI и границы развития дефектов шести уровней для пульсирующего растяжения, $\alpha = 1$, кривая усталости по дефектам мезоуровня ft , 1-6 – базовые точки модели; (г) – зависимость между длиной микротрещин и числом циклов нагружения, (•) при $\sigma_a \in [126, 144] \text{ МПа}$, (○) при $\sigma_a \in [147, 168] \text{ МПа}$; (д) – микроструктура зоны в устье надреза при уровнях напряжений: (а) $\sigma_a = 131 \text{ МПа}$, $N = 1.35 \cdot 10^5$ циклов, размер дефектов $l_{f,3} \approx d_\alpha$; (б), (в) – $\sigma_a = 216 \text{ МПа}$, $N = 1.5 \cdot 10^5$ циклов, $l_{f,4} \approx d_\beta$; (г) – фасетки кристаллографического скола;

(е) – зависимость между длиной макротрещин и числом циклов нагружения, (•) при $\sigma_a \in [192, 198] \text{ МПа}$, (○) при $\sigma_a \in [207, 210] \text{ МПа}$; (ж) – размеры наблюдаемых дефектов в зависимости от амплитуды пульсирующего растяжения; (з), (и) – области развития I-VI и границы образования дефектов шести уровней при $\alpha = 0$ и $\alpha = 2.43$ соответственно

Физический смысл линии Френча в том, что она соответствует окончанию процесса развития разрушения в пределах зерна с образованием коротких макротрещин, в среднем, размера зерна металла, и начала активного процесса роста макротрещин на мезоуровне.

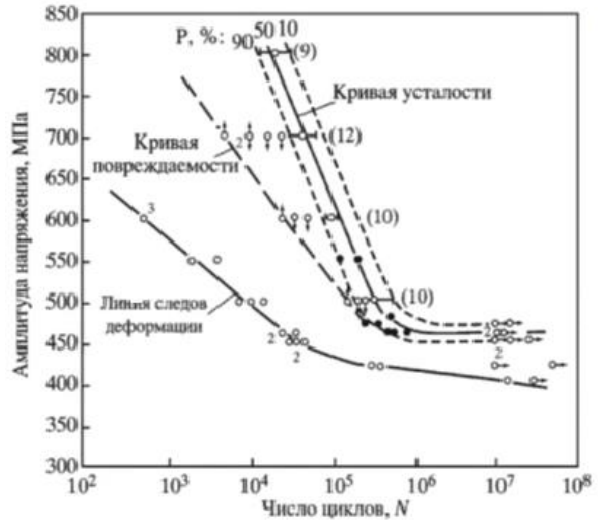
На рис. 2.25 (а,б) представлены экспериментальные кривые зависимости амплитуды напряжения от числа циклов на линии следов деформации (кривая, выше которой наблюдались микротрещины внутри и на поверхности зерен, линейных размеров в среднем, 0.01–0.04 мм), на линии повреждаемости Френча и кривая усталости стали по полному разрушению. По известным опытным данным согласно п.2.3 выбраны базовые характеристики модели. Построены области развития дефектов шести уровней, кривые 1-1– 3-3 на рис. 2.25 (в) находились из соотношений (2.29), (2.30) и (2.31) соответственно, кривые 4-4, 5-5 – по (2.52), (2.57). Кривая усталости по дефектам мезоуровня f_t на рис. 2.25 (в) определялась как решение уравнения (2.36) с учетом (2.35), (2.49) – (2.51), (2.53). Линия 2-2 на рис. 2.25 (в) соответствует экспериментальной кривой следов деформации на рис. 2.25 (б) и является началом развития дефектов второго уровня. Линия 4-4 на рис. 2.25 (в) отвечает линии Френча на рис.2.25 (б) и отражает достижение предельного состояния дефектами четвертого уровня.

Кривая усталости с рис. 2.25 (б) на рис. 2.25 (в) изображена кривой FT . Расчеты по модели для стали 34CrMo4 при пульсирующем растяжении, $\alpha = 1$, показаны на рис. 2.25 (г). На рис. 2.25 (д) представлены результаты расчетов для одноосного нагружения с параметром $\alpha = 1.86$, при котором для данной стали базовая характеристика $\sigma_4 = \sigma_s$. Модель предсказывает существование области развития дефектов четырех уровней, дефектов пятого и шестого уровней не образуется.

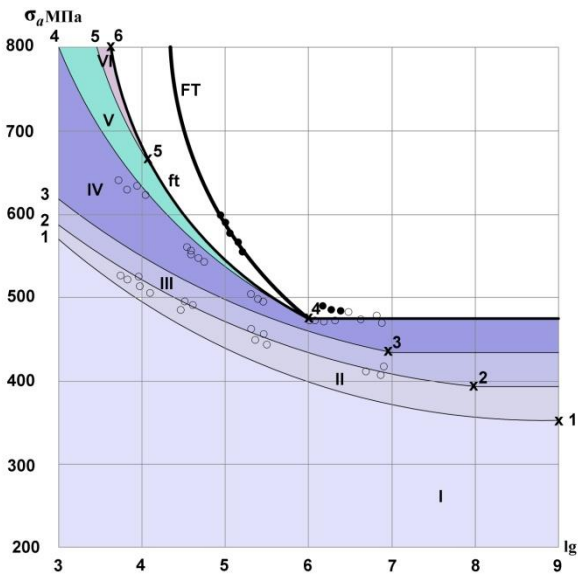
В работах Л.Р.Ботвиной исследовались закономерности зарождения и развития усталостных трещин для стали 08X14АН4МД при симметричном



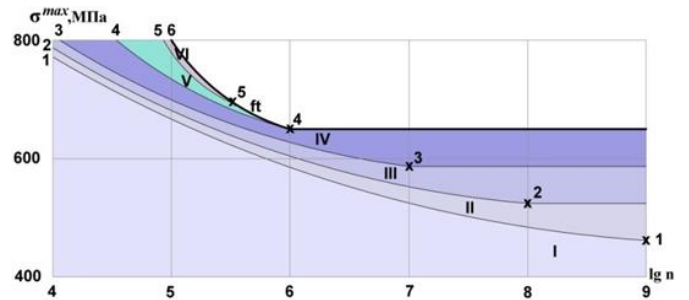
а



б



в



з

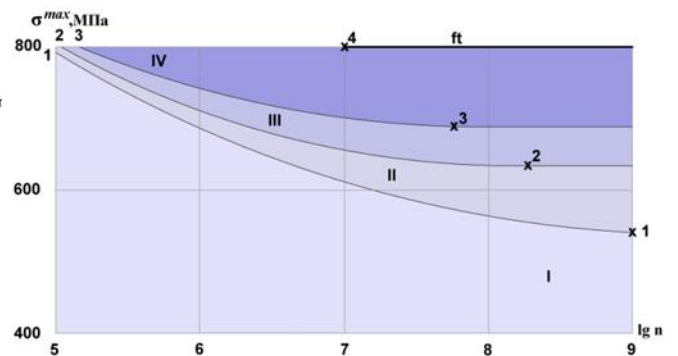


Рис. 2.25 Анализ развития усталостного разрушения для стали 34CuMo4, $\sigma_B = 950 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 800 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 470 \text{ МПа}$, $\sigma_0 = 648 \text{ МПа}$, $d = 0.12 \text{ мм}$, $\varepsilon_B = 11\%$

(а,б) – кривые усталости и линии Френча (кривые поврежденности), полые кружки со стрелкой вниз – разрушенные образцы, кружки со стрелкой вверх и вправо –

неразрушенные образцы, () - число образцов, (а) – шлифованные образцы, (б) – электрополированные образцы [184,185]; (в) – области I-VI и границы развития дефектов шести уровней для симметричного нагружения, $\alpha = 0$, кривая усталости по дефектам мезоуровня ft, экспериментальная кривая усталости по полному разрушению FT, 1-6 – базовые точки модели; (г,д) – области I-VI и границы развития дефектов шести уровней при $\alpha = 1, \alpha = 1.86$ соответственно, кривая усталости по дефектам мезоуровня ft, 1-6 – базовые точки модели

нагружении в интервале $n \in [10^4, 10^8]$ чисел циклов нагружения с частотой

100Гц. Микроструктура аустенитно-мартенситная коррозионностойкой стали 08X14АН4МД (механические характеристики указаны на рис. 2.27) включает пакетный α -мартенсит (составляет примерно 82%, с кубической кристаллической решеткой, состоит из перенасыщенного твердого раствора до 2% углерода в α -железе) в виде пластин, расположенных параллельно или пересекающихся под углами и имеющих в плоскости шлифа игольчатую форму. Длина наиболее крупных из них достигает $70 \text{ нм} (7 \cdot 10^{-5} \text{ мм})$, а толщина - около $15 \text{ нм} (1.5 \cdot 10^{-5} \text{ мм})$. Пластины мартенсита имеют высокую плотность дислокаций. Тонкими прослойками между пластинами служит остаточный аустенит (составляет 16% и представляет собой твердый раствор до 2% углерода в γ -железе с кристаллами феррита, имеющими гранцентрированную кубическую кристаллическую решетку). В экспериментах размеры и средние скорости развития трещин определялись по данным металлографии и фотографии на оптическом микроскопе с видеокамерой. Результаты опытов представлены на рис. 2.27 (1) для гладких образцов и образцов с концентраторами. Кинетическая диаграмма скорости роста хрупких макротрещин для стали изображена на рис.2.27 (4). На рис. 2.27 (2, а,б) представлены фрактографии микротрещин и пор средних размеров $l_2 \leq 4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$, образованных вдоль рек мартенсита, и многочисленные очаги их слияния по границам структурных элементов при амплитуде напряжений $\sigma_a = 150 \text{ МПа}$ и числе $n \geq 10^8$ циклов, на рис. 2.27 (2, в,г) – поры и микротре-

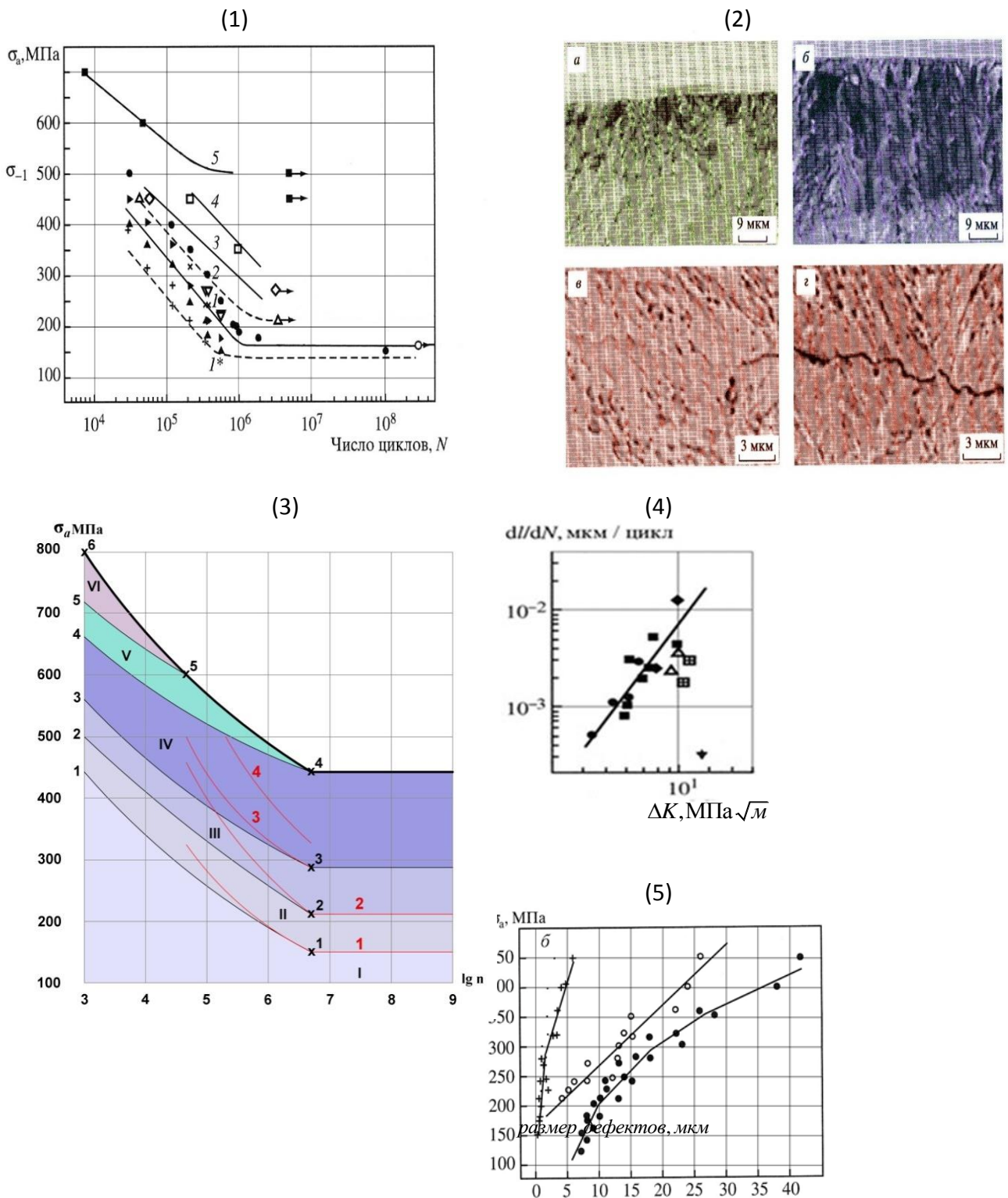


Рис. 2.27 Анализ развития усталостного разрушения для стали 08X14АН4МД, $\sigma_B = 1585 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 1290 \text{ МПа}$, $\sigma_{-1} = 450 \text{ МПа}$, $d = 0.02 \text{ мм}$, $\varepsilon_B = 21\%$,

(1) – кривая 1^* – зависимость амплитуды от числа циклов начала развития микротрещин, кривая 5 – кривая усталости образцов без надреза по хрупким трещинам, кривые 1 – 4 – кривые усталости образцов с различными концентраторами: 1 – $k = 5.82$, 2 – $k = 4.51$, 3 – $k = 3.11$, 4 – $k = 2.13$; (2) – (а,б) микрорельеф усталостного разрушения образца при

$\sigma_a = 150 \text{ МПа}$, $n \geq 10^8$ циклов, (в,г) микроструктура в области развивающейся макротрещины; (3) – Области I-VI и границы развития дефектов шести уровней для симметричного одноосного нагружения, кривая усталости по дефектам мезоуровня f_t , 1-6 – базовые точки модели; красные кривые 1–4 – кривые усталости образцов с надрезами 1 – 4 с рис. (1) соответственно; (4) – кинетическая диаграмма усталостного разрушения по экспериментальным данным в различных сечениях образца; (5) – зависимость размеров дефектов от амплитуды действующего напряжения

щины вблизи берегов хрупкой макротрещины. На рис. 2.27 (5) представлены опытные данные образовавшихся дефектов в диапазоне от микродефектов внутри зерна до дефектов размера нескольких зерен (дефектов мезоуровня) в зависимости от амплитуды напряжений при заданном числе циклов нагружения.

Результаты расчетов согласно представленной модели по соотношениям (2.30) – (2.60) и кривая усталости по уравнению (2.61) представлены на рис. 2.26 (3). Базовые характеристики найдены в соответствии с алгоритмом п.2.3.

Кривая 1-1 по модели соответствует кривой 1^* на рис.2.27 (1). Пары $(\sigma_4, N_4 = 5 \cdot 10^6 \text{ циклов})$,

$(\sigma_5, N_5 = 5 \cdot 10^4 \text{ циклов})$, $(\sigma_6, N_6 = 5 \cdot 10^3 \text{ циклов})$ выбраны с кривой 5 на рис. 2.27

(а). Теоретическая кривая усталости f_t соответствует кривой усталости по хрупким макротрещинам 5 с рис. 2.27 (1). Наблюдаемые в экспериментах дефекты (см рис.2.27 (5)) согласуются с областями развития дефектов по модели. Красным цветом на рис. 2.27 (3) нанесены экспериментальные кривые усталости образцов с концентраторами, в которых при сложном напряженном состоянии зарождались и развивались одиночные макротрещины.

Большой цикл работ Л.Р.Ботвиной, В.Ф.Терентьева посвящен исследованиям микроструктуры конструкционных сталях 3Г, 19Г (используются при изготовлении труб магистральных газопроводов) и 20Х13 (применяется при изготовлении допатов турбин энергетических установок)

методами акустической эмиссии при симметричных и несимметричных циклах одноосного нагружения.

Сталь 3Г имеет следующие механические свойства: $\sigma_b = 680 \text{ МПа}$, $\varepsilon_b = 23\%$, $\sigma_s = 560 \text{ МПа}$, предел выносливости при симметричном изгибе $\sigma_{-1} = 305 \text{ МПа}$, при симметричном сдвиге $\tau_{-1} = 180 \text{ МПа}$ и перлитно-ферритную структуру с неметаллическими включениями, ориентированными по направлению прокатки, размер зерна 0.03–0.04 мм. На рис. 2.27 представлен процесс накопления повреждений в этой стали при амплитуде пульсирующего растяжения $\sigma_a = 190 \text{ МПа}$ [220]. На начальной стадии имеются одиночные дефекты и полосы скольжения (рис.2.27 а), далее дефекты сливаются, увеличивается их концентрация и растет плотность полос скольжения (рис.2.27 б). Развитие дефектов приводит к образованию микротрещин (пор) внутри зерна и по границам зерен, их росту и слиянию с образованием макротрещин размеров зерен (рис.2.27 в). Параллельно с этим идет локализация процесса разрушения, которая обусловлена неравномерным накоплением дефектов. На рис.2.27 к отчетливо видны участки деформированного и недеформированного материала. В поверхностных слоях возникают устойчивые плоскости и линии сдвига в плоскостях действия максимального напряжения сдвига внутри зерна и зарождаются вязкие трещины (рис.2.27 г-ж), при этом плотность и размеры хрупких макротрещин увеличиваются (рис.2.27 л). На боковой поверхности образца в плоскости действия максимального напряжения сдвига возникает вязкая трещина (рис.2.27 м). В ее вершине формируется пластическая зона, в которой повторяется описанный выше процесс накопления хрупких повреждений. На рис. 2.28 у вершины трещины видны пачки полос скольжения, внутри которых формируются хрупкие макротрещины. При этом размеры полос увеличиваются (на рис.2.28 стрелкой показано направления роста полос) и плотность хрупких трещин растет.

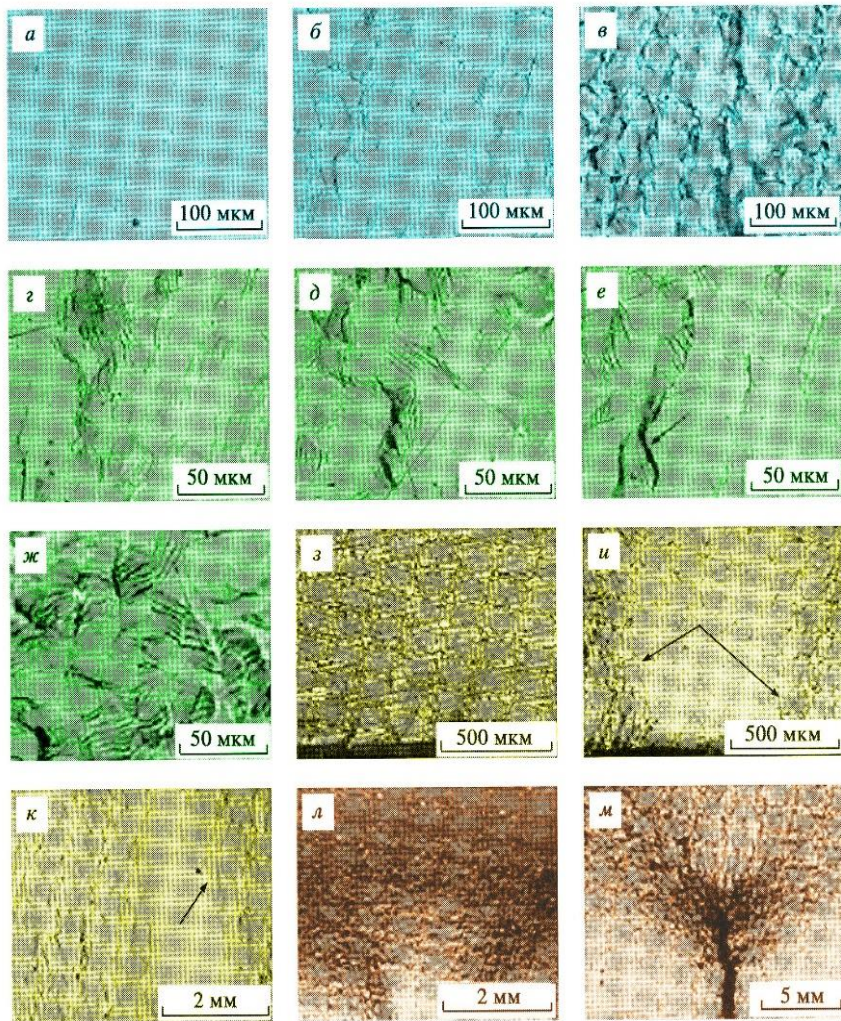


Рис. 2.27 Кинетика накопления повреждений в стали 3Г при пульсирующем растяжении

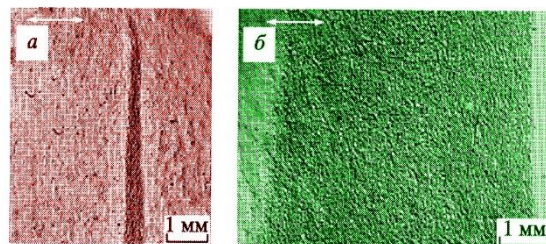


Рис. 2.28 Кинетика образования хрупких трещин в полосах скольжения

Сталь 19Г также имеет ферритно-перлитную структуру с наличием вытянутых включений сульфида марганца (см рис.2.29 а) со следующими характеристиками: $\sigma_{\theta} = 505 \text{ МПа}$, $\varepsilon_{\theta} = 30,1\%$, $\sigma_{\text{с}} = 400 \text{ МПа}$. Структура стали 20Х13 состоит из бейнита с цементитом с вкраплениями карбидов различной

величины (рис.2.29 б) и она имеет механические свойства: $\sigma_B = 532 \text{ МПа}$, $\varepsilon_B = 23\%$, $\sigma_S = 520 \text{ МПа}$.

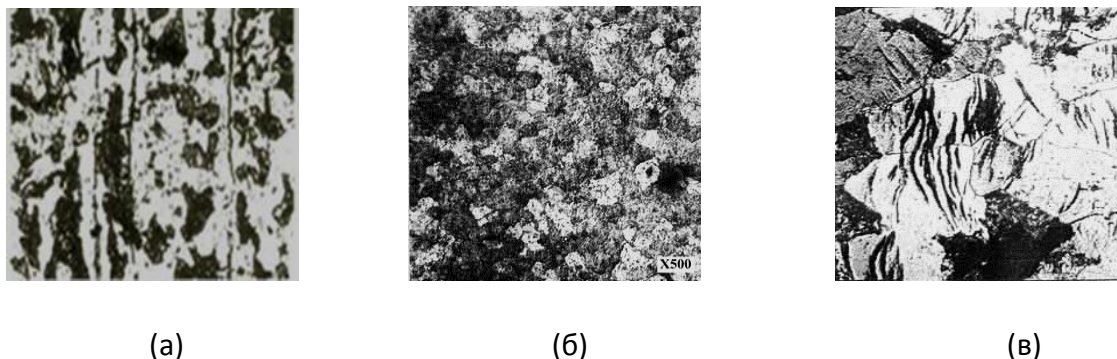


Рис. 2.29 Структура сталей 19 Г (а) и 20Х13 (б). Кинетика образования хрупких трещин в полосах скольжения, X500

На рис. 2.30 (а, б) для сталей 19Г и 20Х13 представлены линии Френча (пунктиром), кривая усталости по полному разрушению (сплошная черная линия) и экспериментальные результаты при осевом нагружении с несимметричным циклом, $\alpha = \frac{1}{9}$. Синяя линия 4-4 – кривая усталости, рассчитанная по (2.52) – (2.31) с учетом (2.21) – (2.23), (2.29) – (2.31), (2.48), (2.63) и известным данным. Она соответствует линии Френча и свидетельствует о том, что в металле завершился период развития разрушения на микроуровне и последующее нагружение связано с развитием разрушения на макроуровне. Фотография структуры ферритных зерен с образовавшимися короткими трещинами на линии Френча приведена на рис. 2.29 (в).

Обнаружено хорошее соответствие расчетов по модели с опытными данными [202] для малолегированной и малоуглеродистой (0.11% С) стали (характеристики представлены в табл. 1.2 первой главы) при одноосном симметричном нагружении.

Для малолегированной стали на рис.2.31 (1) представлены опытные данные (черным пунктиром – для крупнозернистой, сплошной линией – для мелкозернистой структур) и теоретические кривые, рассчитанные по

предлагаемой модели (желтые линии для крупнозернистой и синие линии – для мелкозернистой структур соответственно). Так, для мелкозернистой структуры получено следующее:

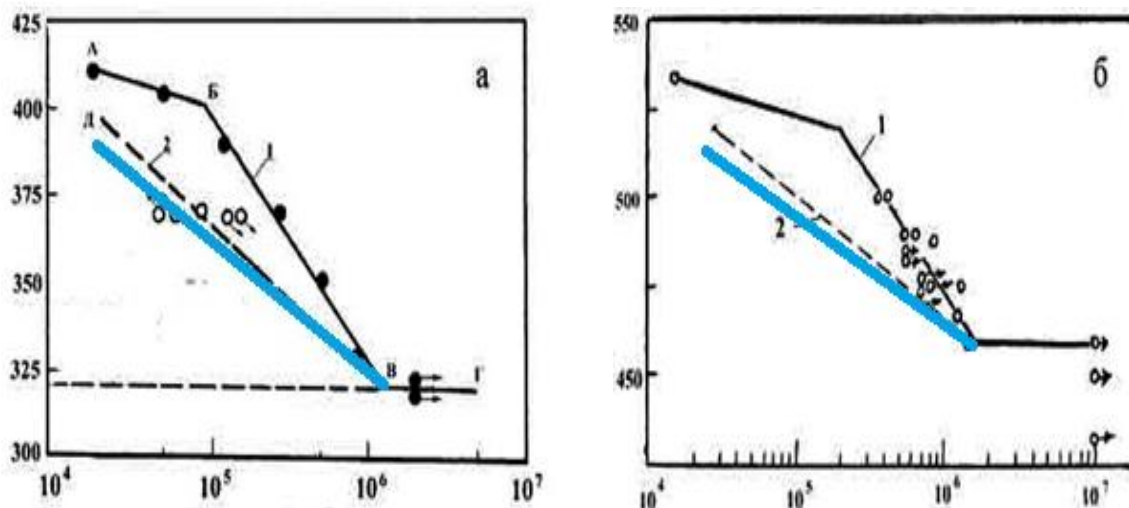


Рис. 2.30 Кривые усталости (1) и линии Френча (2) в координатах (σ^{\max} , МПа ; $\lg n$) для стали 19 Г (а) и для стали 20Х13 (б): полые кружки со стрелкой вверх и вправо – данные по неразрушенным образцам, полые кружки со стрелкой вниз – данные по разрушенным образцам [184,185], синим цветом отмечена кривая усталости по дефектам четвертого уровня, рассчитанная по модели

синяя линия 3 (по (2.9), $i = 3$) (зарождение дефектов 4 уровня) соответствует черной сплошной линии на рис. 2.31 (1) – опытными данным по зарождению трещин среднего размера $l = 0.025 \text{ мм}$; синяя линия 4 (по (2.11)) – рассчитанная по модели линия Френча и начало роста дефектов 5 уровня, которая согласовывается с опытными данными (черная сплошная линия при $l = 0.1 \text{ мм}$); синяя линия 5 (по 2.15)) (начало развития дефектов 6 уровня) соответствует черной сплошной линии при $l = 0.3 \text{ мм}$), и, наконец, синяя линия ft – теоретическая кривая усталости (по (2.35), (2.36)), которая соответствует экспериментальной кривой усталости (черной сплошной линией с опытными точками).

Для крупнозернистой структуры установлено следующее: желтая линия 3 (по (2.9), $i = 3$) (зарождение дефектов 4 уровня) соответствует черной

пунктирной линии – опытными данным по зарождению трещин среднего размера $l=0.1\text{мм}$; желтая линия 4 (по (2.11)) – линия Френча и начало роста дефектов 5 уровня описывает опытные данные при $l=0.3\text{мм}$ (черная пунктирная линия); желтая линия ft – теоретическая кривая усталости (по (2.35), (2.36)), которая соответствует экспериментальной кривой усталости (черной пунктирной линии с опытными точками).

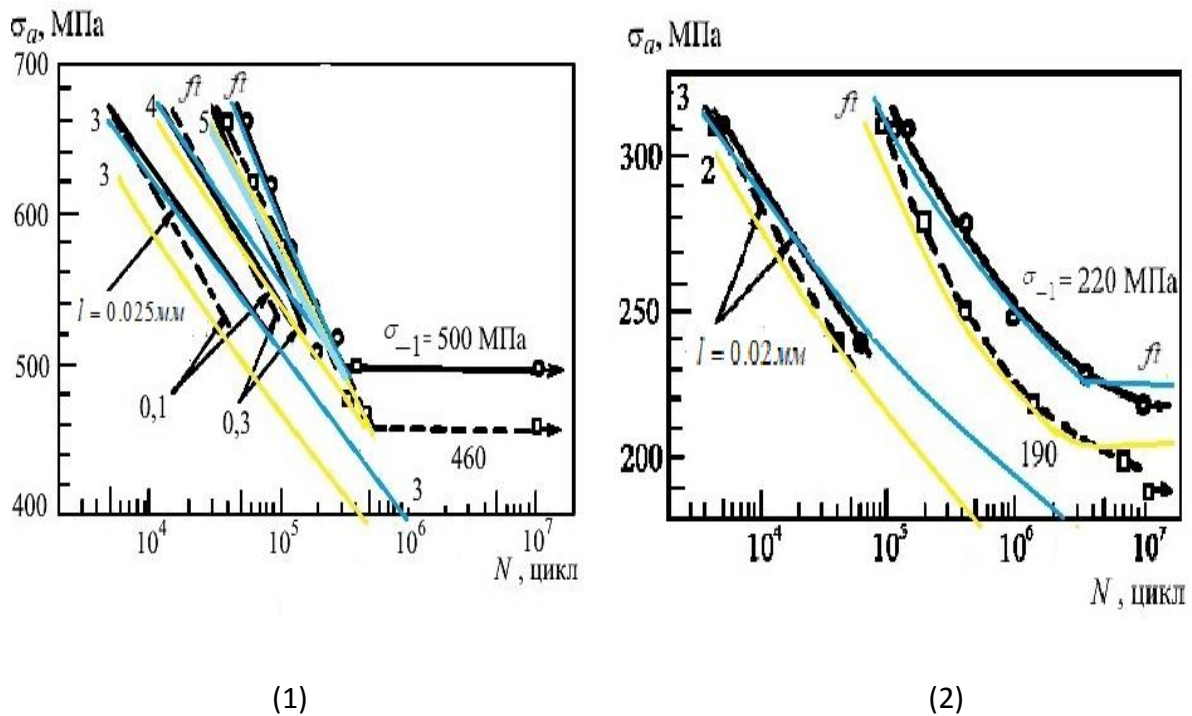


Рис. 2.31 Расчетные и экспериментальные [202] линии зарождения макротрещин и кривые усталости для малолегированной стали (1) и малоуглеродистой 0.11% С стали (2)

Для малоуглеродистой 0.11% С стали на рис.2.31 (2) изображены опытные данные по образованию трещин среднего размера $l=0.02\text{мм}$ и экспериментальная кривая усталости для крупнозернистой (черной пунктирной линией) и мелкозернистой (черной сплошной линией) структур соответственно. Рассчитанная по уравнению (2.9), $i=3$, синяя линия 3 соответствует началу образования дефектов 4 уровня и опытным данным по образованию трещин размера $l=0.02\text{мм}$ для мелкозернистой структуры соответственно. Желтая линия 2 (по (2.9), $i=2$) соответствует началу образования дефектов 3 уровня и опытным данным по зарождению трещин

размера $l = 0.02 \text{ мм}$ в малоуглеродистой стали крупнозернистой структуры. Желтая и синяя линии ft представляют теоретическую кривую усталости для крупнозернистой и мелкозернистой структур стали и хорошо соответствуют экспериментальным кривым усталости (черным пунктирной и сплошной линиям соответственно). Для исследованных сталей дефекты среднего размера $l \in [0.02, 0.025] \text{ мм}$ зарождаются при числе циклов, не превышающем 20% от общей долговечности материала.

ВЫВОДЫ по второй главе

1. Выполнено математическое моделирование процессов хрупкого усталостного разрушения металлов и сплавов на разных масштабных уровнях при одноосном и двухосном равномерном нагружении и сдвиге с симметричным и асимметричным циклами напряжений как сумма двух случайных процессов разрушения.
2. Предлагаемая модель описывает процессы хрупкого разрушения металлов и сплавов, первоначально имеющих дефекты кристаллической решетки металлургического и технологического происхождения (точечные, двумерные и трехмерные), но не имеющих макротрещин, в областях многоциклового и гигациклового усталости при $N_f \in [5 \cdot 10^3, 10^{10}]$ циклов. На основе анализа основных научных результатов Главы 1, сформулированы основные гипотезы теории, которые состоят в следующем:
 - усталостное разрушение металлов определяется независимыми процессами хрупкого и вязкого разрушений как суммы двух случайных процессов;
 - процесс хрупкого усталостного разрушения рассматривается на шести масштабных уровнях, отвечающих разным стадиям развития хрупкого разрушения в соответствии со стадиями эволюции структуры металла и по разным физическим механизмам; вводится классификация хрупкого разрушения по дефектам i -го уровня, $i = 1, \dots, 6$;
 - образование дефектов каждого уровня происходит вследствие последовательного зарождения, развития и слияния дефектов предыдущих уровней;
 - дефекты i -го масштабного уровня характеризуются линейным размером и плотностью в некотором представительном объеме тела; для каждого уровня вводится усредняющая функция, зависящая от размера и плотности дефектов, отражающая развитие процесса нагружения;

предельное состояние дефекта i -го уровня определяется достижением этой функцией определенного предельного значения;

– образование дефектов i -го уровня начинается с достижения усредняющей функцией $(i-1)$ -го уровня предельного значения в момент времени

$$t_i, i=1, \dots, 6;$$

– поврежденность на i -ом уровне определяется как отношение усредняющей функции i -го уровня к своему предельному значению; для каждого момента времени τ поврежденность является случайной величиной;

– вероятность разрушения на i -ом масштабном уровне (по дефектам i -ого уровня) в момент времени τ определяется как вероятность достижения усредняющей функцией i -ого уровня предельного значения (дефектами i -го уровня – предельного состояния), $\tau \in [0, t]$.

Физическая интерпретация вышеизложенной системы гипотез для построения модели делает такой подход достоверным.

3. В качестве основных понятий введены понятия усредняющих функций и вероятностей достижения их предельных значений.

4. Сформулированная система гипотез и методология механики деформируемого твердого тела позволила разработать теорию усталостного разрушения. При трех видах одночастотного плоского напряженного состояния: одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении, предложена система рекуррентных определяющих соотношений для вероятностей разрушения на каждом уровне, позволяющая описывать процесс развития хрупкого разрушения в виде ограниченного количества шагов до возникновения одиночных макротрещин конечной длины. В этих соотношениях в качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения, а материальные функции определяются по экспериментальным данным по усталостной прочности с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин.

Сформулировано условие для начала развития дефектов каждого уровня.

5. Предложена и реализована методика идентификации материальных функций, входящих в определяющие соотношения модели.

6. Введено понятие вероятности разрушения по дефектам мезоуровня как суммы вероятностей независимых событий. Получены кривые усталости как результат последовательного образования, развития и слияния дефектов шести уровней типа микро- и макротрещин.

Выписано уравнение для долговечности металла по дефектам мезоуровня.

7. Предложены выражения для зависимостей материальных функций от параметра асимметрии цикла в соответствии с экспериментально обоснованными современными критериями усталостной прочности металлов.

8. Достоверность модели обеспечивается сопоставлением расчетных и опытных данных для большого класса металлов и сплавов, применяемых в промышленности. В качестве примера в работе представлены некоторые полученные результаты. Проведена классификация наблюдаемых в экспериментах дефектов и стадий процесса разрушения. По имеющимся данным найдены материальные константы модели. Построены области развития дефектов и показано соответствие результатам экспериментальных исследований с выходом на кривые усталости по дефектам мезоуровня и полному разрушению (с учетом дороста хрупких трещин по соотношению Пэриса), которые удовлетворительно соответствуют опытным данным по усталости и кривым Велера для исследованных материалов. Подтверждена схема расчета по предложенным определяющим соотношениям. 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 предложенного подхода. Для ряда материалов по данным известных работ систематизированы фотографии микроструктуры, сделанные в процессе нагружения, а по модели определена

остаточная долговечность металла с накопленным уровнем дефектов. Исследована связь стадийности развития дефектов на разных уровнях с изменением физико-механических свойств в процессе нагружения.

Предложенной моделью предсказываются минимальные значения долговечности. До полного разрушения материала 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.

ГЛАВА 3. Теория усталостного масштабно-структурного разрушения металлов при пропорциональном нагружении

Данная глава посвящена изучению процессов усталостного разрушения металлов на разных структурно-масштабных уровнях при различных простых циклических нагружениях следующего вида (см. (2.1)):

$$\sigma_{kk}(\tau) = \alpha_k \sigma_a f(\tau), f(\tau) = \alpha + \sin(\omega\tau + \theta), k = 1, 2, 3, \tau \in [0, t] \quad (3.1)$$

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

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

В Главе 2 исследованы различные частные случаи процессов (3.1) при плоском напряженном состоянии: одноосное нагружение (2.2), сдвиг (2.3) и двухосное нагружение (2.4) с симметричным и несимметричным циклами.

В этой главе формулируются определяющие соотношения теории для общего случая трехмерного нагружения (3.1).

3.1. Определяющие соотношения теории и кривая усталостного разрушения по дефектам мезоуровня

При трех видах напряженного состояния (2.1), (2.2) – (2.4) в предположении равномерного распределения дефектов i -го масштабного уровня в объеме V_c вероятности разрушения по дефектам i -го уровня $Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$, $i = 1, \dots, 6$, определяются соотношениями (2.8) – (2.19) таблицы 2.1 с учетом выражений (2.20). Для этих видов нагружения в определяющих соотношениях в качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения и

вводится система материальных функций $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2, N_i, \omega)$, $i=1, \dots, 6$, $\alpha_2 = 0, 1, -1$, при которых дефект i -го уровня достигает предельного состояния и функция l_i^* предельного значения $l_{f,i}^*$, $i=1, \dots, 6$. Метод определения этих базовых функций предложен в п.2.3.

Для одноосного нагружения, $\alpha_2 = \alpha_3 = 0$, сдвига, $\alpha_2 = -1, \alpha_3 = 0$, и двухосного нагружения, $\alpha_2 = 1, \alpha_3 = 0$, с произвольным параметром α также справедливы определяющие соотношения (2.8) – (2.19). В этих случаях под переменной σ_a понимается амплитуда максимального главного напряжения, а от параметра асимметрии цикла α зависят материальные функции $\sigma_i = \sigma_i(\alpha, \alpha_2, N_i, \omega)$, $i=1, \dots, 6$. Метод идентификации этих функций изложен в п.2.5 Главы 2.

Этот принцип применяется и при построении выражения для вероятности разрушения по дефектам i -го уровня $Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$, $i=1, \dots, 6$, в случае произвольного простого симметричного нагружения (3.1). Вид определяющих соотношений сохраняется. А именно, для нагружений (3.1) справедливы соотношения (2.8) – (2.19), где в качестве переменной σ_a рассматривается амплитуда максимального главного напряжения. При этом возникает необходимость определять систему базовых функций: $\sigma_i = \sigma_i(\alpha, \alpha_3, \alpha_2, N_i, \omega)$, $i=1, \dots, 6$, которая в данном общем случае учитывает отношения главных напряжений и параметр асимметрии цикла для нагружения (3.1). Определению этой системы посвящен п.3.2 этой Главы.

В рекуррентной системе определяющих соотношений для вероятности разрушения $Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$, $i=1, \dots, 6$, последующее уравнение связано с предыдущим через числа циклов $n_{i+1} = n_{i+1}(\sigma_a)$ начала разрушения $(i+1)$ -

го масштабного уровня, для определения которых сформулированы уравнения (2.9), (2.11), (2.15), (2.19).

Вероятность разрушения по дефектам мезоуровня $Q = Q(\sigma_a, n)$ определяется выражением (2.35), в котором функции $Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$ рассматриваются в виде (2.12) – (2.14), (2.16) – (2.18). Кривая усталостного разрушения по дефектам мезоуровня определяется уравнением (2.36), из которого находится долговечность металла по дефектам мезоуровня $n_f = n_f(\sigma_f)$ для произвольного процесса (3.1). При этом числа циклов n_f при амплитуде максимального главного напряжения σ_f определяют начало развития трещин, описываемого механикой разрушения.

3.2. Система материальных функций для произвольного пропорционального нагружения

В рассматриваемой модели система материальных функций $\sigma_i = \sigma_i(\alpha, \alpha_3, \alpha_2, N_i, \omega)$, $i = 1, \dots, 6$, строится по материальным константам при одноосном нагружении, сдвиге и двухосном равномерном нагружении с учетом отношения главных напряжений α_k , $k = 2, 3$, и параметра асимметрии цикла α на основе известных экспериментально обоснованных критериев усталостной прочности металлов следующим образом.

Рассмотрим симметричные трехмерные простые процессы нагружения (3.1), $\alpha = 0$. Материальные функции предлагается представлять в следующем виде:

$$\sigma_i = \sigma_i(N_i, \omega) \tilde{\sigma}_i(\alpha_2, \alpha_3, \tilde{\eta}_i, \hat{\eta}_i) \quad i = 1, \dots, 6, \quad (3.2)$$

где

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

Выражение (3.2) строится, как принято в механике деформируемого твердого тела, выделяя базовую функцию при одноосном нагружении $\sigma_i(\alpha_2=0, N_i, \omega) \equiv \sigma_i(N_i, \omega)$, $i=1, \dots, 6$, и функцию, зависящую от отношения главных напряжений и базовых функций при сдвиге $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2=-1, N_i, \omega)$ и двухосном нагружении $\sigma_i(\alpha_2=1, N_i, \omega)$, нахождению которых посвящен п.2.3 Главы 2.

Для дефектов первых трех уровней при расчетах применяются такие выражения:

$$\text{при } i=1, 2, 3 \quad \tilde{\eta}_i = \frac{1}{3}(\tilde{\eta}_4(i-1) + 4 - i), \quad \hat{\eta}_i = \frac{1}{3}(\hat{\eta}_4(i-1) + 4 - i) \quad (3.3)$$

Рассмотрим симметричные нагружения при плоском напряженном состоянии (3.1), $\alpha_3 = 0$. Для пластичных материалов зависимость функции $\tilde{\sigma}_i = \tilde{\sigma}_i(\alpha_2, \tilde{\eta}_i, \hat{\eta}_i)$ в (3.2) от вида напряженного состояния (т.е. от параметра α_2) предлагается представлять таким образом:

$$\text{для } -1 \leq \alpha_2 \leq 0 \quad \tilde{\sigma}_i = \left[(1 + \alpha_2)^2 - \alpha_2 \tilde{\eta}_i^2 \right]^{-1/2}, \quad i=1, \dots, 6 \quad (3.4)$$

$$\text{для } 0 \leq \alpha_2 \leq 1 \quad \tilde{\sigma}_i = \left[(1 - \alpha_2)^2 + \alpha_2 \hat{\eta}_i^2 \right]^{-1/2}, \quad i=1, \dots, 6 \quad (3.5)$$

Для хрупких материалов записываются такие выражения для функции $\tilde{\sigma}_i = \tilde{\sigma}_i(\alpha_2, \tilde{\eta}_i, \hat{\eta}_i)$:

$$\text{для } -1 \leq \alpha_2 \leq 0 \quad \tilde{\sigma}_i = \left[1 - \alpha_2(\tilde{\eta}_i - 1) \right]^{-1}, \quad (3.6)$$

$$\text{для } 0 \leq \alpha_2 \leq 1 \quad \tilde{\sigma}_i = \left[1 + \alpha_2(\hat{\eta}_i - 1) \right]^{-1}, \quad i=1, \dots, 6 \quad (3.7)$$

Выбор выражений (3.4) – (3.7) обеспечивается проведенным сравнением предсказаний циклической прочности по предлагаемой теории с известными

современными критериями и представительным количеством экспериментов. Так, известные критерии Гафа, Полларда, Ли для симметричного изгиба (или растяжения-сжатия) с кручением пластичных материалов, имеющие широкое экспериментальное обоснование (см., например, обзоры [33,50,251,253]) в принятых здесь обозначениях имеют вид:

$$\sigma_f = \sigma_{-1}(N_f, \omega) \left[(1 + \alpha_2)^2 - \alpha_2 \tilde{\eta}^2 \right]^{-1/2}, \quad \tilde{\eta} = \frac{\sigma_{-1}(N_f, \omega)}{\tau_{-1}(N_f, \omega)}, \quad (3.8)$$

где величины $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(N_f, \omega)$ и $\tau_{-1} = \tau_{-1}(N_f, \omega)$ – пределы усталости по полному разрушению при симметричных одноосном нагружении и сдвиге соответственно при числе циклов N_f и заданной частоте ω . Вид базовых функций σ_i в (3.2) с учетом (3.4), $i=4,5,6$, совпадает с правой частью уравнения (3.8).

Карпинтери, Спаньоли и др. [239] предлагают следующую зависимость между максимальным касательным напряжением и нормальным напряжением на площадке действия максимального касательного напряжения при разрушении в условиях изгиба (или растяжения-сжатия) с кручением пластичных материалов:

$$\sigma_f = \sigma_{-1}(N_f, \omega) \left[\tilde{\eta}^2 \left(\frac{1 - \alpha_2}{2} \right)^2 + \left(\frac{1 + \alpha_2}{2} \right)^2 (4 - \tilde{\eta}^2) \right]^{-1/2}, \quad \tilde{\eta} = \frac{\sigma_{-1}(N_f, \omega)}{\tau_{-1}(N_f, \omega)} \quad (3.9)$$

Соотношение (3.9) удовлетворяет экспериментальным данным для большого ряда материалов. В п.3.4 этой Главы проводится анализ усталостной прочности материалов по критерию (3.9) и по предлагаемой модели с учетом (3.2) – (3.4).

Согласно уравнению Гафа и общему подходу Завойчинского [33,50] для симметричного двухосного нагружения имеет место следующий критерий циклической прочности пластичных материалов:

$$\sigma_f = \sigma_{-1}(N_f, \omega) \left[(1 - \alpha_2)^2 + \alpha_2 \hat{\eta}^2 \right]^{-1/2}, \quad \hat{\eta} = \frac{\sigma_{-1}(N_f, \omega)}{\hat{\sigma}_{-1}(N_f, \omega)}, \quad (3.10)$$

где величины $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(N_f, \omega)$ и $\hat{\sigma}_{-1} = \hat{\sigma}_{-1}(N_f, \omega)$ - пределы усталости по полному разрушению при симметричных одноосном и двухосном нагружениях соответственно при числе циклов N_f и заданной частоте ω . Вид выражения (3.10) совпадает с выражением (3.2) с учетом (3.5), $i=4,5,6$.

Отметим, что в литературе не представлено достаточное количество экспериментов по симметричному двухосному нагружению металлов. Экспериментальная база, в основном, опирается на данные по разрушению элементов натуральных конструкций и анализ аварий.

Амплитуда максимального главного напряжения σ_f при разрушении хрупких материалов в условиях симметричного растяжения-сжатия и кручения в работах МакДиармида, Матаке, Финдли, Данг Вана, Зеннера, Ли, Пападопулоса, Кенмена, Завойчинского определяется таким образом:

$$\sigma_f = \sigma_{-1}(N_f, \omega) \left[1 - \alpha_2 (\tilde{\eta} - 1) \right]^{-1}, \quad \tilde{\eta} = \frac{\sigma_{-1}(N_f, \omega)}{\tau_{-1}(N_f, \omega)}, \quad (3.11)$$

вид этого выражения совпадает с выражением (3.2) с учетом (3.6), $i=4,5,6$.

Критерии вида (3.11) имеют широкое экспериментальное обоснование.

Подходы Сайнса, Кросслэнда, Какуно, Кавады, Деперо, основанные на комбинации наибольших значений интенсивности напряжений и среднего напряжения, для хрупких материалов при симметричном растяжении-сжатии

и кручении в выбранных обозначениях представляются уравнением такого вида:

$$\sigma_f = \sigma_{-1}(N_f, \omega) \left[\frac{\tilde{\eta}}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + \alpha^2 - \alpha} + (1 + \alpha_2) \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\sqrt{3}} \right) \right]^{-1}, \quad \tilde{\eta} = \frac{\sigma_{-1}(N_f, \omega)}{\tau_{-1}(N_f, \omega)} \quad (3.12)$$

В качестве примера в п.3.4 представлены результаты расчетов по критерию (3.12) и предложенной модели усталостного разрушения.

Для хрупких материалов при изгибе с кручением наибольшее расхождение расчетов по предлагаемой теории наблюдается с критерием циклической прочности Гафа и Поларда следующего вида:

$$\sigma_f = \sigma_{-1}(N_f, \omega) \left[\alpha_2 |\tilde{\eta}^2 + (1 + \alpha_2)^2 (\tilde{\eta} - 1) + (2 - \tilde{\eta})(1 + \alpha_2) \right]^{-1/2}, \quad \tilde{\eta} = \frac{\sigma_{-1}(N_f, \omega)}{\tau_{-1}(N_f, \omega)} \quad (3.13)$$

Для материалов, удовлетворяющих критерию прочности (3.13), есть необходимость уточнять выбор базовых функций теории.

В случае двухосного симметричного нагружения хрупких материалов при $0 \leq \alpha_2 \leq 1$ согласно подходам МакДиармида, Данг Вана, Завойчинского амплитуда максимального главного напряжения при разрушении определяется так:

$$\sigma_f = \sigma_{-1}(N_f, \omega) \left[1 + \alpha_2 (\hat{\eta} - 1) \right]^{-1}, \quad \hat{\eta} = \frac{\sigma_{-1}(N_f, \omega)}{\hat{\sigma}_{-1}(N_f, \omega)}, \quad (3.14)$$

вид которого совпадает с (3.2) с учетом (3.7), $i = 4, 5, 6$.

В случае простого симметричного трехмерного нагружения общего вида

(3.1) базовые функции $\tilde{\sigma}_i = \tilde{\sigma}_i(\alpha_2, \alpha_3, \tilde{\eta}_i, \hat{\eta}_i)$, $i = 1, \dots, 6$, в выражении (3.2)

предлагается выбирать в таком виде (согласно подходу [50]):

для хрупких материалов

$$\begin{aligned} \text{при } -1 \leq \alpha_2 \leq 0 \quad \tilde{\sigma}_i &= \left[6 - \tilde{\eta}_i - \alpha_2 (2\tilde{\eta}_i - 6) + \alpha_0 (3\tilde{\eta}_i - 15) \right]^{-1}, \\ \text{при } 0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha_3 \geq 0 \quad \tilde{\sigma}_i &= \left[1 + \alpha_2 (\hat{\eta}_i - 1) - \alpha_3 (\hat{\eta}_i - 1) \right]^{-1}, \\ \text{при } 0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha_3 < 0 \quad \tilde{\sigma}_i &= \left[6 - \tilde{\eta}_i - \alpha_3 (2\tilde{\eta}_i - 6) + \alpha_0 (3\tilde{\eta}_i - 15) \right]^{-1}; \end{aligned} \quad (3.15)$$

для пластичных материалов

$$\begin{aligned} \text{при } -1 \leq \alpha_2 \leq 0 \quad \tilde{\sigma}_i &= \left[3\alpha_0 (1 + \alpha_2) + \frac{1}{2} \tilde{\eta}_i^2 (1 - \alpha_2 - 3\alpha_0) \right]^{-1/2}, \\ \text{при } 0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha_3 \geq 0 \quad \tilde{\sigma}_i &= \left[3\alpha_0 (1 + \alpha_3) + \frac{1}{2} \tilde{\eta}_i^2 (1 - \alpha_3 - 3\alpha_0) \right]^{-1/2}, \\ \text{при } 0 \leq \alpha_2 \leq 1, \alpha_3 < 0 \quad \tilde{\sigma}_i &= \left[3\alpha_0 (1 + \alpha_3) + \frac{1}{2} \tilde{\eta}_i^2 (1 - \alpha_3 - 3\alpha_0) \right]^{-1/2}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\text{где } \tilde{\eta}_i = \frac{\sigma_i(N_i, \omega)}{\sigma_i(\alpha_2 = -1, N_i, \omega)}, \quad \hat{\eta}_i = \frac{\sigma_i(N_i, \omega)}{\sigma_i(\alpha_2 = 1, N_i, \omega)}, \quad i = 1, \dots, 6$$

Таким образом, для нагружений (3.1) с симметричным циклом система (2.8) – (2.19) является системой определяющих соотношений для вероятности разрушения $Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$, $i = 1, \dots, 6$, в качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения σ_a и базовые функции задаются выражениями (3.2), (3.3), (3.15), (3.16), которые учитывают отношение амплитуд главных напряжений и усталостные свойства материала.

Перейдем к рассмотрению произвольных трехмерных нагружений вида (3.1), в общем случае, с асимметричным циклом напряжений. В п.2.5 представлены выражения (2.62), (2.63) для частных случаев нагружений: одноосного нагружения, сдвига и двухосного равномерного нагружения. Исходя из метода построения, принятого в данной работе (см., например,

выражение (2.62) или (3.2)), в общем случае нагружения (3.1) материальные функции в этом случае предлагается определять в таком виде:

$$\sigma_i = \sigma_i(N_i, \omega) \tilde{\sigma}_i(\alpha_2, \alpha_3, \tilde{\eta}_i, \hat{\eta}_i) \bar{\sigma}_i(\alpha, \eta_i), \quad i=1, \dots, 6, \quad (3.17)$$

$$\bar{\sigma}_i(\alpha, \eta_i) = \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right) |\alpha| + 1, \quad (3.18)$$

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

В выражения (3.17), (3.18) входят следующие материальные константы: для одноосного симметричного нагружения $\sigma_i = \sigma_i(N_i, \omega)$, для одноосного пульсирующего нагружения $\sigma_i^0 = \sigma_i^0(N_i, \omega)$, для симметричного сдвига $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2 = -1, N_i, \omega)$, для симметричного равномерного двухосного нагружения $\sigma_i = \sigma_i(\alpha_2 = 1, N_i, \omega)$. Функции $\tilde{\sigma}_i = \tilde{\sigma}_i(\alpha_2, \alpha_3, \tilde{\eta}_i, \hat{\eta}_i)$ в общем случае задаются выражениями (3.15), (3.16).

В выражениях (3.17), (3.18) сделано предположение, что $\eta_i(\alpha_2) = Const$, $i=1, \dots, 6$, т.е. равны отношения материальных констант при симметричном к пульсирующему нагружениям для всех базовых нагружений (при $\alpha_2 = 0, -1, 1$). Для большинства исследованных материалов это предположение удовлетворительно согласуется с опытными данными. Возможно построение и более сложной зависимости от параметра асимметрии цикла α с учетом разных значений $\eta_i = \eta_i(\alpha_2)$.

В общем случае произвольного простого процесса (3.1) система (2.8) – (2.19) является системой определяющих соотношений для вероятностей усталостного разрушения $Q_i = Q_i(\sigma_a, n, n_i)$, $i=1, \dots, 6$, по дефектам i -го

масштабного уровня, в которых в качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения σ_a и базовые функции задаются выражениями (3.17), (3.18) с учетом (3.3), (3.15), (3.16).

3.3. Анализ экспериментальных данных по развитию усталостного разрушения металлов при различных процессах плоского напряженного состояния

Автором проведены численные исследования усталостного разрушения по предложенной модели для различных конструкционных сталей, некоторых алюминиевых, магниевых и титановых сплавов с хрупким характером разрушения и со смешанным характером разрушения в области многоциклового усталости с различными размерами зерен при различных простых процессах в условиях плоского напряженного состояния.

В качестве примера на рис.3.1 и в таблице 3.1 приведены результаты анализа развития усталостного разрушения для стали 12ХН2А при симметричном одноосном нагружении с кручением. В таблице 3.1 приведены результаты расчета в зависимости от α_2 по теории (на рис. 3.1 представлена кривой ft) и по критерию (3.11) (на рис.3.1 представлен красной линией), а также известные опытные данные в обозначениях: $\sigma_{f,T}$, $\sigma_{f,\text{Э}}$, $\sigma_{f,T}^*$, которые соответствуют амплитуде максимального главного напряжения по предложенной модели, согласно экспериментальным данным и по критерию (3,11), отнесенной к $\sigma_{-1} = 390 \text{ МПа}$ в зависимости от долговечности N_f .

В п. 2.8 Главы 2 был проведен анализ одноосного нагружения и сдвига для этой стали (см. рис. 2.11, 2.12). В частности, при одноосном нагружении и сдвиге построены определяющие соотношения для вероятностей разрушения, уравнения для чисел циклов начала развития дефектов каждого уровня и кривая усталости FT по полному разрушению (с учетом дороста хрупких

трещин по соотношению Пэриса), которая хорошо соответствует опытным данным [153]. Согласно предложенной модели для одноосного нагружения с кручением в эти соотношения подставляются базовые функции, найденные по методике п.2.3 с учетом отношений (3.2), (3.3), (3.6) и известных данных для этой стали (см. п.2.8 Главы 2). Результаты расчетов представлены на рис. 3.1 для разных параметров асимметрии цикла в координатах $(\sigma_a, \lg n)$. Из рисунка видно, как меняются области развития и границы начала образования дефектов каждого уровня, в зависимости от асимметрии цикла. Например, по графикам на рис. 3.1 можно при заданных отношении α_2 и числе циклов n_i найти амплитуды σ_a возникновения дефектов каждого уровня.

В п.2.8 построены кривые усталости ft по дефектам и FT по окончательному разрушению для одноосного нагружения ($\alpha_2 = 0$) и сдвига ($\alpha_2 = -1$). На рис.3.1 приведены построенные кривые усталости для одноосного нагружения с кручением в зависимости от асимметрии цикла. Красная линия на рис. 3.1 соответствует кривой усталости МакДиармида, Матаке и др. (3.11), желтая линия – кривая усталости Гафа, Полларда (3.13), линия цвета морской волны – кривая усталости Сайнса, Кросслэнда и др. (3.12). Расчетная кривая усталости ft по макротрещинам мезоуровня определяет наименьшую усталостную прочность по образованию хрупких усталостных трещин и построена как результат последовательного образования, развития и слияния дефектов микро- и мезоуровней. Наилучшее соответствие расчетов для данной стали наблюдается с кривой усталости МакДиармида, Матаке и др. При $\alpha_2 = 0$ и $\alpha_2 = -1$ кривые усталостного разрушения по всем теориям совпадают. На основе проведенного анализа получено, что в области $N_f \in [10^5, 5 \cdot 10^6]$ циклов построенная по модели

кривая усталости ft по дефектам четвертого и пятого уровней хорошо описывает опытные данные по усталостному разрушению стали (см. рис. 3.1).

На рис.3.2 для стали 12ХН2А представлены области и границы начала развития дефектов каждого уровня и кривые усталости при двухосном нагружении с различными отношениями амплитуд α_2 . По соотношениям (3.2), (3.3), (3.7) с учетом известных данных для этой стали (см. п.2.8 Главы 2) найдены базовые функции модели при двухосном нагружении, которые подставляются в имеющиеся определяющие соотношения. Получены кривые усталости по дефектам мезоуровня ft как результат последовательного развития дефектов на микро-, мезо- и макроуровнях и по хрупкому макроразрушению FT (с учетом дороста хрупких трещин) в зависимости от асимметрии цикла. Построенная кривая усталости FT хорошо согласуется с кривой усталости МакДиармида, Дан Вана, Завойчинского (3.14), полученной авторами для большого класса исследованных металлов и сплавов (представлена красной линией на рис. 3.2).

На рис. 3.3 и 3.4 представлены данные численных расчетов по модели для другой конструкционной стали, диаграммы деформирования, экспериментальные данные и анализ усталостного разрушения при симметричных растяжении-сжатии и сдвиге которой был проведен в п.2.8 Главы 2 на рис. 2.9 и 2.10. Особенностью этой стали является то, что она относится к пластичным материалам и в области $N_f \in [5 \cdot 10^3, 10^5]$ циклов на поверхности макроизлома наблюдаются как зоны сдвигового характера разрушения, так и зоны хрупкого разрушения.

На рис. 3.3 представлены результаты расчетов для одноосного нагружения с кручением, где базовые функции в зависимости от отношения α_2 рассчитывались по методике п. 2.3, выражениям (3.2), (3.3), (3.4) и с учетом известных данных для этой стали (см. п.2.8 Главы 2). Найдя базовые

характеристики в зависимости от отношения амплитуд напряжений, строятся кривые усталости по дефектам мезоуровня ft (рис. 3.3). Красная линия на рис. 3.3 соответствует кривой усталости по полному разрушению Гафа, Полларда, Ли (3.8), синяя линия – кривая усталости Карпинтери, Спаньоли (3.9). Разрушение по дефектам четвертого и пятого уровней в области $N_f \in [10^5, 5 \cdot 10^6]$ циклов хорошо описывается по предложенной модели и подтверждается опытными данными [153]. При $N_f \in [5 \cdot 10^3, 10^5]$ циклов для построения кривой усталости по полному разрушению необходимо привлекать критерии развития вязкого разрушения.

В таблице 3.2 приведены результаты расчета в зависимости от α_2 для этой стали по теории (на рис. 3.3 представлена кривой ft) и по критерию (3.8) (на рис.3.3 представлен красной линией), а также известные опытные данные в обозначениях: $\sigma_{f,T}$, $\sigma_{f,\mathcal{E}}$, $\sigma_{f,T}^*$, которые соответствуют амплитуде максимального главного напряжения по предложенной модели, согласно экспериментальным данным и по критерию (3,11), отнесенной к $\sigma_{-1} = 220 \text{ МПа}$ в зависимости от долговечности N_f .

На рис. 3.4 приведены результаты анализа областей и границ начала развития дефектов каждого масштабного уровня и кривые усталости при двухосном нагружении с различными отношениями амплитуд α_2 . По соотношениям (3.2), (3.3), (3.5) с учетом известных данных для этой стали (см. п.2.8 Главы 2) найдены базовые функции модели при двухосном нагружении, которые подставляются в определяющие соотношения для вероятности разрушения по дефектам каждого уровня. Полученные кривые усталости по дефектам мезоуровня ft в зависимости от параметра α_2 изображены на рис. 3.4. Красной линией представлена кривая усталости по окончательному

N_f	$\alpha_2 = 0$			$\alpha_2 = -0.2$			$\alpha_2 = -0.4$			$\alpha_2 = -0.6$			$\alpha_2 = -0.8$			$\alpha_2 = -1$		
	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$
$5 \cdot 10^6$	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 3.1 Результаты расчетов для хрупкой стали 12ХН2А, $\sigma_{-1} = 390 \text{ МПа}$, при симметричном одноосном нагружении с кручением

N_f	$\alpha_2 = 0$			$\alpha_2 = -0.2$			$\alpha_2 = -0.4$			$\alpha_2 = -0.6$			$\alpha_2 = -0.8$			$\alpha_2 = -1$		
	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$	$\sigma_{f,T}$	$\sigma_{f,\varepsilon}$	$\sigma_{f,T}^*$
$5 \cdot 10^6$	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 3.2. Результаты расчетов для пластичной стали, $\sigma_{-1} = 220 \text{ МПа}$, при симметричном одноосном нагружении с кручением

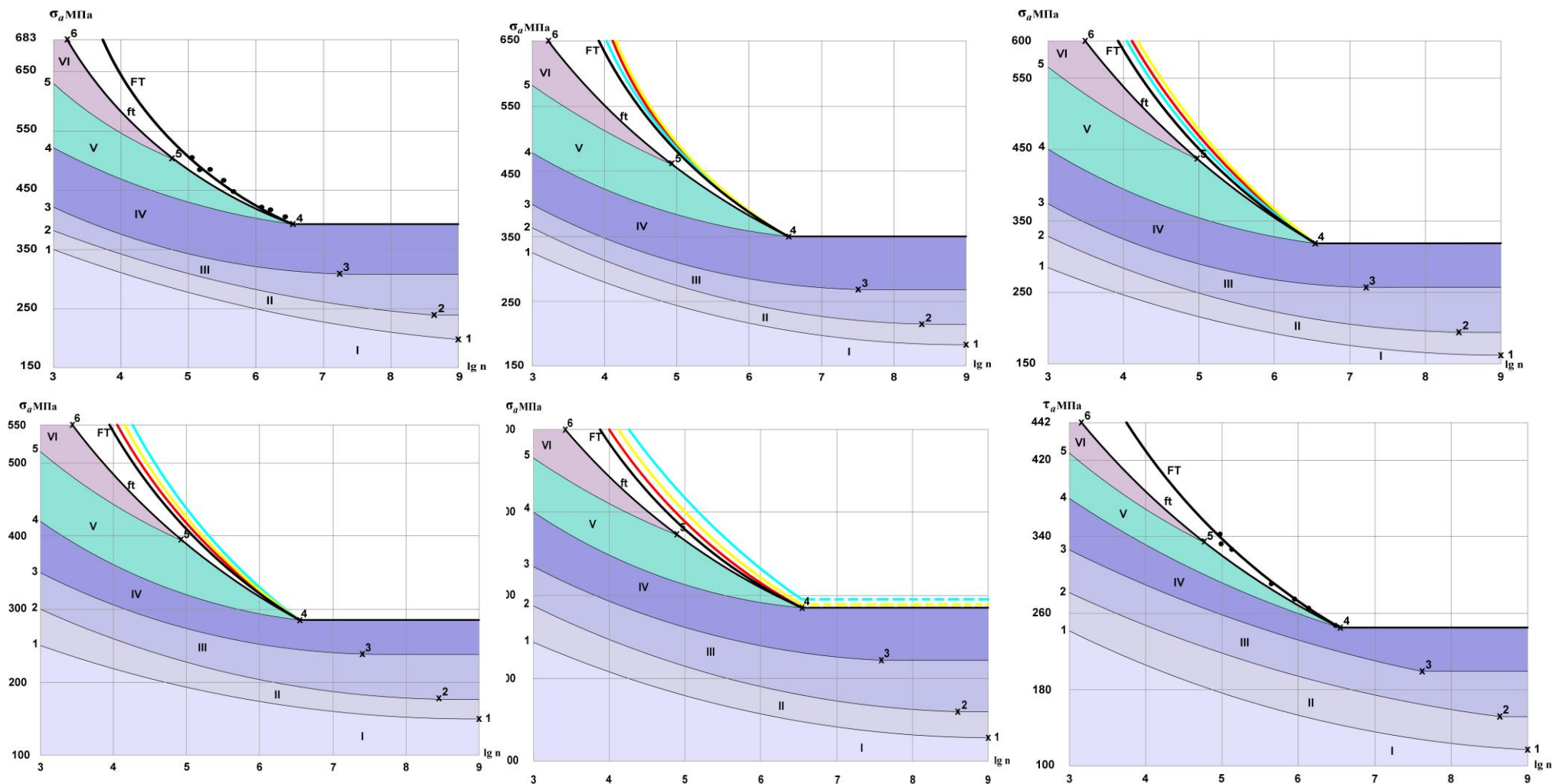


Рис. 3.1 Расположение областей и границ развития дефектов шести уровней и кривые усталости при симметричном осевом нагружении с кручением конструкционной стали 12ХН2А: $\sigma_{-1} = 390 \text{ МПа}$, $\tau_{-1} = 252 \text{ МПа}$: *ft* – кривая усталости по дефектам мезоуровня, *FT* – кривая усталости по полному разрушению, красная линия – кривая 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) – $\alpha_2 = -1$

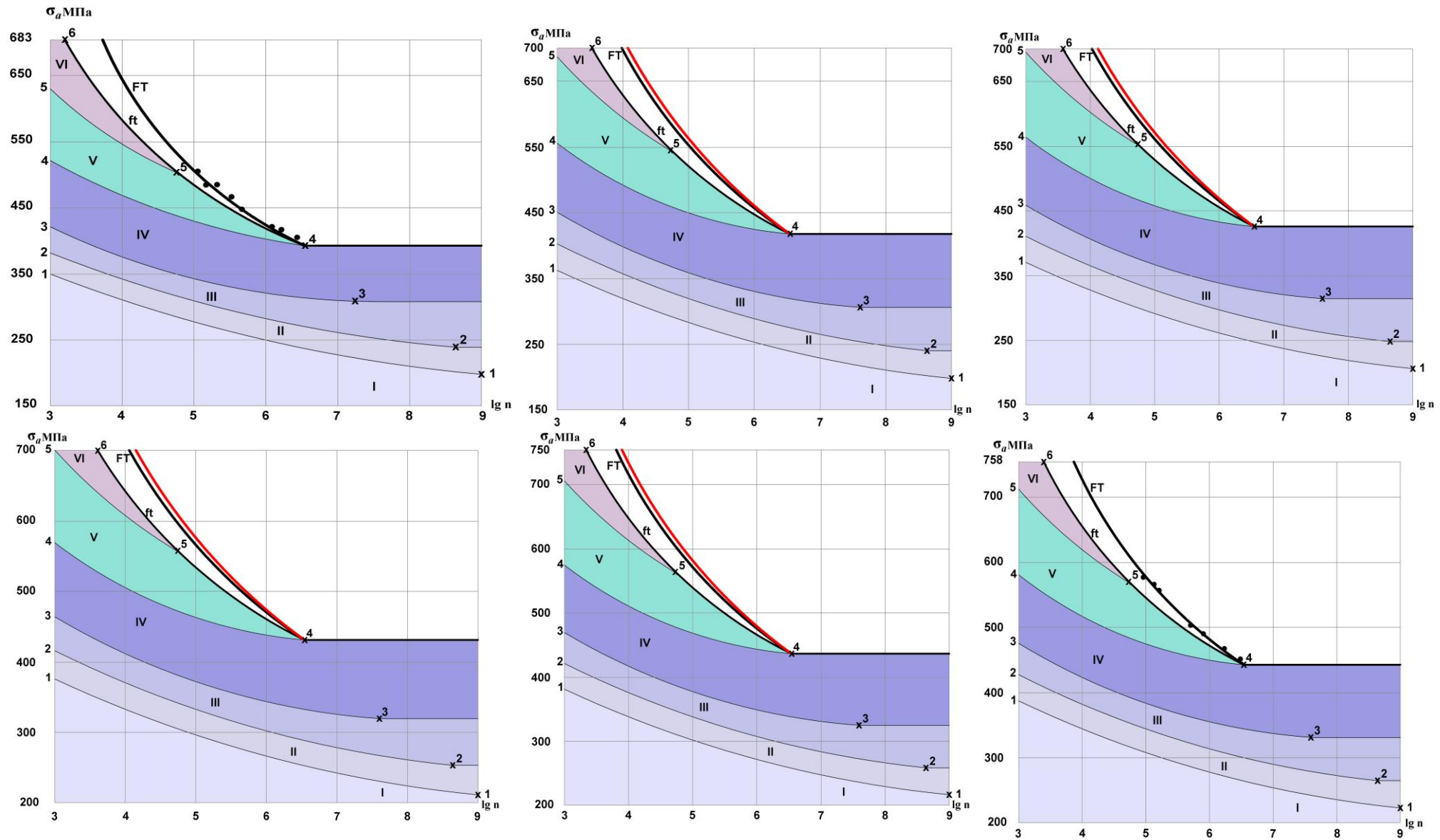


Рис. 3.2 Расположение областей и границ развития дефектов шести уровней и кривые усталости при симметричном двухосном нагружении стали 12ХН2А, $\hat{\eta}_4 = 0.9$: ft – кривая усталости по дефектам мезоуровня, FT – кривая усталости по полному разрушению, красная линия – кривая МакДиармида, Данг Вана, 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) – $\alpha_2 = 1$

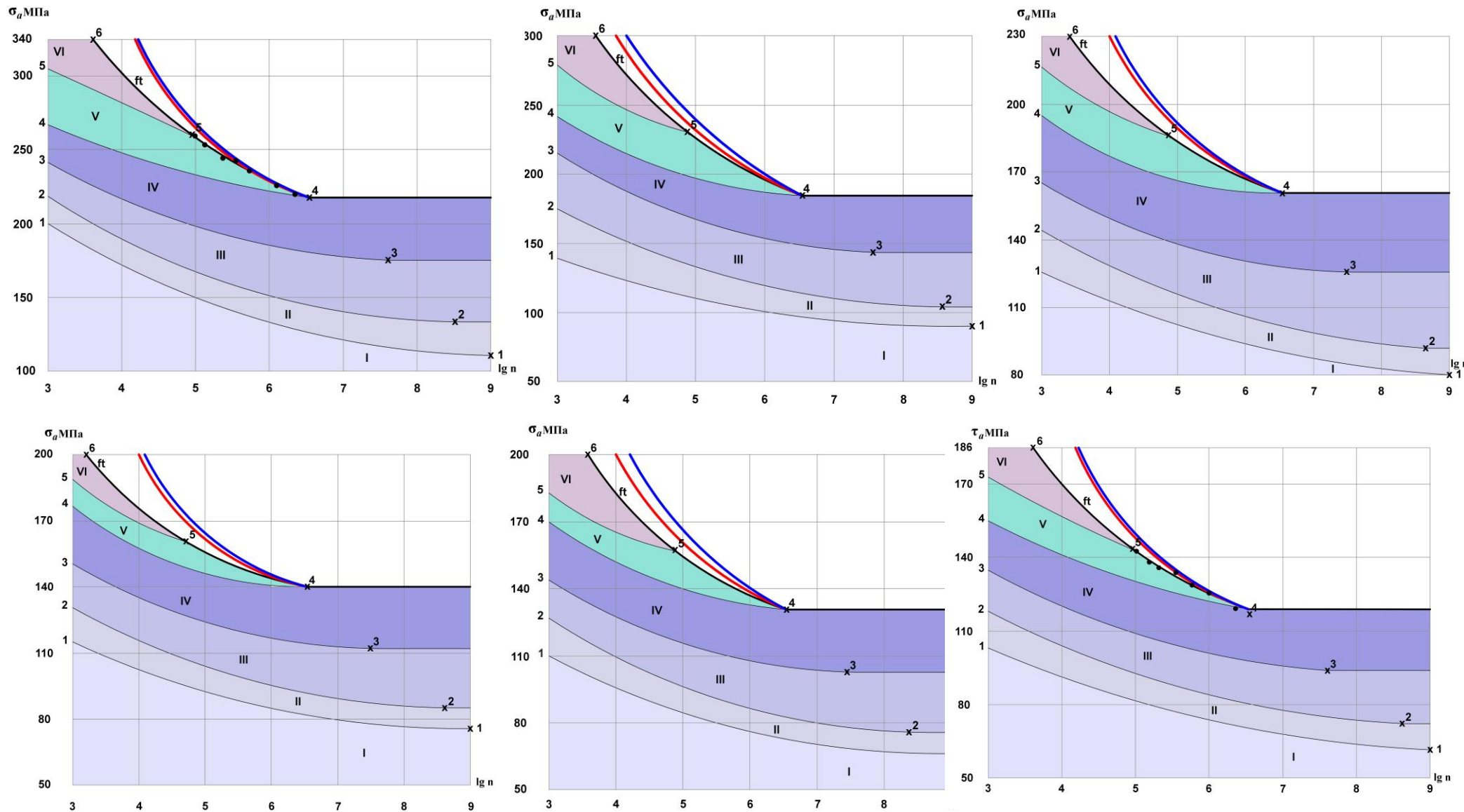


Рис. 3.3 Расположение областей и границ начала дефектов каждого масштабного уровня и кривые усталости при симметричном осевом нагружении с кручением конструкционной стали, $\sigma_{-1} = 220 \text{ МПа}$, $\tau_{-1} = 120 \text{ МПа}$: красная линия – кривая усталости Гафа, Полларда, Ли; синяя линия – кривая усталости Карпинтери, Спальоли (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) – $\alpha_2 = -1$

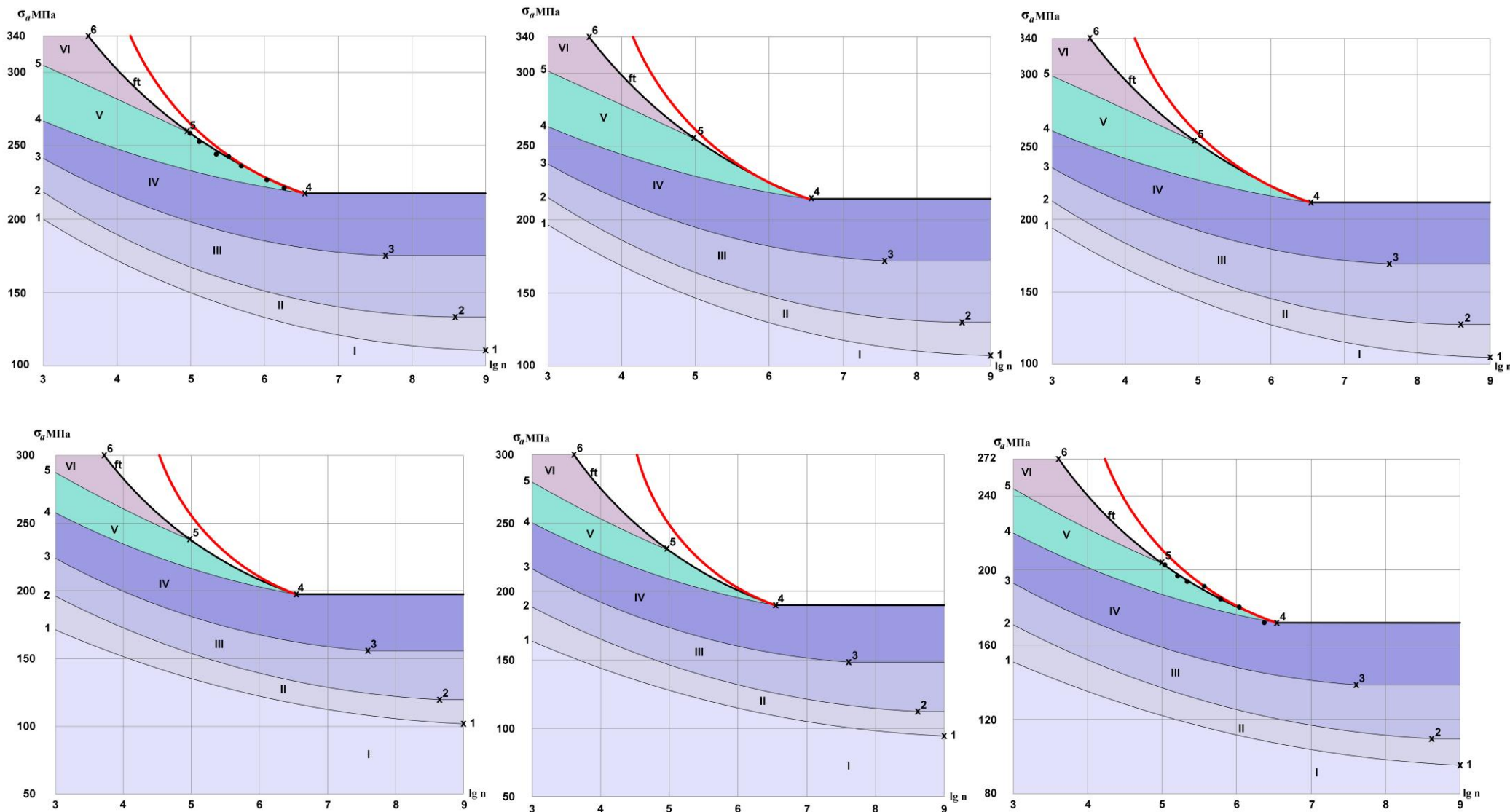


Рис. 3.4. Расположение областей и границ начала дефектов каждого масштабного уровня и кривые усталости при двухосном нагружении конструкционной стали, $\hat{\eta}_4 = 1.25$; красная линия – кривая усталости Гафа, Завойчинского; (1) – $\alpha_2 = 0$, (2) – $\alpha_2 = 0.2$, (3) – $\alpha_2 = 0.4$, (4) – $\alpha_2 = 0.6$, (5) – $\alpha_2 = 0.8$, (6) – $\alpha_2 = 1$

разрушению (3.10), предложенная Гафом и Завойчинским для таких нагружений. Из анализа видно, что в области $N_f \in [5 \cdot 10^3, 10^5]$ циклов долговечность по окончательному разрушению больше, чем рассчитанная по модели для хрупких дефектов, что говорит о необходимости исследовать развитие вязкого разрушения. В области $N_f \in [10^5, 5 \cdot 10^6]$ циклов разрушение носит в основном хрупкий характер и теоретическая кривая усталости по дефектам пятого и четвертого уровней хорошо соответствует известным кривым усталости.

Проведен анализ экспериментальных данных [253] по усталости трубной стали S135 (0.32% C) (характеристики стали: $\sigma_B = 1197 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 1112 \text{ МПа}$, $\varepsilon_B = 17.5\%$, $d \approx 0.02 \text{ мм}$) при симметричном осевом нагружении с кручением, $\alpha_2 = -0.72$. По экспериментальным данным построена кривая усталости FT на рис. 3.5.

Авторами [253] представлены результаты исследования микроструктуры в процессе нагружения (с помощью электронного микроскопа). На рисунках 3.6 и 3.7 приведены фотографии микроструктуры стали при четырех рассмотренных амплитудах осевого напряжения с остановкой в процессе нагружения и перед разрушением. Так, процесс нагружения с амплитудой максимального главного напряжения $\sigma_a = 545 \text{ МПа}$ останавливали при $n = 10^3$ циклов (на рис.3.5 поставлен красный крестик с соответствующими координатами) и проводили исследование микроструктуры, соответствующая фотография приведена на рис. 3.6 (а). Выявлено, что в стали накапливаются короткие макротрещины. На рис. 3.7 (а) представлена фотография перед разрушением. В стали наблюдаются образовавшиеся хрупкие макротрещины размера нескольких зерен. Полное разрушение происходило при $\sigma_f = 545 \text{ МПа}$, $N_f = 1.18 \cdot 10^6$ циклов.

На рис.3.6 (b) и 3.7 (b) при $\sigma_a = 594 \text{ МПа}$ изображены состояния при $n = 40$ циклов (накопление коротких макротрещин) и перед разрушением (интенсивного развития макротрещин и вязкого разрушения) соответственно. Полное разрушение наблюдалось при $\sigma_f = 594 \text{ МПа}$, $N_f = 3.48 \cdot 10^4$ циклов.

При амплитудах максимального главного напряжения $\sigma_a = 695 \text{ МПа}$ и $\sigma_a = 743 \text{ МПа}$ производили остановку при $n = 10$ циклов, фотографии микроструктуры представлены на рис. 3.6 (c) и (d), что соответствует стадии наибольшей концентрации коротких макротрещин и началу образования макротрещин размером нескольких зерен. Состояние непосредственно перед

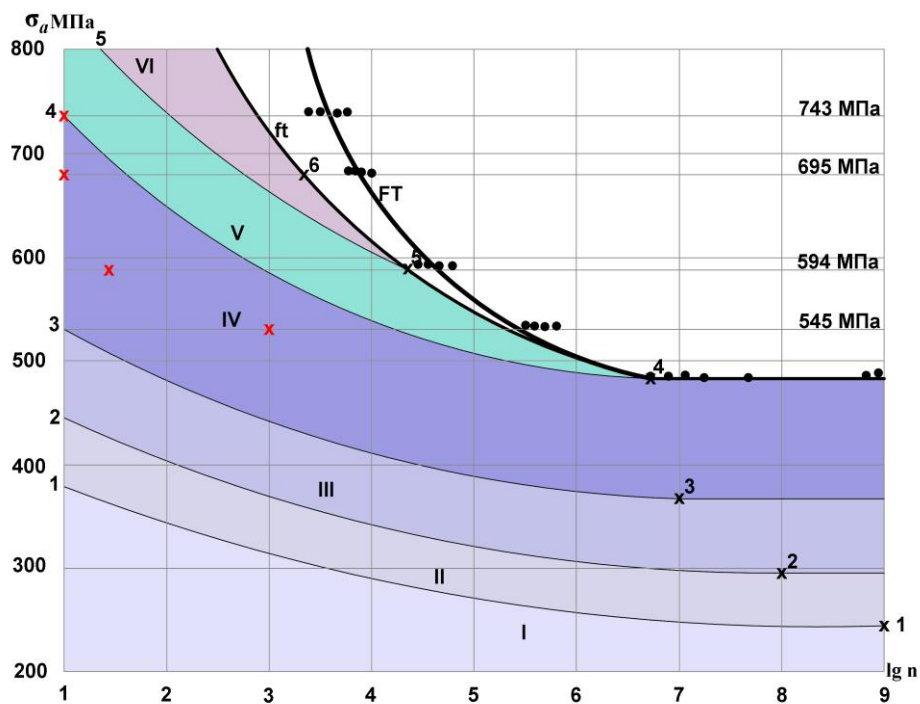


Рис. 3.5. Расположение областей I–VI и границ начала роста дефектов каждого масштабного уровня, кривая усталости f_t по дефектам мезоуровня и экспериментальная кривая усталости по полному разрушению FT при симметричном осевом нагружении с кручением трубной стали S135 [253]

По имеющимся экспериментальным данным и результатам анализа разрушением (рис. 3.7 (с) и (d) соответственно) характеризуется образованием развитых макротрещин размеров, в среднем, на порядок больше размера зерна и вязких трещин с характерными ямками. Образцы разрушались при $\sigma_f = 695 \text{ МПа}$, $N_f = 9.6 \cdot 10^3 \text{ циклов}$ и $\sigma_f = 743 \text{ МПа}$, $N_f = 6.25 \cdot 10^3 \text{ циклов}$.

микроструктуры, применяя методику п. 2.3 Главы 2, определяются базовые характеристики модели (отмечены черными крестиками и цифрами 1-6). По результатам анализа микроструктуры принято, что дефекты пятого масштабного уровня достигают предельного состояния при $\sigma_5 = 594 \text{ МПа}$ и числе циклов $N_5 = 10^4 \text{ циклов}$, дефекты шестого масштабного уровня – при $\sigma_5 = 695 \text{ МПа}$ и числе циклов $N_6 = 10^3 \text{ циклов}$. Далее по выражениям (2.21) – (2.23), (2.29) – (2.31), (2.48) – (2.59) строятся функции вероятности разрушения и находятся числа циклов начала образования дефектов каждого масштабного

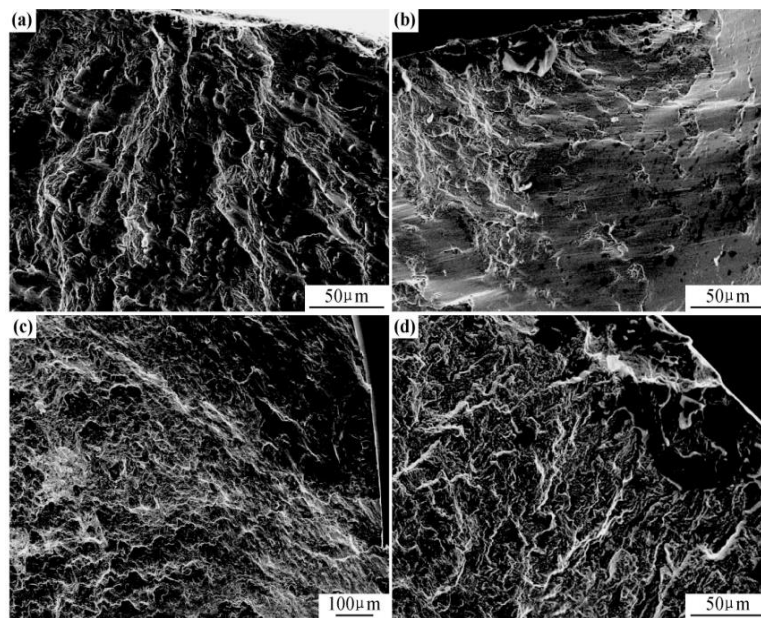


Рис. 3.6. Фотографии развития коротких макротрещин при симметричном осевом нагружении с кручением трубной стали S135 [253]

(a) – $\sigma_1 = 545 \text{ МПа}$, $n = 10^3 \text{ циклов}$, (b) – $\sigma_1 = 594 \text{ МПа}$, $n = 40 \text{ циклов}$ (c) – $\sigma_1 = 695 \text{ МПа}$, $n = 10 \text{ циклов}$, (d) – $\sigma_1 = 743 \text{ МПа}$, $n = 10 \text{ циклов}$

уровня. На рис. 3.5 изображены полученные области развития дефектов каждого уровня и границы начала образования дефектов последующего уровня.

Таким образом, по модели при ($\sigma_a = 545 \text{ МПа}$, $n = 10^3 \text{ циклов}$), ($\sigma_a = 594 \text{ МПа}$, $n = 40 \text{ циклов}$) и ($\sigma_a = 695 \text{ МПа}$, $n = 10 \text{ циклов}$) в стали развиваются дефекты четвертого масштабного уровня (область IV на рис. 3.5); при ($\sigma_a = 743 \text{ МПа}$, $n = 10 \text{ циклов}$) дефектами четвертого уровня достигается предельное состояние и образуются дефекты пятого уровня. Состояние перед разрушением при амплитудах $\sigma_a = 545 \text{ МПа}$ и $\sigma_a = 594 \text{ МПа}$ характеризуется достижением предельного состояния дефектами пятого уровня, при амплитудах $\sigma_a = 695 \text{ МПа}$ и $\sigma_a = 743 \text{ МПа}$ – достижением предельного состояния дефектами шестого уровня, что подтверждается опытными данными.

Кривая усталости f_t по хрупким дефектам мезоуровня, определенная по уравнению (2.36) с учетом (2.35), лежит левее кривой полного усталостного

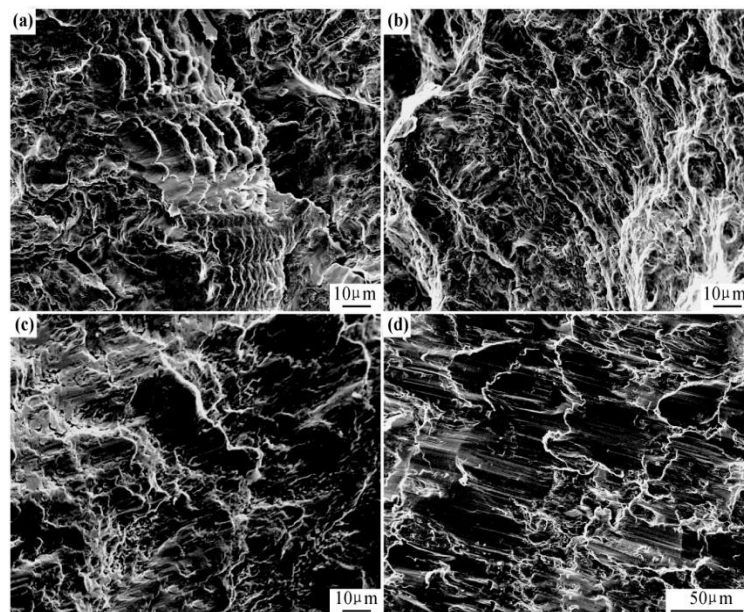


Рис. 3.7. Фотографии микроструктуры стали S135 при симметричном осевом нагружении с кручением перед разрушением, $n = 0.9N_f$ [253] (a) $\sigma_1 = 545 \text{ МПа}$, (b) $\sigma_1 = 594 \text{ МПа}$, (c) $\sigma_1 = 695 \text{ МПа}$, (d) $\sigma_1 = 743 \text{ МПа}$

разрушения, т.к. в материале развивается вязкое разрушение, которое тормозит развитие хрупких трещин и увеличивает долговечность стали. Для построения кривой усталости по окончательному разрушению необходимо привлекать критерии развития вязкого разрушения.

Отметим, что по предложенной модели можно построить области развития дефектов и кривые усталости для любого отношения амплитуд α_2 .

По предложенной модели проанализированы процессы развития хрупких усталостных трещин для ряда других конструкционных сталей; для металлов: молибдена, никеля; для магниевых, алюминиевых и титановых сплавов при различных двухосных нагружениях и одноосных нагружениях с кручением. Это позволило найти области развития дефектов каждого масштабного уровня и долговечность по хрупким дефектам определенного уровня для различных простых процессах циклического нагружения.

ВЫВОДЫ по третьей главе

1. Эта глава посвящена развитию теории хрупкого усталостного разрушения металлов при произвольном пропорциональном (простом) процессе нагружения с симметричными и несимметричными циклами напряжений.

Представленный во второй главе подход позволяет сформулировать определяющие соотношения для вероятности разрушения на шести уровнях при произвольных простых процессах нагружения, выбирая в качестве переменной амплитуду максимального главного напряжения и материальные функции на основе соотношений современных теорий усталостной прочности материалов.

2. Изложена методика определения материальных функций для одночастотного простого процесса, в выражения которых входят материальные функции при симметричных одноосном и двухосном равномерном нагружениях и сдвиге, а зависимость от отношения главных напряжений и асимметрии цикла устанавливается в соответствии с известными современными критериями усталостной прочности металлов.

3. На основе теоретического анализа построены зависимости областей развития и начала образования дефектов определенного уровня от отношения амплитуд нагружения для разных материалов при различных плоских напряженных состояниях: одноосном нагружении с кручением и двухосном нагружении с различными отношениями амплитуд.

4. Получены кривые усталости для произвольного простого процесса циклического нагружения как результат последовательного зарождения, развития и слияния дефектов.

5. Проведена верификация модели на ряде конструкционных сталей, алюминиевых, магниевых и титановых сплавах в области многоциклового усталости при плоских напряженных состояниях: одноосном нагружении с кручением и двухосном нагружении с различными отношениями амплитуд. Дана классификация наблюдаемых в экспериментах дефектов при таких

нагружениях. Найдены материальные константы модели в зависимости от отношения амплитуд. Построены области развития дефектов и проанализированы зависимости начала развития дефектов каждого уровня от отношения амплитуд напряжения. Расчет подтвержден сравнением с опытными данными.

Осуществлен численный анализ процесса развития трещинообразования в материалах. По представленным графикам при заданных отношении амплитуд и числе циклов нагружения определяется амплитуда начала развития дефектов каждого уровня. Построены кривые усталости по предложенной модели, определяющие минимальную долговечность стали. Проведено сравнение расчетных кривых с известными подходами Завойчинского, Гафа, Полларда, Карпинтерри, Спаньоли, МакДиармида, Матаке, Финдли, Данг Вана, Зеннера, Ли, Пападопулоса, Кэнмена, Сайнса, Кросслэнда, Какуно, Кавады и др.

6. Определяющие соотношения предложенной теории могут быть обобщены на близкие к простым процессы нагружения.

ГЛАВА 4. Критерий безопасной эксплуатации протяженных конструкций

Обширная проблема оценки безопасности при эксплуатации конструкций включает в себя: разработку критериев конструктивной надежности конструкций; исследования вероятностей появления и распространения негативных факторов поражения при разрушении конструктивных элементов; оценку социальных, промышленных и экологических рисков при строительстве и эксплуатации конструкций; установление приемлемых рисков; определение долговечности и остаточного срока службы конструкций с учетом социальных, промышленных и экологических рисков; расчет потенциального экономического ущерба при строительстве и эксплуатации конструкций.

Конструкции газо- и нефтедобывающих предприятий: обвязки скважин, промысловые газопроводы, установки предварительной и комплексной подготовки углеводородного сырья к транспортировке, компрессорные и насосные станции, установки охлаждения газа и конденсата до температур вечномерзлых грунтов, подземные хранилища; конструкции газо- и нефтетранспортных предприятий и технологических трубопроводов: обвязочные трубопроводы, компрессорные станции, распределительные станции и др., принадлежат к категории объектов повышенной ответственности, аварии на которых приводят к значительному материальному и экологическому ущербу, и обеспечение их безопасной эксплуатации является актуальной задачей.

Автором проанализирована литература и нормативные документы по проблеме оценки прочности и надежности конструкций продуктопроводов (см., например, [1,3,5,6,15,18,26,30,31,50,52,67,135,136,138,155,165–170]).

Результаты этого анализа содержатся в опубликованных работах. На его основе в диссертации сформулирован критерий конструктивной надежности в виде неравенства, в котором вероятность разрушения конструкции меньше или равна ее заданному приемлемому значению. Равенство определяет срок службы конструкции.

При этом вероятность разрушения конструкции, состоящей из большого количества однотипных конструктивных элементов выражается через вероятности разрушения ее конструктивных элементов. Для определения срока службы конструктивного элемента применяется подход теории предельных процессов нагружения [50] и теория поэтапного усталостного разрушения металлов, предложенная в данной работе.

В Приложении на основе этого критерия представлен метод оценки сроков службы и остаточной долговечности участков магистральных газо-, нефте- и продуктопроводов при сложном эксплуатационном нагружении.

Процесс строительства и эксплуатации продуктопроводов по штатным и внештатным технологическим режимам часто сопровождается различными негативными воздействиями: выбросом вредных веществ, гибелью людей, строений, представителей флоры и фауны. В этой главе дается классификация основных известных негативных факторов поражения при разрушении конструктивных элементов продуктопроводов. Выписываются выражения для промышленных, социальных и экологических рисков от возникновения этих факторов, применяемые при расчетах в данной отрасли.

Автором рассмотрен значительный теоретико-экспериментальный материал по проблеме безопасности и рисков эксплуатации газо- и нефтепроводов (см., например, работы [9–12,90,91,95,96,104–109,139,177,178,188,218]). Критерий безопасной эксплуатации конструкций, сформулированный в этой работе, является теоретическим обобщением известных соотношений, используемых в расчетной практике.

Кроме проблемы определения проектного срока безопасной эксплуатации конструкций существует задача определения сроков промежуточной диагностики и остаточной долговечности с учетом накопленных дефектов в конструктивных элементах. Т.к. конструкции продуктопроводов являются ремонтно-пригодными, то, после замены выявленных по результатам диагностики конструктивных элементов с недопустимыми дефектами, возникает задача оценки остаточной долговечности конструкции с учетом накопленных допустимых дефектов в элементах. В рамках настоящего подхода в этой главе выписано уравнение для определения остаточного срока безопасной эксплуатации конструкций.

Таким образом, по нашему мнению, в настоящей работе представлен системный подход к решению проблемы расчета сроков безопасной эксплуатации конструкций продуктопроводов, включающий критерий конструктивной надежности, применение которого обеспечивает нормативный уровень социальной, промышленной и экологической безопасности, и метод определения сроков службы конструктивных элементов с использованием предложенной математической модели усталостного разрушения металла конструктивных элементов.

Основные понятия и обозначения

$\Omega = \Omega(\tau)$, $\tau \in [0, t]$ – функция поврежденности конструкции

$\Omega_k = \Omega_k(\tau)$, $k = 1, \dots, K$, $\tau \in [0, t]$ – функция поврежденности k – го участка конструкции

$\Omega_{k,q} = \Omega_{k,q}(\tau)$, $k = 1, \dots, K$, $q = 1, \dots, Q$, $\tau \in [0, t]$ – функция поврежденности q – го конструктивного элемента k – го участка

$Q = Q(\tau)$, \tilde{Q} , $\tau \in [0, t]$ – вероятность разрушения конструкции (конструкционный риск) и ее приемлемое значение соответственно

$Q_k = Q_k(\tau)$, \tilde{Q}_k , $k = 1, \dots, K$, $\tau \in [0, t]$ – вероятность разрушения k – го участка конструкции и ее приемлемое значение соответственно

$Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$, $\tilde{Q}_{k,q}$, $k = 1, \dots, K$, $q = 1, \dots, Q$, $\tau \in [0, t]$ – вероятность разрушения q – го конструктивного элемента k – го участка и ее приемлемое значение соответственно

t_R – суммарное время всех R нормативных диагностик

$Q_R = Q_R(\tau)$, $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$, $r = 1, \dots, R$, $\tau \geq t_R$, $\tau \in [0, t]$ – вероятность разрушения всей конструкции и ее k -го участка после проведения R диагностик ее технического состояния соответственно

$Q_{k,r} = Q_{k,r}(\tau)$, $Q_{k,r,q} = Q_{k,r,q}(\tau)$, $k = 1, \dots, K$, $q = 1, \dots, Q$, $r = 1, \dots, R$, t_R , $\tau \geq t_R$, $\tau \in [0, t]$ – вероятность разрушения k -го участка и q -го конструктивного элемента k -го участка по всем дефектам, выявленным в r -м диагностическом обследовании соответственно

$Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$, $k = 1, \dots, K$, $q = 1, \dots, Q$, $r = 1, \dots, R$, $j = 1, \dots, J$, t_R , $\tau \geq t_R$, $\tau \in [0, t]$ – вероятность разрушения q -го конструктивного элемента k -го участка по дефекту j -го вида, выявленному при r -м диагностическом обследовании

$l_{q,n_{k,q}}$, $t_{f,k,q}$, $t_{f,k,q,j}$, $k = 1, \dots, K$, $q = 1, \dots, Q$, $j = 1, \dots, J$ – линейный размер, количество, срок службы и остаточный срок службы (с дефектом j -го вида) q -го элемента k -го участка соответственно

\tilde{t} – приемлемый срок службы конструкции

λ_q , $q = 1, \dots, Q$ – коэффициент интенсивности потока разрушений q -го элемента

$\lambda_{r,q,j}$, $q = 1, \dots, Q$, $r = 1, \dots, R$, $j = 1, \dots, J$ – коэффициент интенсивности потока разрушений q -го элемента по дефекту j -го вида, выявленному при r -м диагностическом обследовании

J_i , $i = 1, \dots, 6$ – вероятность появления i -го негативного фактора поражения при разрушении конструктивных элементов

I_m , $0 \leq I_m \leq 1$, \tilde{I}_m , $m = 1, \dots, 4$, $\tau \in [0, t]$ – социальный, промышленный и экологический (уничтожения флоры и фауны) риски и их приемлемые значения соответственно

t_f , $t_{f,m}$, $m = 1, \dots, 4$ – срок службы конструкции, сроки службы конструкции с учетом социальной, промышленной и экологической безопасности соответственно

R – радиус действия i -го негативного фактора поражения

t_i – время действия i -го негативного фактора поражения

$\rho_m = \rho_m(r, \theta, \xi)$ – функция распределения плотности людей, объектов, флоры и фауны в зоне $[0, R]$

$D = D(r, \theta, \tau)$ – удельная концентрация токсического вещества в точке (r, θ) в момент τ

$q = q(r, \tau)$ – удельный тепловой поток в точке r в момент времени τ

$I = I(r, \tau)$ и $p = p(r, \tau)$ – импульс и избыточное давление на фронте ударной волны в зависимости от расстояния от центра взрыва r в момент времени τ

m и $v = v(r, \tau)$ – масса и скорость фрагментов разрушенных конструктивных элементов

4.1. Конструкционный риск

В этом пункте рассматриваются понятия конструкционного риска (вероятности разрушения конструкции) и вероятности разрушения ее конструктивных элементов. Вводятся понятия приемлемого конструкционного риска. Выписываются выражения для вероятности разрушения конструкции через вероятности разрушения ее однотипных конструктивных элементов. Предлагается формула для расчета вероятности разрушения конструктивного элемента, в которую входит срок службы элемента.

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

Конструкции типа продуктопроводов разбивают на участки по функционально-конструкторскому принципу: линейные участки с ответвлениями и лупингами; переходы через естественные и искусственные препятствия (автодороги, железные дороги, воздушные переходы через водные преграды, овраги, подводные переходы и т.п.); узлы подключения других конструкций; конструкции газо- и нефтеизмерительных станций; установки регенерации газа; узлы пуска и приема очистных устройств; конструкции головных и промежуточных перекачивающих и насосных станций и др. Вводится функция поврежденности k -го участка $\Omega_k = \Omega_k(\tau)$, $0 \leq \Omega_k \leq 1$, и вероятность разрушения (конструкционный риск) k -го участка $Q_k = Q_k(\tau)$, $k = 1, \dots, K$.

Участки протяженных конструкций состоят из большого числа однотипных конструктивных q -ых элементов, $q=1,\dots,Q$, для которых рассматривается функция поврежденности q -го элемента k -го участка $\Omega_{k,q} = \Omega_{k,q}(\tau)$ и конструкционный риск $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$, $k=1,\dots,K$, $q=1,\dots,Q$.

Полагается, что вероятность разрушения конструкции $Q = Q(\tau)$ определяется через вероятности разрушения $Q_k = Q_k(\tau)$ ее k -ых участков, $k=1,\dots,K$, по следующим выражениям:

оптимистический сценарий
$$Q(\tau) = \sum_{k=1}^K \left(\frac{Q_k(\tau)}{1-Q_k(\tau)} \right) \prod_{k=1}^K [1-Q_k(\tau)] \quad (4.1)$$

пессимистический сценарий
$$Q(\tau) = 1 - \prod_{k=1}^K [1-Q_k(\tau)] \quad (4.2)$$

Выражение (4.1) определяет сумму независимых K событий – разрушений k -того участка при отсутствии разрушения остальных $(K-1)$ участков, $k=1,\dots,K$. Вероятность такого события равна такому выражению:

$Q(\tau) = Q_k(\tau)(1-Q_1(\tau))\dots(1-Q_{k-1}(\tau))(1-Q_{k+1}(\tau))\dots(1-Q_K(\tau))$, и, после преобразований – формуле (4.1).

Выражение (4.2) определяет сумму независимых K событий – разрушений по крайней мере k -того участка, $k=1,\dots,K$. Вероятность такого события равна:

$$Q(\tau) = \sum_{k=1}^K Q_k(\tau) - \prod_{k \neq j=1}^K Q_k(\tau) Q_j(\tau), \text{ что сводится к (4.2).}$$

Вероятность разрушения k -ого участка конструкции $Q_k = Q_k(\tau)$, $k=1,\dots,K$, выражается через вероятности разрушения ее q -ых типовых конструктивных элементов таким образом:

оптимистический сценарий
$$Q_k(\tau) = \sum_{q=1}^Q \left(\frac{Q_{k,q}(\tau)}{1-Q_{k,q}(\tau)} \right) \prod_{q=1}^Q [1-Q_{k,q}(\tau)] \quad (4.3)$$

пессимистический сценарий
$$Q_k(\tau) = 1 - \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,q}(\tau)], \quad (4.4)$$

Пусть k – ый участок протяженной конструкции, $k = 1, \dots, K$, состоит из $n_{k,q}$ q –ых типовых конструктивных элементов линейных размеров l_q , $q = 1, \dots, Q$, со сроками службы, равными $t_{f,k,q}$. Вероятность разрушения $n_{k,q}$ q –ых элементов k –ого участка $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$ предлагается описывать функцией типа распределения Пуассона (распределение Пуассона моделирует количество разрушений, произошедших на интервале времени, при условии, что разрушения происходят с некоторой средней интенсивностью независимо друг от друга, и задается следующей функцией вероятности $Q = Q(n)$:

$Q(n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}$, где параметр $\lambda \in (0, \infty)$, носители $n \in \{1, 2, \dots\}$ – количество разрушений) в следующем виде (по первому разрушению q –ого элемента):

$$Q_{k,q}(\tau) = \varphi_{k,q}(\tau) e^{1 - \varphi_{k,q}(\tau)}, \quad \varphi_{k,q}(\tau) = \lambda_q l_q n_{k,q} \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,q}} \tau, \quad k = 1, \dots, K, \quad q = 1, \dots, Q \quad (4.5)$$

В выражение (4.5) входит параметр \tilde{t} – экономически и социально приемлемый срок службы конструкции, назначаемый нормами проектирования объектов. Например, для магистральных трубопроводов \tilde{t} находятся в интервале 35÷45 лет, для обвязочных трубопроводов – 60÷65 лет, для промысловых трубопроводов – 15÷20 лет. Под λ_q обозначены коэффициенты интенсивности потока разрушений q –ого элемента, т.е. количество разрушений q –ого элемента в единицу времени (год) на единицу длины (км), известные по статистике разрушений при эксплуатации аналогичных конструкций в аналогичных природно-климатических условиях. Для тройниковых соединений в качестве λ_q рассматривается количество

разрушений в единицу времени к общему количеству элементов и в выражение (4.4) не входит величина l_q .

В выражение (4.5) входит срок службы q -ого конструктивного элемента k -ого участка $t_{f,k,q}$, который определяется с учетом теоретических результатов второй и третьей глав настоящей диссертации. Метод определения срока службы рассматривается в Приложении (см. п.П.2).

Обратимся к понятию экономически и социально приемлемого значения вероятности разрушения q -ого конструктивного элемента k -ого участка $\tilde{Q}_{k,q}$. Оно определяется для конструкции с одинаковыми сроками службы элементов, равными приемлемому сроку службы \tilde{t} : $t_{f,k,q} = \tilde{t}$, $k=1, \dots, K$, $q=1, \dots, Q$, согласно выражению (4.4) в виде (по первому разрушению q -ого элемента):

$$\tilde{Q}_{k,q} = \lambda_q l_q n_{k,q} e^{-\lambda_q l_q n_{k,q} \tilde{t}}, \quad k=1, \dots, K, \quad q=1, \dots, Q \quad (4.6)$$

По аналогии с выражениями (4.3) и (4.4) приемлемое значение вероятности разрушения k -ого участка \tilde{Q}_k выражается через приемлемые значения вероятностей разрушения q -ых типовых конструктивных элементов $\tilde{Q}_{k,q}$ (4.6)

в виде:

оптимистический сценарий
$$\tilde{Q}_k = \sum_{q=1}^Q \left(\frac{\tilde{Q}_{k,q}}{1 - \tilde{Q}_{k,q}} \right) \prod_{q=1}^Q [1 - \tilde{Q}_{k,q}], \quad (4.7)$$

пессимистический сценарий
$$\tilde{Q}_k = 1 - \prod_{q=1}^Q [1 - \tilde{Q}_{k,q}], \quad (4.8)$$

и согласно (4.1) и (4.2) приемлемое значение вероятности разрушения конструкции \tilde{Q} представляется в виде:

оптимистический сценарий
$$\tilde{Q} = \sum_{k=1}^K \left(\frac{\tilde{Q}_k}{1 - \tilde{Q}_k} \right) \prod_{k=1}^K [1 - \tilde{Q}_k] \quad (4.9)$$

пессимистический сценарий
$$\tilde{Q} = 1 - \prod_{k=1}^K [1 - \tilde{Q}_k] \quad (4.10)$$

Регламент эксплуатации протяженных конструкций предусматривает проведение комплексной диагностики технического состояния в процессе эксплуатации. Эти исследования проводят различными методами: фотограмметрической, цветной, многозональной, инфракрасной и радиочастотной съемкой с привлечением аэрокосмической и вертолетной съемки; физическими неразрушающими методами диагностики (эховибрационными, инфракрасного излучения, электрометрическими, рентгеновскими, радиоактивного излучения); методами измерения твердости поверхностных слоев металла; магнитными и ультразвуковыми методами (при пропуске интеллектуальных снарядов); механическими потенциально разрушающими методами диагностики при условии, когда испытательное нагружение конструкций выше рабочего нагружения на 25-50%. Создаются базы данных обнаруженных дефектов.

Вероятность разрушения конструкции $Q_R = Q_R(\tau)$, $t_R \leq \tau$ (t_R – суммарное время всех R нормативных диагностик), после проведения R нормативных диагностик ее технического состояния и замене конструктивных элементов с недопустимыми дефектами определяется через функцию вероятности $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$ разрушения $n_{k,q}$ q -ых элементов 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:

$$Q_{k,r,q,j}(\tau) = \varphi(\tau) e^{1 - \varphi(\tau)}, \quad \varphi(\tau) = \lambda_{r,q,j} l q^{n_{k,q}} \frac{\tilde{t}}{\Delta t_{f,k,q,j}} \tau, \quad (4.11)$$

в котором l_q – характерный линейный размер q -ого элемента, $\lambda_{r,q,j}$ – коэффициенты интенсивности потока разрушений, т.е. количество разрушений q -ого элемента по дефекту j -го вида, выявленное r -ым диагностическим обследованием или известное по статистике разрушений (в этом случае примем $r=1$) в единицу времени (год) на единицу длины (км); $\Delta t_{f,k,q,j}$ – остаточный срок службы q -ого элемента k -ого участка по j -му разрушению.

Метод нахождения остаточного срока службы $\Delta t_{f,k,q,j}$ q -ого элемента k -ого участка по j -му разрушению с учетом результатов второй и третьей глав и механики разрушения [52] кратко изложен в Приложении (п. П.2).

Вероятность разрушения $Q_{k,r,q} = Q_{k,r,q}(\tau)$ q -го конструктивного элемента k -ого участка по всем дефектам, выявленным при r -ом диагностическом обследовании, $1 \leq r \leq R$, задается через $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$ (4.10) таким образом:

$$\text{оптимистический сценарий } Q_{k,r,q}(\tau) = \sum_{j=1}^J \left(\frac{Q_{k,r,q,j}(\tau)}{1 - Q_{k,r,q,j}(\tau)} \right) \prod_{j=1}^J [1 - Q_{k,r,q,j}(\tau)] \quad (4.12)$$

$$\text{пессимистический сценарий } Q_{k,r,q}(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^J [1 - Q_{k,r,q,j}(\tau)] \quad (4.13)$$

Вероятность разрушения k -ого участка по всем дефектам, выявленным при r -ом диагностическом обследовании, $1 \leq r \leq R$, $Q_{k,r} = Q_{k,r}(\tau)$, $t_R \leq \tau$, определяется так:

$$\text{оптимистический сценарий } Q_{k,r}(\tau) = \sum_{q=1}^Q \left(\frac{Q_{k,r,q}(\tau)}{1 - Q_{k,r,q}(\tau)} \right) \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,r,q}(\tau)] \quad (4.14)$$

$$\text{пессимистический сценарий } Q_{k,r}(\tau) = 1 - \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,r,q}(\tau)] \quad (4.15)$$

Вероятность разрушения k – ого участка после проведения R нормативных диагностик $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$, $t_R \leq \tau$, задается в виде:

$$\text{оптимистический сценарий } Q_{k,R}(\tau) = \sum_{r=1}^R \left(\frac{Q_{k,r}(\tau)}{1 - Q_{k,r}(\tau)} \right) \prod_{r=1}^R [1 - Q_{k,r}(\tau)] \quad (4.16)$$

$$\text{пессимистический сценарий } Q_{k,R}(\tau) = 1 - \prod_{r=1}^R [1 - Q_{k,r}(\tau)] \quad (4.17)$$

И, наконец, вероятность разрушения конструкции $Q_R = Q_R(\tau)$, $t_R \leq \tau$, после проведения R нормативных диагностик выражается через функции $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$ (4.17), (4.18) следующим образом:

$$\text{оптимистический сценарий } Q_R(\tau) = \sum_{k=1}^K \left(\frac{Q_{k,R}(\tau)}{1 - Q_{k,R}(\tau)} \right) \prod_{k=1}^K [1 - Q_{k,R}(\tau)] \quad (4.18)$$

$$\text{пессимистический сценарий } Q_R(\tau) = 1 - \prod_{k=1}^K [1 - Q_{k,R}(\tau)] \quad (4.19)$$

4.2. Критерий конструктивной надежности

Критерий конструктивной надежности конструкции формулируется таким образом:

$$Q(\tau) \leq \tilde{Q}, \quad (4.20)$$

при условии $t_{f,k,q} \geq \tilde{t}$, $k = 1, \dots, K$, $q = 1, \dots, Q$,

где $Q = Q(\tau)$ – вероятность разрушения конструкции в интервале нагружения $[0, t]$, определяемый выражениями (4.1) – (4.4); \tilde{Q} – приемлемое значение конструкционного риска, задаваемое (4.6) – (4.10).

Отметим, что в случае, если вероятность разрушения $Q(\tau) > \tilde{Q}$, конструкция может разрушиться ранее приемлемого срока службы \tilde{t} , что является недопустимым по нормам проектирования.

Срок службы конструкции t_f определяется как решение уравнения:

$$Q(t_f) = \tilde{Q} \quad (4.21)$$

Критерий конструктивной надежности конструкции после проведения R нормативных диагностик его технического состояния при условии замены конструктивных элементов с недопустимыми дефектами формулируется в следующем виде:

$$Q_R(\tau) \leq \tilde{Q}, \quad (4.22)$$

где $Q_R = Q_R(\tau)$ – конструкционный риск k -ого участка в интервале нагружения $[t_R, t]$, определяемый выражениями (4.11) – (4.19); \tilde{Q} – приемлемое значение конструкционного риска, задаваемое (4.6) – (4.10).

Остаточный срок службы конструкции Δt_f после проведения R нормативных диагностик ее технического состояния и замене конструктивных элементов с недопустимыми дефектами находится из уравнения:

$$Q_R(\Delta t_f) = \tilde{Q} \quad (4.23)$$

4.3. Критерий безопасной эксплуатации конструкций

На основе анализа литературных источников и нормативных документов выделяются следующие основные негативные факторы поражения при разрушении конструкций продуктопроводов: токсическое воздействие от истечения перекачиваемых токсических жидкостей и газов ($i=1$); термическое воздействие при возгорании струи газа, истекающего из сквозной трещины ($i=2$); термическое воздействие при загорании облака газозооушной 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 в случаях аварий газо- и нефтепроводов ($i = 6$). 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.

Рассматриваются известные понятия:

социального риска I_1 , $0 \leq I_1 \leq 1$, $\tau \in [0, t]$ – вероятности поражения человека,

промышленного риска I_2 , $0 \leq I_2 \leq 1$, $\tau \in [0, t]$ – вероятности разрушения промышленных объектов, находящихся в потенциально-опасной зоне вблизи конструкции,

экологического риска уничтожения флоры I_3 , $0 \leq I_3 \leq 1$, $\tau \in [0, t]$ – вероятности уничтожения флоры, растущей в потенциально-опасной зоне вблизи конструкции,

экологического риска уничтожения фауны I_4 , $0 \leq I_4 \leq 1$, $\tau \in [0, t]$ – вероятности уничтожения фауны при строительстве и эксплуатации конструкции.

Нормами и ГОСТами для конкретных конструкций определяются приемлемые значения \tilde{I}_m , $m = 1, \dots, 4$, социального, промышленного и экологического рисков как их приемлемое количество при разрушении конструкции в течении приемлемого срока службы \tilde{t} .

В этом пункте систематизируются известные данные по расчетам промышленных, социальных и экологических рисков от рассматриваемых групп негативных факторов поражения и применяются известные соотношения для их определения.

На основании результатов изучения современного состояния вопроса оценки безопасности при эксплуатации конструкций формулируются критерии конструктивной надежности с учетом социальных, промышленных и

экологических рисков (критерии социальной, промышленной и экологической безопасности).

4.3.1. Социальная безопасность

Критерий социальной безопасности, являющийся обобщением известных подходов, предлагается записывать в следующем виде:

$$Q(\tau)I_1(\tau) \leq \tilde{Q}\tilde{I}_1, \quad (4.24)$$

где $Q=Q(\tau)$ – конструкционный риск в интервале нагружения $[0, t]$, определяемый выражениями (4.1) – (4.4); \tilde{Q} – приемлемое значение конструкционного риска, задаваемое (4.5)–(4.9). При этом неравенство (4.24) имеет место при $\tilde{I}_1 \leq I_1$, т.к. в противном случае социальный риск меньше приемлемого значения и социальной опасности при разрушении конструкции не возникает.

Срок службы $t_{f,1}$, при котором эксплуатация конструкции становится социально опасной, находится как решение следующего уравнения:

$$Q(t_{f,1}) = \frac{\tilde{I}_1}{I_1} \tilde{Q} \quad (4.25)$$

При этом выполняется неравенство: $t_{f,1} \leq t_f$, где t_f – срок службы конструкции, определяемый по уравнение (4.21) без учета социальной безопасности ее эксплуатации.

Социальный риск I_1 определяется через социальные риски $I_{1,i}$ от возникновения i -ых негативных факторов с вероятностью J_i таким образом:

$$\text{оптимистический сценарий} \quad I_1 = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{J_i I_{1,i}}{1 - J_i I_{1,i}} \right) \prod_{i=1}^5 [1 - J_i I_{1,i}], \quad (4.26)$$

$$\text{пессимистический сценарий} \quad I_1 = 1 - \prod_{i=1}^5 [1 - J_i I_{1,i}], \quad (4.27)$$

где J_i – вероятность появления i -ого негативного фактора.

Определение значений социального риска $I_{1,i}$ от i -ого негативного фактора выполняют по рекомендациям отраслевых руководств, по известным теоретическим решениям или эмпирическим соотношениям.

Ниже приводятся известные соотношения (4.28) – (4.36) для нахождения социального риска $I_{1,i}$ от каждого негативного фактора, $i=1, \dots, 6$, необходимые для расчетов.

В общем виде социальный риск $I_{1,i}$ представляют таким образом:

$$I_{1,i} = \max \left\{ \int_0^R \int_0^{2\pi} \rho_1(r, \theta, \xi) I_{1,i}(r, \theta, \tau) r dr d\theta : 0 \leq \xi \leq t_p; 0 \leq \tau \leq t_i \right\}, i = 1, \dots, 6, (4.28)$$

где (r, θ) – полярная система координат с центром в точке возникновения i -ого негативного фактора; $\rho_1 = \rho_1(r, \theta, \xi)$ – функция распределения плотности нахождения жителей и сотрудников в зоне $[0, R]$ в зависимости от времени; t_p – период времени (целесообразно выбирать равным одному году); $I_{1,i} = I_{1,i}(r, \theta, \tau)$ – вероятность поражения человека в течении времени действия i -ого негативного фактора ($0 \leq \tau \leq t_i$); R – радиус действия i -ого негативного фактора, t_i – время действия i -ого негативного фактора.

В случаях аварий с выбросом токсических продуктов вероятность поражения человека $I_{1,1} = I_{1,1}(r, \theta, \tau)$ в (4.28) представляется в виде:

$$I_{1,1}(r, \theta, \tau) = a_1 * \ln \left\{ \left(\frac{D(r, \theta, \tau)}{D_0} \right)^2 \frac{\tau}{t_1} \right\}, 0 \leq \tau \leq t_1, a_1, D_0 = const \quad (4.29)$$

где $D = D(r, \theta, \tau)$ – удельная концентрация (отнесенная к единице объема) токсического вещества в точке (r, θ) в момент времени τ , t_1 – полное время

действия токсического поражения. Удельная концентрация $D = D(r, \theta, \tau)$ и время поражения t_1 зависят от плотности газа, средней скорости ветра, интенсивности и длительности выбросов и определяются методами гидроаэродинамики [170]; константы (α_1, D_0, t_1) лежат в таких диапазонах: $0.2 \leq \alpha_1 \leq 2.5$; $7 < -\alpha_1 \ln(D_0^2 t_1) < 60$.

Вероятность термического поражения человека $I_{1,2} = I_{1,2}(r, \tau)$ при возгорании струи газа, истекающего из сквозной трещины, входящая в (4.28), $i = 2$, ($I_{1,2}$ не зависит от θ) определяется в виде [170]:

$$I_{1,2}(r, \tau) = b_1 * \ln \left\{ \left(\frac{q(r, \tau)}{q_0} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_2} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_2, \quad b_1, q_0 = const, \quad (4.30)$$

где $q = q(r, \tau)$ – удельный тепловой поток (отнесенный к единице поверхности) в точке r , [М], в момент времени τ и t_2 – полное время горения струи, [с].

В таблице 4.1 приводятся численные значения радиуса термического поражения r ($I_{1,2} = 1$) для подземных трубопроводов различных диаметров D .

Диаметр, мм	530	720	820	1020	1220	1420
Размер котлована, м	28*15*4.5	35*12*5	60*15*4	106*30*12	49*22*12	65*40*10
Радиус термического воздействия r , м	250	195	244	244	275	188

Таблица 4.1. Значения радиуса термического воздействия r при возгорании струи газа, истекающего из сквозной трещины при разрушении подземных трубопроводов

При загорании облака газозадушной смеси при разрушении конструкции для вероятности термического поражения людей $I_{1,3} = I_{1,3}(r, \tau)$, не зависящей от θ , в (4.28) используют выражение:

$$I_{1,3}(r, \tau) = c_1 * \ln \left\{ \left(\frac{q(r, \tau)}{q_0} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_3} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_3, \quad c_1, q_0 = const, \quad (4.31)$$

$$q(r, \tau) = \left(\frac{R_s}{r} \right)^2 q_0 \left(\frac{\tau}{t_3} \right)^\beta, \quad (4.32)$$

где $q = q(r, \tau)$ – удельный тепловой поток (отнесенный к единице поверхности) в точке r , [М], в момент времени τ , t_3 – время существования огневого шара, [с]; $c_1 = 2.5$; $-3 \leq \beta \leq 4$; R_s , [М] – радиус огневого шара (радиус 100% поражения людей), приближенно определяется по следующей формуле:

$$R_s = 2.71 \left(\frac{M}{M_0} \right)^{0.325} \text{ м}, \quad \text{где } M = 0.678 S \sqrt{p \rho} \frac{\kappa \mathcal{E}}{c}, \quad (4.33)$$

где $\frac{M}{M_0}$ – относительный расход массы газа; S – площадь трещины, свищей или отверстия в конструктивном элементе, через которое происходит истечение газа, [м²]; p – внутреннее давление газа в зоне истечения, [МПа]; ρ – плотность газа, [кг/м³]. Координаты центра шара зависят от скорости ветра. Время существования огневого шара t_3 приближенно оценивают по зависимости:

$$t_3 = 0.85 \left(\frac{M}{M_0} \right)^{0.26} \text{ с}. \quad (4.34)$$

В качестве примера в таблице 4.2 приводятся численные значения наибольшего коллективного риска $I_{1,3} = I_{1,3}(r)$ в зависимости от расстояния r от центра взрыва облака газозвушной смеси при появлении магистральной трещины длиной 1420 мм (крупномасштабном разрушении) на подземном

участке газопровода для трех значений давления газа и времени существования огневого шара t_3 (средняя скорость ветра принималась 2 м/с).

	$r, \text{ м}$	40	50	60	70	100	150	170	190	200
$p, \text{ МПа}$	$t_2, \text{ с}$									
5.4	7	1.0	0.99	0.8	0.6	0.1	0.01	0	0	0
7.4	8	1.0	1.0	0.9	0.7	0.2	0.1	0.01	0	0
9.8	9	1.0	1.0	0.99	0.8	0.3	0.2	0.1	0.01	0

Таблица 4.2. Значения социального риска $I_{1,3}$ термического поражения людей при взрыве облака газозвушной смеси

Для социального риска $I_{1,4} = I_{1,4}(r, \tau)$ при поражении людей от воздействия ударной волны в (4.28) применяют соотношение:

$$I_{1,4}(r, \tau) = d_1 * \ln \left[\left(\frac{p_0}{p(r, \tau)} \right)^{\alpha_1} + \left(\frac{I_0}{I(r, \tau)} \right)^{\beta_1} \right], 0 \leq \tau \leq t_4, d_1, p_0, \alpha_1, \beta_1, I_0 = const, (4.35)$$

$I = I(r, \tau)$ и $p = p(r, \tau)$ – соответственно импульс и максимальное избыточное давление на фронте волны (в зависимости от расстояния r от центра взрыва) и t_4 – время действия взрывной волны определяются при решении

динамической задачи о взрыве; коэффициенты $d_1, p_0, \alpha_1, \beta_1, I_0$

выбираются равными: $d_1 = -0.2, p_0 = 40\text{ МПа}, \alpha_1 = 7.5, \beta_1 = 11.5, I_0 = 450\text{ кг}^*\text{ м/с}$.

В таблице 4.3 представлены численные значения социального риска

$I_{1,4} = I_{1,4}(r)$ в зависимости от расстояния r от центра взрыва на подземном участке газопровода для трех значений давления газа.

Для оценки социального риска $I_{1,5} = I_{1,5}(r)$ – вероятности поражения людей от разлета фрагментов разрушенного участка конструкции, в (4.28) применяют выражение:

$$I_{1,5}(r) = f_1 + g_1 \left(\frac{mv(r, \tau)^2}{I_0} \right), \quad 0 \leq \tau \leq t_5, \quad f_1, g_1, I_0 = const, \quad (4.36)$$

m и $v(r, \tau)$ – соответственно масса и скорость фрагмента и t_5 – время разлета фрагментов, находятся из решения задачи об ударном разрушении сосудов давления; параметры f_1 и g_1 выбирались такими: $f_1 = 10.5$, $g_1 = -21$.

$r, м$	40	45	55	70	85	100	120	0	150
$p, МПа$									
5.4	1.0	0.99	0.9	0.5	0.1	0.01	0	0	0
7.4	1.0	1.0	0.99	0.9	0.5	0.1	0.01	0	0
9.8	1.0	1.0	1.0	0.99	0.9	0.5	0.1	0.01	0

Таблица 4.3. Значения социального риска $I_{1,4}$ при разрушении подземного участка газопровода

Ниже рассмотрены некоторые примеры негативных воздействий на окружающую среду при эксплуатации и разрушении трубопроводов.

Наиболее известный случай группового травмирования со смертельным исходом – катастрофа под Уфой (14.06.1989) при загорании облака пропан-бутановой смеси на участке продуктопровода, транспортирующего широкие фракции легких углеводородов по территории Башкортостана. В результате разрушения основного металла трубы в зоне механических дефектов, нанесенных строительной техникой (по-видимому, при переключении линейных кранов возникло давление выше испытательного – гидроудар), образовалась продольная сквозная трещина длиной около двух метров, которая обусловила двухфазное истечение жидкости с растеканием по поверхности с формированием облака тяжелых углеводородных паров и его распространением на значительное расстояние. В пятистах метрах от аварийного участка проходили две колеи железной дороги. Источником зажигания, по-видимому, явился один из двух пассажирских поездов. Возникшая ударная волна привела к глобальному возгоранию растительности и пожару в поездах, унесшему около шестисот человеческих жизней. Площадь покрытия аварии 2.5 км, расстояние дрейфа – 900 – 1350 м. При этом произошло падение атмосферного давления (образование вакуума), что обусловило лесоповал, отслоение коры деревьев и др. разрушения в прилегающих лесных массивах.

В Бельгии в 2004 г. в результате утечки и взрыва газа на магистральном газопроводе уничтожено да завода, погибли 24 человека, ранены более 120 человек. Ударная волна ощущалась на расстоянии до 10 км от места аварии.

4.3.2. Промышленная безопасность

По принятой идеологии критерий промышленной безопасности при эксплуатации конструкции формулируется в виде:

$$Q(\varsigma)I_2 \leq \tilde{Q}\tilde{I}_2, \quad (4.37)$$

где $Q = Q(\tau)$ – конструкционный риск в интервале нагружения $[0, t]$, определяемый выражениями (4.1) – (4.4); \tilde{Q} – приемлемое значение конструкционного риска, задаваемое (4.5) – (4.9). При этом выполняется неравенство: $\tilde{I}_2 \leq I_2$ (при промышленном риске, меньшем приемлемого значения, промышленной опасности при разрушении конструкции не возникает).

Срок службы конструкции $t_{f,2}$, при котором эксплуатация конструкции становится промышленно опасной, определяется из уравнения:

$$Q(t_{f,2}) = \frac{\tilde{I}_2 \tilde{Q}}{I_2} \quad (4.38)$$

При этом выполняется неравенство: $t_{f,2} \leq t_f$, где t_f – срок службы конструкции, определяемый по уравнению (4.21) без учета антропогенного фактора.

Аналогично формулам (4.26), (4.27) представляется выражение промышленного риска I_2 через промышленные риски $I_{2,i}$ при разрушении k – ого участка от возникновения i – го негативного фактора с вероятностью J_i в виде:

оптимистический сценарий
$$I_2 = \sum_{i=2}^5 \left(\frac{J_i I_{2,i}}{1 - J_i I_{2,i}} \right) \prod_{i=2}^5 [1 - J_i I_{2,i}], \quad (4.39)$$

пессимистический сценарий
$$I_2 = 1 - \prod_{i=2}^5 [1 - J_i I_{2,i}], \quad (4.40)$$

значения J_i , $i=2, \dots, 5$, определяются по известным данным о значениях вероятности появления i -тых негативных факторов при разрушении конструктивных элементов.

Промышленный риск $I_{2,i}$ задают следующим образом:

$$I_{2,i} = \max \left\{ \int_0^R \int_0^{2\pi} \rho_1(r, \theta) I_{2,i}(r, \theta, \tau) r dr d\theta : 0 \leq \tau \leq t_i \right\}, \quad i = 2, \dots, 5, \quad (4.41)$$

где (r, θ) – полярная система координат с центром в точке i -ого негативного фактора; $\rho_1 = \rho_1(r, \theta)$ – плотность размещения промышленных объектов в зоне $[0, R]$; $I_{2,i} = I_{2,i}(r, \theta, \tau)$ – вероятность разрушения объектов в течении времени действия i -ого негативного фактора t_i .

В нормативных расчетах применяют следующие выражения для определения промышленных рисков (см. соотношения (4.42) – (4.45)). Вероятность термического поражения объектов при возгорании струи газа, истекающего из сквозной трещины, предлагается оценивать по выражению, аналогичному (4.30):

$$I_{2,2}(r, \tau) = b_2 * \ln \left\{ \left(\frac{q(r, \tau)}{q_0} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_2} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_2, \quad b_2, q_0 = const, \quad (4.42)$$

где $q = q(r, \tau)$ – удельный тепловой поток в точке r и t_2 – полное время горения струи.

В таблице 4.4 представлены численные значения промышленного риска от термическом воздействия горячей струи $I_{2,2} = I_{2,2}(r)$ при разрушении трубопровода от сквозной трещины длиной 1420 мм подземного участка.

Для вероятности возгорания объектов под действием теплового потока горящего продукта $I_{2,3}$ применяют выражения, аналогичные (4.42), с учетом (4.31) – (4.33):

$$I_{2,3}(r, \tau) = c_2 * \ln \left\{ \left(\frac{q(r, \tau)}{q_0} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_3} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_3, \quad c_2, q_0 = const, \quad (4.43)$$

где $q = q(r, \tau)$ – удельный тепловой поток в точке r и t_3 – время существования огневого шара.

$r, м$	40	50	80	150	180	230	350
$p, МПа$							
5.4	1.0	0.9	0.7	0.5	0.2	0.01	0
7.4	1.0	0.99	0.9	0.5	0.3	0.1	0
9.8	1.0	1.0	0.99	0.6	0.4	0.2	0

Таблица 4.4. Значения промышленного риска $I_{2,2}$ при термическом воздействии горячей струи

Оценка вероятности разрушения зданий и сооружений $I_{2,4}$ от воздействия ударной волны производится по выражению вида (4.35):

$$I_{2,4}(r, \tau) = d_2 * \ln \left(\left(\frac{p_0}{p(r, \tau)} \right)^{\alpha_2} + \left(\frac{I_0}{I(r, \tau)} \right)^{\beta_2} \right), \quad 0 \leq \tau \leq t_4, \quad d_2, p_0, \alpha_2, \beta_2, I_0 = const, \quad (4.44)$$

$r, м$	30	40	50	80	120	180	250	350	450
$p, МПа$									
5.4	1.0	0.99	0.9	0.7	0.5	0.1	0.01	0	0
7.4	1.0	1.0	0.99	0.9	0.7	0.4	0.1	0.01	0
9.8	1.0	1.0	1.0	0.99	0.9	0.6	0.4	0.05	0

Таблица 4.5. Значения промышленного риска $I_{2,3}$ при взрывном превращении облака газозвушной смеси

Примером теплового и барического воздействий на промышленные здания являются последствия аварии на компрессорной станции Северного Урала в восьмидесятые годы. Раскрывшаяся сквозная трещина по сварному соединению тройника у пылеуловителя (цилиндра диаметром 2.5 м и длиной 12 м) привела к значительному истечению газа. В зоне облака оказалась автомашина с открытым пламенем, ставшая источником загорания облака газозвушной смеси. Пылеуловитель, из патрубка которого истекала горячая струя газа, улетел на значительное расстояние. В ближайшем цехе начался пожар. К счастью, обошлось без жертв.

Печальным примером разрушения от воздействий взрывной волны является авария в 1978 г. при испытании повышенным давлением газа обвязочного газопровода цеха компрессорной станции «Приполярная» в зимних условиях. Хрупкое разрушение всего надземного газопровода диаметром 1.02 м и длиной свыше 800 м с корпусами 36-ти шаровых кранов, инициированное технологическими и металлургическими дефектами в тройниковом соединении, привело к появлению ударной воздушной волны и разлету фрагментов газопровода, разрушивших цех, и гибели шести рабочих.

Промышленный риск $I_{2,5}$ вероятности уничтожения объектов от разлета фрагментов разрушенного участка конструкции определяется по (4.36) в виде:

$$I_{2,5}(r) = f_2 + g_2 \left(\frac{mv(r, \tau)^2}{I_0} \right), \quad 0 \leq \tau \leq t_5, \quad f_2, g_2, I_0 = const, \quad (4.45)$$

m и $v(r, \tau)$ – соответственно масса и скорость фрагментов и t_5 – время разлета фрагментов, находятся из решения задачи об ударном разрушении сосудов давления.

4.3.3. Экологическая безопасность

Экологический риск уничтожения флоры I_3 при разрушении конструкции по аналогии с (4.26), (4.27) определяется через экологические риски $I_{3,i}$ уничтожения флоры от возникновения i -го негативного фактора с вероятностью J_i в виде:

оптимистический сценарий
$$I_3 = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{J_i I_{3,i}}{1 - J_i I_{3,i}} \right) \prod_{j=1}^5 [1 - J_j I_{3,j}], \quad (4.46)$$

пессимистический сценарий
$$I_3 = 1 - \prod_{j=1}^5 [1 - J_j I_{3,j}] \quad (4.47)$$

Критерий экологической безопасности флоры формулируется по аналогии с (4.24) в виде :

$$Q(\varepsilon) I_3 \leq \tilde{Q} \tilde{I}_3, \quad (4.48)$$

где $Q=Q(\tau)$ – конструкционный риск в интервале нагружения $[0,t]$, определяемый выражениями (4.1) – (4.4); \tilde{Q} – приемлемое значение конструкционного риска, задаваемое (4.5) – (4.9), \tilde{I}_3 – экономически и социально приемлемое количество уничтоженных представителей базового вида растительности при разрушении конструкции за приемлемый срок службы \tilde{t} , определяемое нормами эксплуатации рассматриваемых конструкций. При этом выполняется неравенство: $\tilde{I}_3 \leq I_3$.

Срок службы конструкции $t_{f,3}$, при котором разрушение конструкции становится опасным для флоры, определяется из уравнения:

$$Q(t_{f,3}) = \frac{\tilde{I}_3 \tilde{Q}}{I_3} \quad (4.49)$$

При этом выполняется неравенство: $t_{f,3} \leq t_f$.

Экологический риск уничтожения фауны при разрушении представляется в виде:

оптимистический сценарий
$$I_4 = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{J_i I_{4,i}}{1 - J_i I_{4,i}} \right) \prod_{j=1}^5 [1 - J_j I_{4,j}], \quad (4.50)$$

пессимистический сценарий
$$I_4 = 1 - \prod_{j=1}^5 [1 - J_j I_{4,j}], \quad (4.51)$$

где экологические риски $I_{4,i}$ определяются при возникновении i -го негативного фактора с вероятностью J_i . Оценку значений экологических рисков $I_{4,i}$ для исследуемых объектов выполняют по отраслевым рекомендациям.

Критерий экологической безопасности фауны формулируется таким образом:

$$Q(\zeta)I_4 \leq \tilde{Q}\tilde{I}_4, \quad (4.52)$$

где $Q=Q(\tau)$ – конструкционный риск в интервале нагружения $[0, t]$, определяемый выражениями (4.1) – (4.4); \tilde{Q} – приемлемое значение конструкционного риска, задаваемое (4.5) – (4.9), I_4 – экологический риск уничтожения фауны, \tilde{I}_4 – его приемлемое значение, т.е. экономически и социально приемлемое количество уничтоженных представителей базового вида фауны при разрушении конструкции за приемлемый срок службы \tilde{t} , $I_4^* \leq I_4$.

Срок службы конструкции $t_{f,4}$, при котором разрушение конструкции становится опасным для фауны, удовлетворяет равенству:

$$Q(t_{f,4}) = \frac{\tilde{I}_4 \tilde{Q}}{I_4} \quad (4.53)$$

Для оценки экологических рисков $I_{3,i}$ и $I_{4,i}$, $i=1, \dots, 5$, при разрушении конструкции от токсического и термического воздействий истекающего продукта, а также при воздействии взрывных волн и разлетающихся осколков принимаются соотношения аналогичные (4.41) и (4.28) соответственно в виде:

$$I_{3,i} = \max \left\{ \int_0^R \int_0^{2\pi} \rho_3(r, \theta) I_{3,i}(r, \theta, \tau) r dr d\theta : 0 \leq \tau \leq t_i \right\}, \quad (4.54)$$

$$I_{4,i} = \max \left\{ \int_0^R \int_0^{2\pi} \rho_4(r, \theta, \xi) I_{4,i}(r, \theta, \tau) r dr d\theta : 0 \leq \xi \leq t_p; 0 \leq \tau \leq t_i \right\}, \quad (4.55)$$

где для функций $I_{m,i} = I_{m,i}(r, \theta, \tau)$, $m=3,4$, имеем такие выражения:

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

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

$$I_{m,3}(r, \tau) = c_m * \ln \left\{ \left(\frac{q(r)}{q_0} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_3} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_3, \quad c_m, q_0 = \text{const},$$

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

$$I_{m,5}(r) = f_m + g_m \left(\frac{mv(r, \tau)^2}{I_0} \right), \quad 0 \leq \tau \leq t_5, \quad f_m, g_m, I_0 = \text{const}, \quad m = 3, 4, \quad (4.56)$$

$\rho_m = \rho_m(r, \theta, \xi)$ – функция распределения плотности флоры ($m=3$) и фауны ($m=4$) в зоне $[0, R]$.

В качестве примера можно привести проведенный анализ негативных воздействий на растительность при строительстве и эксплуатации газовых объектов на Бованенковском месторождении полуострова Ямал. Результаты показали, что мхи и лишайники постепенно будут вымирать, что приведет к значительному увеличению глубины протаивания грунта и образованию оврагов. Это, в свою очередь, увеличит конструкционный риск подземных участков газопроводов, связанный с ростом продольных напряжений.

4.3.4. Критерий безопасной эксплуатации конструкций

Теперь сформулируем основной критерий этой Главы.

Согласно развиваемому подходу критерий безопасности с учетом социальных, промышленных и экологических рисков при эксплуатации конструкций на основе неравенств (4.24), (4.37), (4.48), (4.52) предлагается записывать таким образом:

$$Q(\tau) \leq k\tilde{Q}, \quad k = \min \left\{ 1, \left(\frac{\tilde{I}_m}{I_m} : m = 1, \dots, 4 \right) \right\} \quad (4.57)$$

В неравенстве (4.57) функция $Q = Q(\tau)$ – конструкционный риск в интервале

нагружения $[0, t]$, определяемый выражениями (4.1) – (4.4), \tilde{Q} – приемлемое значение конструкционного риска, задаваемое (4.6) – (4.10). В выражении для коэффициента k индексы $m=1, \dots, 4$ обозначают социальный, промышленный и экологические риски соответственно. Коэффициент k определяется по результатам расчетов социального, промышленного и экологического рисков согласно следующим известным выражениям (см. п.4.3.1 – 4.3.3):

$$\text{оптимистический сценарий} \quad I_m = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{J_i I_{m,i}}{1 - J_i I_{m,i}} \right) \prod_{i=1}^6 [1 - J_i I_{m,i}], \quad (4.58)$$

$$\text{пессимистический сценарий} \quad I_m = 1 - \prod_{i=1}^6 [1 - J_i I_{m,i}], \quad (4.59)$$

$$I_{m,i} = \max \left\{ \int_0^{R2\pi} \int_0^0 \rho_m(r, \theta) I_{m,i}(r, \theta, \tau) r dr d\theta : 0 \leq \tau \leq t_i \right\}, \quad m=2, 3, \quad i=1, \dots, 6, \quad (4.60)$$

$$I_{m,i} = \max \left\{ \int_0^{R2\pi} \int_0^0 \rho_m(r, \theta, \xi) I_{m,i}(r, \theta, \tau) r dr d\theta : 0 \leq \xi \leq t_p; 0 \leq \tau \leq t_i \right\},$$

$$m=1, 4, \quad i=1, \dots, 6, \quad (4.61)$$

$$I_{m,1}(r, \theta, \tau) = a_m * \ln \left\{ \left(\frac{D(r, \theta, \tau)}{D_0} \right)^2 \frac{\tau}{t_1} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_1, \quad a_m, D_0 = \text{const} \quad m=1, \dots, 4, \quad (4.62)$$

$$I_{m,2}(r, \tau) = b_m * \ln \left\{ \left(\frac{q(r, \tau)}{q_0} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_2} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_2, \quad b_m, q_0 = \text{const}, \quad m=1, \dots, 4, \quad (4.63)$$

$$I_{m,3}(r, \tau) = c_m * \ln \left\{ \left(\frac{q(r, \tau)}{q_0} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_3} \right\}, \quad 0 \leq \tau \leq t_3, \quad c_m, q_0 = \text{const}, \quad m=1, \dots, 4, \quad (4.64)$$

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

$$d_m, p_0, \alpha_m, \beta_m, I_0 = \text{const}, \quad m=1, \dots, 4, \quad (4.65)$$

$$I_{m,5}(r) = f_m + g_m \left(\frac{mv(r, \tau)^2}{I_0} \right), \quad 0 \leq \tau \leq t_4, \quad f_m, g_m, I_0 = \text{const}, \quad m=1, \dots, 4 \quad (4.66)$$

и заданным требованиями нормативно-технических документов приемлемым социальным \tilde{I}_1 , промышленным \tilde{I}_2 и экологическим \tilde{I}_3 и \tilde{I}_4 рискам. Для газопроводов РФ федеральные приемлемые риски эксплуатации в течение приемлемого срока службы следующие:

приемлемый коллективный риск:

$$I_1^* = (2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}) \left[\frac{\text{количество людей}}{\text{км трубопровода}} \right] * L_0, \quad L_0 - \text{длина трубопровода};$$

$$\text{приемлемый промышленный риск: } I_2^* = (10^{-3} - 10^{-4}) \left[\frac{\text{количество объектов}}{\text{кв. км}} \right] * S_2,$$

S_2 - площадь потенциально опасной зоны для промышленных и гражданских объектов при разрушении трубопровода;

приемлемое значение вероятности уничтожения флоры:

$$I_3^* = (10^{-1} - 10^{-2}) \left[\frac{\text{количество представителей флоры}}{\text{кв. км}} \right] * S_3,$$

S_3 - площадь потенциально опасной для флоры зоны вокруг трубопровода;

приемлемое значение вероятности уничтожения фауны:

$$I_4^* = (10^{-2} - 10^{-3}) \left[\frac{\text{количество представителей фауны}}{\text{кв. км}} \right] * S_4,$$

S_4 - площадь потенциально опасной для фауны зоны вокруг трубопровода.

При условии, когда фактические социальные, промышленные и экологические риски не превышают соответствующих приемлемых значений, коэффициент $k=1$, и неравенство (4.57) совпадает с (4.20), т.е. является критерием конструктивной надежности конструкции.

Из неравенства (4.57) определяется срок службы конструкции t_f с учетом социальных, промышленных и экологических рисков как решение уравнения:

$$Q(t_f) = k\tilde{Q}, \quad k = \min \left\{ 1, \left(\frac{\tilde{I}_m}{I_m} : m = 1, \dots, 4 \right) \right\} \quad (4.67)$$

Аналогично критерий безопасности с учетом социальных, промышленных и экологических рисков при эксплуатации конструкции после проведения R нормативных диагностик ее технического состояния при условии замены конструктивных элементов с недопустимыми дефектами формулируется в следующем виде:

$$Q_R(\tau) \leq k\tilde{Q}, \quad k = \min \left\{ 1, \left(\frac{\tilde{I}_m}{I_m} : m = 1, \dots, 4 \right) \right\} \quad (4.68)$$

В неравенстве (4.68) функция $Q_R = Q_R(\tau)$ – конструкционный риск k – ого участка в интервале нагружения $[t_R, t]$, определяемый выражениями (4.11) – (4.19); \tilde{Q} – приемлемое его приемлемое значение, задаваемое (4.6) – (4.10), I_m – социальные, промышленные и экологические риски при $m = 1, \dots, 4$ соответственно, которые задаются выражениями (4.58) – (4.66), \tilde{I}_m – их приемлемые значения.

И наконец, остаточный срок службы конструкции Δt_f после проведения R нормативных диагностик ее технического состояния находится из уравнения:

$$Q_R(\Delta t_f) = k\tilde{Q}, \quad k = \min \left\{ 1, \left(\frac{\tilde{I}_m}{I_m} : m = 1, \dots, 4 \right) \right\} \quad (4.69)$$

ВЫВОДЫ по четвертой главе

1. Разработаны критерии безопасности протяженных конструкций, учитывающие социальные, промышленные и экологические риски.
2. Предложены выражения для функции вероятности разрушения конструкции через вероятности разрушения ее однотипных конструктивных элементов. Срок службы конструктивного элемента, входящий в выражения для вероятности разрушения по элементам, находится с учетом результатов анализа вероятности разрушения металла по определенному уровню накопленных дефектов на основе предложенной в диссертации модели.
3. Рассмотрено понятие приемлемого значения конструкционного риска. В предположении, что вероятность разрушения конструкции не должна превышать ее заданного приемлемого значения (критерий конструктивной надежности), выписано условие для нахождения срока службы конструкции.
4. Проведена классификация негативных факторов поражения при разрушении конструктивных элементов трубопроводов.
Систематизированы экспериментальные данные по определению промышленных, социальных и экологических рисков от этих негативных факторов. Приведены соотношения для этих рисков, используемые в расчетной практике. Рассмотрены приемлемые значения рисков.
5. 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.
6. Предложен критерий безопасности в виде неравенства, в котором конструкционный риск не превышает заданного приемлемого значения, умноженного на коэффициент, определяемый по расчетным и приемлемым

значениям промышленных, социальных и экологических рисков. Критерий является теоретическим обобщением известных соотношений, используемых в расчетной практике при разработке инвестиционных проектов по строительству и эксплуатации различных конструкций продуктопроводов. Выписано уравнение для определения срока безопасной эксплуатации конструкций.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Метод экспертной оценки долговечности магистральных трубопроводов

Этот раздел диссертации посвящен краткому изложению инженерного метода оценки сроков службы и остаточной долговечности участков магистральных газо- и нефтепроводов при сложном эксплуатационном нагружении. Он основан на результатах анализа обширной нормативно-регламентирующей документации по данной проблеме. Метод разрабатывался по заданию Управления проектирования и экспертизы ПАО Газпром в течение многих лет и реализован в ряде нормативных документов.

Метод построен на основе критерия конструктивной надежности с учетом социального, промышленного и экологического рисков, представленного в Главе 4, с применением построенной теории усталостного разрушения металла конструктивных элементов, изложенной в Главе 2 и Главе 3 настоящей работы. Для иллюстрации приведен пример по определению проектных сроков службы подземного участка магистрального газопровода в сложных природных условиях.

Участки продуктопроводов состоят из большого числа конструктивных элементов, находящихся под внутренним давлением перекачиваемого продукта, действием массовых сил и температурного поля. Кроме этого, вследствие большой протяженности эксплуатация таких конструкций происходит в различных природно-климатических условиях, участки трубопровода находятся под различными механическими (в результате действия третьих лиц и строительной техники), техногенными (разрушение соседних объектов), аэрогидродинамическими (воздушные и водные потоки, морских и суспензионных течений, потоков массы «осколков», грязевых потоков и др.), геодинамическими (природные оползни и просадки, проседание и горизонтальные сдвиги толщин пород, осадки грунта и т.п.), сейсмическими воздействиями. В результате почвенной коррозии, морской

коррозии с кислородной или смешанной деполяризацией, коррозии с водородной деполяризацией, а также коррозионной активности перекачиваемого продукта при действии эксплуатационного нагружения происходит стресс–коррозионное разрушение. В результате воздействия на участки трубопровода микроорганизмов происходят биокоррозионные разрушения. Отсюда возникает необходимость кроме вероятности разрушения участков при эксплуатационном нагружении рассматривать вероятность разрушения от указанных выше факторов. С этой целью в П.3 вводится понятие участков трубопроводов трех классов в зависимости от учета разных групп факторов и для каждого класса формулируется критерий конструктивной надежности участка с учетом антропогенного фактора.

По нашему мнению, предложенный метод представляет единый комплекс для решения задачи оценки долговечности и безопасности эксплуатации конструкций продуктопроводов под действием эксплуатационных нагрузок и воздействий.

П. 1. Представление процесса эксплуатационного нагружения расчетного участка трубопровода

Схематично рассмотрим конструкцию линейного участка длины L_0 магистрального трубопровода, заключенного между смежными компрессорными или нефтеперекачивающими станциями, $L_0 = 100 - 120$ км.

Линейный участок состоит из расчетных участков длины l_k , $k = 1, \dots, K$, $l_k \approx 20$

– 25 км, $\sum_{k=1}^K l_k = L_0$. Длина каждого расчетного участка такова, что внутренние

и внешние нагрузки и воздействия на его конструкцию приближенно могут рассматриваться как однородные по его протяженности.

Расчетный участок l_k , $k = 1, \dots, K$, формируется из некоторого набора последовательно соединенных следующих типовых конструктивных элементов q , $q = 1, \dots, 7$, (см. рис. П.1) с характерными линейными размерами

$l_{k,q}$: 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, $q=7$. Рассматривается q -тый тонкостенный конструктивный элемент с отношением толщины стенки δ к внешнему диаметру D : $\delta/D \leq 1/70$, который содержит определенные геометрические и физические дефекты механического, технологического и эксплуатационного происхождения.

Нагрузки и воздействия на участок трубопровода подразделяют на три группы. К первой группе относятся следующие нагрузки и воздействия: – эксплуатационное нагружение (внутреннее давление перекачиваемого продукта, массовые силы, температура); потенциальные механические воздействия третьих лиц и строительной техники; техногенные воздействия; гидрологические, геодинамические и сейсмические воздействия. Во вторую группу включают потенциальные коррозионные воздействия на металл конструктивных элементов (почвенная коррозия, коррозионная активность перекачиваемого продукта, потенциальные электромагнитные воздействия). Третья группа рассматривает потенциальные стресс- и биокоррозионные воздействия на металл конструктивных элементов.

На рис. П. 1 представлено эксплуатационное нагружение q -тых конструктивных элементов ($q=1, \dots, 7$) изгибающими и крутящим вектор – моментами \vec{M}_ξ и вектор – усилиями \vec{Q}_ξ , $\xi = x, y, z$, возникающими в поперечных сечениях.

Компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат, соответствующие вектор – усилиям \vec{Q}_ξ и вектор – моментам \vec{M}_ξ , $\xi = (x_j, y_j, z_j)$, $j=1, 2$, в поперечных сечениях (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) и

внутреннему давлению $p = p(\tau)$, $\tau \in [0, t]$, действующим на конструктивные элементы: основной металл $q = 1$ и переходник $q = 6$ k -го расчетного участка (индекс q опущен), определяют по таким формулам (СНиП 2.05.06-85, СНиП 11-6-74, СН 527-80 и ВСН 185-95):

$$\sigma_{\theta\theta,k}(\tau) = k_p \frac{p(\tau)(D - 2\delta^*)}{2\delta^*}, \quad \sigma_{zz,k}(x_j, y_j, z_j, \tau) = \pm \sqrt{\frac{M_{xj}^2 + M_{yj}^2}{W}} + \frac{Q_{zj}}{F} + \nu \sigma_{\theta\theta,k}(\tau),$$

$$\sigma_{r\theta,k}(x_j, y_j, z_j) = \frac{2\sqrt{Q_{xj}^2 + Q_{yj}^2}}{F} + \frac{M_{zj}}{2W}; \quad \sigma_{rr,k}, \sigma_{rz,k}, \sigma_{\theta z,k} \ll \sigma_{\theta\theta,k}, \quad j=1,2, \quad k=1, \dots, K \quad (1)$$

Здесь D – внешний диаметр конструктивного элемента; $F = \pi\delta^*(D - \delta^*)$, δ^* – толщина стенок трубы с определенными допусками (ВСН 185-95); $W = 2I/D$, I – момент инерции сечения; k_p – коэффициент надежности по нагрузке (СНиП 2.05.06-85); ν – коэффициент Пуассона.

Неоднородное напряженное состояние в монтажных сварных швах ($q = 2, 3$) учитывают введением в формулы (1) коэффициентов концентрации напряжений в тангенциальном направлении $K_{\theta,q}$ и в осевом направлении $K_{z,q}$ ($q = 2$ и $q = 3$ для кольцевого и продольного сварных соединений соответственно), в виде (ВСН 185-95):

$$\sigma_{\theta\theta,k,q}(\tau) = K_{\theta,q} \sigma_{\theta\theta,k}(\tau), \quad \sigma_{zz,k,q}(x_j, y_j, z_j, \tau) = K_{z,q} \sigma_{zz,k}(x_j, y_j, z_j, \tau),$$

$$\sigma_{r\theta,k,q}(x_j, y_j, z_j) = \sigma_{r\theta,k}(x_j, y_j, z_j), \quad j=1,2, \quad q=2,3, \quad (2)$$

где $\sigma_{\theta\theta,k} = \sigma_{\theta\theta,k}(\tau)$, $\sigma_{zz,k} = \sigma_{zz,k}(x_j, y_j, z_j, \tau)$ и $\sigma_{r\theta,k} = \sigma_{r\theta,k}(x_j, y_j, z_j)$ определяются по (1).

Для тройникового соединения ($q = 4$) в поперечном сечении его магистральной части справедливы выражения (1); для его отводящей части выражения для напряжений принимаются в виде:

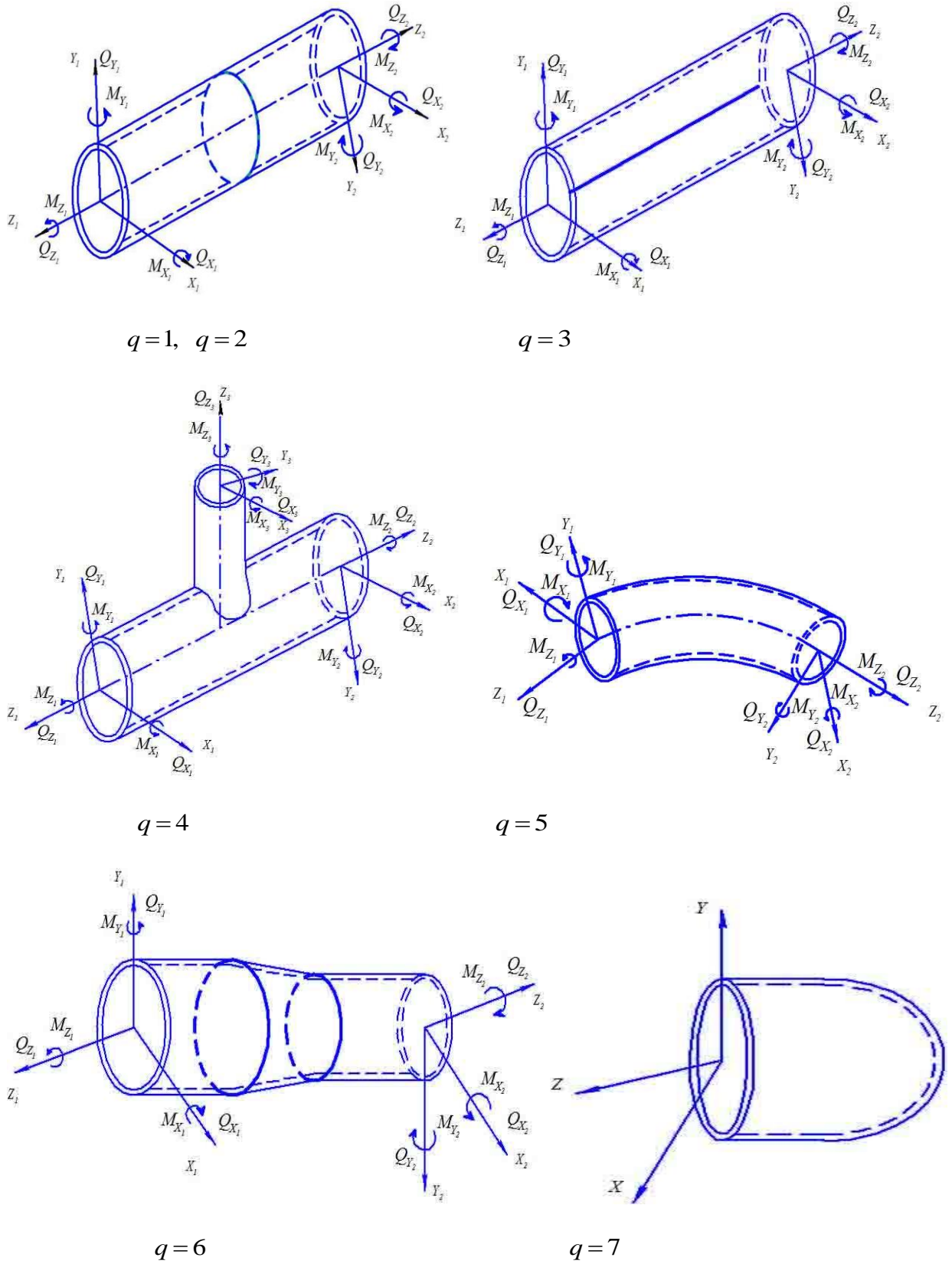


Рис. П. 1. Схема действия моментов M_ξ и усилий Q_ξ , $\xi = (x_j, y_j, z_j)$, $j=1,2$, на торцах семи типовых конструктивных элементов участка трубовода

$$\sigma_{\theta\theta,k,4}(\tau) = K_{\theta,4} \sigma_{\theta\theta,k}(\tau), \quad \sigma_{zz,k,4}(x_3, y_3, z_3, \tau) = K_{z,4} \sigma_{zz,k}(x_3, y_3, z_3, \tau),$$

$$\sigma_{r\theta,k,4}(x_3, y_3, z_3) = \max \left[\left\{ \frac{2\sqrt{Q_{xj}^2 + Q_{yj}^2}}{F}, \frac{2\sqrt{Q_{x3}^2 + Q_{y3}^2}}{F_3}, j=1,2 \right\} + \frac{M_{z3}}{2W_3} \right], \quad (3)$$

где $K_{\theta,4}$ и $K_{z,4}$ — коэффициенты концентрации напряжений в тангенциальном и осевом направлении отводящей части тройника соответственно, $\sigma_{\theta\theta,k} = \sigma_{\theta\theta,k}(\tau)$ и $\sigma_{zz,k} = \sigma_{zz,k}(x_3, y_3, z_3, \zeta)$ определяются по (1), $j=3$.

Неоднородное напряженное состояние в отводах, $q=5$, представим в виде:

$$\sigma_{\theta\theta,k,5}(x_j, y_j, \tau) = K_{\theta,5} \left(\sigma_{\theta\theta,k}(\tau) \pm \frac{\sqrt{M_{xj}^2 + M_{yj}^2}}{W} \right), \quad j=1,2 \quad (4)$$

$$\sigma_{zz,k,5}(x_j, y_j, z_j, \tau) = K_{z,5} \sigma_{zz,k}(x_j, y_j, z_j, \tau),$$

$$\sigma_{r\theta,k,5}(x_j, y_j, z_j) = \sigma_{r\theta,k}(x_j, y_j, z_j),$$

$K_{\theta,5}$ и $K_{z,5}$ — коэффициенты концентрации напряжений в тангенциальном

и осевом направлении отвода соответственно, $\sigma_{\theta\theta,k} = \sigma_{\theta\theta,k}(\tau)$,

$\sigma_{zz,k} = \sigma_{zz,k}(x_j, y_j, z_j, \tau)$ и $\sigma_{r\theta,k} = \sigma_{r\theta,k}(x_j, y_j, z_j)$ задаются по (1).

Для днища ($q=7$) напряженное состояние представляется в виде:

$$\sigma_{\theta\theta,k,7}(\tau) = \sigma_{zz,k,7}(\tau) = \frac{1}{2} \sigma_{\theta\theta,k}(\tau), \quad \sigma_{r\theta,k,7} \ll \sigma_{\theta\theta,k}, \quad (5)$$

$\sigma_{\theta\theta,k} = \sigma_{\theta\theta,k}(\tau)$ выражается согласно (1).

Для всех элементов компонентами напряжений σ_{rr} , σ_{rz} , $\sigma_{\theta z}$ пренебрегается. Напряжение $\sigma_{r\theta}$ значительно меньше $\sigma_{\theta\theta}$ и в дальнейшем также не учитывается.

Таким образом, компоненты тензора напряжений для типовых конструктивных элементов представляются известным образом по соотношениям (1) – (5).

Нагружение трубопровода внутренним давлением падает от компрессорной станции по длине (наиболее опасным является первый участок), при этом происходят случайные колебания давления с амплитудой до 10-15% от максимального значения. Кроме того, в процессе эксплуатации происходит плановое увеличение (уменьшение) давления (годовое, месячное) в зависимости от объемов потребления. Экспериментально обнаружено, что эти колебания определяют разрушение конструктивных элементов, особенно в зонах концентрации напряжений.

С целью учесть изменение давления предлагается рассмотреть зависимость давления перекачиваемого продукта от времени в виде циклического нагружения с несимметричным циклом с параметром асимметрии α , амплитудами σ^s и частотой ω_s , $\omega_s = 10^s \left[\frac{\text{циклов}}{\text{год}} \right]$, $s=1, \dots, 4$. Тогда процесс нагружения q -го конструктивного элемента 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:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta, k, q}(\tau) = K_{\theta, q} \sigma_{\theta} f(l_k) \left(\alpha + \sum_{s=1}^4 \sigma^s \sin \omega_s \tau \right), \\ \sigma_{zz, k, q}(\tau) = \frac{K_{z, q}}{K_{\theta, q}} \left(\nu \sigma_{\theta\theta, k, q}(\tau) + \sigma_z(k) \right) \end{cases} \quad k=1, \dots, K, \quad q=1, \dots, 7, \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{p(D - 2\delta^*)}{2\delta^*}, \quad f(l_k) = 1 - C_k \frac{l_k}{L_0},$$

$$\sigma_z(k) = E \left[-\alpha T_k \pm R \sqrt{\frac{1}{\rho_{1, k}^2} + \frac{1}{\rho_{2, k}^2}} \right], \quad T_k = T_0 \left(1 - \beta \frac{l_k}{L_0} \right) \quad (7)$$

Здесь введены обозначения: p – рабочее (нормативное) внутреннее давление перекачиваемого продукта; R – радиус основной трубы (СНиП 2.05.06-85*, СНиП «Магистральные трубопроводы», 1985 г.); 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 материала; T_k – рабочая температура и T_0 – начальная температура после строительства (температура замыкания участка); 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, $K_{\theta,1} = K_{\theta,3} = K_{z,1} = K_{z,3} = 1$.

П.2. Определение долговечности обобщенных конструктивных элементов участка трубопровода

В п.4.1 введены понятия функции поврежденности q -го конструктивного элемента k -го расчетного участка $\Omega_{k,q} = \Omega_{k,q}(\tau)$, $k = 1, \dots, K$, $q = 1, \dots, 7$, как непрерывной возрастающей функции на интервале времени $\tau \in [0, t]$: $0 \leq \Omega_{k,q} \leq 1$ и вероятности разрушения $n_{k,q}$ q -ых типовых конструктивных элементов $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$ по выражению (4.5). В (4.5) входит срок службы q -ого элемента k -ого участка $t_{f,k,q}$. Здесь дается алгоритм его определения для нагружений (6), (7).

Функция поврежденности $\Omega_{k,q} = \Omega_{k,q}(\zeta)$ определяется по теории предельных процессов нагружения [50], согласно которой:

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

$$\Omega_k(\tau) = \frac{\sigma_{\theta f}(l_k)\alpha^2}{\Pi_1(\tau, k)} + \frac{|\sigma_z(k) + \nu\sigma_{\theta f}(l_k)\alpha| \alpha}{\sqrt{\Pi_1(\tau, k)\Pi_2(\tau, k)}} + \frac{(\sigma_z(k) + \nu k_p \sigma_{\theta f}(l_k)\alpha)^2}{\Pi_2(\tau, k)}, \quad (8)$$

Где

$$\Pi_1(\tau) = \alpha\sigma^*(\tau) + \sum_{s=1}^4 \sigma^s \sigma_{-1}^s(\tau, \omega_s), \quad \Pi_2(\tau, k) = \nu k_p \sigma_{\theta f}(l_k) \Pi_1(\tau, k) + |\sigma_z| \sigma^*(\tau) \quad (9)$$

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

$$\Omega_{k,q}(\tau) = R_{1,q}(\tau, k) + \sqrt{R_{1,q}(\tau, k)R_{2,q}(\tau, k) + R_{2,q}(\tau, k)}, \quad (10)$$

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

$$R_{2,q}(\tau, k) = \frac{K_{z,q}}{K_{\theta,q}} \left(\nu R_{1,q}(\tau, k) + \frac{|\sigma_z(k)|}{\sigma_q^*(\tau, K_{z,q})} \right) \quad (11)$$

Если значение функции $\Omega_{k,q}(\tau)$, $q=1, \dots, 7$, $k=1, \dots, K$, определенное по (8) и (10), больше единицы, то полагается $\Omega_{k,q}(\tau) = 1$.

В выражениях (9) функция $\sigma^* = \sigma^*(\tau)$ – кривая длительной прочности основного металла, функции $\sigma_q^* = \sigma_q^*(\tau, K_{\theta,q})$ и $\sigma_q^* = \sigma_q^*(\tau, K_{z,q})$ в (11) – экспериментально определяемые кривые длительной прочности q -ого элемента при внутреннем давлении, а именно, предельные кольцевые и осевые напряжения соответственно. Коэффициенты $K_{\theta,q}$ и $K_{z,q}$ – коэффициенты концентрации напряжений в тангенциальном и осевом направлении соответственно.

В качестве функции $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\tau, \omega_s)$, входящей в формулы (9), выбирается кривая усталости основного металла по макротрещинам мезоуровня, построенная по предложенной модели усталостного разрушения (по уравнению (2.36) с учетом (2.35), (2.8) – (2.20)) (или по полному разрушению с учетом механики разрушения) при симметричном одноосном нагружении.

Вводится предположение, что кривые усталости $\sigma_{-1,q} = \sigma_{-1,q}(\tau, \omega_s, K_{\theta,q})$ по дефектам мезоуровня в q -ом элементе могут быть построены по предлагаемой модели, при этом определяющие соотношения и материальные константы модели устанавливаются для всего элемента в условиях симметричного внутреннего давления.

Параметр асимметрии α и амплитуды $\sigma^s, s=1, \dots, 4$, являются случайными величинами. Рассмотрим различные группы значений $(\alpha, \sigma^0 \dots \sigma^4)_g, g=1, \dots, G$, и для каждого нагружения найдем срок службы $t_{f,k,q,g}$ q -го обобщенного элемента k -го расчетного участка из следующих уравнений:

$$\Omega_{k,q}(t_{f,k,q,g}) = 1, \quad g=1, \dots, G, \quad q=1, \dots, 7, \quad k=1, \dots, K \quad (12)$$

где для $\Omega_{k,q} = \Omega_{k,q}(\zeta)$ имеем (8) – (11).

Далее в качестве срока службы $t_{f,k,q}$ q -ого элемента k -того расчетного участка рассмотрим минимальное значение из сроков службы $t_{f,k,q,g}$:

$$t_{f,k,q} = \min \left\{ t_{f,k,q,g}, g=1, \dots, G \right\} \quad (13)$$

Аналогично находится остаточный срок службы q -ого элемента k -ого участка по j -му разрушению $\Delta t_{f,k,q,j}$ – остаточный срок службы q -ого элемента k -ого участка по j -му разрушению. Для функции поврежденности q -го конструктивного элемента k -го расчетного участка по

j -му разрушению $\Omega_{k,q,j} = \Omega_{k,q,j}(\tau)$, $k = 1, \dots, K$, $q = 1, \dots, 7$, $j = 1, \dots, J$, справедливы соотношения (8) – (11).

П.3. Критерий безопасной эксплуатации участков трех классов в сложных эксплуатационных и природно-климатических условиях

В Главе 4 (п.4.1) определена вероятность разрушения $n_{k,q}$ q -ых элементов k -ого участка $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$ по выражениям (4.5). В них входят коэффициенты интенсивности потока разрушений q -ого элемента λ_q . После проведения R нормативных диагностик технического состояния вероятность разрушения $n_{k,q}$ q -ых элементов k -ого участка, обусловленного дефектами j -го вида, $j = 1, \dots, J$, выявленными при r -ом диагностическом обследовании ($r = 1, \dots, R$) $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$ описывается выражением (4.11), в которое входят коэффициенты интенсивности потока разрушений $\lambda_{r,q,j}$.

В известные базы данных по разрушениям конструктивных элементов трубопроводов входят данные о следующих видах наблюдаемых дефектов элементов участков трубопроводов [205]: 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 ($j = 5, 6, 7$ соответственно); риски, вмятины, гофры ($j = 8$); и расслоение металла ($j = 9$) в стенках конструктивных элементов. Коэффициенты λ_q определяются как количество разрушений элемента всех его видов, $\lambda_{r,q,j}$ – количество разрушений элемента по дефекту j -го вида, $j = 1, \dots, 9$. Например, согласно нормативным документам $\lambda_{q,j} \leq 3 \cdot 10^{-5}$ в

основном металле и в днище, $q=1,7$, по дефектам $j=1,4$; $\lambda_{q,j} \leq 10^{-5}$ в зонах $j=8,9$; $q=1,\dots,7$; $\lambda_{q,j} \leq 4 \cdot 10^{-5}$, $j=2,\dots,7$, $q=2,\dots,6$.

Выражениями (4.3) и (4.4) задаются вероятности разрушения k -ого участка конструкции $Q_k = Q_k(\tau)$, $k=1,\dots,K$, через вероятности разрушения ее q -ых элементов $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$. При этом в q -ом элементе возможны дефекты j -го вида, $j=1,\dots,9$, соответственно. Отсюда для вероятности $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$ по аналогии с соотношениями (4.12) или (4.13) справедливы следующие выражения через вероятности разрушения q -ых элементов k -ого участка по дефекту j -го вида, $Q_{k,q,j} = Q_{k,q,j}(\tau)$:

$$\text{оптимистический сценарий } Q_{k,q}(\tau) = \sum_{j=1}^9 \left(\frac{Q_{k,q,j}(\tau)}{1 - Q_{k,q,j}(\tau)} \right) \prod_{j=1}^9 [1 - Q_{k,q,j}(\tau)] \quad (14)$$

$$\text{пессимистический сценарий } Q_{k,q}(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^9 [1 - Q_{k,q,j}(\tau)] \quad (15)$$

При этом вероятность разрушения $n_{k,q}$ q -ых элементов k -ого участка, обусловленного дефектами j -го вида, $j=1,\dots,9$, $Q_{k,q,j} = Q_{k,q,j}(\tau)$

определяется по аналогии с (4.11) в виде:

$$Q_{k,q,j}(\tau) = \varphi(\tau) e^{1 - \varphi(\tau)}, \quad \varphi(\tau) = \lambda_{q,j} l_{k,q} n_{k,q} \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,q,j}} \tau, \quad j=1,\dots,9 \quad (16)$$

в котором $l_{k,q}$ – характерный линейный размер q -ого элемента k -ого участка, $\lambda_{q,j}$ – коэффициенты интенсивности потока разрушений, т.е. количество разрушений q -ого элемента по дефекту j -го вида, $t_{f,k,q,j}$ – срок службы q -ого элемента k -ого участка по j -му виду дефектов.

Вероятность разрушения k – ого участка после проведения R нормативных диагностик $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$, $t_R \leq \tau$, находится по (4.16) или (4.17) через вероятность разрушения k – ого участка $Q_{k,r} = Q_{k,r}(\tau)$ по всем дефектам, выявленным при r – ом диагностическом обследовании, которая, в свою очередь, выражается через вероятность разрушения $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$ по (4.11) – (4.17), $j = 1, \dots, 9$.

Как уже отмечалось, участки трубопровода находятся под различными механическими, техногенными, аэрогидродинамическими, геодинамическими, сейсмическими, коррозионными воздействиями. Нормативными документами выделяются следующие виды повреждений:

$j=10$ – механическое повреждение от деятельности третьих лиц (акты вандализма, механические воздействия землеройной и транспортной техники, взрывы, удары и т.п.);

$j=11$ – повреждение от техногенных воздействий (при разрушении соседних газонефтепроводов, химических объектов, гидроузлов атомных станций и т.п.);

$j=12$ – повреждение от аэрогидродинамических и геодинамических воздействий;

$j=13$ – повреждение от сейсмических воздействий (землетрясениях силой в восемь баллов и выше);

$j=14$ – коррозионное повреждение от почвенной коррозии и коррозионной активности перекачиваемого продукта; язвенная (питтинговая) коррозия, при которой возникают локальные потери металла в результате электрохимической реакции;

$j=15$ – коррозионное повреждение от электромагнитных воздействий;

$j=16$ – стресс - коррозионное растрескивание под действием эксплуатационных растягивающих напряжений и остаточных растягивающих напряжений в зоне сварных соединений;

$j=17$ – биокоррозионное растрескивание.

Функции распределения вероятности разрушения $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$ от механических повреждений при деятельности третьих лиц, $j=10$, от аварий на соседних объектах, $j=11$, и от воздействий при оползнях, проседании пород и т.п., $j=12$, определяются в таком виде:

$$Q_{k,j}(\tau) = \varphi_{k,j}(\tau) e^{1 - \varphi_{k,j}(\tau)},$$

$$\varphi_{k,j}(\tau) \equiv \begin{cases} \lambda_j l_k \frac{\sigma_{z,k,j}^{\max} - R}{\sigma_{\theta} - R} \frac{\tilde{t}}{\tilde{t} + t_j} \tau, & \text{при } \sigma_{z,k,j}^{\max} > R, \\ 0, & \sigma_{z,k,j}^{\max} \leq R, \end{cases} \quad j=10,11,12 \quad (17)$$

где $\sigma_{z,k,j}^{\max}$ – максимальное растягивающее продольное напряжение в k -том расчетном участке от механических ($j=10$), техногенных ($j=11$) и гидрологических ($j=12$) воздействий в течение времени t_j соответственно; R – расчетное сопротивление (СНиП 2.05.06-85*); σ_{θ} – временное сопротивление материала; λ_j – коэффициенты интенсивности разрушений от воздействия третьих лиц ($j=10$), от аварий на соседних объектах ($j=11$) и при оползнях ($j=12$), $[\lambda_j] = \left[\frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}} \right]$, $\lambda_{10} \leq 0.6 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{11} \leq 4 \cdot 10^{-4}$, $\lambda_{12} \leq 6 \cdot 10^{-4}$.

Для функции вероятности разрушения от сейсмических воздействий $Q_{k,13} = Q_{k,13}(\tau)$ предлагается следующее выражение:

$$Q_{k,13}(\tau) = \varphi_{k,13}(\tau) e^{1 - \varphi_{k,13}(\tau)},$$

$$\varphi_{k,13}(\tau) \equiv \begin{cases} \lambda_{13} l_k (a^* - 1) \frac{\sigma_{z,k,13}^{\max} - R}{\sigma_{\theta} - R} \frac{\tilde{t}}{\tilde{t} + t_{13}} \tau, & \text{при } a^* > 1, \sigma_{z,k,13}^{\max} > R, \\ 0, & a^* \leq 1, \sigma_{z,k,13}^{\max} \leq R, \end{cases} \quad (18)$$

где $a^* \equiv a/a_0$, a – сейсмическое ускорение, $[a] = \left[\frac{см}{с^2} \right]$, $a_0 = 10^2 \left[\frac{см}{с^2} \right]$; λ_{13} – коэффициенты интенсивности потока разрушений от сейсмического воздействия, т.е. количество разрушений для аналогичного k -тому расчетному участку в единицу времени на единицу длины, известное по статистике разрушений, $[\lambda_{13}] = \left[\frac{1}{км * год} \right]$, $\lambda_{13} \leq 1.45 * 10^{-3}$; $\sigma_{z,k,13}^{\max}$ – максимальное растягивающее продольное напряжение на k -том расчетном участке от сейсмических воздействий в течение времени t_{13} .

Вероятность разрушения $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$ $j=14,15$, от почвенной коррозии и коррозионной активности перекачиваемого продукта ($j=14$) и от коррозии в результате действия электромагнитных полей ($j=15$) определяются через следующие функции распределения:

$$Q_{k,j}(\tau) = \varphi_{k,j}(\tau) e^{1 - \varphi_{k,j}(\tau)}, \quad \varphi_{k,j}(\tau) \equiv \lambda_{j,k} \frac{\tilde{t}_{k,j}(\tau)}{\delta_k} \tau, \quad j=14,15, \quad (19)$$

где δ_k – толщина основного металла k -того расчетного участка длины l_k , $[\delta_k] = [мм]$; коэффициенты λ_{14} и λ_{15} характеризуют: распределение вероятности достижения критических толщин конструктивных элементов и размеров сквозных локальных дефектов из-за почвенной коррозии, коррозионной активности перекачиваемого продукта или коррозии от электромагнитных полей и достижения критических размеров коррозионными дефектами от электромагнитных воздействий из-за влияния близлежащих энергосистем постоянного и переменного тока (в зоне «стекания» блуждающих токов с поверхности трубопровода) соответственно,

$[\lambda_j] = \left[\frac{1}{\text{км} * \text{год}} \right]$, $\lambda_j \leq 8.75 * 10^{-5}$, $j=14,15$. Скорость $v_{k,14} = v_{k,14}(\tau)$ развития почвенной коррозии в процессе работы активной и пассивной защиты металла трубопровода и скорость $v_{k,15} = v_{k,15}(\tau)$ развития коррозионных процессов от блуждающих токов для k - того расчетного участка в течение срока эксплуатации $\tau \in [0, t]$ предлагается описывать следующей аппроксимацией:

$$v_{k,j}(\tau) = v_j \frac{\binom{\tau-t_{a,k,j}}{\tau} \binom{\tau-t_{p,k,j}}{\tau}}{\tau^2} h(\tau-t_{a,k,j}) h(\tau-t_{p,k,j}), \quad j=14,15, \quad (20)$$

где $v_j, j=14,15$ – соответственно средние скорости «свободного» развития почвенной коррозии и развития коррозионных процессов от блуждающих токов, $t_{a,k,j}$ и $t_{p,k,j}$ – время работы активной (от разности потенциалов) и пассивной (изоляция, напыление и т.п.) защиты от почвенной коррозии и от блуждающих токов на k - том расчетном участке соответственно, $[v_j] = \left[\frac{\text{мм}}{\text{год}} \right]$, $h = h(y)$ – функция Хевисайда.

Функция распределения вероятности разрушения от стресс-коррозионных ($j=16$) и биокоррозионных ($j=17$) дефектов $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$ представляется в следующем виде:

$$Q_{k,j}(\tau) = \varphi_{k,j}(\tau) e^{1-\varphi_{k,j}(\tau)}, \quad \varphi_{k,j}(\tau) \equiv \lambda_j l_k \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,j}} \tau, \quad j=16,17, \quad (21)$$

где λ_j – коэффициенты интенсивности потока разрушений от стресс-

коррозионных и биокоррозионных дефектов, $\lambda_j = \left[\frac{1}{\text{км} * \text{год}} \right]$, $\lambda_j \leq 1.25 * 10^{-5}$;

$t_{f,k,j}$ – время разрушения k - того расчетного участка от стресс-коррозионных и биокоррозионных дефектов, состоящее из времени формирования «колоний» стресс-коррозионных и биокоррозионных трещин, их слияния до

образования магистральной макротрещины и достижения ею критических размеров соответственно, $j=16,17$.

Таким образом, вероятность разрушения k – того расчетного участка трубопровода $Q_k = Q_k(\tau)$ при эксплуатационном нагружении с учетом механических, техногенных, аэрогидродинамических, геодинамических, сейсмических, коррозионных воздействий определяется таким образом:

$$\text{оптимистический сценарий} \quad Q_k^*(\tau) = Q_k(\tau) + \sum_{j=10}^{17} \frac{Q_{k,j}(\tau)}{1 - Q_{k,j}(\tau)} \prod_{j=10}^{17} (1 - Q_{k,j}(\tau)), \quad (22)$$

$$\text{пессимистический сценарий} \quad Q_k^*(\tau) = Q_k(\tau) + 1 - \prod_{j=10}^{17} [1 - Q_{k,j}(\tau)] \quad (23)$$

где вероятности разрушения $Q_k = Q_k(\tau)$ определяются по (4.3) или (4.4) с учетом (14) или (15) и (16), вероятности разрушения $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$ k – того расчетного участка от j – тых повреждений при $j=10, \dots, 17$ задаются формулами (17) – (21) соответственно.

Для вероятности разрушения $Q_{k,R}^* = Q_{k,R}^*(\tau)$ справедливы выражения, аналогичные (22) или (23), в которых вероятность разрушения k – ого участка после проведения R нормативных диагностик $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$, $t_R \leq \tau$, находится по (4.16) или (4.17) через вероятность разрушения k – ого участка $Q_{k,r} = Q_{k,r}(\tau)$ по всем дефектам, для которой выписаны выражения (4.11) – (4.17) через вероятность разрушения $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$, $j=1, \dots, 9$.

Вероятность разрушения (конструкционный риск) участка трубопровода длины L_0 $Q^* = Q^*(\tau)$ (или вероятность $Q_R^* = Q_R^*(\tau)$) находится по

выражениям, аналогичным (4.1),(4.2) (или (4.17), (4.18)) через вероятности разрушения k – тых расчетных участков $Q_k^* = Q_k^*(\tau)$ (или вероятности $Q_{k,R}^* = Q_{k,R}^*(\tau)$), определенные выражениями (22) или (23).

К оценке долговечности участков трубопроводных систем предъявляют различные требования. В зависимости от этого рассматриваются различные классы трубопроводов по нормам строительства и эксплуатации. В таблице П.1 приведены основные условия отнесения участков к первому, второму и третьему классам, а именно, определенное качество трубопроводной системы: труб, стыковых соединений и т.п.; технология и качество строительных работ; пассивная защищенность участка от коррозионной активности грунтов и перекачиваемого продукта, от влияния близлежащих энергосистем; диагностикой состояния участка после строительства и во время их эксплуатации и т.д.

Так, вследствие высокой обеспеченности защиты от коррозионных процессов для вероятности разрушения участков первого класса $Q_I = Q_I(\tau)$ в выражении вида (22) или (23) (в этом случае у всех функций добавляется индекс «I») не учитываются слагаемые $Q_{I,k,j} = Q_{I,k,j}(\tau)$, $j=14,\dots,17$.

Для участка первого класса при формулировке критерия конструктивной надежности в виде (4.19) (или (4.21)) и условия безопасности в виде (4.56) (или (4.67)) необходимо определить приемлемые значения вероятности разрушения \tilde{Q}_I^* в течение социально и экономически приемлемого срока службы \tilde{t} . В случае оптимистического сценария приемлемое значение \tilde{Q}_I^* находится по выражению (4.9), в котором значения $\tilde{Q}_{I,k}^*$ полагаются в виде:

$$\tilde{Q}_{I,k}^* = \sum_{j=1}^9 \frac{\tilde{Q}_{I,k,j}^*}{1 - \tilde{Q}_{I,k,j}^*} \prod_{j=1}^9 \left(1 - \tilde{Q}_{I,k,j}^* \right), \quad (24)$$

$$\tilde{Q}_{I,k,j}^* = \varphi_j^e \quad 1 - \varphi_j, \quad j=1, \dots, 7, \quad (25)$$

в которых $\varphi_j, j=1, \dots, 9$, для трубопроводов находятся в следующих интервалах: для трещин и дефектов в основном металле и в днищах, в том числе вмятинах, рисках, при расслоении металла $\varphi_j \leq 7 \cdot 10^{-2}, j=1, 7, 8, 9$; для трещин и дефектов в кольцевых сварных соединениях при смещениях кромок $\varphi_2 \leq 8 \cdot 10^{-2}$; для трещин и дефектов в продольных сварных соединениях при смещениях кромок $\varphi_3 \leq 6 \cdot 10^{-2}$; для трещин и дефектов в тройниках ($j=4$), отводах ($j=5$) и переходниках ($j=6$) $\varphi_j \leq 10^{-3}$.

Оценку безопасности эксплуатации участка с учетом социальных, промышленных и экологических рисков проводят по неравенству (4.56) (или (4.67)). Срок службы t_f (или остаточный срок службы Δt_f после проведения R нормативных диагностик ее технического состояния) с учетом социальных, промышленных и экологических рисков определяется по (4.66) (или (4.68)). Таким образом, условие безопасной эксплуатации участка первого класса представляется неравенством:

$$Q_I^*(\tau) \leq k \tilde{Q}_I^* \quad k = \min \left\{ 1, \left(\frac{\tilde{I}_m}{I_m} : m=1, \dots, 4 \right) \right\} \quad (26)$$

где I_m – социальные, промышленные и экологические риски при $m=1, \dots, 4$ соответственно, которые задаются выражениями (4.57) – (4.65), \tilde{I}_m – их приемлемые значения (см. Главу 4).

Из равенства (26) находится срок безопасной эксплуатации $t_{f,I}$ участка трубопровода первого класса. По рекомендациям технико-экономического обоснования систем газопроводов первого класса проектный срок службы $t_{f,I}$ должен находиться в пределах $70 \leq t_{f,I} \leq 85$ лет.

Обратимся к участку второго класса по долговечности. Здесь имеется возможность появления коррозионных макроразрушений вследствие почвенной коррозии, влияния близлежащих энергосистем постоянного и переменного тока и коррозионной активности перекачиваемого продукта. Поэтому в выражении (22) или (23) (у каждой функции добавляется индекс «II») в этом случае не учитываются только слагаемые $Q_{II,k,j} = Q_{II,k,j}(\tau)$, $j=16,17$. Все соотношения и критерии определяются аналогично случаю первого класса. Единственное отличие заключается в нахождении приемлемого значения вероятности разрушения \tilde{Q}_{II}^* в течение приемлемого срока службы \tilde{t} . При оптимистическом сценарии его предлагается находить по выражению вида (4.9), в котором значения $\tilde{Q}_{II,k}^*$ полагаются в виде:

$$\tilde{Q}_{II,k}^* = \sum_{j=1}^{9,14,15} \frac{\tilde{Q}_{II,k,j}^*}{1 - \tilde{Q}_{II,k,j}^*} \prod_{j=1}^{9,14,15} \left(1 - \tilde{Q}_{II,k,j}^* \right), \quad (27)$$

$$\tilde{Q}_{II,k,j}^* = \varphi_j e^{1 - \varphi_j}, \quad j=1, \dots, 9, 14, 15. \quad (28)$$

По данным эксплуатации и диагностики технического состояния трубопроводов, находящихся в коррозионно-активных средах, значения φ_j , $j=14,15$, в выражениях (28) удовлетворяют следующим неравенствам: $\varphi_{14} \leq 9 \cdot 10^{-3}$ для коррозионных трещин от почвенной коррозии и коррозионной активности перекачиваемого продукта; $\varphi_{15} \leq 10^{-3}$ для

потенциальных коррозионных трещин от электромагнитных воздействий.

Условие безопасной эксплуатации участка второго класса записывается следующим образом:

$$Q_{II}^*(\tau) \leq k \tilde{Q}_{II}^* \quad k = \min \left\{ 1, \left(\frac{\tilde{I}_m}{I_m} : m = 1, \dots, 4 \right) \right\} \quad (29)$$

Из равенства (29) находится срок службы участка трубопровода второго класса $t_{f,II}$. Согласно нормативным документам для газопроводов второго класса этот срок должен находиться в пределах $60 \leq t_{f,II} \leq 70$ лет.

И, наконец, для участка трубопровода третьего класса необходимо учитывать все виды повреждений, и вероятность разрушения $Q_{III,k,j} = Q_{III,k,j}(\tau)$ определяется по (22) или (23). Для приемлемого значения \tilde{Q}_{III}^* имеем выражение вида:

$$\tilde{Q}_{III,k}^* = \sum_{j=1}^{9,14,\dots,17} \frac{\tilde{Q}_{III,k,j}^*}{1 - \tilde{Q}_{III,k,j}^*} \prod_{j=1}^{9,14,\dots,17} \left(1 - \tilde{Q}_{III,k,j}^* \right), \quad (30)$$

$$\tilde{Q}_{III,k,j}^* = \varphi_j \cdot e^{1 - \varphi_j}, \quad j = 1, \dots, 9, 14, \dots, 17. \quad (31)$$

По данным эксплуатации и диагностики технического состояния значения φ_j , $j=16,17$, в выражениях (31) полагаются следующие: $\varphi_{16} \leq 9 \cdot 10^{-2}$ для стресскоррозионных трещин; $\varphi_{17} \leq 10^{-2}$ для биокоррозионных трещин.

Условие безопасной эксплуатации участка третьего класса по долговечности представляется так:

$$Q_{III}^*(\tau) \leq k \tilde{Q}_{III}^* \quad k = \min \left\{ 1, \left(\frac{\tilde{I}_m}{I_m} : m = 1, \dots, 4 \right) \right\} \quad (32)$$

Из решения уравнения (32) определяется срок службы $t_{f,III}$ участка трубопровода третьего класса по долговечности. Для газопроводов третьего класса проектный срок службы $t_{f,III}$ должен находиться в интервале:

$$\tilde{t} \leq t_{f,III} \leq 60 \text{ лет.}$$

П.4. Практическая реализация теоретических и прикладных результатов диссертационных исследований

Метод оценки сроков службы трубопроводов (см. п. П.1–П.4) использован при подготовке заключений для различных участков магистральных газопроводов (МГ): линейных участков между компрессорными станциями, конструкций установок регенерации газа, конструкций узлов редуцирования газа (УРГ) (рис. П.1–П.10, П.12), конструкций газоизмерительных станций (ГИС) (рис. П.11, П.13), установок очистки газа, обвязочных трубопроводов компрессорных станций (КС), технологических трубопроводов нефтеперекачивающих станций.

Во введении представлен список подготовленных Заключений о сроках службы и остаточной работоспособности различных участков трубопроводов.

На рис. П.1 – П.12 приведены некоторые конструктивные решения узлов редуцирования газа и газоизмерительных станций с расчетными данными суммарных осевых напряжений в рабочем режиме в растянутой зоне (рис. П.2, рис. П.4) и в сжатой зоне (рис. П.3, рис. П.5), и максимальными интенсивностями напряжений в рабочем режиме (рис. П.6 – рис. П.12)

Так, проведены расчеты сроков безопасной эксплуатации УРГ: «Заключение о сроках безопасной эксплуатации УРГ-2 с МГ КС «Сохрановка – КС «Октябрьская» на газопровод на г. Волгодонск и УРГ-3 с МГ КС «Сохрановка» – КС «Октябрьская» перед КС «Октябрьская» (Архив ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2006); «Заключение о сроках безопасной эксплуатации УРГ с МГ «Починки–Грязовец» на МГ «Саратов– Горький», на

МГ «Горький–Центр», на МГ «Горький–Череповец», на отвод к Костромской ГРЭС на участке ООО «Волготрансгаз» (Архив ОАО "Гипрогазцентр", Нижний Новгород, 2007).

Подготовлены «Заключение о сроках безопасной эксплуатации конструкции ГИС «Бурмакино» МГ «Починки–Грязовец» и УРГ с МГ «Починки–Грязовец» на газопровод «Грязовец–КГМО» и газопровод «Горький–Череповец» на участке ООО «Севергазпром» (Архив ОАО "Гипрогазцентр", Нижний Новгород, 2007) и «Заключение о сроках безопасной эксплуатации ГИС газопровода «Починки –Изобильное – ССПХГ» ООО «Кавказтрансгаз» (Архив ООО НПО «ЭТАН –Промгаз», Москва, 2008).

Разработанный метод прогнозирования долговечности конструкций потенциально опасных объектов, в том числе магистральных трубопроводов, включен в руководящие документы для проектных организаций ОАО «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).

Таблица П.1. Классы трубопроводов по долговечности

<p>трубопровод первого класса $70 \leq t \leq 85 \text{ лет}$</p>	<p>трубопровод второго класса $60 \leq t \leq 70 \text{ лет}$</p>	<p>трубопровод третьего класса $45 \leq t \leq 60 \text{ лет}$</p>
На стадии строительства		
<p>Применяют трубы с высоким качеством заводских сварных соединений и заводской изоляции. Достигается высокое качество строительно-монтажных работ, в том числе монтажных сварных соединений, вставок холодного гнущего и других элементов, созданных в трассовых условиях. Используют современные технологии и методы неразрушающего контроля и необходимые объемы инструментальной диагностики технического состояния трубопровода в процессе строительства с выполнением контроля качества технологических операций при строительстве: от приемки всех строительных элементов конструкций - труб, арматуры, деталей и оборудования до приемо-сдаточных испытаний его участков со строгим исполнением Технического проекта и Проекта производства строительно-монтажных работ. Проводят внутритрубную инспекцию участка для выявления дефектов геометрии труб, уточнения углов поворотов, координат стыков, планово-высотного положения, географического позиционирования при высокой информационной обеспеченности инспекции. Информационная база данных по исходному техническому состоянию трубопровода должна содержать такие параметры: фактическая раскладка труб, размещение арматуры, деталей и оборудования; фактическое планово-высотное положение трубопровода, дефекты сварных швов, дефекты защитных покрытий, параметры траншеи, входные параметры средств ЭХЗ. Выполняются требования норм и правил к дефектам основного металла труб и их сварных соединений, к размерам вмятин, гофров, рисок.</p>	<p>Используют трубы с определенным качеством заводских сварных соединений и с заводской изоляцией. Качество строительно-монтажных работ, в том числе монтажные сварные соединения, вставки холодного гнущего и другие элементы, созданные в трассовых условиях, размеры вмятин, гофров, риск, в основном, отвечают требованиям норм и правил при низкой информационной обеспеченности и при отдельных нарушениях регламента производства работ. Выполнение Технического проекта (конструктивные решения трубопровода) и Проекта производства строительно-монтажных работ (технологический проект трубопровода), в основном, обеспечено при низкой информационной поддержке.</p>	<p>Используют трубы с определенным качеством заводских сварных соединений и с заводской изоляцией. Качество строительно-монтажных работ, в том числе, качество монтажных сварных соединений, вставок холодного гнущего и других элементов, созданных в трассовых условиях, в основном удовлетворительное. Размеры вмятин, гофров, риск отвечают требованиям норм и правил при низкой информационной обеспеченности. Строительно-монтажные работы выполнены при значительных нарушениях конструктивных решений. Выполнение Технического проекта и регламента производства работ при низкой информационной обеспеченности.</p>

Продолжение таблицы П.1 . Классы трубопроводов по долговечности

<p>трубопровод первого класса по долговечности $70 \leq t \leq 85 \text{ лет}$</p>	<p>трубопровод второго класса по долговечности $60 \leq t \leq 70 \text{ лет}$</p>	<p>трубопровод третьего класса по долговечности $45 \leq t \leq 60 \text{ лет}$</p>
На стадии эксплуатации		
<p>Практически отсутствуют коррозионные процессы. Высокая обеспеченность химической защиты металла по всей длине участка при эксплуатации в течение прогнозируемого срока службы, обусловленная применением труб с заводской изоляцией и отсутствием строительных дефектов покрытия.</p> <p>Высокая обеспеченность катодной защиты металла по всей длине участка при эксплуатации в течение прогнозируемого срока службы с учетом влияния близлежащих энергосистем (в зонах “стекания” блуждающих токов с поверхности трубопровода). Эксплуатационные параметры, характеризующие нагрузку участка, (давление и температура перекачиваемого продукта, параметры системы катодной защиты, коррозионной активности грунтов по трассе, отсутствие возможности воздействия третьих лиц на его конструкцию и т.д.), лежат в проектном диапазоне. Диагностика участка в процессе его эксплуатации проводится строго в сроки и по видам и объемам диагностики в соответствии с принятыми регламентами.</p>	<p>Обеспеченность химической защиты металла по всей длине участка при эксплуатации в течение прогнозируемого срока службы, в основном, соответствует действительной обеспеченности химической защиты металла аналогичных трубопроводов.</p> <p>Обеспеченность катодной защиты металла по всей длине участка при эксплуатации в течение прогнозируемого срока службы, в основном, соответствует действительной обеспеченности катодной защиты металла трубопроводов при эксплуатации с учетом влияния близлежащих энергосистем и коррозионной активности грунтов по трассе. Эксплуатационные параметры, характеризующие нагрузку участка (давление и температура перекачиваемого продукта и т.д.) лежат в проектном диапазоне; возможно воздействие третьих лиц на его конструкцию с вероятностью появления меньше или равной 0.001 в течение прогнозируемого срока службы. Диагностика участка в процессе его эксплуатации проводится, в основном, в сроки и по видам и объемам диагностики в соответствии с принятыми регламентами при отдельных нарушениях.</p>	<p>Обеспеченность химической защиты металла по всей длине участка при эксплуатации в течение прогнозируемого срока службы, в основном, соответствует действительной обеспеченности химической защиты металла участков, состоящих из труб с заводской изоляцией, действующих трубопроводов при возможных нарушениях на отдельных расчетных участках.</p> <p>Обеспеченность катодной защиты металла по всей длине участка при эксплуатации в течение прогнозируемого срока службы, в основном, соответствует действительной обеспеченности катодной защиты металла трубопроводов при эксплуатации с учетом влияния близлежащих энергосистем и коррозионной активности грунта по трассе при возможных нарушениях на отдельных участках. Эксплуатационные параметры, характеризующие нагрузку участка (давление и температура перекачиваемого продукта и т.д.), в основном, лежат в проектном диапазоне. Возможно воздействие третьих лиц с вероятностью меньше, или равной 0,1 в течение прогнозируемого срока службы. Диагностика участка в процессе эксплуатации проводится в соответствии с принятыми регламентами при значительных нарушениях сроков и регламента.</p>

Рис.П.2. Узел редуцирования газа, суммарные осевые напряжения в растянутой зоне при рабочем режиме ($p = 75 \text{ кгс/см}^2$)

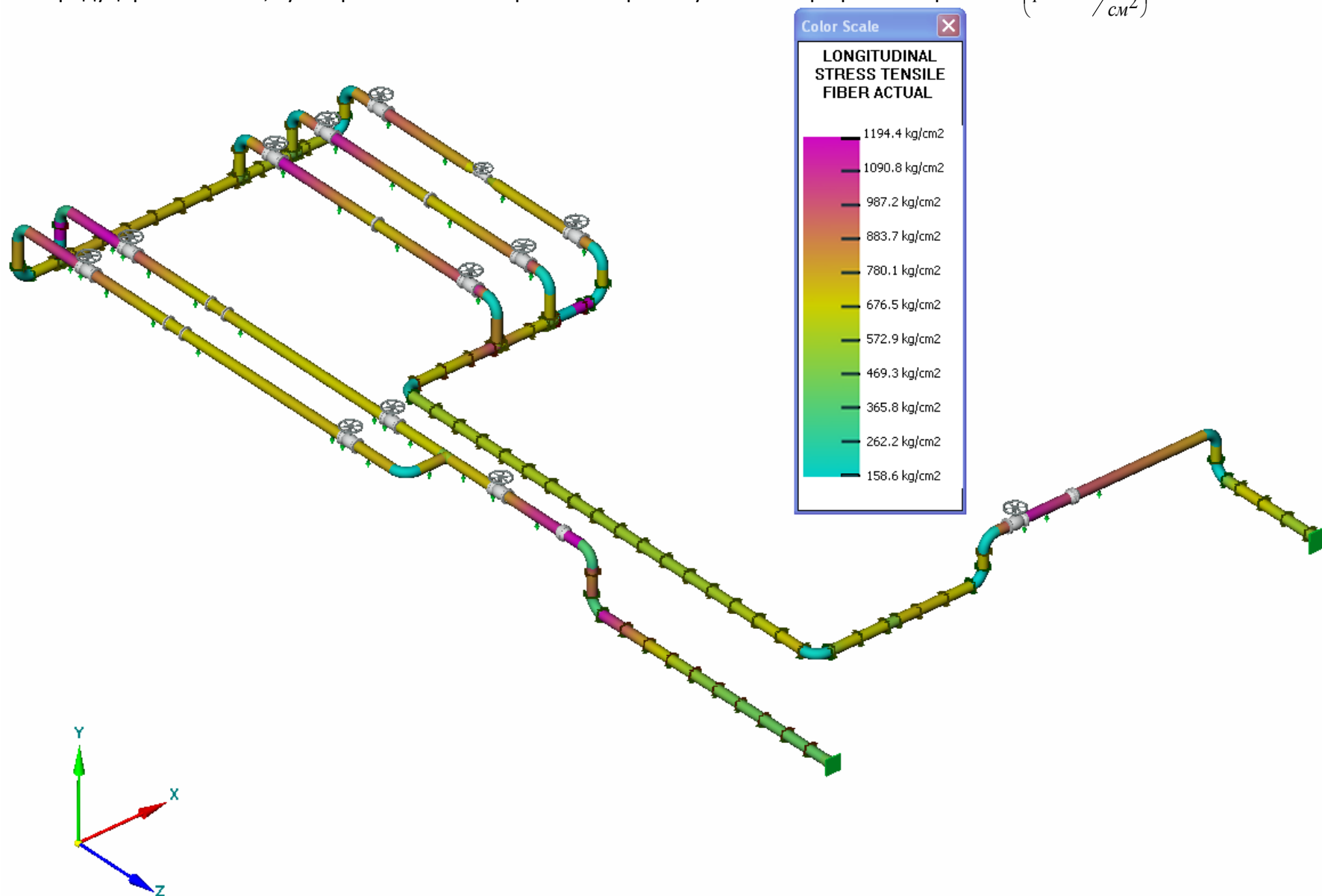


Рис.П.3. Узел редуцирования газа, суммарные осевые напряжения в сжатой зоне при рабочем режиме ($p = 75 \text{ кг/см}^2$)

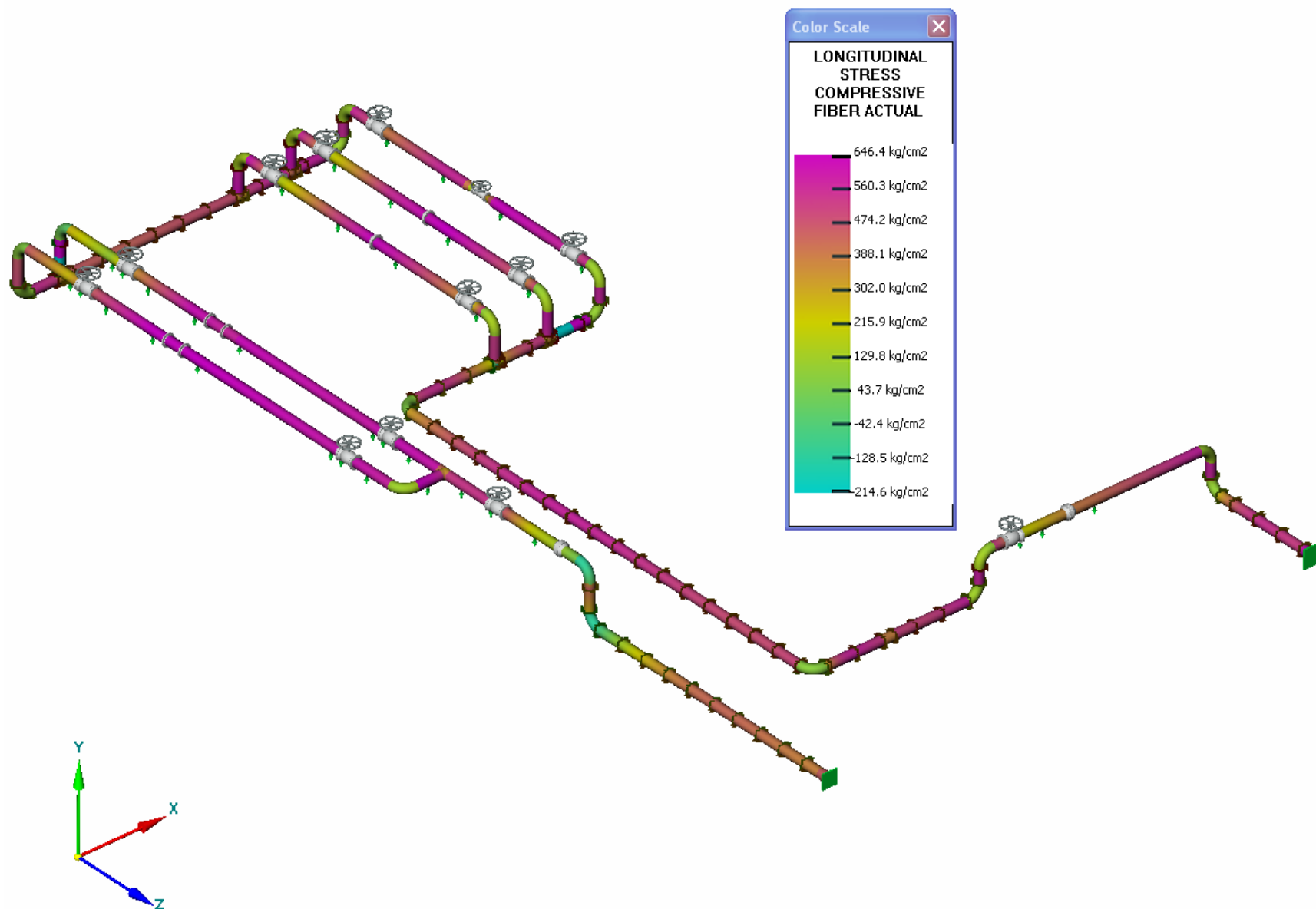


Рис.П.4. Узел редуцирования, газа суммарные осевые напряжений в растянутой зоне при рабочем режиме $(p = 75 \text{ кг/см}^2)$

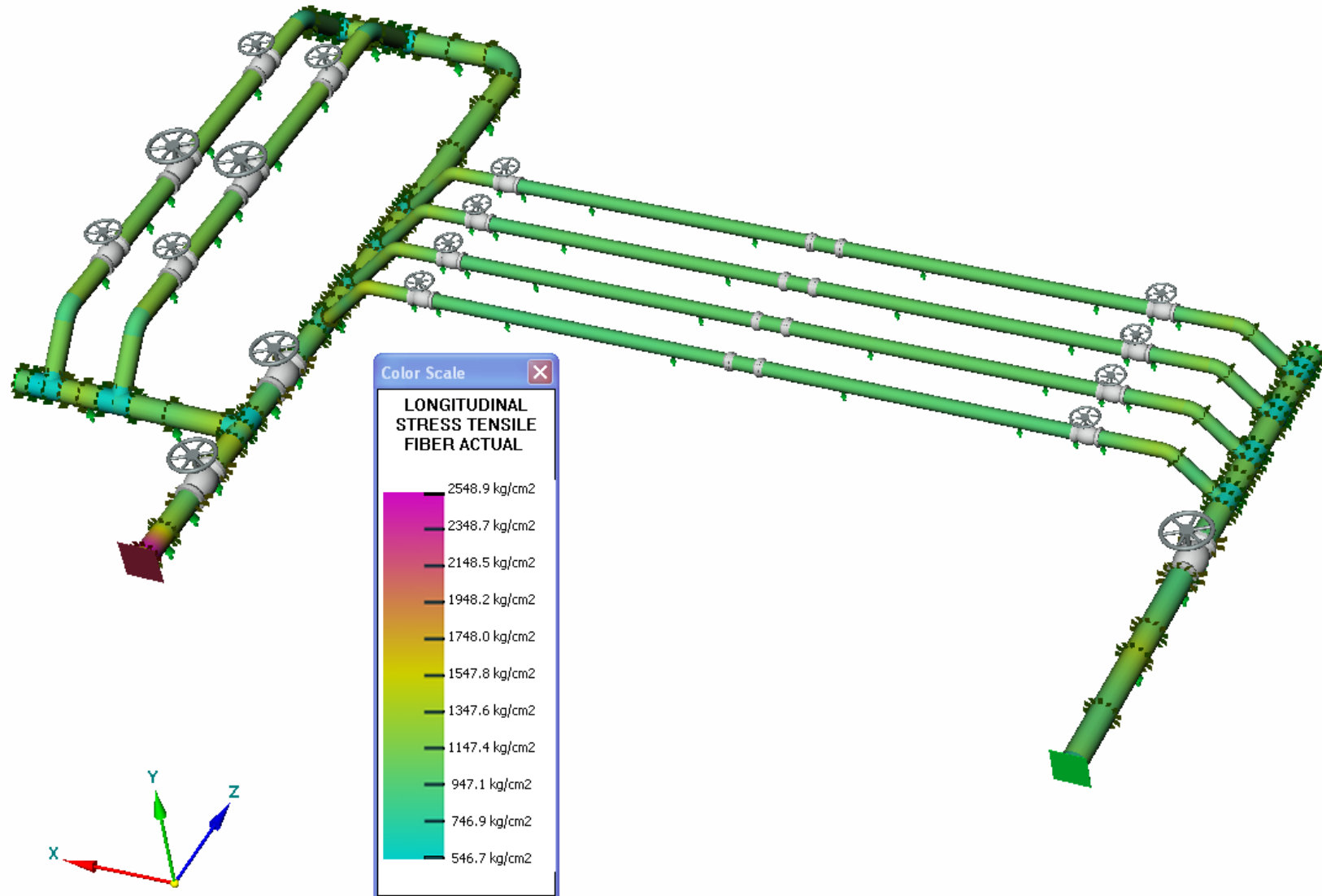


Рис.П.5. Узел редуцирования газа, суммарные осевые напряжения в сжатой зоне при рабочем режиме ($p = 75 \text{ кгс/см}^2$)

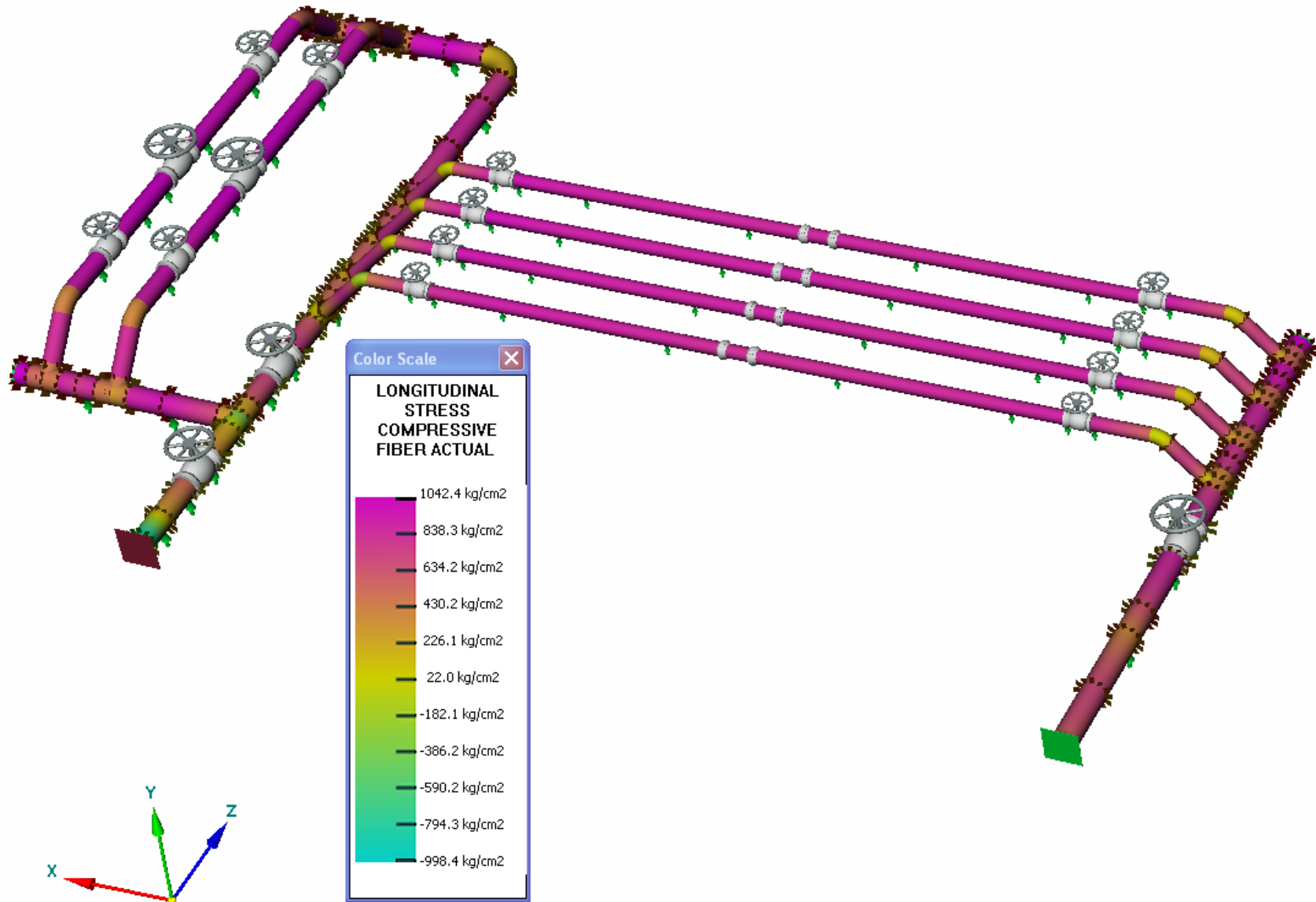


Рис. П.6. Узел редуцирования газа, результаты расчета максимальной интенсивности напряжений

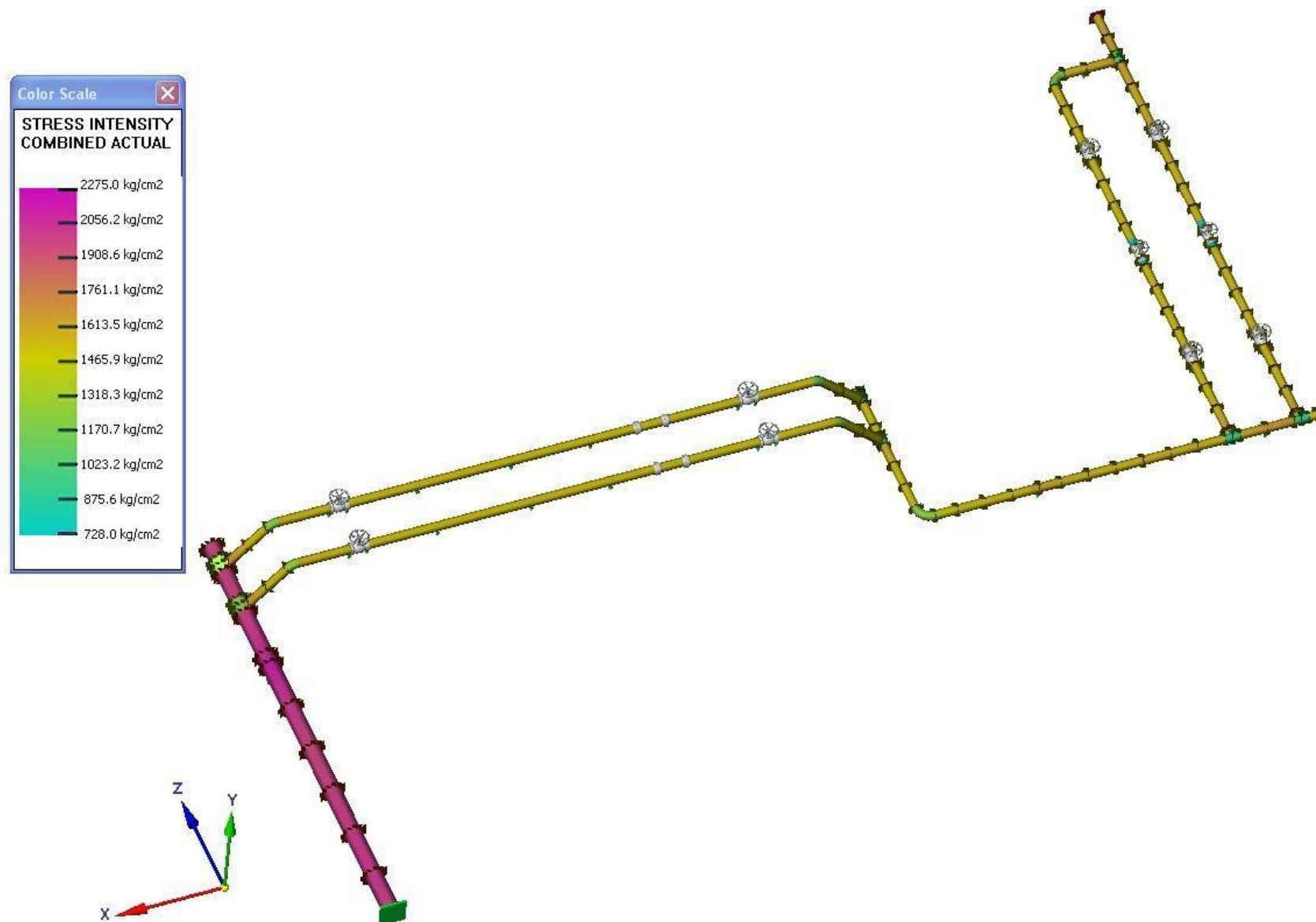


Рис. П.7. Результаты расчета максимальной интенсивности напряжений в узле редуцирования газа



Рис. П.8. Узел редуцирования газа, расчет максимальной интенсивности напряжений

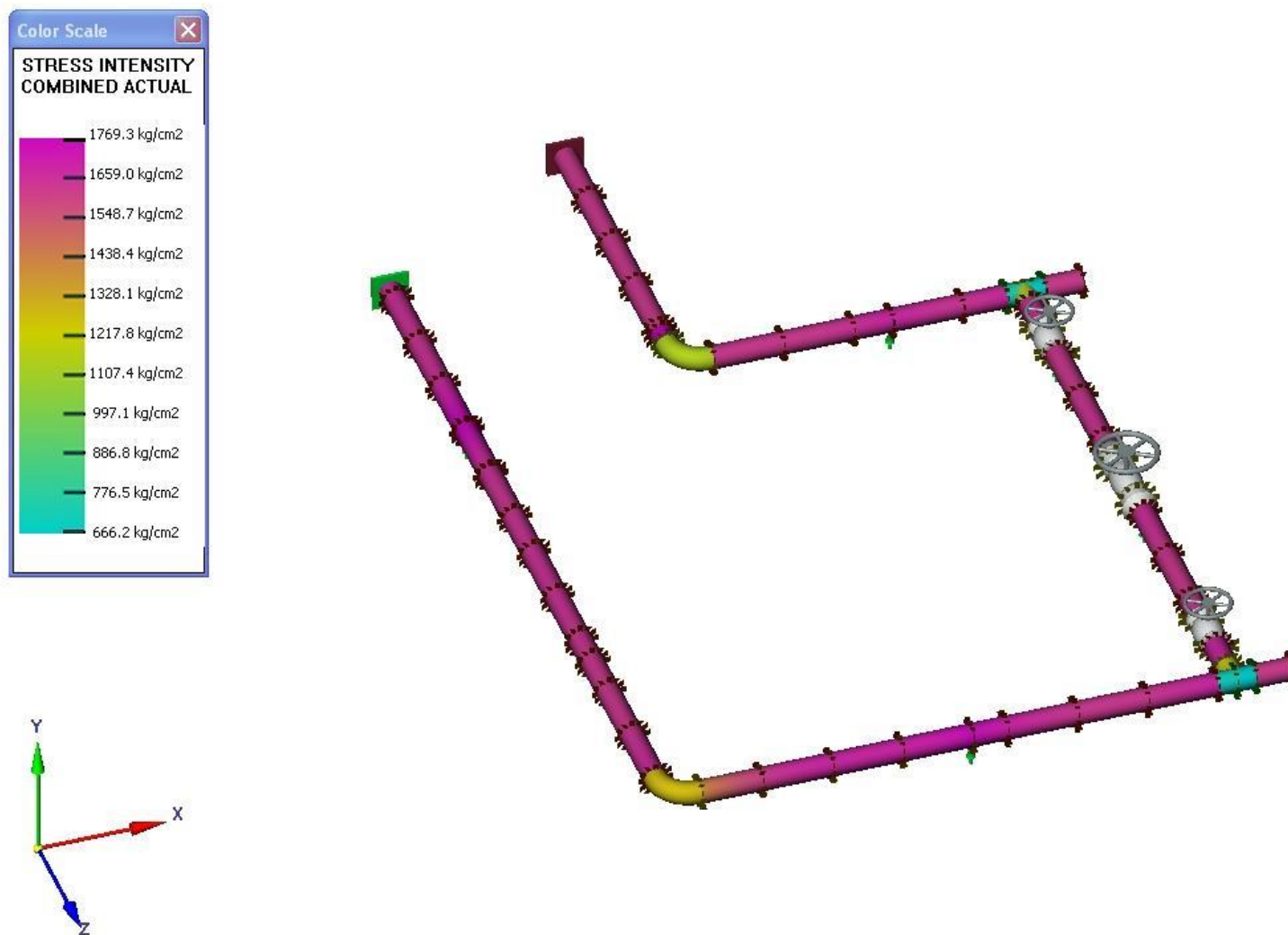


Рис.П.9. Узел редуцирования газа, расчет максимальной интенсивности напряжений в узле

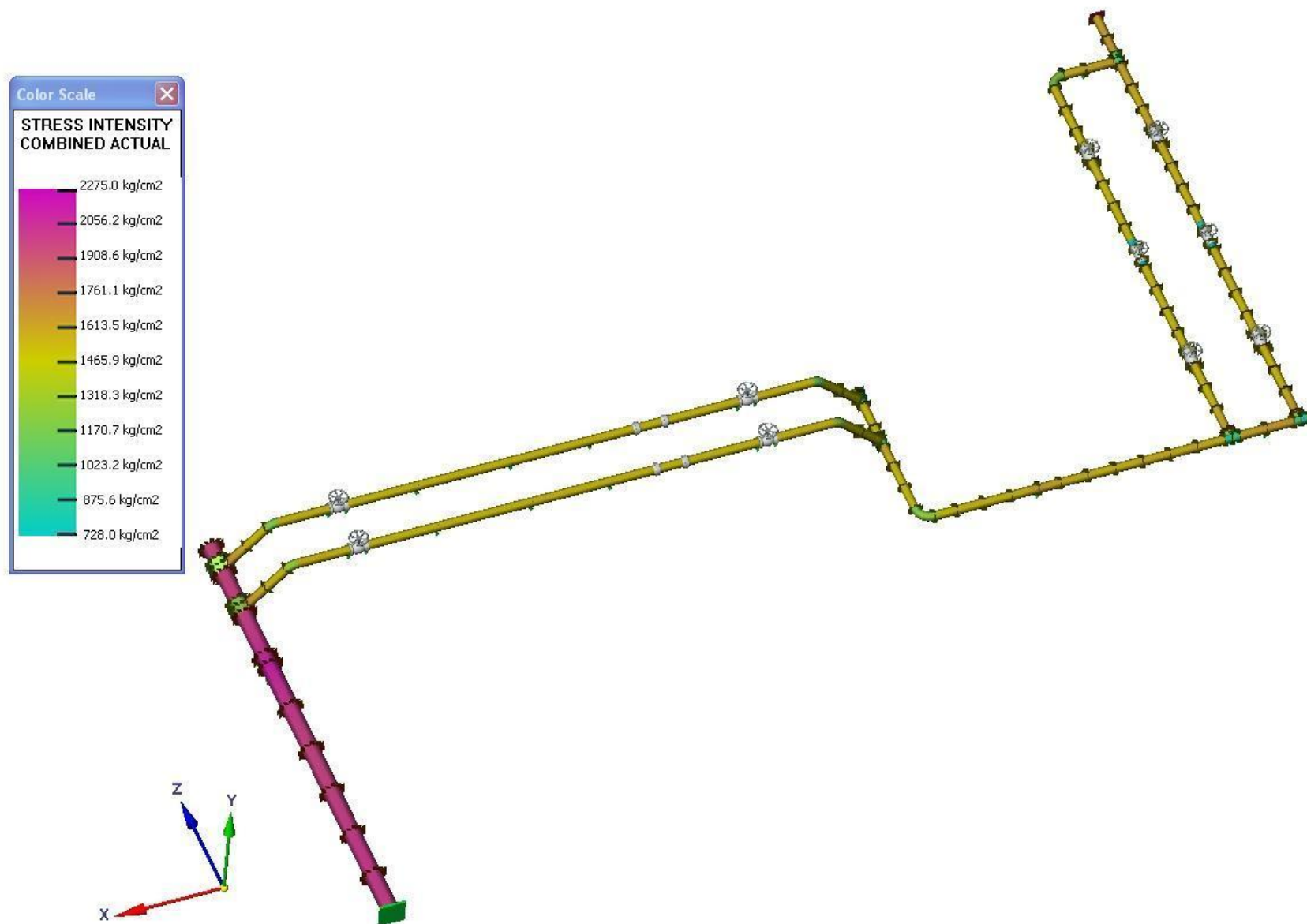


Рис.П.10. Узел редуцирования газа, расчет максимальной интенсивности напряжений в узле

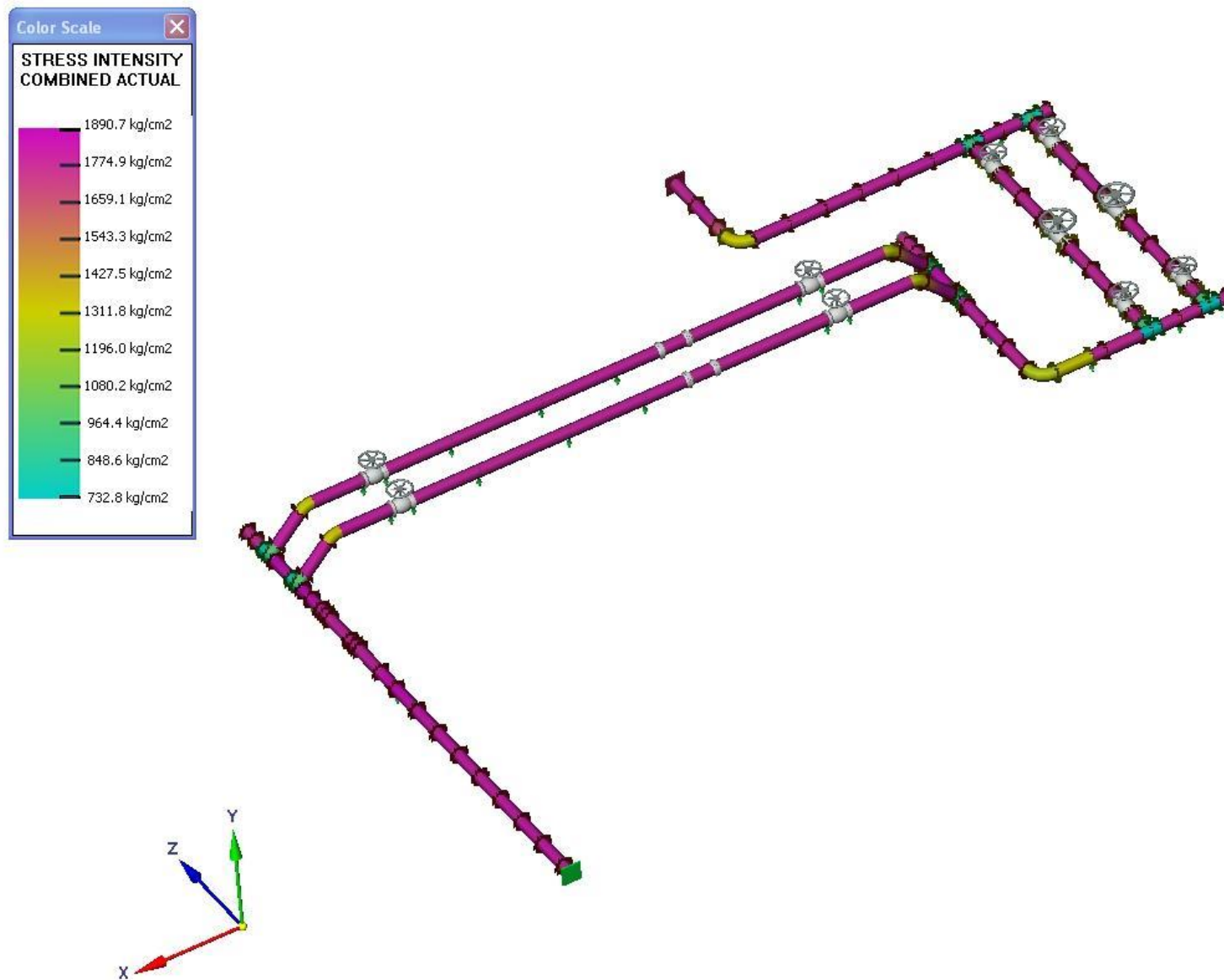


Рис. П.11. Конструктивная схема газоизмерительной станции, уровни максимальной интенсивности напряжений

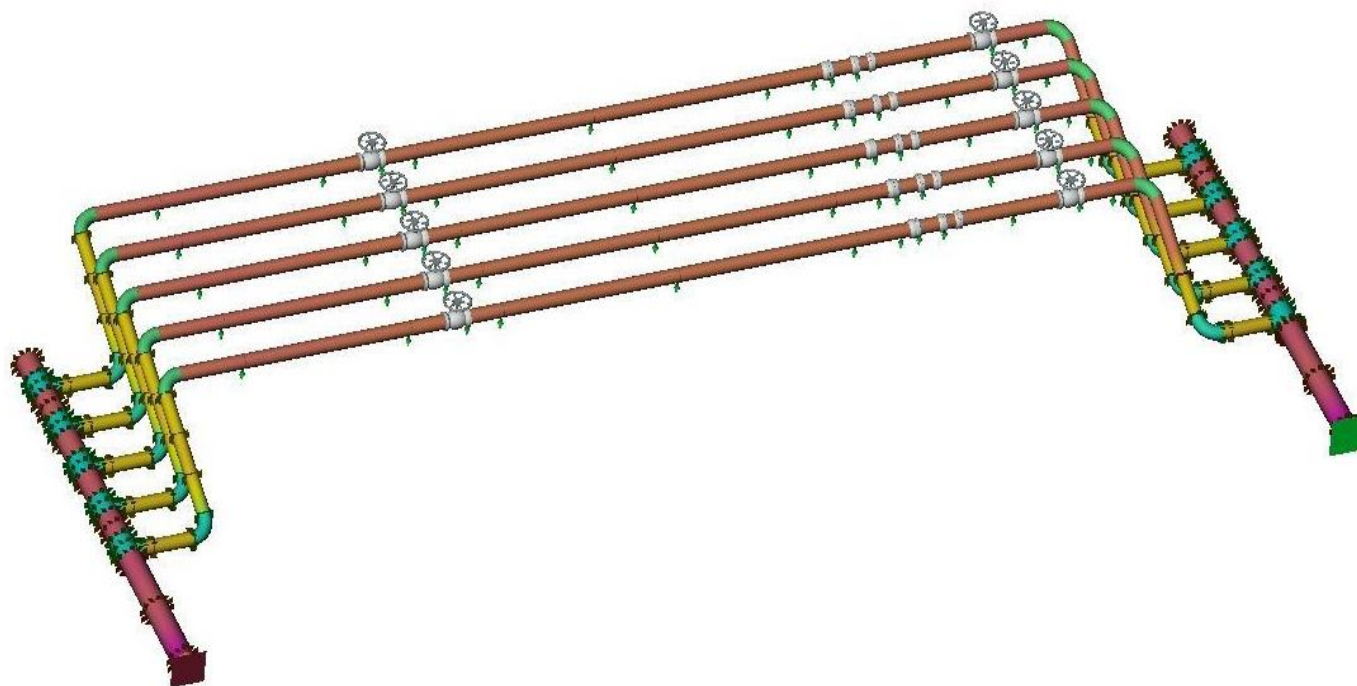


Рис.П.12. Конструктивная схема узла редуцирования газа, уровни максимальной интенсивности напряжений

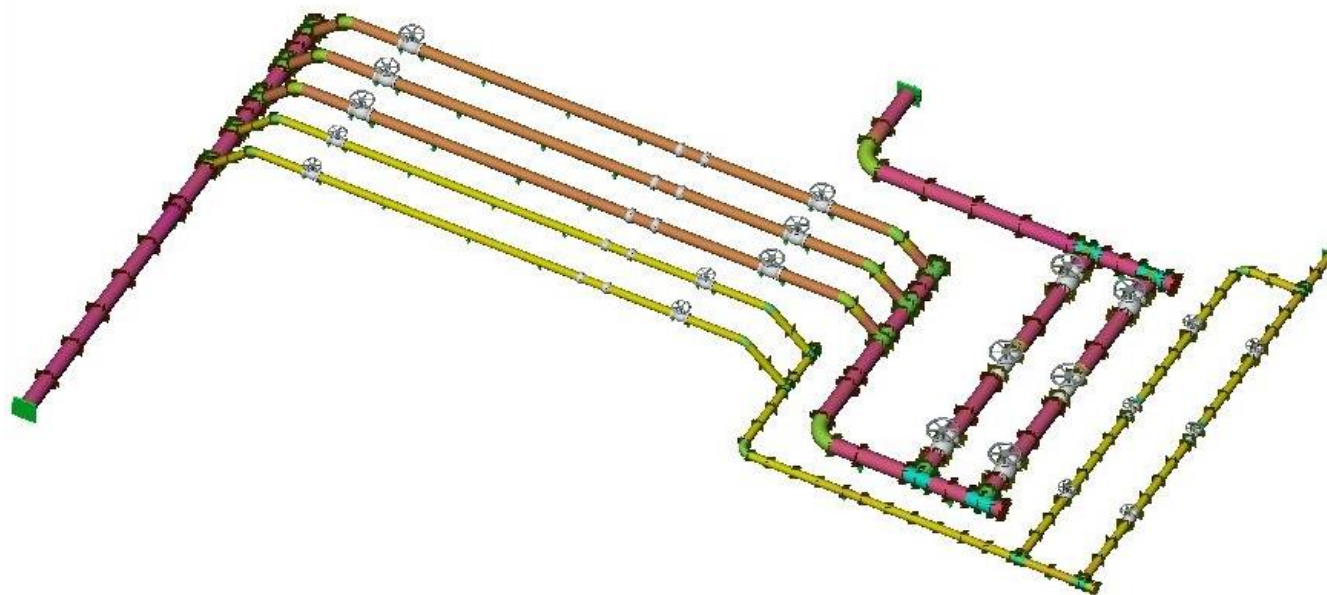
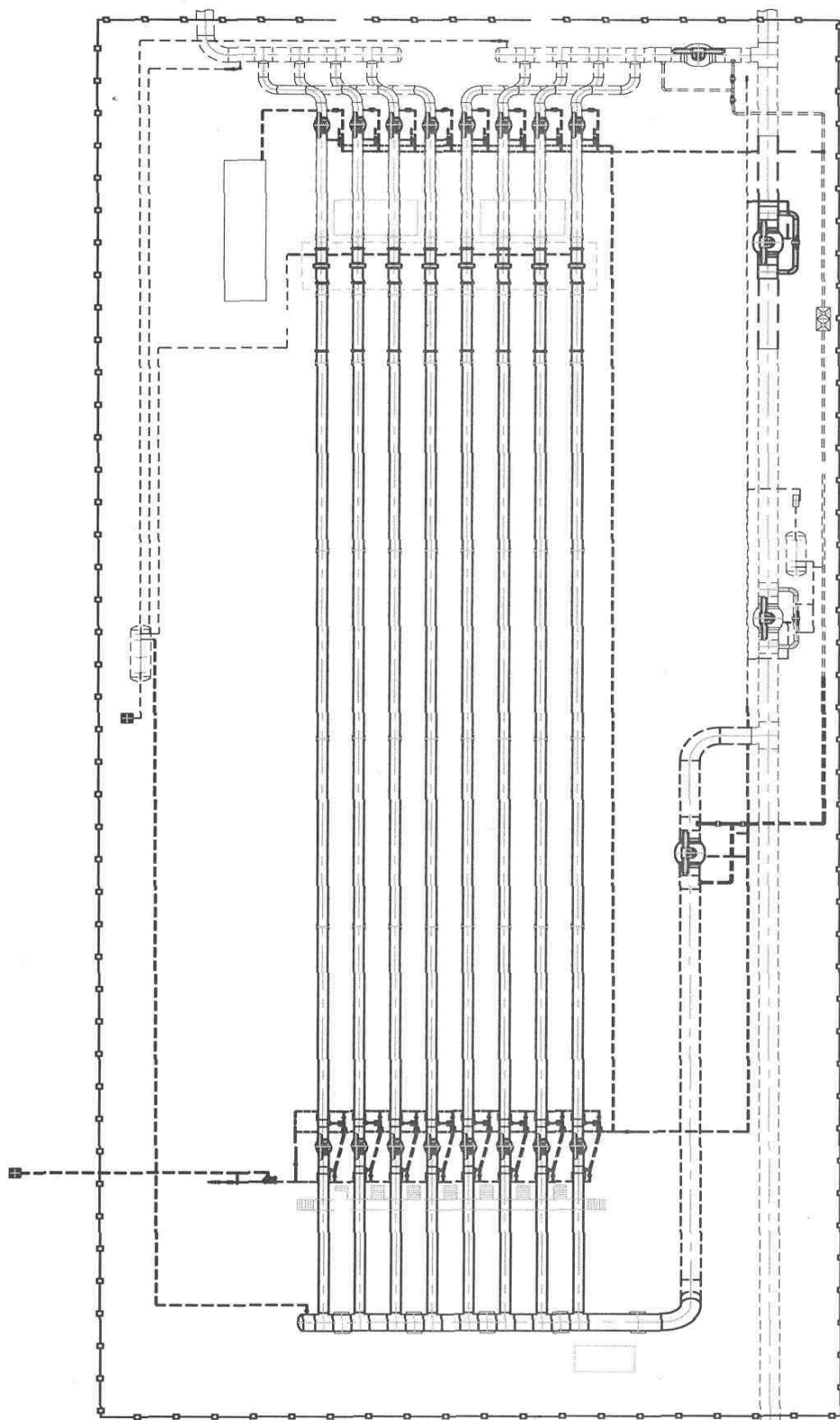


Рис. П.13. Конструктивная схема газоизмерительной станции



В настоящей работе в качестве примера приводятся результаты расчета проектных сроков службы линейной части магистрального газопровода на участке между компрессорными станциями. Рассматривается подземный участок магистрального газопровода (фото 1) длины $L_0 = 120 \text{ км}$, который условно разбивается на шесть расчетных участков длины $L \approx 20 \text{ км}$. Первый расчетный участок магистрального газопровода ($k=1$) расположен между нагнетательным узлом подключения компрессорной станции и первым линейным краном по ходу потока газа. Четыре последующих участка $k=2, \dots, 5$, расположены между соседними линейными кранами по ходу потока газа. Последний участок ($k=6$) лежит между последним линейным краном и всасывающим узлом подключения к компрессорной станции. Расчетная схема участка состоит из последовательного соединения следующих элементов, имеющих допустимые дефекты: $q=1$ – основной металл, $q=2$ – основной металл с кольцевым сварным соединением, $q=3$ – основной металл с продольным сварным соединением (см. рис. П.1). Трубные элементы (трубы длиной $l \approx 12 \text{ м}$) изготовлены из стали контролируемой прокатки с заводской изоляцией с такими механическими характеристиками: $\sigma_B = 600 \text{ МПа}$, $\sigma_S = 470 \text{ МПа}$. Каждый участок состоит из $n = 556$ элементов каждого вида. Магистральный газопровод проходит в сейсмическом районе, характеризуемом силой землетрясения в 8 баллов при расчетном

сейсмическом ускорении $a = 2 * 10^2 \left[\frac{\text{см}}{\text{с}^2} \right]$.

Напряженное состояние представляется выражениями (6), (7), в которых выбираются следующие константы: $D = 1420 \text{ мм}$, $\delta = 15,7 \text{ мм}$, $p = 7,5 \text{ МПа}$,

$\alpha = 1,2 * 10^{-5} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$, $E = 2,06 * 10^5 \text{ МПа}$, для всех участков $k = 1, \dots, 6$ имеем:

$T_0 = 35^\circ\text{C}$, $\beta = 0,5$.

Значение экономически и социально приемлемого срока службы \tilde{t} рассматривалось равным 32 годам.



Фото 1. Укладка линейного участка подземного газопровода

Функция поврежденности $\Omega_{k,q} = \Omega_{k,q}(\tau)$, $k=1, \dots, 6$, $q=1, 2, 3$, определялась по выражениям (8) – (11). В них входят известные кривые длительной прочности для основного металла $\sigma^* = \sigma^*(\tau)$; предельные амплитуды кольцевого напряжения $\sigma_2^* = \sigma_2^*(\tau, K_{\theta,2})$ при длительном нагружении внутренним давлением (коэффициент концентрации $K_{z,2}$ полагался равным единице).

По уравнению (2.36) с учетом (2.35), (2.21) – (2.34) второй главы и материальных констант, найденных по методике п.2.3, построена кривая макроразрушения основного металла по макротрещинам и с учетом (2.71) по полному разрушению $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\tau, \omega_s)$.

Входящая в выражение (10) с учетом (11) кривая усталости кольцевого сварного соединения $\sigma_{-1,2} = \sigma_{-1,2}(\tau, \omega_s, K_{\theta,2})$ рассчитывалась по

предложенной модели в предположении, что определяющие соотношения (2.21) – (2.34) и кривая усталости (2.36) с учетом (2.35) справедливы для элемента и материальные константы находятся по методике п.2.3 для элемента.

При решении задачи о нахождении проектного срока службы q -го элемента k – того участка по макроразрушению рассматривались различные группы значений $(\sigma_0, \dots, \sigma_4)_g$, и $(\omega_1, \dots, \omega_4)_g$, $g=1, \dots, G$, и по уравнению (12) с учетом (8) – (11) рассчитывались значения сроков службы основного металла $t_{f,k,1,g}$, кольцевого сварного соединения $t_{f,k,2,g}$ и продольного сварного соединения $t_{f,k,3,g}$ при g – нагружении k -ого расчетного участка, $k=1, \dots, 6$.

В качестве срока службы $t_{f,k,q}$ выбирались минимальные расчетные значения по выражению (13) и соответствующее им наиболее неблагоприятные значения компонент кольцевого напряжения. В таблицу П.2 помещены полученные значения компонент кольцевого напряжения и частот колебания внутреннего давления, обуславливающие минимальные значения сроков службы. Результаты расчетов сроков службы $t_{f,k,q}$ $k=1, \dots, 6$, $q=1, 2, 3$, представлены в таблице П.3.

$\sigma_\theta = \frac{pR}{\delta} = 339 \text{ МПа}$	$[\omega_s] = \frac{\text{циклов}}{\text{год}}$
$\sigma_0 = 0.85$	
$\sigma_1 = 0.1$	$\omega_1 = 10$
$\sigma_2 = 0.05$	$\omega_2 = 10^2$
$\sigma_3 = 0.025$	$\omega_3 = 10^3$
$\sigma_4 = 0.025$	$\omega_4 = 10^4$

Таблица П.2. Расчетные параметры кольцевого напряжения в выражении (6)

k	$(L_k - L_{k-1}) / L_0$	$t_{f,k,1}, \text{ год}$	$t_{f,k,2}, \text{ год}$	$t_{f,k,3}, \text{ год}$
1	0.165	75	30	45
2	0.167	115	55	75
3	0.167	180	85	110
4	0.167	280	135	180
5	0.167	445	220	280
6	0.167	690	340	440

Таблица П.3. Расчетная долговечность конструктивных элементов расчетных участков газопровода

Перейдем к определению проектных сроков службы расчетных участков газопровода. Рассмотрим участки первого класса по долговечности (см. пункт П.3). Вероятность разрушения конструктивных элементов k – ого участка по макротрещинам $Q_{I,k,q} = Q_{I,k,q}(\tau)$ определяется по выражению (4.5) так:

$$Q_{I,k,q}(\tau) = \varphi(\tau) e^{1-\varphi(\tau)}, \quad \varphi(\tau) = \lambda_{I,q} \ln \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,q}} \tau, \quad k=1,\dots,6, \quad q=1,2,3 \quad (33)$$

где сроки службы $t_{f,k,1}, t_{f,k,2}, t_{f,k,3}$ приведены в таблице П.3. По данным статистики выбираются коэффициенты интенсивности отказов:

$$\lambda_{I,1}, \lambda_{I,2}, \lambda_{I,3} \leq 10^{-5} \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}} \quad (\text{см. таблицу П.4}).$$

Далее по (4.3) определяется вероятность разрушения k – го участка $Q_{I,k} = Q_{I,k}(\tau)$. Затем по формулам (17), (18) и данным таблицы П.4 находятся вероятности $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$, $j=10,\dots,13$, появления критических размеров продольных и поперечных дефектов в результате деятельности третьих лиц (акты вандализма, механические воздействия землеройной и транспортной техники, взрывы, удары), от техногенных воздействий, гидрологических, геодинамических и механических воздействий и сейсмических воздействий.

Согласно выражению (22) находим вероятность разрушения k – го участка с учетом воздействий $Q_{I,k}^* = Q_{I,k}^*(\tau)$. Приемлемое значение $\tilde{Q}_{I,k}^*$ вероятности

разрушения для всех участков выбирается равным $\tilde{Q}_I^* = 10^{-1}$.

(1.2.3)	трещины в основном металле и сварных соединениях	10^{-5}	$1.15 \cdot 10^{-5}$	$1.36 \cdot 10^{-5}$
10	от воздействия третьих лиц и строительной техники	$0.1 \cdot 10^{-6}$	$0.11 \cdot 10^{-6}$	$0.6 \cdot 10^{-6}$
11	от разрушения соседних газонефтепроводов, объектов с химически опасными веществами, объектов энергетического комплекса, зданий и сооружений	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
12	при механических воздействиях (нарушениях почв и почвенно-растительного покрова, природных оползнях и просадках)	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
13	при сейсмических воздействиях	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
14	при почвенной коррозии	-	$0.52 \cdot 10^{-5}$	$0.6 \cdot 10^{-5}$
15	коррозионные потенциальные дефекты от электромагнитных воздействий (в районах компрессорных станций и линий электропередач)	-	10^{-6}	10^{-6}
16	стресс-коррозионные дефекты	-		$1.2 \cdot 10^{-5}$

Таблица П.4. Коэффициенты интенсивности потока разрушений участка

Проектный срок службы $t_{f,I,k}$ k -го участка первого класса по долговечности находится из уравнения:

$$Q_{I,k}^*(t_{f,I,k}) = \tilde{Q}^*, \quad k = 1, \dots, 6 \quad (34)$$

Вероятность разрушения $Q_I^* = Q_I^*(\tau)$ всего участка L_0 определяется по (4.1) и срок службы $t_{f,I}$ – как решение уравнения:

$$Q_I^*(t_{f,I}) = \tilde{Q}^* \quad (35)$$

Результаты расчетов по уравнениям (34) и (35) представлены в таблице П.5.

k	$(L_k - L_{k-1}) / L_0$	$t_{f,I,k}^{200}$	$t_{f,II,k}^{200}$	$t_{f,III,k}^{200}$
1	0.165	60	50	40
2	0.167	75	60	50
3	0.167	110	90	75
4	0.167	180	140	120
5	0.167	280	220	160
6	0.167	440	220	160
	L_0	65	55	45

Таблица П.5. Проектные сроки службы участков трубопровода трех классов

Определенный по уравнению (35) проектный срок службы всего участка первого класса $t_{f,I}$ составляет 65 лет.

Аналогичные рассуждения справедливы для нахождения срока службы участка второго класса по долговечности. Вероятность разрушения конструктивных элементов k -ого участка по макротрещинам $Q_{II,k,q} = Q_{II,k,q}(\tau)$ определяется по выражению, аналогичному (33) с учетом данных таблицы П.4.

Далее по (4.3) определяется вероятность разрушения k -го участка $Q_{II,k} = Q_{II,k}(\tau)$. Затем по формулам (17) – (20) и данным таблицы П.4 находятся вероятности $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$, $j = 10, \dots, 16$, с учетом дополнительно вероятностей разрушения от почвенной коррозии и электромагнитных воздействий.

Согласно выражению (22) находим вероятность разрушения k -го участка с учетом всех рассматриваемых воздействий $Q_{II,k}^* = Q_{II,k}^*(\tau)$. Вероятность разрушения всего участка второго класса $L_0 Q_{II}^* = Q_{II}^*(\tau)$ определяется по (4.1).

Приемлемое значение $\tilde{Q}_{II,k}^*$ вероятности разрушения для всех участков

выбирается равным $\tilde{Q}_{II}^* = 10^{-1}$.

Проектные сроки службы $t_{f,II,k}$ k -го участка и $t_{f,II}$ всего участка L_0 второго класса по долговечности находятся из уравнений (34) и (35) соответственно. Результаты расчетов представлены в таблице П.5.

Проектный срок службы $t_{f,II}$ участка второго класса по долговечности составляет 55 лет.

И, наконец, для участка третьего класса по долговечности по выражению (33) с учетом таблицы П.4 определяется вероятность разрушения $Q_{III,k,q} = Q_{III,k,q}(\tau)$, далее по (4.3) – вероятность $Q_{III,k} = Q_{III,k}(\tau)$. По формулам (17) – (21) и данным таблицы П.4 рассчитываются значения вероятности $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$, $j=10, \dots, 15$, с учетом стресскоррозионных повреждений. Далее по (22) определяется вероятность разрушения k -го участка $Q_{III,k}^* = Q_{III,k}^*(\tau)$ и по (4.1) – вероятность разрушения всего участка третьего класса L_0 $Q_{III}^* = Q_{III}^*(\tau)$. Приемлемое значение $\tilde{Q}_{III,k}^*$ вероятности разрушения для всех участков выбирается равным $\tilde{Q}_{III}^* = 10^{-1}$. Проектные сроки службы $t_{f,III,k}$ k -го участка и $t_{f,III}$ всего участка L_0 третьего класса по долговечности находятся по (34) и (35) соответственно. Результаты расчетов представлены в таблице П.5. Определенный по уравнению (35) проектный срок службы участка третьего класса по долговечности $t_{f,III}$ составляет 45 лет.

Для данного участка был выбран срок проведения первой технической диагностики t_d , равный 16 годам, что соответствует по данным расчетов неравенству: $t_d \leq 0.35t_{f,III}$. В результате было выявлено свыше десяти тысяч дефектов в основном металле и сварных соединениях участков, среди

которых имелось около 70% значимых и 30% незначимых дефектов и произведена замена элементов с недопустимыми дефектами. Таблица П.6 содержит данные

j	Вид дефекта конструктивного элемента	%
(1)	– механические повреждения с потерей металла (царапины, риски, забоины)	7
	– отклонения толщины стенок от номинальной	3
	– нарушения геометрии (овальности, вмятины)	5
	– гофры	5
(2)	– дефекты в кольцевых сварных соединениях (непровары, шлаковые включения, наплывы, инородные включения и т.п.)	10
(3)	– дефекты в продольных сварных соединениях	5
(9)	– расслоение металла стенок (внутренние расслоения, расслоения с выходом на поверхность)	50
(12)	– коррозионная потеря металла	10
(14)	– стресс-коррозионные дефекты	5

Таблица П.6. Относительное количество значимых дефектов по результатам комплексной технической диагностики участка

об относительном количестве значимых дефектов в конструктивных элементах.

Для определения остаточных сроков службы $\Delta t_{f,k,q,j}$ q -го элемента k -того участка с j -ым дефектом (см. таблицу П.6) рассматриваются функции повреждаемости $\Omega_{k,q,j} = \Omega_{k,q,j}(\zeta)$ по каждому из дефектов согласно выражениям (8) – (11) при нагружении (6). При этом предполагается находить входящие в эти выражения кривые длительной прочности элемента $\sigma_{q,j}^* = \sigma_{q,j}^*(\tau, K_{\theta,q})$ и $\sigma_{q,j}^* = \sigma_{q,j}^*(\tau, K_{z,q})$ по результатам экспериментов на натуральных образцах, вырезанных из q -го элемента с j -ым дефектом. В расчете применялись предложенные аппроксимационные зависимости от коэффициентов $K_{\theta,q}$ и $K_{z,q}$.

Кривые усталости q -го элемента k -того участка с j -ым дефектом

$\sigma_{-1,q,j} = \sigma_{-1,q,j}(\tau, \omega_s, K_{\theta,q})$ полагается определять по предложенной модели в предположении, что определяющие соотношения (2.21) – (2.34) и кривая усталости (2.36) с учетом (2.35) справедливы для элемента с j -ым дефектом и материальные константы находятся по методике п.2.3 для элемента с j -ым дефектом. В расчете применялась определенная зависимость материальных констант от коэффициента $K_{\theta,q}$.

Решая уравнение (12) с учетом (8) – (11), находятся остаточные сроки службы $\Delta t_{f,k,q,j}$ конструктивных элементов: основного металла, кольцевого и продольного сварных соединений с j -ми дефектами. Если по данным расчета оказывается, что срок службы q -го элемента k -го участка $\Delta t_{f,k,q,j}$ по j -ому дефекту меньше 8 лет, то данный дефект является недопустимым и этот элемент подлежит замене или ремонту.

Затем по алгоритму, описанному выше, находятся остаточные сроки службы $\Delta t_{f,III,k}$ k -го участка и $\Delta t_{f,III}$ всего участка L_0 третьего класса по долговечности. Результаты расчетов представлены в таблице П.7. Остаточный срок службы участка третьего класса по долговечности $\Delta t_{f,III}$ оказался приблизительно равным 42 годам (см .таблицу П.7).

k	$(L_k - L_{k-1}) / L_0$	$\Delta t_{f,III,k}$ год
1	0.165	36
2	0.167	44
3	0.167	59
4	0.167	101
5	0.167	126
6	0.167	131
	L_0	42

Таблица П.7. Расчетные остаточные сроки службы участков

Проведены вычисления вероятности разрушения $Q_{4,q,j} = Q_{4,q,j}(\zeta)$ основного металла при одноосном нагружении с амплитудами $\sigma_a = 0.85\sigma_{-1,q,j}$, где значения $\sigma_{-1,q,j}$ выбираются с расчетных кривых усталости $\sigma_{-1,q,j} = \sigma_{-1,q,j}(\tau, \varpi_s, K_{\theta,q,j})$ q -ых элементов с j -ми дефектами при $\varpi_s, s=1, \dots, 4$, за период времени t_d и $\Delta t_{f,III}$ по формуле (2.24) с учетом (2.29) – (2.31) второй главы. В результате расчетов установлены неравенства:

$$Q_{4,q} = \max \left\{ Q_{4,q,j}(t_d) : j \right\} \leq 0.1,$$

$$Q_{4,q} = \max \left\{ Q_{4,q,j}(\Delta t_{f,III}) : j \right\} \leq 0.28.$$

Таким образом, выявленные при диагностике дефекты (см. таблицу П.6) не являются определяющими при оценке остаточного срока эксплуатации участка.

В результате проведенных исследований общий срок службы участка трубопровода определен равным $t_d + \Delta t_{f,III} = 16 + 42 = 58$ лет. Рассматриваемый трубопровод принадлежит к третьему классу по долговечности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрена актуальная научная проблема создания критериев усталостного разрушения металлов и сплавов и методов оценки долговечности и безопасной эксплуатации протяженных конструкций.

Впервые получены следующие научные результаты:

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 масштабного 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 масштабного структурного разрушения металлов при пропорциональном процессе нагружения с симметричным и асимметричным циклами напряжений, охватывающая весь поэтапный процесс разрушения с выделением типичных состояний – дефектов определенных масштабных 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.

На основе критериев безопасности и разработанной теории усталостного масштабно-структурного разрушения с учетом эксплуатационного нагружения и вышеперечисленных воздействий построен метод оценки долговечности участков магистральных трубопроводов.

Научные результаты диссертации реализованы при прогнозировании сроков службы участков нефте- и газопроводов. Метод по оценке долговечности был разработан по заданию Управления проектирования и экспертизы ПАО «Газпром» 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.). Подготовлен ряд Заключений о сроках службы и остаточной долговечности различных конструкций магистральных газо- и нефтепроводов с определенным уровнем накопленных дефектов.

Полученные научные и практические результаты вошли в специальные курсы кафедры теории упругости механико-математического факультета

МГУ им. 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.»

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [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. Об одном представлении несинхронного предельного нагружения при плоском напряженном состоянии// Численное моделирование в задачах механики. М.: Изд-во МГУ, 1991. с.21– 27.
- [3]. Завойчинская Э.Б. Предельные процессы циклического нагружения при плоском напряженном состоянии// Автореферат канд.дисс. Москва, 1991. 14с.
- [4]. 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.
- [5]. Завойчинская Э.Б. Предельные циклические процессы при плоском напряженном состоянии// Вопросы механики сплошных сред. М.: Изд-во МГУ, 1993. с.68– 71.
- [6]. 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.
- [7]. Завойчинская Э.Б. Об одном представлении предельных процессов несинхронного нагружения// Упругость и неупругость. Ч.2, 1993. Изд-во МГУ. с.121– 136.
- [8]. Завойчинская Э.Б., Сатаров А.Г. Взаимосвязь параметров асимметричного сложного нагружения при разрушении //Доклад на Конф. молодых ученых Ломоносов – 1994, М.: МГУ, 1994.
- [9]. 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.

[10]. 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.

[11]. Завойчинская Э.Б., Сатаров А.Г. Взаимосвязь параметров асимметричного сложного нагружения при разрушении // Механика твердого тела, 1, 1997. с. 122–129.

[12]. 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.

[13]. 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.

[14]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. Методика оценки сроков службы газопроводов. М.: ИРЦ Газпром. 1997. 84 с.

[15]. 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.

[16]. 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.

[17]. 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.

[18]. 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.

[19]. 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.

[20]. 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.

[21]. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. О критериальных условиях оценки социальной, промышленной и экологической безопасности трубопроводов // Доклады участников Третьей Международной Конф. «Безопасность трубопроводов», 06 – 10 сентября 1999. М.: 1999. том 1. с. 113 – 123.

[22]. 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.

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

[24]. 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.

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

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

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

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

- [29]. 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.
- [30]. 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.
- [31]. 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.
- [32]. 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.
- [33]. Завойчинская Э.Б. Об одном подходе к описанию микроразрушения твердых тел. // Упругость и неупругость. М.: Ленанд, 2006. с. 321–331.
- [34]. 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.
- [35]. 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. Диагностика. № 8 (110), 2007. с.36–45.

- [36]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Теоретические основы экспертной оценки сроков службы газопроводов на стадии проектирования. // Газовая промышленность. № 8, 2007. с.82–86.
- [37]. Завойчинская Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения материалов в проблеме структурной диагностики физическими методами //Проблемы машиностроения и автоматизации, № 3. 2007. с.52–58.
- [38]. 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.
- [39]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика экспертной оценки срока службы газопроводов на стадии проектирования//Газовая промышленность, № 12. 2007. с. 35–38.
- [40]. 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.
- [41]. 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.
- [42]. 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.
- [43]. 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.

- [44]. 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.
- [45]. 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.
- [46]. 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.
- [47]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Проектная оценка долговечности протяженных конструкций магистральных трубопроводов // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 1, 2009. с. 114–122.
- [48]. Завойчинская Э.Б. Об одной модели описания микроразрушения металлов // Проблемы машиностроения и автоматизации, № 1. 2009. с. 60–65.
- [49]. Завойчинская Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения металлов при полигармоническом нагружении // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 3, 2009. С.27–34.
- [50]. 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.
- [51]. 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.
- [52]. Завойчинская Э.Б. Об одной модели описания микроразрушения металлов – 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.

- [53]. Завойчинская Э.Б. К проблеме микроразрушения металлов при циклических нагрузках // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 1, 2010. с. 43– 52.
- [54]. 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.
- [55]. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении // Справочник. Инженерный журнал. № 3. 2010. с. 41– 46.
- [56]. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении (продолжение). Часть 2 // Справочник. Инженерный журнал. № 7. 2010. с. 16– 22.
- [57]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Механика субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин при сложном напряженном состоянии // Справочник. Инженерный журнал. № 10. 2010. с. 22– 27.
- [58]. 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. 2010г., с. 248–251.
- [59]. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Механика макроскопических трещин при сложном напряженном состоянии // Справочник. Инженерный журнал. № 3. 2011.с. 37–43.
- [60]. Завойчинская Э.Б. Микро- и макромеханика разрушения металлов при сложном напряженном состоянии //Сб.: Упругость и неупругость, М.: Изд-во МГУ,2011, с. 346–352.
- [61]. 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.

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

[63]. 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.

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

[65]. Завойчинская Э.Б. Определяющие соотношения теории микро- и макроразрушения 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.

[66]. 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.Ломоносова, секция механики. 17 ноября 2011 г. Тезисы. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2011.

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

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

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

- [70]. 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.
- [71]. 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.
- [72]. 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.
- [73]. 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.
- [74]. 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.
- [75]. 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.
- [76]. 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.
- [77]. 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.
- [78]. 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.

[79]. 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.

[80]. 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.

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

[82]. 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.

[83]. 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.

[84]. 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. p.392.

[85]. 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.

[86]. 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.

[87]. 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.

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

[89]. 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. p.1-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Агапкин В.М., Борисов С.Н., Кривошеин Б.Л. Справочное руководство по расчетам трубопроводов. М.: Недра, 1987. 191 с.
- [2]. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. Физ.-мех. Ин-т. Киев: Наук. Думка, 1989. 176 с.
- [3]. Анучкин М.П., Горицкий В.Н., Мирошниченко Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1986. 231 с.
- [4]. Атомный механизм разрушения // Материалы Международной конференции по вопросам разрушения, состоявшейся 12-16 апреля 1959 г. в Свомпсготте (США), пер. с англ. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии. 1963. 660 с.
- [5]. Айбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных газопроводов на прочность и устойчивость: Справочное пособие. М.: Недра, 1982. 341 с.
- [6]. Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. Автомодельность усталостного разрушения. Накопление поврежденности // Изв. АН СССР. МТТ, №4. 1983. с. 161-165.
- [7]. Бажанов В.Л., Копнов В.А., Гольденблат И.И. Длительная прочность в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976. 246 с.
- [8]. Безопасность России. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. Раздел первый и второй. М.: МГФ "Знание", 1998. 416 с.
- [9]. Безопасность России. Безопасность трубопроводного транспорта. М.: МГФ "Знание", 2002. 752 с.
- [10]. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях под общей редакцией академика Фролова К.В. М.: МГФ "Знание", 2006, 2007, 2008.

- [11]. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ рисков и управление безопасностью (Методические рекомендации) под общей редакцией акад. Фролова К.В. и чл.-корр. РАН Махутова Н.А. М.: МГФ "Знание", 2008. 672 с.
- [12]. Бетехтин В.И., Владимиров В.И. Кинетика микроразрушения твёрдых тел. В кн. Проблемы прочности и пластичности твёрдых тел. Л.: Наука, 1979. 267 с.
- [13]. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. Эволюция микроскопических трещин и пор в нагруженных твердых телах // ФТТ, 2005. Т. 47. вып. 5. С. 801-807.
- [14]. Бородавкин П.П. Подземные магистральные газопроводы. (Проектирование и строительство). М.: Недра, 1982. 384 с.
- [15]. Богданофф Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. М.: Мир, 1989. 344 с.
- [16]. Болотин В. В. О безопасных размерах трещин при случайном нагружении // Изв. АН СССР. МТТ, № 1. 1980. С. 124-130.
- [17]. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
- [18]. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М.: Наука, 1989. 230 с.
- [19]. Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения // Заводская лаборатория, № 4. Т. 70. 2004. С. 41-52.
- [20]. Ботвина Л.Р. Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
- [21]. Ботвина Л.Р., Тютин М.Р. Фрактальные свойства картин множественного разрушения // Докл. РАН, 2007. Т. 417. № 3. С. 385-388.
- [22]. Ботвина Л.Р., Жаркова Н.А., Тютин М.Р. и др. Кинетика накопления повреждений в низкоуглеродистой стали при растяжении // Деформация и разрушение материалов, 2005. № 3. С. 2-8.
- [23]. Ботвина Л.Р., Опарина И.Б. Кинетика разномасштабного множественного разрушения // Докл. РАН. 1998. Т. 362, № 6. С. 762-765.

- [24]. Браун У., Сроули Дж. Испытание высокопрочных материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. М.: Мир, 1972. 246 с.
- [25]. Брок Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
- [26]. Быков Л.И., Мустафин Ф.М. и др. Типовые расчеты при проектировании, строительстве и ремонте газонефтепроводов. М.: Недра, 2011. 730 с.
- [27]. Волегов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В. Поврежденность и разрушение: обзор экспериментальных работ// Физическая мезомеханика, 2015. т.18. №3. С.11-24; т.18, № 4. С.68-86.
- [28]. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Metallurgy, 1984. 280 с.
- [29]. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964. 275 с.
- [30]. ВРД 39-1.10-004-99. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирование по степени опасности и определению остаточного ресурса. М.: 2000.
- [31]. ВРД 39-1.10-043-2001. Положение о порядке продления ресурса магистральных газопроводов ОАО "Газпром". М.: 2001.
- [32]. Вычислительные методы в механике разрушения // Пер. с англ.: под ред. С. Атлури. М.: Мир, 1990. 392 с.
- [33]. Гаф Г.Дж. Усталость металлов// Пер. с англ.: М.: Л: ОНТИ НКТП, Гл. ред. литературы по черной металлургии, 1935. 304 с.
- [34]. Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И. Изломы конструкционных сталей. Справочник. М.: Metallurgy, 1987. 272 с.
- [35]. Головин С.А., Пушкар Л. Микропластичность и усталость металлов. М.: Metallurgy, 1980. 240 с.
- [36]. Гольдштейн Р.В., Ентов В.М. Качественные методы в механике сплошных сред. М.: Наука, 1989. 223 с.
- [37]. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Механика разрушения льда и

некоторые ее приложения// Вестник НГУ. Сер. Математика, механика, информатика. 12:4. 2012. С.41-47.

[38]. Гордеева Т.А., Жегина Л. П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение, 1978.- 193 с.

[39]. Горицкий В.М. Диагностика металлов. М.: Metallurgizdat, 2004. – 408 с.

[40]. Горячева И.Г., Морозов Н.Ф. Механика как наука 20 столетия//Вестник РАН, т.82.№ 4. 2012. 638-647 с.

[41]. ГОСТ 25.504-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.

[42]. Глезер А.М., Козлов Э.В., Конева Н.А., Попова Н.А., Курзина И.А. Основы пластической деформации наноструктурных материалов. М.: Физматлит, 2016. 379 с.

[43]. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Изд-во «Наука», 1992. 295 с.

[44]. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 542 с.

[45]. Динамика, долговечность и живучесть элементов машиностроительных конструкций в задачах и примерах: Учеб. пособие ВСГТУ. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1997. 286 с.

[46]. Ежов А.А., Герасимова Л.П. Дефекты в металлах. Справочник-атлас. Изд-во Русский университет, 2002. 360 с.

[47]. Ежов А.А., Герасимова Л.П. Разрушение металлов. М.: Наука, 2004. 400с.

[48]. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М.: Металлургия, 1971. 293 с.

[49]. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов. Киев: Наукова Думка, 1978. 352 с.

[50]. Ермишкин В.А., Пластинин В.М. Кристаллографические особенности хрупкого разрушения монокристаллов молибдена // Проблемы прочности, 1978. №4. С. 90-95.

- [51]. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. Неразрушающий контроль: Справочник В 7 т. Под общей редакцией Клюева В.В. Т.3, 2004. 864 с.
- [52]. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов (теория, методы расчета, проектирование). М.: Недра, 1992. 271 с.
- [53]. Закономерности ползучести и длительной прочности. Справочник (под общей ред. Шестерикова С.А.). М.: Машиностроение, 1983. 101 с.
- [54]. Зайнуллин Р.С., Александров А.А., Морозов Е.М. Критерии безопасного разрушения элементов трубопроводных систем с трещинами. М.: Наука, 2005. 316 с.
- [55]. Золотаревский В.С. Механические испытания и свойства металлов. М.: Металлургия, 1974. 303 с.
- [56]. Зуев А.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности материалов. Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2013. 376 с.
- [57]. Иванов В.И. Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник; В 7 т., Под общей редакцией Клюева В.В. Т.7, кн.1, 2005. 829 с.
- [58]. Иванова В.С. Межзеренный и внутризеренный характер разрушения армко-железа при усталости // ДАН СССР, 1957. Т. 114, №3 - С. 537-540.
- [59]. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургия, 1963. 272 с.
- [60]. Иванова В.С. Разрушение металлов. М.: Металлургия, 1979. 168 с.
- [61]. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж. и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 384 с.
- [62]. Иванова В.С., Ботвина Л.Р., Сапрыкин Ю.В. О связи фрактографических особенностях разрушения стали X18H9T со структурными изменениями // Пробл. прочности, 1976. № 6. С. 34-36.
- [63]. Иванова В.С., Закирничная М.М., Кузеев И.Р. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов // Уфа: Учебное

пособие, ч.1, 1998. 144 с.

[64]. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.

[65]. Иванова В.С., Терентьев В.Ф., Пойда В.Г. Особенности накопления деформации при циклическом нагружении низкоуглеродистой стали//Физика металлов и металловедения, 1970.30. №4. с. 836-842.

[66]. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металлургия, 1988. 397 с.

[67]. Иванцов О.М., Харитонов В.И. Надежность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1978, 166 с.

[68]. Ильюшин А.А. Об одной теории длительной прочности. Механика твердого тела, 1967. № 3.

[69]. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1990. 310 с.

[70]. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.

[71]. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.

[72]. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М.: Мир, 1974. - 496 с.

[73]. Керштейн И.М., Ключников В.Д., Ломакин Е.В., Шестериков С.А. Основы экспериментальной механики разрушения. М.: МГУ, 1989. 139 с.

[74]. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А. Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС, 2007. 264 с.

[75]. Ключников В.Д. Физико-математические основы прочности и пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1994. 189 с.

[76]. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

[77]. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях / анализ, предсказание, предотвращение /. М.: Мир, 1984. 624 с.

- [78]. Косевич А.М. Физическая механика реальных кристаллов. Киев: Наукова Думка, 1981. 327 с.
- [79]. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Гос. Н.-т. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1958. 267 с.
- [80]. Коттрелл А.Х. Теоретические аспекты процесса разрушения//Атомный механизм разрушения. М.: Металлургиздат, 1963. С. 30-68.
- [81]. Коттрелл А.Х. Прерывистая текучесть. Структура и механические свойства металлов. М.: Металлургия. 1967. 210 с.
- [82]. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. Пер. с польск. /Под ред. С. Я. Яремы. М.: Металлургия, 1990. 623 с.
- [83]. Коч К., Овидько И., Сил С., Вепрек С. Научные основы и приложения. Конструкционные нанокристаллические материалы. М. Физматлит. 2012. 448 с.
- [84]. Красовский А.Я. Физические основы прочности. Киев, Наукова Думка, 1977. 140 с.
- [85]. Красовский А.Я., Краси́ко В.Н. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. Киев: Наукова Думка, 1990. 173 с.
- [86]. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. М.: Машиностроение, 1982. 174 с.
- [87]. Кузьменко В.А., Васинюк И.Н., Крук Б.З. Многоцикловая усталость при переменных амплитудах нагружения. Киев: Наукова Думка, 1986. 264 с.
- [88]. Лари́ков Л.Н. Залечивание дефектов в металлах. Киев: наукова Думка, 1980. 280 с.
- [89]. Левин В.Д., Морозов Е.М., Матвиенко Ю.Г. Избранные нелинейные задачи механики разрушения. М.: Физматлит, 2004.- 407 с.
- [90]. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2003. 174 с.
- [91]. Лисанов М.В., Печеркин А.С., Сидоров В.И. Анализ риска и декларирование безопасности объектов нефтяной и газовой

промышленности//Сертификация и безопасность оборудования.1998. №1. 37-41 с.

[92]. Лихачев В.А., Волков А.Е., Шудегов В.Е. Континуальная теория дефектов. Л.: Изд-во Ленинградского университета. 1986. 232с.

[93]. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016. - 504 с.

[94]. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах конструкций. М.: Наука, 1996. 240 с.

[95]. Магистральный газопровод МГ "Сахалин-Хабаровск-Владивосток" // Основные технические решения по линейной части, т.1, т.2. // М.: ОАО "Гипрогазцентр", ОАО "Газпром", 2008.

[96]. Мазур И.И., Иванцов О.М., Молдаванов О.И. Конструктивная надежность и экологическая безопасность трубопроводов. М.: Недра,1990. 264 с.

[97]. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных ситуаций. М.: РИЦ "Техносфера", 2010. 416 с.

[98]. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. С. 359-412.

[99]. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. Рига: Зинатне, 1980. 572 с.

[100]. Матвиенко Ю.Г. Физика и механика разрушения твердых тел. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 74 с.

[101]. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.:Физматлит, 2006. 328 с.

[102]. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. М.: Машиностроение. 1973. 201 с.

[103]. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

[104]. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.

- [105]. Махутов Н.А. Научные основы и задачи по формированию систем оценки рисков // Безопасность критических инфраструктур и территорий. Т.2. №1. 2010. с. 6-11.
- [106]. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности. Учебное пособие. Под общей редакцией В.В.Клюева. М.: Изд-во «Спектр». 2011. 187 с.
- [107]. Махутов Н.А. Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. Новосибирск: Наука, 2005. 516 с.
- [108]. Махутов Н.А. Пермяков В.Н., Ботвина Л.Р., Кравцова Ю.А. Комплексный анализ механических свойств материала для обоснования ресурса и безопасности продуктопроводов// Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2006. с. 65-76.
- [109]. Махутов Н.А. и др. Катастрофы и общество. М.: Контакт-культура, 2000. 331 с.
- [110]. Машиностроение. Энциклопедия. Том VI-3. Надежность машин. Глава 4.7 «Надежность газонефтепроводов»: М.: «Машиностроение», 1998. – с. 525-585.
- [111]. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: в 4 т. / Под ред. Панасюка В.В. Киев, Наукова Думка. 1988. т.1., 488 с. 1988. т.2, 620 с. 1988. т.3, 436 с. 1990. т.4, 680 с.
- [112]. Механика малоциклового разрушения//Махутов Н.А., Бурак М.И., Гаденин М.М. и др. М.: Наука, 1986. 264 с.
- [113]. Миллер К. Ползучесть и разрушение. М., Металлургия, 1986. 119 с.
- [114]. Миллер К.Ж. Усталость металлов – прошлое, настоящее и будущее//Заводская лаборатория. 1994. № 3. С. 31-44.
- [115]. Мовчан А.А. Феноменологическое описание дислокационного механизма образования зародышевых дефектов при пластическом деформировании//Прикладная механика и техническая физика. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1987. № 1. С. 147-155.
- [116]. Мовчан А.А. Микромеханический подход к проблеме описания

накопления анизотропных рассеянных повреждений//Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. 1990. Т.3. С. 115-123.

[117].Мовчан А.А. Механика накопления повреждений в элементах конструкций. М., 1996. 64 с.

[118].Модернизация систем учета расхода газа, качества газа и реконструкция ГИС ООО "Кавказтрансгаз". ГИС газопровода "Починки - Изобильное-ССПХГ". Общая пояснительная записка ОАО "ИПП "ВНИПИтрансгаз". Киев: 18-С/02.П.1.1-ПЗ, 2007. том 1, часть 1.

[119].Морозов Е.М. Механика разрушения упругих тел. М.: МИФИ, 1984. 80 с.

[120]. Морозов Е.М. Механика разрушения упругопластических тел. М.: МИФИ, 1986. 88 с.

[121].Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения. М.: Ленанд, 2010. 456 с.

[122].Морозов Н.Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984. 256 с.

[123].Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб., 1997. 132 с.

[124].Морозов Н. Ф., Паукшто М. В. Дискретные и гибридные модели механики разрушения. СПб., 1995. 156 с.

[125].Москвитин В.В. Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.

[126].Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 708 с.

[127].Никитенко А.Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. Новосибирск, 1997. 278 с.

[128].Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. Клюева В.В. М.: Машиностроение, 2005.

[129].Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. -А.: Металлургия, 1968. 188 с.

- [130].Новиков И.И., Ермишкин В.А., Гребнева В.С. и др. Дислокационно-сдвиговой механизм разрушения // Физика прочности и пластичности. М: Наука, 1986. С. 56-64.
- [131].Новиков И.И., Ермишкин В.А. Микромеханизмы разрушения металлов. М.: Наука, 1991. 366 с.
- [132].Новиков И.И., Ермишкин В.А. Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. 321 с.
- [133].Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. М.: Metallurgy, 1990. 336 с.
- [134].Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения. М.: Metallurgy, 1978. 256 с.
- [135].Нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору.Сер. 09, вып. 38. 44с.
- [136].Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
- [137].Онами М., Ивасимидзу С. и др. Введение в микромеханику. М.: Metallurgy, 1987. 80 с.
- [138].Остсемин А.А., Заварухин В.Ю. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами // Пробл. Прочности, №12. 1993.С.51-59.
- [139].Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности. М.: РАО "Газпром", 1997.
- [140].Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. Киев: Наукова Думка, 1991. 416 с.
- [141].Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. Механика разрушения и прочность материалов. Киев: Наукова Думка, 1988. т.1-4, 2128 с.
- [142].Панин В.Е. Основы физической мезомеханики//Физическая мезомеханика. 1998. № 1. С. 5-22.

- [143]. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск, Наука, 1990. 258 с.
- [144]. Панин В.Е. Механизмы деформации и зарождения усталостных трещин в поликристалле алюминия при знакопеременном изгибе//Доклады РАН. т. 382. № 3. 2002. С. 335-340.
- [145]. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. Некоторые автомоделные закономерности развития поврежденности при квазихрупком разрушении твердых тел//Вычислительная механика сплошных сред, т.4, № 1. 2011. с.90-100.
- [146]. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамическая механика разрушения. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.
- [147]. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
- [148]. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. 2-е изд. М.: Наука, 1985. 503 с.
- [149]. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения. СПб: ЦОП "Профессия", 2012. 552 с.
- [150]. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений / (пер. с англ.) М.: Мир, 1977. 302с.
- [151]. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. Пер. с англ. М.: Metallurgia, 1982. - 184 с.
- [152]. Плювинаж Г. Механика упруго-пластического разрушения. М.: Мир, 1993. 448 с.
- [153]. Ползучесть элементов машиностроительных конструкций (под ред. Подгорного А.Н.). Киев: Наукова Думка, 1984. 262 с.
- [154]. Потапова Л.Б., Ярцев В.П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2005. 244 с.
- [155]. Прочность труб магистральных трубопроводов по данным исследований, выполненных в Советском Союзе и США / (под ред. М.П. Анучкина). М.: ЦНТИ Газпрома СССР, 1965. 208 с.

- [156]. Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения // Доклады 2 Всесоюзного семинара, ИПП АН УССР; Киев: Наукова Думка, 1980. 524 с.
- [157]. Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения // Матохнюк Л.Е. и др., ИПП АН УССР, Киев, 7-8 декабря 1988 г.: тезисы докладов Всесоюзной конференции, 119 с.
- [158]. Прочность и разрушение материалов и конструкций. Межвуз. сборник (под ред. Морозова Н.Ф.). СПб.: Изд-во СПб., 1999. 304 с.
- [159]. Прочность материалов и конструкций // Трощенко В.Т. и др. Киев: Академперіодика, 2005. 1088 с.
- [160]. Р 50-54-52/2-94. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение характеристик разрушения металлических материалов рентгеновским методом. М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1994.- 28 с.
- [161]. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
- [162]. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
- [163]. Разрушение (под ред. Либовица Г.). М.: Мир. 1973. т.1, 620 с., 1975. т.2, 763 с., 1976. т.3, 406 с., 1977. т.4, 399 с.
- [164]. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. 237 с.
- [165]. РД 50-398-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний. Планирование механических испытаний и статистическая обработка результатов // Методические указания М.: Стандарты, 1984. 199 с.
- [166]. РД 50-672-88. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. Гос. Комитет СССР по стандартам. 1989. 22 с.
- [167]. РД 153-39.4-067-00. Методы ремонта дефектных участков действующих магистральных нефтепроводов. М.: ОАО "Транснефть", 2000.
- [168]. РД 03-484-02. Положение о порядке продления срока безопасной

эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах. Утверждено Постановлением Госгортехнадзора России № 43 от 09 июля 2002г.

[169].РД 153-39.4Р-135-2002. Методика определения несущей способности действующих трубопроводов и создание регламентов их функционирования.М.2003.

[170].Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. 44 с.

[171].Реслер И., Хардес Х., Беккер М. Механическое поведение конструкционных материалов. Учебно-справочное пособие. М.: Интеллект Групп,2011.504 с.

[172].Ромалис Н.Б., Тамуж В.П. Разрушение структурно-неоднородных тел. Рига: Зинатне, 1989. 224 с.

[173].Романив О.Н., Андрусив Б.Н., Борсукевич В.И. Трещинообразование при усталости металлов (Обзор)//Физико-химическая механика материалов. 1988. Т.24. № 1. С. 3-21.

[174].Романив О.Н., Деев Н.А., Сорокинский И.С. Морфология «рыбьего глаза» и многоцикловое усталостное разрушение закаленных сталей// Физико-химическая механика материалов. 1973. Т.9. № 6. С, 21-26.

[175].Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1988. 282 с.

[176].Ромбах В.П. Введение в физику разрушения. Эдмондс, США: Vladimir Rombakh,2014. 320 с.

[177].Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М.: 1996. 207 с.

[178].Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС (книги 1и 2). М.: МЧС России, 1994.

[179].Си Дж. Мезомеханика, понятие сегментации и мультискейлинговый подход: нано-микро-макро//Физическая мезомеханика,2008. № 11 (3). С. 5-18.

- [180]. Синергетика и фракталы в радиационном материаловедении. Учебное пособие // Состав: Иванова В.С. М.: Интерконтакт. Наука, 1997. 53 с.
- [181]. Симонов Ю.Н., Георгиев М.Н., Симонов М.Ю. Основы физики и механики разрушения. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. 184 с.
- [182]. Синергетика и усталостное разрушение металлов: Сборник // Под ред. Ивановой В.С. М.: Наука, 1989. 246 с.
- [183]. Скелтон Р.П. Усталость материалов при высокой температуре. М.: Металлургия, 1986. 279 с.
- [184]. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы // Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 52 с.
- [185]. СНиПП-6-74. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. М. 1963. 15с.
- [186]. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т. (под ред. Ю. Мураками)// пер. с англ. Р.В.Гольдштейна, Н.А.Махутова. М.: Мир, 1990. т.1, 448 с. т.2, 568 с.
- [187]. Степанов А.В. Основы практической прочности кристаллов. М.: Наука. 1974. 131 с.
- [188]. СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром».
- [189]. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности. М.: Металлургия, 1986. 279с.
- [190]. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978. 294 с.
- [191]. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. 254 с.
- [192]. Терентьев В.Ф., Алымов М.И. и др. Циклическая прочность субмикроструктурного никеля, полученного методом спекания нанопорошка// Российские нанотехнологии. Т.3. № 5-6. 2008. 164-169 с.
- [193]. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015.

480с.

[194]. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Уч. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. 61 с.

[195]. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН – ЦИАМ. 2013. 505 с.

[196]. Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов. М.: Гостехиздат, 1957. 536 с.

[197]. Томсон Р. Физика разрушения//Атомистика разрушения. М.: Мир, 1987. 310 с.

[198]. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. Киев: Наукова Думка, 1976. 315 с.

[199]. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов (справочник). Киев: Наукова Думка, 1988. т.1,2. 1340 с.

[200]. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова Думка, 1981. 344 с.

[201]. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов. Киев: Наукова думка, 1971. 267 с.

[202]. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А. Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному разрушению металлов и сплавов. Сообщение 1. Размеры трещин на пределе выносливости. Проблемы прочности, 2014. № 3. С. 5-20; Сообщение 2. Продолжительность стадий зарождения и развития усталостных трещин. Проблемы прочности, 2014. № 4. С. 5-20.

[203]. Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. Новосибирск: НГТУ, 2004. 399 с.

[204]. Ужик Г.В. Методы испытаний металлов и деталей машин на выносливость. М.: Изд-во АН СССР, 1948.

[205]. Ужик Г.В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. М.: 1950.

[206]. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1966. 555с.

[207]. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов/ Под ред. В.Е.Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1.298 с.

т. 2.320 с.

- [208]. Физическое металловедение: В 3-х т., 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. Канна Р.У., Хаазена П.Г. Т.3. Физико-механические свойства металлов и сплавов. Пер. с англ.-М.: Металлургия, 1987. 663 с.
- [209]. Филоненко-Бородич М.М. Механические теории прочности. М.: Изд-во МГУ, 1961. 91 с.
- [210]. Филиппов Г.А. Фундаментальные исследования природы хрупкости – основа создания высокопрочных и надежных конструкционных материалов//Сталь. 2004. № 8. С, 85-89.
- [211]. Финкель В.М. Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
- [212]. Форрест П. Усталость металлов. М.: Машиностроение, 1968.
- [213]. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник. //под ред. Дж. Феллоуза. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982. – 489 с.
- [214]. Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. 643с.
- [215]. Хажинский Г.М. Механика мелких трещин в расчетах прочности оборудования и трубопроводов. М.: Физматкнига, 2008. 256 с.
- [216]. Хейвуд Р.Б. Анализ циклов в технической термодинамике. М.: Энергия, 1979. 279 с.
- [217]. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
- [218]. Хенли Э., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
- [219]. Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. М.: Металлургия, 1989. 576 с.
- [220]. Циклическая деформация и усталость металлов. т.1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов (под ред. Трощенко В.Т.). Киев: Наукова Думка, 1985. 216 с.
- [221]. Циммерман Р., Гюнтер К. Металлургия и материаловедение. Спр. Изд. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1982. 480 с.
- [222]. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.:

Энергоатомиздат, 1990. 372 с.

[223]. Черепанов Г.П. Механика разрушения. Изд-во: Регулярная и хаотическая динамика. Институт компьютерных исследований. 2012. 872 с.

[224]. Черных К.Ф. Введение в физически и геометрически нелинейную теорию трещин. М.: Наука, 1996. 287 с.

[225]. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Уфа: Монография, 2003. 804 с.

[226]. Шлюшенков А.П. Механика разрушения и расчеты на прочность и долговечность элементов машин и конструкций с трещинами. Брянск: Брянский ГТУ, 1996. 229 с.

[227]. Шмитт-Томас К.Г. Металловедение для машиностроения. Справочник (пер. с нем.). М.: Metallurgiya, 1995. 512 с.

[228]. Шумилов И.С. Авиационные происшествия: причины возникновения и возможности предотвращения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 383 с.

[229]. Штиллер В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика. М.: Мир, 2000. 176 с.

[230]. Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы. Учебное пособие. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. 672 с.

[231]. Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций. М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1963. 247 с.

[232]. Ярема С.Я. Стадийность усталостного разрушения и ее следствия//Физико-химическая механика материалов. 1973. т.9. № 6. С. 66-72.

[233]. Alshamma F.A.S., Gali M.A.G. Theoretical and Experimental Study of the Behavior of Metals under Multiaxial Fatigue Failure // Int. J. of Current Eng. And Tech., 2017. Vol.1. N 1. P. 148-156.

[234]. Atlas of Fatigue Curves// Edited by Howard E. Boyer. ASM International, 1986. 518 p.

[235]. Bathias C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. Verlag:Marcel Dekker, 2005. 304 p.

- [236]. Bathias C. Fatigue Limit in Metals. John Willey@Sons Inc., 2013. 114 p.
- [237]. Bathias C., Pineau A. Fatigue of Materials and Structures: Application to Design and Damage. ISTE Ltd., Great Britain. 2011. 344 p.
- [238]. Bathias C., Pineau A. Fatigue of Materials and Structures. John Willey@Sons Inc., 2013. 512 p.
- [239]. Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture//Editors: Carpinteri A., de Fritas M., Spagnoli A.ESIS, Publ. 31, Elsevier. 2003. 516 p.
- [240]. Cottrell A.H. Dislocations and plastic flows in crystals. Oxford. Clarendon Press. 1953. 134 p.
- [241]. Fatemi A., Shamsaei N. Multiaxial Fatigue: An overview and some approximation models for life estimation // Int. J. of Fatigue, 2011. N 33. pp. 948-958.
- [242]. Fourth Int. Conf. on Very High Cycle Fatigue (VHCF-4)//Editors: Allison J.E., Jones W., Larsen J.M., Ritchie R.O. John Willey@Sons Inc., 2007. 466 p.
- [243]. Frost N.E., Marsh K.J., Pook L.P. Metal Fatigue. Springer, 2007. 512 p.
- [244]. Furuya Y. Visualization of internal small fatigue crack growth//Mater.Lett., 2013. N 112. pp.139-141.
- [245]. Gogotsi Y., Presser V. Carbon Materials. CRS Press. 2013. 529 p.
- [246]. Goncalves C., Araujo J.A., Mamiya E.N. Multiaxial Fatigue: A stress based criterion for hard metals//Int. J. of Fatigue, 2005. N 27. P.177-187.
- [247]. Henley E.J., Kumamoto H. Reliability Engineering and Risk assessment. Prentice Hall, Englewood Cliffs. NJ, 1981. 368 p.
- [248]. Hirth J.P., Kubin L. Dislocations in Solids. Vol.15. Elsevier. 2009. 328 p.
- [249]. Joshi V. A. Titanium Alloys: An Atlas of Structure and Fracture Features. T@Francis Group, 2006. 248 p.
- [250]. Krupp U. Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys. John Willey@Sons Inc., 2007. 311 p.
- [251]. Lee Y., Mark E. Metal Fatigue Analysis. Barkley, 2011. 633 p.
- [252]. Liu Y., Mahadevan S. Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals// Int. J. of Fatigue, 2005. vol. 27. P.790-800.

- [253].Luo She-ji, Zhao Kang, Wang Rong. Biaxial Fatigue Behavior Under Combined Axial and Torsional Loading for S135 Drill Pipe Steel. *Journal of Materials Engineering*, 2013. vol.3. N 1. P. 40-44(5)
- [254].Major S. Effectiveness of the Fatigue Criteria for Combined bending-torsion loading//*Materials Eng.*, 2010. Vol.17, N 4. P. 1-6.
- [255].*Material Science and Technology: Plastic Deformation and Fracture of Materials*. Editor: H. Mughrabi. V.6. John Wiley@Sons Inc., 1992. 710 p.
- [256].Miller K.J. Short Fatigue Cracks. *ESIS13*, 1992. 496 p.
- [257].Miller K.J., de Los Rios E.R. *The Behaviour of Short Fatigue Cracks*. John Wiley@Sons Inc., 2005. 560 p.
- [258].McDowell D.L., Dunne F.P.F. Microstructure-sensitive computation modelling of fatigue crack formation//*Int. J. Fatigue*, 2010. V.32. .1521-1542.
- [259].McKeighan P.C., Ranganathan N. *Fatigue Testing and Analysis under Variable Amplitude Loading Conditions*. ASTM International, STP 1439, 2005. 585 p.
- [260].Mughrabi H. *Dislocations and Properties of Real Materials*. Book No.323. The Institute of Metals. London.1985. P. 244-262
- [261].Mughrabi H. On the grain-size dependence of Metal Fatigue: Outlook on the Fatigue of Ultrafine-Grained Metals//*Invest. And App. Of Severe Plastic Deformation*. NATO Science Series. V.80, 2000. P.241-253
- [262].Murakami Y. *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Elsevier, 2002. 369 p.
- [263].Murakami Y., Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneity on fatigue strength // *Fatigue*. 1994. V. 16, April. P. 163-182.
- [264].Newman J.C., Wu X.R. et all. Small-crack growth and fatigue life predictions for high- strength aluminum alloys. Part II // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct*. 2000. V.23, №4. P. 59-72.
- [265].Newman J.C., Piascrik R. *Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits and Design*. ASTM International, 2000. 431 p.
- [266].Nishida S.I. *Macro and Micro-Scopic Approach to Fracture*. Computation

Mechanics, 2004. 328 p.

[267]. Plasticity, Failure and Fatigue in Structural Materials – from Macro to Nano: Proc. of the H.Mughrabi Honorary Symposium. John Willey@Sons Inc., 2010.

264 p.

[268]. Pook L. Metal Fatigue: What It Is, Why It Matters. Springer, 2007. 264 p.

[269]. Radaj D., Sonsino C.M., Fricke W. Fatigue assesment of welded joints by local approaches. Woodhead Publishing Limited, 2006. 660 p.

[270]. Ravishandran K.S., Ritchie R.O., Murakami Y. Small Fatigue Cracks: Mechanics, Mechanisms and Applications. Elsevier, 1999. 498 p.

[271]. Saeidi N., Ashrafizadeh F., Niroumand B., Forouzan M.R., Barlat F. Damage mechanism and modeling of void nucleation process in a ferrite-martensite dual phase steel//Eng.Fract.Mech.2014.V.127.P.97-105.

[272]. Sangid M.D. The physics of fatigue crack initiation//Int. J. of Fatigue, 2013. v.57. P.58-72.

[273]. Serbino E.M., Tschiptshin A.P. Fatigue behavior of bainitic and martensitic super clean Cr-Si high strength steels// Int. J. of Fatigue, 2014. N 61. P.87-92.

[274]. Sih G. C. Multiscale Fatigue Crack Initiation and Propagation of Engineering Materials: Structural Integrity and Microstructural Worthiness // Fatigue Crack Growth Behaviour of Small and Large Bodies. Series: Solid Mechanics and Appl., vol.152. Springer, 2008. 385 p.

[275]. Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art//Int.J. of Fatigue,2003. N 25. P.679-702.

[276]. Srinivasan R., Ashrof I.M. Fatigue of Materials: Advances and Emergences in Understanding. John Willey@Sons Inc., 2010. 448 p.

[277]. Stephens R.I., Fatemi A., Stephens R., Fuchs H. Metal Fatigue in Engineering. John Willey@Sons Inc., 2000. 496 p.

[278]. Suresh S. Fatigue of Metals.UK: Cambridge University Press.2003. 679 p.

[279]. Tang P., Zhang J. Fatigue Crack Growth: Mechanisms, Behaviour and Analysis. Nova Science Pub. Inc., 2013. 319 p.

[280]. Wang Y., Zhang D., Yao W. Fatigue damage rule of LY12CZ aluminium

alloy under sequential biaxial loading // *Sci.China-Phys. Mech. Astron.*, vol.57, N 1, 2014. pp. 98-103.

[281]. Weiland H., Nardiello J., Zafferer S., Cheong S., Papazian J., Raabe D. Microstructural aspects of crack nucleation during cyclic loading of AA7075-T651//*Eng.Fract.Mech.*2009.V.76.P.709-714.