

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи



Бадиков Кирилл Андреевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ
ТРЕЩИНЫ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ И КОНСТРУКЦИОННЫХ
СТАЛЯХ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Савкин Алексей Николаевич

Волгоград – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ.....	11
1.1 Кривая усталости в анализе накопления повреждаемости, зарождения и роста трещин в материалах.....	11
1.2 Оценка стадийности роста усталостной трещины на основе кинетической диаграммы усталостного разрушения.....	19
1.3 Физические основы поведения усталостных трещин.....	23
1.4 Факторы, влияющие на рост усталостных трещин.....	27
1.5 Закрытие трещины и ее влияние на циклическую трещиностойкость.....	29
1.6 Кинетика развития усталостных трещин с учетом последовательности нагрузок.....	35
1.7 Модели роста трещин при постоянной амплитуде нагружения.....	38
1.8 Модели роста трещин при переменной амплитуде напряжения.....	42
1.9 Современные программные продукты оценки трещиностойкости материалов.....	53
1.10 Кривые циклического деформирования.....	56
Выводы по первой главе.....	58
2 МАТЕРИАЛ, ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	60
2.1 Анализ материалов, используемых при испытаниях на трещиностойкость.....	60
2.2 Образцы для испытания на распространение трещин.....	62
2.3 Испытательное оборудование и программы автоматической обработки экспериментальных данных для испытаний на трещиностойкость.....	66
2.4 Моделирование квазислучайного нагружения, характерного для условий эксплуатации конструкций.....	68
2.5 Определения порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений.....	72
Выводы по второй главе.....	76

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РОСТА ТРЕЩИН ПРИ РЕГУЛЯРНОМ, БЛОЧНОМ С РАЗЛИЧНЫМИ ПЕРЕГРУЗКАМИ И КВАЗИСЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ.....	77
3.1 Изучение кинетики роста трещин для материалов при регулярном циклическом нагружении.....	77
3.2 Анализ влияния характера переменного нагружения на продолжительность роста усталостной трещины с оценкой фрактографических особенностей.....	81
3.2.1 Влияние последовательностей перегрузок и недогрузок на кинетику роста усталостных трещин на примере алюминиевого сплава.....	81
3.2.2 Анализ характера блочного нагружения на кинетику роста усталостных трещин на примере низколегированной стали.....	98
3.2.3 Влияние вида квазислучайного нагружения на кинетику роста усталостных трещин.....	105
3.3 Оценка характера нерегулярного нагружения и учет закрытия трещины на кинетику ее роста.....	116
Выводы по третьей главе.....	124
4 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.....	125
4.1 Анализ продолжительности роста усталостных трещин по различным моделям и программным продуктам.....	125
4.2 Использование принципа эквивалентности при оценке характера переменного циклического нагружения.....	128
4.3 Моделирование роста усталостных трещин при нерегулярном циклическом нагружении поцикловым методом с учетом закрытия трещины и характера нагружения.....	131

4.4	Формирование гибридной модели, описывающей кинетику роста усталостных трещин с учетом локальных напряжений в устье усталостной трещины и изменения критериальных параметров КДУР	136
4.5	Учет последовательности при переменном нагружении на основании изменения порогового значения ΔK_{th} с учетом локальных напряжений по правилу Нойбера и кривой Рамберга-Осгуда и модели пластичности в устье трещины	157
	Выводы по четвертой главе.....	160
	Основные результаты и выводы	162
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	164
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Современные ответственные конструкции в областях ракето-, авиа-, судостроения, наземных транспортных систем гражданского и военного назначения чаще всего испытывают переменные нагрузки регулярного и особенно опасно нерегулярного случайного характера, отягощенные перегрузками разного уровня. Это инициирует разработку моделей оценки ресурсных возможностей наиболее используемых конструкционных материалов, в частности алюминиевых, титановых, стальных и других сплавов специального назначения. При этом большое значение в инженеростроении приобретают удобные для анализа ситуаций нерегулярного нагружения модели развития трещин именно с учетом параметров нерегулярности и случайного нагружения.

Кинетика развития трещин существенно зависит от взаимодействия последовательности нагрузок (амплитуд) переменного нагружения. Так перегрузочные режимы способствуют замедлению роста трещины, недогрузочные режимы могут ее увеличивать. Режимы перегрузка-недогрузка и недогрузка-перегрузка также влияют на кинетику роста трещин. Случайное внешнее нагружение содержит все эти элементы и поэтому возникает необходимость исследования кинетики роста трещины с приложением внешней нагрузки в виде спектров для различных технических объектов, соответствующих эксплуатационным условиям. Последовательность циклов случайного нагружения отличаются асимметрией и амплитудой, данные особенности затрудняют разработку обобщенного метода определения продолжительности роста усталостных трещин, учитывающего характер нагружения. Это вызывает необходимость расширения научно-исследовательских работ по изучению трещиностойкости металлов и сплавов, формированию моделей разрушения.

Таким образом, актуальной задачей является развитие методов прогнозирования ресурса объекта при регулярном и нерегулярном нагружениях с

учетом воздействия на процесс роста трещины разной величины асимметрии, амплитуды и характера переменного нагружения, и взаимодействия последовательности нагрузок при случайном нагружении.

Цель работы: разработка моделей прогнозирования продолжительности роста усталостной трещины в алюминиевых и стальных материалах с учетом воздействия на процесс роста трещины разной величины асимметрии, последовательности нагружения, характера переменного нагружения и окружающей среды.

Задачи исследования:

1) Провести серию экспериментальных исследований усталостных характеристик трещиностойкости алюминиевых и стальных конструкционных материалов при различных видах переменного нагружения.

2) На основе известного критерия нерегулярности (полноты), использующего параметры кривой выносливости при стационарном циклическом нагружении, разработать его модификацию с включением наклона среднего участка кривой Пэриса и нормированных амплитуд нагружения, более полно учитывающих характер нагружения.

3) С учетом предложенного критерия нерегулярности нагружения сформировать полуфеноменологическую модель оценки роста трещин и более сложную по структуре модель на основе поциклового метода расчета.

4) Определить эффект области их применения для разных материалов, видах и характере переменного нагружения.

5) Провести эксперименты по исследованию влияния на параметры кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при широкой вариации материалов, характера переменного нагружения, силовых параметров, режимов недо- и перегрузки и других эффектов динамики роста трещины с анализом возможности обобщенных КДУР.

6) Разработать модель для оценки кинетики роста усталостных трещин на всех участках КДУР в том числе в околопороговой области роста трещины с учетом локальных напряжений в устье трещины и изменением порогового

значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в процессе циклического нагружения с учетом влияния окружающей среды на основе водородного окрупчивания материала.

7) Провести оценку продолжительности роста усталостных трещин по разработанным моделями и полученным экспериментальным данным на различных конструкционных материалах, видах и характере переменного нагружения.

Методы исследований и используемая аппаратура

Исследования усталостных характеристик материалов проводились на современной сервогидравлической машине Biss Nano 25 kN на компактных образцах с использованием специализированной программы MTL, осуществляющей управление по нагрузке. Анализ экспериментальных результатов проводился апробированными в прикладной математике численными методами с помощью различных компьютерных программ.

Научная новизна

Новыми являются следующие основные результаты:

1) Разработана методика оценки сложного переменного нагружения через модифицированную меру нерегулярности, которая учитывает параметры кривой КДУР материала.

2) Введен эффективный КИН на основе предложенной меры нерегулярности и эффекта закрытия трещины, которые позволяют свести полученные КДУР при переменном нагружении на одну кривую, характерную для регулярного нагружения.

3) Разработаны две новые полуфеноменологические модели прогнозирования кинетики роста усталостных трещин: для экспресс-анализа на среднем участке КДУР на основе принципа эквивалентности нерегулярного нагружения регулярному, а также на основании поциклового расчета на всей длине роста трещины.

4) Введены аналитические зависимости для оценки изменения порогового значения КИН для разных материалов в зависимости от остаточных

локальных напряжений в устье усталостной трещины, на основе которых разработана новая модель для оценки кинетики роста трещины на всех участках КДУР с учетом последовательности нагрузок.

5) Предложена и апробирована новая численно-аналитическая методика расчета напряжений в окрестности вершины трещины, которая позволяет более точно учитывать последовательность нагрузок. В основе данной методики лежит вариант теории пластичности, рассматривающий комбинированное изотропно-трансляционное упрочнение и линейное правило определения деформации в окрестности трещины.

6) Проведен сравнительный анализ предложенных моделей, позволяющий выявить эффективность использования модели, учитывающей последовательность нагрузок в околопороговой области нагружения.

Практическая значимость работы

1) Использование предложенной полуфеноменологической модели по определению продолжительности роста трещин на основании эквивалентности нерегулярного нагружения регулярному с использованием меры нерегулярности для оценки характера нагружения позволяет сократить трудоемкость получения расчетных результатов роста усталостных трещин.

2) Для поциклового расчета по определению кинетики роста усталостной трещины при нагружении переменной последовательностью с учетом характера нагружения и закрытия трещины показана возможность для различных материалов на основании критериальных параметров КДУР без учета эффекта последовательности нагрузок проводить оценку продолжительности роста трещины в первую очередь для различных видов квазислучайного нагружения.

3) Разработанная новая модель, с учетом последовательности нагрузок циклического нагружения, определяемого изменением порогового значения КИН с учетом локальных напряжений в устье трещины, позволяет определять продолжительность роста усталостной трещины на всех трех участках КДУР. В том числе и в околопороговой области с оценкой кинетики роста трещины от

дефектов малого размера на основании влияния окружающей среды (водородного охрупчивания) материала в устье трещины.

4) Предложенные модели роста усталостных трещин могут быть использованы для разработки дальнейших теоретических методов оценки развития трещин при различных типах нерегулярного нагружения, в том числе и спектральных для более широкого спектра конструкционных материалов.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на: IX Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат», ВИАМ, г. Москва, 2017; VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов, ИМЕТ РАН, г. Москва, 2017; XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 21-25 мая 2018 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Прогресс транспортных средств и систем – 2018» (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.); First Structural Integrity Conference and Exhibition (4-6th July 2016, Bengaluru, India); Second International Conference & Exhibition (27-27th July 2018, Hyderabad, India); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (15-18 мая 2018, г. Москва).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 39 работ, включая 15 статей в журналах, рекомендованных ВАК России, 8 статей в зарубежных журналах перечня Scopus, 6 статей перечня Web of Science, 7 свидетельств о государственной регистрации программ, 15 статей из сборников материалов конференций, 6 тезисов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, выводов, списка использованных источников и приложения. Список использованных источников составляет 155 наименований. Общий объем диссертации составляет 182

страницы, в том числе основного текста диссертации 163 страницы. Всего в работе 82 иллюстрации и 10 таблиц.

Автор выражает благодарность д.т.н., проф. Багмутову В.П. за оказанную помощь при анализе и обсуждении результатов диссертации и академику Индийской академии наук доктору Сундеру Р. за оказанную помощь в выборе методик исследования и интерпретировании результатов экспериментов.

1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ

1.1 Кривая усталости в анализе накопления повреждаемости, зарождения и роста трещин в материалах

Инженерные задачи по изучению усталости металлов при переменной нагруженности, разработка подходов и методов по предотвращению разрушения конструкций получили развитие в начале 20 века [1]. Во второй половине 20 века возникла проблема по продлению сроков ресурса конструкций, находящихся длительное время в эксплуатации. Эти конструкции уже имели повреждения в виде разрыхления структуры металлов, наличия субмикро и микротрещин. В это время получили развитие модели повреждаемости, основанные на кинетике роста усталостных трещин, что позволяло с определенной степенью надежности назначать сроки профилактических осмотров с целью обнаружения трещин, развитие которых могут привести к разрушению конструкций.

Работы многих зарубежных и отечественных ученых выявили физические основы усталостного разрушения металлов на основе дислокационной траектории деформации [2, 3] развития микронеоднородной и микропластической деформации структуры сплава, связанной с развитием неупругих свойств, и многих других. Общепринято, что конечным этапом усталостного развития структур металла является возникновение трещины. Процесс усталостного разрушения металлов можно разделить на две основные стадии – стадию зарождения магистральной усталостной трещины и стадию ее развития. В связи с неоднородностью металла при циклических напряжениях на границах отдельных включений и вблизи микроскопических пустот и различных дефектов металла возникает концентрация напряжений, которая приводит к микропластическим деформациям сдвига некоторых зерен. При этом на поверхности зерен могут появляться полосы скольжения, которые на некоторых материалах проявляются в виде микроскопических

бугорков и впадинок – экструзий и интрузий. Происходит развитие сдвиговых деформаций, переходящих в микротрещины, перерастающих в магистральную трещину. Под магистральной трещиной в этом случае подразумевается трещина, которая при заданных условиях нагружения развивается с большей скоростью, чем остальные трещины и является причиной окончательного усталостного разрушения. Начальные размеры магистральной трещины для пластичных сталей составляют десятые, а для высокопрочных сталей сотые доли миллиметра.

Результаты большого числа исследований свидетельствуют о том, что усталостные трещины возникают уже на самой ранней стадии циклического нагружения [2]. Реальные конструкции и детали не всегда так хорошо отполированы, как лабораторные образцы. В конструкциях на поверхности детали могут наблюдаться шлифовочные риски, забоины, царапины. Это значит, что относительное время зарождения трещин в них еще меньше.

Одной из важнейших задач по изучению механической усталости стало получение и графическое представление результатов испытаний. Было установлено, что кривая усталости, построенная в координатах циклические напряжения – число циклов до разрушения ($\sigma-N$), есть наиболее полная интегральная характеристика свойств сопротивления усталости. В этой связи выполнены многочисленные экспериментальные исследования и их анализ [4, 5], в результате которых дано обобщенное представление о «полной кривой усталости». Такие кривые строили на базе 10^7 циклов, поскольку считалось, что именно на этой базе удастся установить (физический) предел выносливости — критическое напряжение, которое является границей между зоной усталостного разрушения и областью выносливости материала. Это означает, что ниже предела выносливости обнаруживается область неограниченной долговечности. Типичная схематизация полной кривой усталости представлена на рис. 1.1. Полная кривая усталости разделяется на основные области: малоциклового и многоциклового усталости. Многоциклового усталость – это усталость материала, при которой

усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании. Малоцикловая – при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упруго-пластическом деформировании [6]. Ряд исследований показывает, что условной границей между этими областями является напряжение, равное динамическому пределу текучести.

Область малоциклового усталости охватывает участок АБВГ (рис. 1.1), который находится в диапазоне напряжений от σ_v до $\sigma_{нр}$ и разделена на три участка:

I – участок квазистатического излома. Механизм разрушения зависит от долговечности: если разрушение происходит на первом цикле, то наблюдается вязкий статический излом, а если при большем числе циклов – то с образованием шейки;

II – участок циклической ползучести. Разрушение носит квазистатический характер, приводит к образованию шейки в месте излома. Для этого участка характерно непрерывно возрастающее накопление пластической деформации;

III – участок малоциклового усталости, на котором может накопиться значительная пластическая деформация. И на поверхности разрушения уже отчетливо можно выделить зону усталостного излома.

Переход от одного участка к другому часто связаны с изменением формы кривой усталости – наличием перегиба или разрыва. Разрыв обусловлен сменой механизма усталостного разрушения: выше предела текучести интенсивно происходит коагуляция вакантных мест на поверхности микропор в плоскостях максимальных касательных напряжений, ниже – процесс осаждения вакансий в плоскостях максимальных нормальных напряжений. При малых амплитудах цикла трещина усталости растет внутрь, образуя излом, перпендикулярный оси образца, т.е. разрушение происходит в плоскости максимальных нормальных напряжений. При больших амплитудах цикла разрушение происходит под

углом 45° к оси образца, т.е. по линии главных касательных напряжений. Данные разрывы и перегибы при переходе от малоциклового к многоциклового усталости являются следствием процесса интенсификации пластической деформации и разрушения при достижении определенного напряжения, когда за каждый цикл нагрузки возникают трещины субмикроскопических и микроскопических размеров [7, 8].

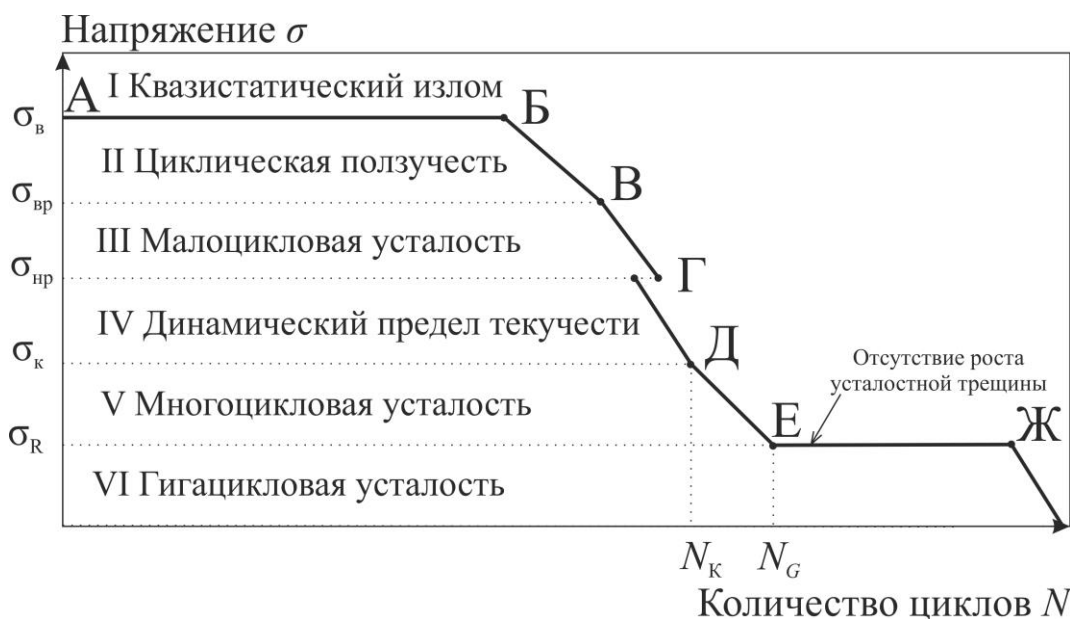


Рис 1.1 – Схематическое изображение полной кривой усталости: σ_v – временное сопротивление разрушению, $\sigma_{вр}$ – напряжение верхнего разрыва, $\sigma_{нр}$ – напряжение нижнего разрыва, σ_k – критическое напряжение, σ_R – предел выносливости, N_k – критическое число циклов; N_G – число циклов до перегиба кривой усталости и выхода на физический предел выносливости [5]

К многоциклового усталости относятся разрушения при напряжениях ниже переходной области, участок ГДЕЖ, рис. 1.1. Процесс многоциклового усталости делят на четыре периода на основании кинетики развития дислокационной структуры материала, субмикротрещин и микротрещин [9]:

IV – участок динамического предела текучести;

V – участок многоциклового усталости, на котором уровень действующих напряжений не превышает предела текучести материала,

поэтому макроскопические пластические деформации в пределах цикла малы;

VI – участок гигацикловой усталости, на котором проводятся испытания в базе 10^{10} циклов нагружения и более. Для высокопрочных сталей наблюдается физический предел усталости – горизонтальный участок на базах до 10^7 циклов нагружения. Если разрушение произошло после 10^7 циклов, то трещины появлялись в подповерхностном слое преимущественно у неметаллических включений в связи с наличием значительной локальной концентрации напряжений возле них и возможностью водородного охрупчивания металла в этой области, а не у поверхности как при многоциклового усталости. Эти включения не влияют на статическую прочность, но снижают пластичность материала в связи с образованием внутренних пор при значительных пластических деформациях [10].

Проанализируем стадийность процессов пластической деформации и разрушения в условиях циклического деформирования. На рис. 1.2 показана схема, описывающая стадийность усталостного процесса [5], соответствующая многоциклового усталости углеродистой стали. Она отражает основные закономерности накопления повреждаемости в основных периодах и стадиях процесса усталостного разрушения металлических материалов, имеющих на кривой статического растяжения физический предел текучести. Исследования по стадийности и кинетике накопления усталостных повреждений начались в начале 20 века [11].

Процесс многоциклового усталости (рис. 1.2) делят на четыре периода на основании кинетики развития дислокационной структуры материала, субмикротрещин и микротрещин [9]:

I – инкубационный период, связанный с накоплением искажений кристаллической решетки можно разделить на стадии: 1) Стадия циклической микротекучести (до линии 1). В первых циклах наблюдается интенсивная пластическая деформация поверхностного слоя металла глубиной порядка размера зерна, большая, чем во внутренних объемах. К

окончанию стадии сечение материала претерпевает небольшую микропластическую деформацию, а в поверхностном слое образуется слой с повышенной плотностью дислокаций; 2) Стадия циклической текучести (между линиями 1 и 2). При определенном числе циклов происходит лавинообразное макроскопическое деформирование всего сечения. В поверхностных слоях образуются прямолинейные скопления дислокаций, которые при дальнейшем нагружении вызывают усталостные полосы скольжения; 3) Стадия циклического упрочнения (между линиями 2 и 3). В поверхностном слое развиваются устойчивые полосы скольжения, а к окончанию стадии в них развиваются первые субмикроскопические усталостные трещины;

II – период разрыхления связан с нарушением сплошности металла, т.е. зарождением и развитием субмикроскопических трещин (между линиями 3 и 4). Происходит рост числа поверхностных устойчивых полос скольжения, их расширение и слияние субмикротрещин в полосах скольжения в микротрещины, не более размера зерна. Имеет место вовлечение новых объемов материала в интенсивное пластическое течение, пока вся поверхность материала не покроется грубыми полосами скольжения, фактически являющихся микротрещинами длиной, равной размеру зерна;

III – начало периода развития микротрещин до макротрещин критического размера (между линиями 4 и 5) связано с переходом микротрещины через границу зерна и ее распространением в плоскости, перпендикулярной направлению нагрузки в условиях плоскодеформированного напряженного состояния у вершины трещины;

IV – начало периода окончательного разрушения (между линиями 5 и 6) связано с неустойчивым ростом усталостной трещины. Разрушение происходит, когда раскрытие трещины достигает критического значения [12].

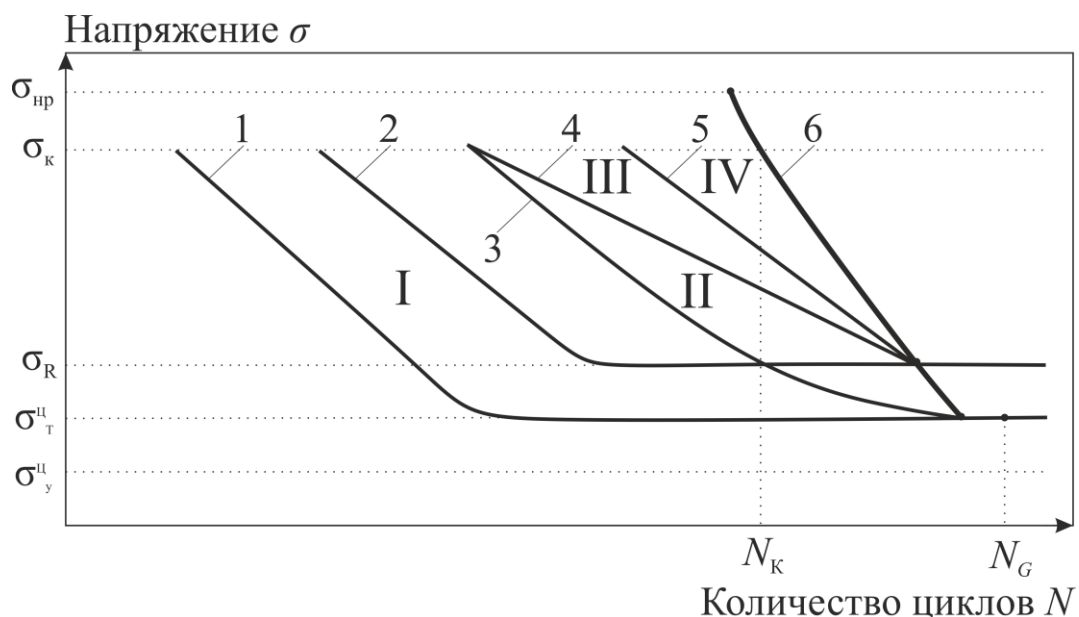


Рис. 1.2 – Периоды и стадии многоциклового усталости: 1 – линия начала макроскопического течения; 2 – линия окончания макроскопического течения; 3 – линия начала образования субмикроскопических трещин; 4 – линия начала образования микроскопических трещин; 5 – линия начала катастрофического разрушения (долома); 6 – кривая усталости; $\sigma_{т}^{II}$ – циклический предел текучести; σ_y^{II} – циклический предел упругости [5]

Для реальных конструктивных элементов эксплуатационные особенности, состояние поверхностного слоя, влияние окружающей среды могут приводить к наличию субмикро и микротрещин еще до начала эксплуатационного внешнего воздействия. Тогда задача исследователя сводится к решению задач механики разрушения – оценке роста усталостной трещины. С другой стороны, исследования показали [7], что после базового числа циклов, равного 10^7 циклов, при достижении 10^9 - 10^{10} циклов наблюдается падение горизонтального участка, кривые 4 и 5, путем развития субмикротрещин усталости ниже предела выносливости σ_R до микро и макротрещин, что характерно для гигацикловой усталости.

Если подвергнуть металл переменному нагружению, то согласно подходу локализованного усталостного разрушения, на микроскопическом уровне в нем может зародиться усталостная трещина, которая вскоре станет

видимой, и в итоге приведет к разрушению. Выделяют периоды зарождения трещины и ее роста (рис. 1.3). В первом периоде имеет место некоторый рост микротрещины. Во втором периоде трещина становится различимой и растет вплоть до разрушения. Период зарождения завершен, если рост микротрещины более не зависит от поверхностных свойств. Факторы оказывают различное влияние на протекание усталостных процессов в каждом периоде, поэтому зарождение и рост трещины рассматривают отдельно [68].



Рис. 1.3 – Периоды зарождения и роста трещин [26]

Приведенный анализ показывает, что развитию усталостных трещин до разрушения, особенно в ответственных конструкциях, следует уделять большое внимание [13]. Несмотря на многочисленные публикации по прогнозированию усталостной долговечности по предсказанию роста трещины при постоянной и переменной амплитуде нагружения, окончательно ответить на все вопросы, относящиеся к этому явлению, не представляется возможным. Таким образом, при разработке моделей усталостного повреждения металлов необходимо учитывать кинетику изменения свойств в процессе циклического нагружения, проявляющуюся в стадийности процесса усталости и связанную с накоплением рассеянных повреждений.

С позиций механики разрушения сопротивление усталости наиболее полно описывается кинетической диаграммой усталостного разрушения – КДУР, представляющей собой сопоставление скорости роста трещины и соответствующего размаха коэффициента интенсивности напряжений – КИН.

1.2 Оценка стадийности роста усталостной трещины на основе кинетической диаграммы усталостного разрушения

Довольно долго для оценки скорости роста усталостных трещин использовались эмпирические формулы, в которые не входили характеристики механики разрушения. Однако только введение в число параметров, влияющих на распространение усталостных трещин, коэффициента интенсивности напряжений (КИН) позволили судить об общих закономерностях роста трещины при циклическом напряжении, так как рост трещины происходит на фоне упругих деформаций, когда справедливы критерии линейной механики разрушения [14]. Коэффициент интенсивности напряжений K , введенный Ирвином Дж.Р. [15], является основным вычисляемым параметром механики разрушения. В вершине трещины возникает сингулярность напряжений, которая определяется стремлением напряжений в вершине трещины к бесконечности при приближении полярного радиуса r к нулю. Параметр K не определяет сингулярность поля напряжений в вершине трещины, но определяет величину напряжений в той зоне, где происходят процессы предшествующие разрушению и, в частности, развивается зона пластических деформаций. Важнейшая практическая значимость КИН K заключается в том, что он не зависит и не влияет на закон распределения напряжений и перемещений в вершине трещины. После того, как определены форма и размеры трещины, а также номинальные напряжения в области трещины, K вычисляется как число за каждый цикл нагружения и имеет размерность МПа $\sqrt{м}$ или МПа $\sqrt{мм}$. В настоящее время для практического использования изданы справочники, позволяющие определить КИН K для часто встречающихся расчетных схем [16].

Скорость роста усталостных трещин зависит от многих факторов, из которых можно выделить следующие: механические (амплитуда напряжений, асимметрия цикла нагружения, частота), металлургические

(микроструктура, наличие включений, характер легирования), геометрические размеры конструктивного элемента [17].

Период распространения усталостных трещин (стадийность), расположенный между кривой усталости на рис. 1.2 (линия 6) и линией необратимой повреждаемости (линия 4) описывается кинетической диаграммой усталостного разрушения (КДУР), которая является основной характеристикой циклической трещиностойкости материала. На ее основании выбирают материал конструкций и оптимизируют технологию изготовления материалов, оценивают условия эксплуатации, безопасный ресурс и живучесть поврежденных трещинами конструкций. Данная диаграмма представляет собой зависимость между скоростью роста усталостной трещины da/dn (мм/цикл или м/цикл) и размаха КИН $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$. По оси абсцисс также может быть отложено максимальное значение КИН $K_{\max} = \Delta K / (1-R)$ или амплитуда КИН – $\Delta K / 2$. По осям координат применяют логарифмические шкалы из-за изменения значений в широких пределах. Схема кинетической диаграммы усталостного разрушения представлена на рис. 1.4.

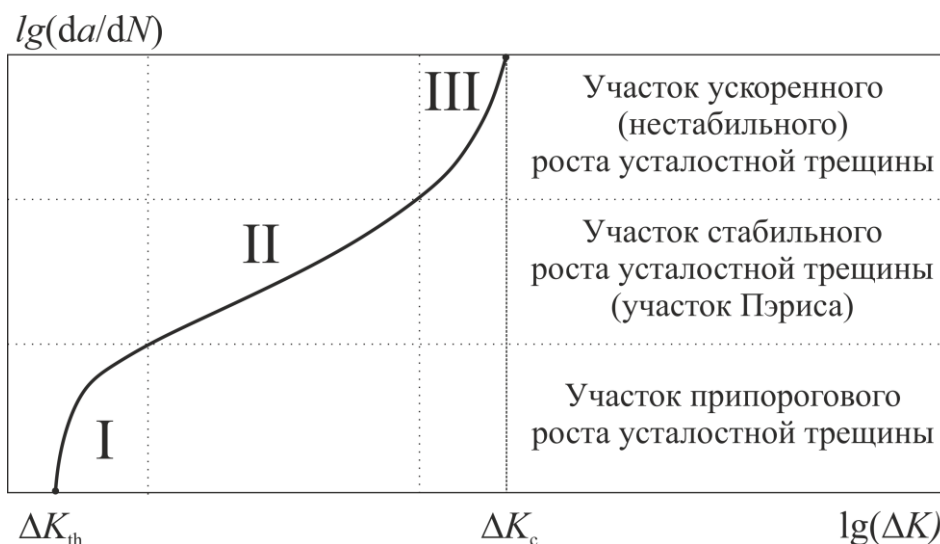


Рис. 1.4 – Кинетическая диаграмма усталостного разрушения (схема)

Диаграмма усталостного разрушения представляет S-образную кривую, имеющую три зоны, согласно рис. 1.4. Границы этих зон могут меняться в

зависимости от типа материала, размеров образца, окружающих условий и других факторов.

I – участок припорогового роста усталостной трещины. Скорость роста трещины на данном участке варьируется в интервале $10^{-5} - 10^{-6}$ мм/цикл. На данном участке происходит хрупкое усталостное микроразрушение, скорость трещины чувствительна к микроструктуре сплава, среднему напряжению от приложенной нагрузки, температуре и окружающей среде. Стадия роста трещины на данном участке может охватывать большой период, особенно при переменных напряжениях близких и выше предела выносливости [18];

II – участок стабильного роста усталостной трещины или участок Пэриса. Скорость роста трещины от $10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-3} мм/цикл. Пластическая зона впереди трещины велика, по сравнению со средним размером зерна, но намного меньше длины трещины. Рост трещины описывается уравнением Пэриса. Влияние микроструктуры, среднего напряжения, пластичности, окружающей среды и толщины мало. На данном участке доминирует циклическое скольжение и сдвиг;

III – участок ускоренного (нестабильного) роста усталостной трещины. Скорость роста трещины от 10^{-3} мм/цикл и выше. Это неустойчивый рост трещин непосредственно перед разрушением. На данном участке преобладает квазистатическое разрушение от расслоения, локализации деформаций и слияния микропустот. Уровни напряжений достаточно высоки, вызывают большие пластические зоны в вершине трещины по сравнению с геометрией образца, которые значительно больше размера зерна. Использование линейной механики разрушения не вполне корректно и должно быть использована нелинейная механика разрушения. Среднее напряжение, свойства материала его микроструктура, толщина образца, асимметрия имеют большое влияние на скорость развития трещины, окружающая среда, ввиду малости времени ее воздействия такое влияние не оказывает. Анализ роста трещины для данной стадии сложен, но часто

игнорируется, как не имеющий большого значения в ситуациях разрушения, в виду малого времени развития [19].

На КДУР выделяют две основные характеристики циклической трещиностойкости, ограничивающие ее сверху и снизу: 1) K_{th} – пороговый размах КИН, ниже которого усталостная трещина не распространяется ($\Delta K < \Delta K_{th}$); K_c – критический размах КИН (вязкость разрушения), при котором происходит усталостное разрушение. Порог развития усталостной трещины ΔK_{th} имеет очень большое практическое значение, так как он определяет безопасную границу уровня переменных напряжений $\Delta \sigma_{th}$. Для определения ΔK_{th} необходима высокая точность и тщательность проведения эксперимента. С ростом коэффициента асимметрии цикла R пороговое значение снижается. Приближенная зависимость для расчета ΔK_{th} определяется формулой 1.1 [20]:

$$\Delta K_{th} = 12.7 - 0.006 \cdot \sigma_T - (11.37 - 0.0065 \cdot \sigma_T) \cdot R, \quad (1.1)$$

КДУР является основной характеристикой развития трещины на всем протяжении ее существования. Наибольший интерес с точки зрения прогнозирования, а также влияния на развитие трещины, представляет средний участок диаграммы. Было получено довольно много зависимостей для скорости роста трещины, но все они практически следуют из уравнения Пэриса [21], которое описывает рост трещины во второй (средней) стадии II стабильного роста трещины, представленного прямолинейной зависимостью на КДУР. Основа данного уравнения в том, что все явления на кончике трещины, а также скорость ее распространения зависят от КИН. Уравнение Пэриса имеет следующий вид:

$$da / dN = C \cdot (\Delta K)^n, \quad (1.2)$$

где C и n – параметры циклической трещиностойкости материала, определяемые по результатам эксперимента в зависимости от R и внешних условий, а ΔK – размах КИН для одного цикла нагружения, N – число циклов нагружения.

Показатель степени n для разных материалов находится в интервале от 2 до 7. Чем хрупче состояние материала, тем больше показатель степени n . Коэффициенты C и n определяются экспериментально: n характеризует наклон КДУР, а C – отрезок по оси ординат, соответствующий $\Delta K=1$. Формула Пэриса не учитывает наличие порогового значения КИН на первом участке КДУР, а также не учитывает ускоренный рост усталостной трещины на третьем участке. Хотя формула Пэриса упрощенно описывает очень сложные явления роста усталостной трещины, тем не менее, в настоящее время она по-прежнему очень популярна в инженерной практике. Применимость формулы Пэриса была подтверждена большим количеством экспериментальных работ, проведенных на материалах сильно отличающихся механическими характеристиками [22, 23]. На базе уравнения Пэриса разработано большое количество моделей, учитывающих те или иные факторы, оказывающие влияние на рост усталостных трещин, которые не учтены в базовом уравнении. Например, модель Формана [24], Формана-Мэтту, Маймона [25], Кассима и др.

1.3 Физические основы поведения усталостных трещин

Для описания закономерности распространения усталостных трещин широко используются методы линейной механики разрушения [26, 27]. В общем случае раскрытие трещины может быть осуществлено по трем модам: тип I – трещина типа «отрыв» при нормальных напряжениях, перемещения берегов трещины перпендикулярны ее плоскости; тип II – трещина типа «сдвиг» при плоском сдвиге, перемещения берегов трещины происходят в плоскости трещины и перпендикулярно ее фронтальной линии; тип III – трещина типа «срез», образуется при антиплоском сдвиге, перемещения берегов трещины совпадают с плоскостью трещины и параллельны ее направляющей кромке. Наиболее важное значение в технике имеет развитие трещины по типу I.

Важно знать при каких условиях распространяется усталостная трещины: плоское напряженное состояние или плоская деформация. Отношение размера зоны пластической деформации к толщине объекта (образца) является существенным фактором, определяющим напряженно-деформированное состояние. Если отношение размера зоны пластической деформации к толщине пластины стремится к единице, то образуется плоское напряженное состояние, если существенно меньше – плоская деформация. В условиях циклического деформирования зона пластической деформации состоит из нескольких областей: статической зоны пластической деформации, которая определяется максимальной величиной КИН; циклической (обратимой) зоной пластической деформации, характеризующейся размахом КИН; зоной процесса разрушения [28].

Если рассмотреть цикл нагружения в зависимости КИН от времени, который представлен на рис. 1.5а, то видно, что первоначальная зона пластической деформации при росте трещины образуется при достижении максимального значения КИН на первом полуцикле нагружения, обозначено как позиция K_1 (рис. 1.5б). При достижении минимального значения K_2 локальное напряжение снижается. В связи с тем, что распределение упругих напряжений, связанное с K_1 , при достижении предела текучести σ_T ограничивалось локальным пластическим течением, снижение распределения упругих напряжений при переходе с K_1 до K_2 приводит к резкому уменьшению уровня напряжений в области вершины трещины и возможному появлению напряжения сжатия. При достижении K_2 образуется меньшая по величине зона пластической деформации, в которой материал испытывает пластическое течение (рис. 1.5в). Размер такой «обратимой» зоны пластической деформации при циклическом деформировании может быть в несколько раз меньше, чем соответствующая величина для случая монотонного нагружения. В связи с тем, что материал, расположенный внутри этой зоны, испытывает воздействие обратимой циклической деформации, в ней протекают основные процессы циклического

деформационного упрочнения или разупрочнения в зависимости от исходного структурного состояния материала.

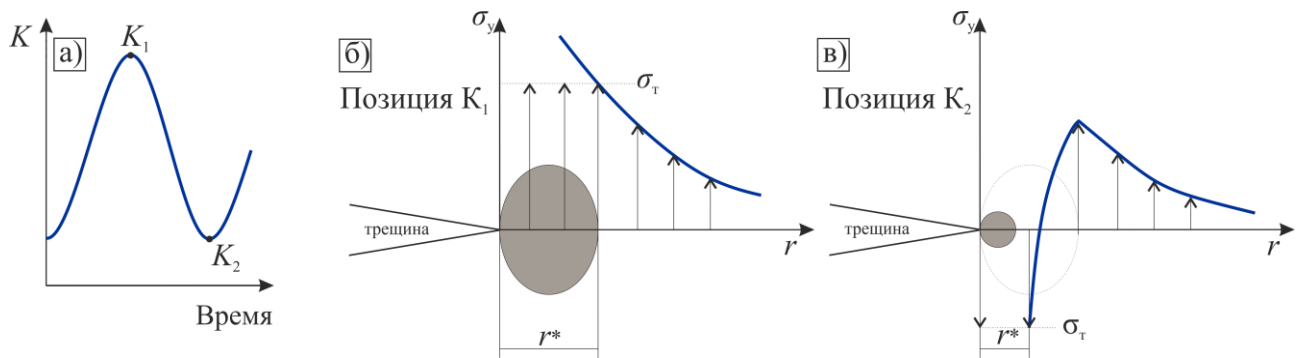


Рис. 1.5 – Зона пластической деформации у вершины усталостной трещины: цикл нагружения (а); непрерывное (б) и обратимое (в) образование зоны пластической деформации

Размер зоны пластичности при вершине трещины можно оценить, если определить расстояние от вершины трещины r^* , на котором упругое напряжение σ_y превышает предел текучести σ_T [28]:

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r^*}}, \text{ или } r^* = \frac{K^2}{2\pi\sigma_y^2}. \quad (1.2)$$

Для знакопеременной пластичности необходимо приращение напряжения не менее удвоенного предела упругости $2 \cdot \sigma_y$, поэтому радиус циклической пластической зоны может быть определен по формуле [29]:

$$r^* = \frac{K^2}{4\pi\sigma_y^2}. \quad (1.3)$$

Для больших значений r величина σ_y стремится к нулю. Данное уравнение справедливо только в ограниченной области – вблизи вершины трещины. Согласно уравнению (1.3), трещины, имеющие одинаковые значения КИН, имеют зоны пластичности одинаковых размеров. Вне зоны пластичности поля напряжений будут одинаковыми. Если две трещины имеют одинаковые пластические зоны и одинаковые напряжения на границе этой зоны, то напряжений и деформации внутри этой зоны пластичности

должны быть одинаковыми. Иными словами, поле напряжений определяется КИНом. Им определяется и то, что происходит внутри зоны пластичности, т.е. это есть мера всех напряжений и деформаций [13].

В соответствии с традиционной концепцией, зона пластической деформации пересекает образец по толщине и дает так называемую модель «собачей кости», которая предполагает состояние плоской деформации (ПДС) внутри образца и плоское напряженное состояние (ПНС) на поверхности образца. Возникновение трехосного растягивающего напряженного состояния в толще образца затрудняет протекание пластических деформаций, протяженность зоны пластически уменьшается, что схематично представлено на рис. рис 1.6. Радиус пластических деформаций $r_{пл}^*$ в этом случае определяется по формуле:

$$r^* = \frac{K^2}{6\pi\sigma_T^2}. \quad (1.4)$$

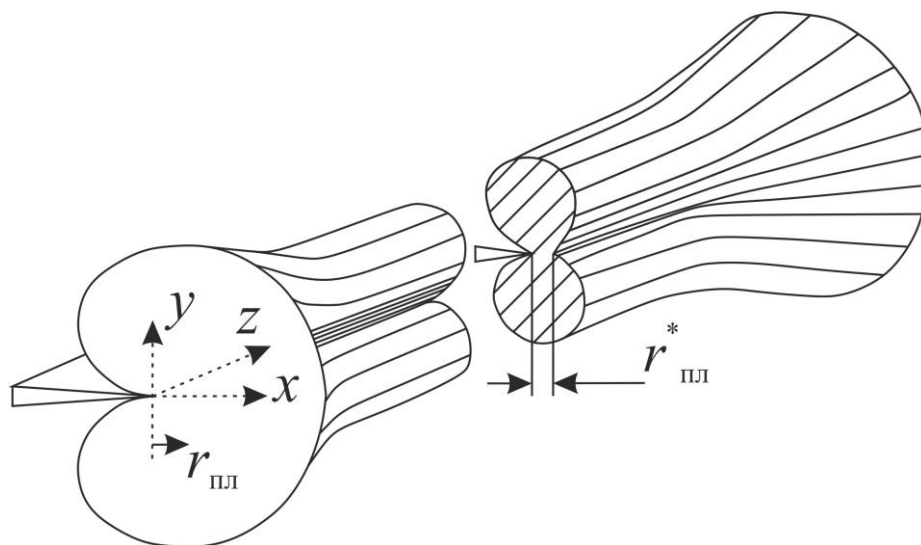


Рис. 1.6 – Зона пластических деформаций у вершины трещины по толще образца: у поверхности – плоское напряженное состояние, область циклических деформаций $r_{пл}$; в объеме – плоское деформированное состояние, область пластических деформаций $r_{пл}^* < r_{пл}$

1.4 Факторы, влияющие на рост усталостных трещин

Влияние структурного состояния материала

Важнейшим структурным параметром металлических материалов, влияющим на зарождение и распространение усталостных трещин, является размер зерна, поскольку границы зерен могут быть эффективными барьерами для развития процессов скольжения [5, 8, 27]. Чаще всего с уменьшением размера зерна предел выносливости возрастает, хотя в ряде работ показано, что измельчение структуры металла не всегда приводит к изменению долговечности. Анализ работ по влиянию размера зерна на предел выносливости металлических материалов представлен в работах [5, 70]. Наряду с размером зерна на трещиностойкость влияют изменение химического состава, морфология, распределение и количество фазовых составляющих и неметаллических включений, а также стабильность структуры в процессе циклического деформирования.

Влияние силовых параметров

Асимметрия цикла, возникающая под воздействием прикладываемого среднего статического нагружения, является одним из факторов, влияющих на кинетику роста усталостной трещины в конструкционных материалах. В рабочих условиях многие детали конструкций подвергаются нагружениям с асимметрией R . В случае определения циклической трещиностойкости асимметрия определяется:

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}. \quad (1.5)$$

Скорость распространения усталостной трещины растет с увеличением R , также увеличение R вызывает сдвиг критических КИН ΔK_{th} и ΔK_c влево (рис. 1.7). Смещение ΔK_c следует из соотношения $\Delta K_c = (1-R) \cdot K_c$. Таким образом, при увеличении R значительно снижаются ΔK_{th} и ΔK_c . Но на среднем участке КДУР наблюдается стабилизация кинетики роста трещины независимо от асимметрии и данный участок диаграммы укладывается в

единую линию, что свидетельствует о постоянстве коэффициентов уравнения Пэриса. Объяснение влияния R на скорость роста трещины основано на анализе эффекта закрытия трещины

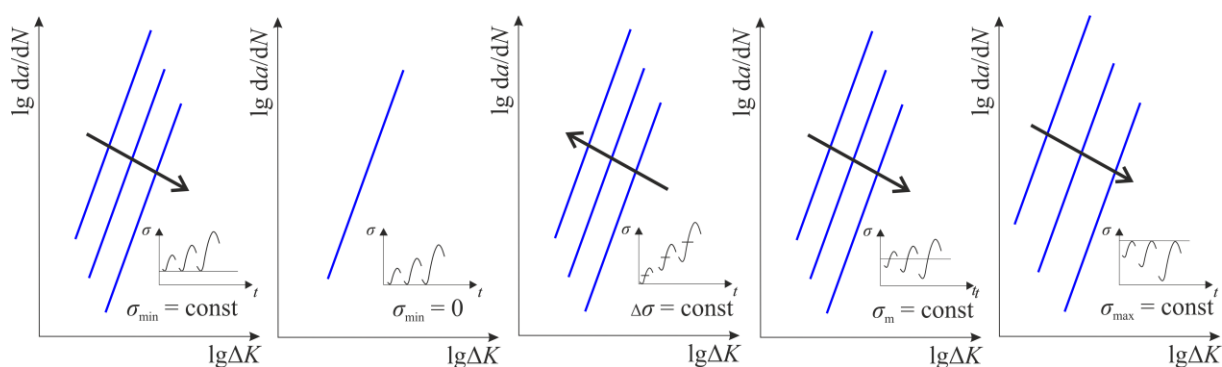


Рис.1.7 – Влияние параметров нагружения на скорость роста усталостной трещины [8]

Влияние водородного охрупчивания

На скорость роста усталостной трещины значительное влияние оказывает водород. Водородное охрупчивание относят к разрушениям под действием окружающей среды. Когда говорят об охрупчивании металла водородом, имеют в виду ухудшение механических свойств: предела прочности, скорости роста трещины, предела выносливости, усталостной долговечности и т. д. [49].

Охрупчивающее действие водорода обнаруживается как при возникновении трещин, так и при их росте. Чем выше давление газообразного водорода $p(H)$, тем ниже пороговый КИН K_{th} . [71]. Влияние водорода на кривую усталости особенно заметно при многоциклового усталости. Влажная атмосфера может приводить к снижению предела выносливости стали на базе 10^7 циклов порядка 30%. Механизм водородного охрупчивания зависит от трех факторов: 1) исходное местоположение и состояние водорода; 2) транспортные реакции, связанные с перемещением водорода от его источника до места реакции с металлом; 3) непосредственно механизм охрупчивания [72]. Охрупчивание может вызываться во многих металлах присутствием даже очень малого количества водорода. В стали

водород легко и быстро диффундирует через решетку железа вследствие малого размера атома [45]. Вычисления показывают, что скорость транспортировки водорода в связи с движением дислокаций может быть на несколько порядков выше, чем скорость его диффузии в решетку. Следовательно, водородное охрупчивание является важным фактором трещинообразования в атмосферной среде, несмотря на то, что скорость растрескивания выше, чем скорость диффузии водорода через решетку. Водород склонен накапливаться на границах зерен, во включениях, пустотах, сетке дислокаций [73].

1.5 Закрытие трещины и ее влияние на циклическую трещиностокость

Одним из наиболее важных феноменов экспериментальной механики усталостного разрушения, установленных в конце 1960х годов В. Элбером, это появление преждевременного контакта берегов растущей усталостной трещины на протяжении некоторой положительной части цикла напряжений раньше, чем нагрузка достигнет нуля. Этот феномен получивший название «смыкание» или «закрытие трещины», широко используется для объяснения многочисленных кинетических эффектов, сопровождающих усталостное разрушение конструкционных материалов. Закрытие трещины также породило различные модели прогнозирования роста трещин, базирующиеся на данном явлении, которое было подтверждено конечно-элементными расчетами [30]. Можно сказать, что закрытие трещины фиксирует в ее вершине некоторое значение коэффициента интенсивности напряжения $K = K_{op}$ (пропорциональное текущей длине трещины и нормальному напряжению в момент открытия трещины σ_{op}), препятствуя снижению этого параметра до уровня $K = K_{min}$. В результате искажается характер формы цикла и величина трещины, а также КИН в вершине трещины. Были выделены монотонная пластическая зона, характеризующаяся течением в возрастающем полупероде

нагружения, и циклическая пластическая зона, описывающая знакопеременную пластичность. Монотонная пластическая зона при плоском деформированном состоянии характеризуется радиусом r^* (подглава 1.3).

Реализация закрытия трещины может быть связана с различными механизмами:

- усталостная трещина может закрываться при наличии на ее берегах определенного объема пластической деформации и воздействием на этот объем неразрушенной части (рис. 1.8в), такой механизм характерен для пластичных материалов, нагруженных в условиях плоско-напряженного состояния;

- на припороговых участках роста усталостной трещины может иметь место механизм окисления ее берегов (рис 1.8а). Были отмечены замедления припороговой трещины в коррозионной среде по сравнению с воздухом. Отмечается, что толщина слоя оксидов на воздухе изменится обратно пропорционально скорости роста усталостной трещины;

- наличие фреттинг-коррозии, сопровождающее закрытие трещины, может приводить к значительному утолщению слоя оксидов, связанное с попеременным контактом поверхности разрушения и выставления слоя оксидов [26], что усиливает исходный уровень закрытия;

- закрытие трещины, наряду с механизмами формирования оксидного слоя может быть связано с шероховатостью поверхности (рис. 1.8б). В напряженное состояние металла зоны предразрушения вносит существенный вклад сдвиговая деформация. Уровень закрытия увеличивается путем расклинивания трещины в отдельных контактирующих точках вдоль траектории;

- встречаются на практике механизмы закрытия, обусловленные вязкостью рабочей среды (γ) и объемными изменениями, сопровождаемые фазовыми превращениями материала в зоне предразрушения (δ).

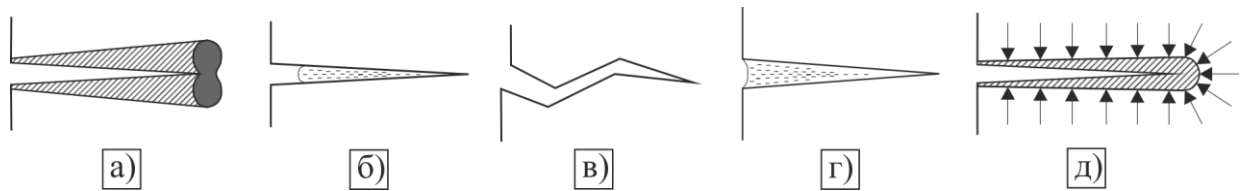


Рис. 1.8 – Схемы механизмов закрытия трещин, обусловленных: пластичностью (а); оксидообразованием (б); шероховатостью поверхностей разрушения (в), вязкостью среды (г), фазовыми превращениями в зоне предразрушения (д)

На основании экспериментальных наблюдений Эльбер установил [31], что усталостная трещина при перегрузке может закрываться еще при действии растягивающей нагрузки, действующей на трещину, что было связано с зоной остаточных напряжений в вершине трещины. Для расчета долговечности Элбер использовал коррекцию размахов напряжений и КИН $\Delta\sigma$ и ΔK . Он ввел такое напряжение открытия $\sigma_{ор}$ (рис. 1.9б), что при $\sigma \geq \sigma_{ор}$ трещина полностью открыта и происходит нормальный рост трещины, а при $\sigma < \sigma_{ор}$ трещина закрыта и напряжения не влияют на ее рост. Это позволило ввести понятие эффективных размахов напряжений $\Delta\sigma_{эфф}$ и КИН $\Delta K_{эфф}$ (рис. 1.9): Он определил эффективное значение:

$$\Delta\sigma_{эфф} = \sigma_{max} - \sigma_{ор} \quad (1.7)$$

$$\Delta K_{эфф} = K_{max} - K_{ор} \quad (1.8)$$

На основании полученных результатов Эльбер пришел к выводу о неэффективности, с точки зрения роста усталостной трещины, некоторой части цикла напряжений. Указывая на необходимость учета явления закрытия трещины при анализе напряженно-деформационного состояния тел с трещинами, он уточнил зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжения, введя эффективное значение последнего параметра:

$$da/dN = C \cdot (\Delta K_{эфф})^n, \quad (1.9)$$

где C и n – коэффициенты Пэриса; $\Delta K_{\text{эфф}}$ – эффективный размах коэффициента интенсивности напряжения, соответствующий открытой трещине.

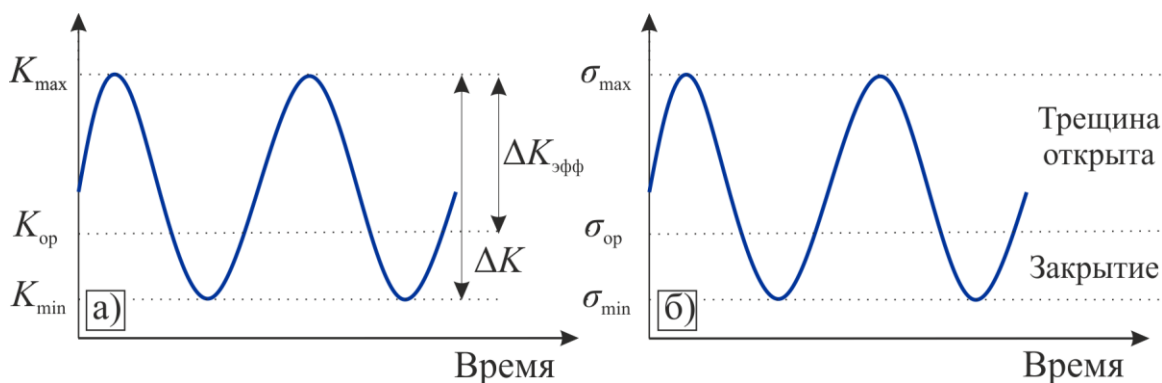


Рис. 1.9 – Схема определения размаха эффективного КИН $\Delta K_{\text{эфф}}$ (а) и эффективных напряжений $\sigma_{\text{эфф}}$ (б)

Влияние асимметрии цикла R на проявление закрытия трещины исследовано весьма широко. Повышение коэффициента асимметрии в сторону положительных значений вызывает снижение закрытия трещины и скорости роста усталостной трещины. По мере снижения размаха КИН ΔK и скорости роста усталостной трещины чувствительность закрытия к асимметрии цикла напряжений усиливается до максимального уровня на пороге усталости. Ослабление роли закрытия трещины по мере роста коэффициента асимметрии объяснят тем, что повышению коэффициента асимметрии происходит сближение значений минимального коэффициента интенсивности напряжения K_{min} и коэффициента интенсивности напряжения, характеризующего момент открытия трещины K_{op} . Поэтому при более высоких коэффициентах асимметрии уменьшается размах коэффициента интенсивности напряжения, соответствующий закрытой трещине и, следовательно, возрастает эффективный размах $\Delta K_{\text{эфф}}$. Поэтому для описания закрытия трещины было введено понятие относительного коэффициента закрытия трещины U [31]:

$$U = \frac{\Delta K_{\text{эфф}}}{\Delta K} = \frac{\Delta \sigma_{\text{эфф}}}{\Delta \sigma} \quad (1.10)$$

На основании испытаний с регулярным нагружением с асимметрией $0.1 \leq R \leq 0.7$ на алюминиевом сплаве 2024-Т3 Элбер предложил формулу [31]:

$$U = 0.5 + 0.4R, \quad (1.11)$$

и, следовательно, справедливо:

$$\frac{\sigma_{op}}{\sigma_{\max}} = 0.5 + 0.1R + 0.4R^2 \quad (1.12)$$

В координатах $da/dN - \Delta K$ кривые скоростей роста трещин для различных асимметрий R не совпадают. В координатах $da/dN - \Delta K_{\text{эфф}}$ точки, соответствующие различным R , попадают на одну кривую. Эта концепция объясняет также снижение порогов развития трещин ΔK_{th} с ростом R , так как при увеличении R растет фактор U [20].

Значением модели Эльбера является то, что закрытие трещин является важным фактором в объяснении факторов взаимодействия при переменных последовательностях нагрузок. Ограничением модели является то, что отношения U и $K_{отк}$ должны быть определены для конкретного материала, типа нагрузки и области на кривой усталости.

Схайве уточнил формулу Элбера для асимметрии $-1 \leq R \leq 0.54$ [29]:

$$U = 0.55 + 0.33R + 0.12R^2, \quad (1.13)$$

и, следовательно, справедливо:

$$\frac{\sigma_{op}}{\sigma_{\max}} = 0.45 + 0.22R + 0.21R^2 + 0.12R^3 \quad (1.14)$$

Представленные формулы по определению параметра U действительны для алюминиевого сплава AL 2024-Т3. При асимметрии цикла истории нагружения $R > 0.54$ используется выражение Элбера (1.11), а при $R \leq 0.54$ применяется уравнение Схайве (1.13).

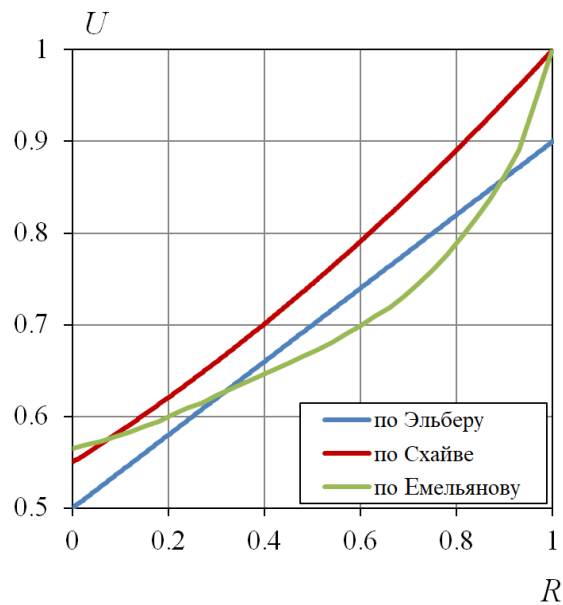


Рис. 1.10 – Взаимосвязь коэффициента закрытия трещины U , определенного разными методами, от величины асимметрии R

В работе [32] Емельяновым О.В и Лядецким И.А. было экспериментально определено выражение для определения U для различных типов сталей:

$$U = 0.5686 + 0.1571 \cdot R + 0.5314 \cdot R^2 - 0.4271 \cdot R^3 - 2.5839 \cdot R^4 + 6.1548 \cdot R^5 - 3.1301 \cdot R^6 \quad (1.15)$$

На рис. 1.10 показана зависимость U , рассчитанного по формулам, указанным выше, от асимметрии нагружения R .

Зависимость U от R по Эльберу и Схайве действительна для алюминиевого сплава AL 2024-T3, а по Емельянову – для сталей [33, 34].

Для припорогового роста усталостной трещины характерны низкие скорости ее роста за цикл. Это создает благоприятные условия для замыкания трещины в положительной области ее нагружения в связи с наличием в устье трещины инородных вторичных частиц, окислов, изменения рельефа зерна в пределах его размера. Исходя из механики разрушения можно отметить, что в процессе нагружения $\Delta K = \Delta K_{\text{эфф}}$ в связи с тем, что в процессе разгрузки $K > K_{\text{min}}$.

1.6 Кинетика развития усталостных трещин с учетом последовательности нагрузок

В процессе эксплуатации деталей конструкций имеет место изменение среднего уровня напряжений, одиночные и последовательные перегрузки и недогрузки, которые вызывают ускорение или замедление развития трещины. Последовательности нерегулярных нагружений деталей машин можно идентифицировать как набор растягивающих и сжимающих нагрузок, влияние которых на скорость роста трещины многократно накладывается друг на друга [29]. Подобное наложение эффектов перегрузок и недогрузок получило название эффекта последовательности нагрузок или взаимодействия амплитуд. Существенное влияние на рост усталостной трещины оказывает: перегрузка растяжением с последующей недогрузкой сжатием, недогрузка сжатием с последующей перегрузкой растяжением. Трещины, возникающие при таких видах нагружения, обычно называют трещинами отсталости, трещинами ускорения. Именно эти взаимодействия зависят в значительной степени от последовательности нагрузки. Воздействие переменной амплитуды (последовательности) является более сложной, чем воздействие постоянной амплитуды. Это взаимодействие можно схематично представить на графике изменения скорости роста трещины в зависимости от последовательности циклов нагружений на рис. 1.11. На первом участке ОА скорость трещины постоянна и равна скорости роста при регулярном нагружении. Точка А соответствует возмущающему воздействию, которое было приложено согласно истории нагружения. Тип данного воздействия будет влиять на скорость распространения трещины и количество циклов N . По прошествии некоторого числа циклов, выделенного черным цветом на рис. 1.11, исходного режима нагружения, скорость снова начинает возрастать и выходит на новый уровень в конце участка. В общем случае новая скорость роста трещины может отличаться от первоначальной.

Число циклов на участке черного цвета называют задержкой развития усталостной трещины.

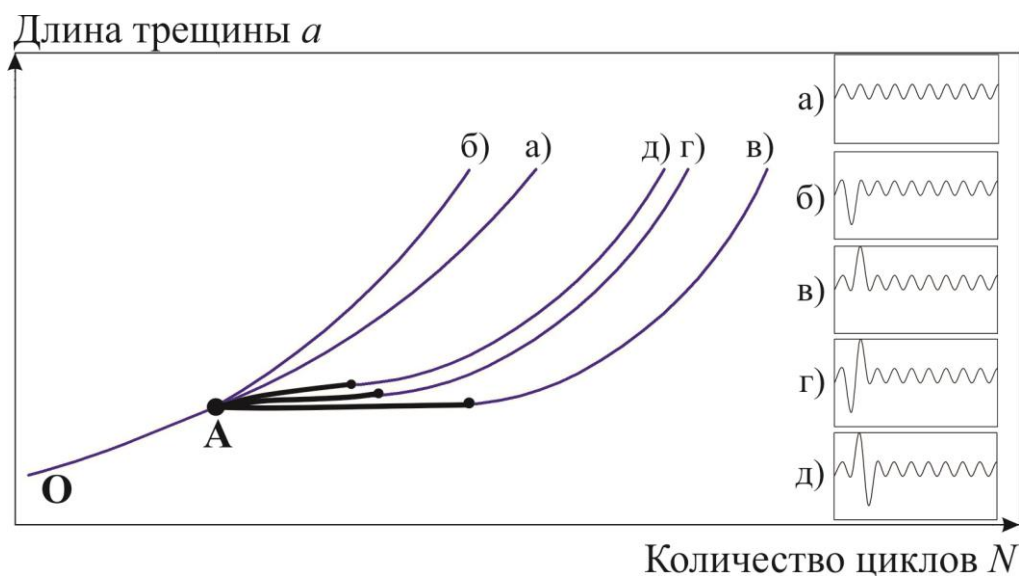


Рис. 1.11 – Воздействие последовательности циклов нагружений на скорость роста усталостной трещины: а) постоянная амплитуда; б) недогрузка; в) перегрузка; г) недогрузка с перегрузкой; д) перегрузка с последующей недогрузкой

Введение одиночной растягивающей перегрузки в регулярное нагружение (рис. 1.11в), как правило, вызывает кратковременный скачок скорости роста трещины и ее последующее замедление или даже остановку, что ощутимо влияет на долговечность материала или конструкции. Это явление называют эффектом перегрузки. Эффект замедления роста трещины зависит от многих факторов [35, 36], основными из которых являются: уровень перегрузки P_{\max} , определяемый как отношение максимальных значений КИН K_{\max} при перегрузке и рабочем нагружении K , или как отношение размахов КИН ΔK_{\max} перегрузки и рабочего нагружения ΔK ; числа перегрузочных циклов; повторения перегрузок через определенный интервал – существует оптимальный интервал повторения перегрузок, при котором число циклов замедленного роста максимально [37].

Нагружение с малой амплитудой после перегрузки, не приводящее к развитию трещины, не влияет на эффект торможения при последующем

нагрузении [38]. Это свидетельствует о том, что на задержку трещины оказывает влияние не количество циклов последующего нагружения, а его уровень.

Минимальная скорость роста усталостной трещины достигается не сразу после приложения перегрузки [39], что подтверждается результатами фрактографических исследований ширины бороздок на поверхности изломов [40, 41]. При превышении уровня перегрузки на 30-40% от базового значения нагружения наиболее существенно проявляется эффект торможения трещины. С увеличением уровня перегрузки число циклов замедленного роста трещины возрастает [20, 42].

Воздействие недогрузки относительно низкого уровня по отношению к основной части нагружения (рис. 1.11б) в отличие от перегрузки имеет тенденцию временно увеличивать скорость роста трещины с последующим постепенным снижением до значения, имевшего место до недогрузки. Ускорение роста трещины после недогрузки обычно меньше, чем задержка после эквивалентной растягивающей перегрузки. Влияние одиночной недогрузки на скорость роста усталостной трещины показано на рис 1.11а.

В результате анализа опубликованных данных [40, 43, 44, 45, 46] посвященных изучению влияния перегрузок и недогрузок типа «недогрузка-перегрузка» и «перегрузка-недогрузка», можно отметить следующее:

- сжимающая часть цикла недогрузки в последовательности «недогрузка-перегрузка» (рис. 1.11г) практически не сказывается на величине задержки в развитии трещин, вызываемой растягивающей частью цикла перегрузки;

- задержка в продвижении трещины снижается, если непосредственно за перегрузкой следует недогрузка (рис. 1.11д). Сжимающая часть нагружения, а именно недогрузка, уменьшает эффект торможения развития трещины от воздействия перегрузки. Снижение задержки в развитии трещины объясняется развитием «вторичных» пластических деформаций сжатия при приложении сжимающей части цикла перегрузки, вызывающее

перераспределение напряжений в вершине трещины и снижение остаточных сжимающих напряжений, сформировавшихся в вершине трещины после растягивающей части нагружения «недогрузка-перегрузка»;

– значительное увеличение числа циклов развития усталостной трещины может быть достигнуто при периодическом воздействии растягивающих перегрузок высокого уровня с большим значением P_{\max} .

Многочисленными экспериментами на разнообразных металлах и сплавах установлено [47, 48], что однократные или многократные перегрузки вызывают задержку в развитии усталостной трещины на десятки и сотни тысяч циклов. Это явление имеет большое практическое значение для разработки методов оценки живучести при нерегулярном нагружении, для лучшего понимания механизма развития усталостных трещин и его использования при разработке методов оценки и повышения надежности элементов машин и конструкций.

1.7 Модели роста трещин при постоянной амплитуде нагружения

Модель Пэриса

Анализ роста трещины при постоянной амплитуде выполняется без учета истории нагружения. Обычно большая часть этих моделей основана на модификации и интерпретации известного уравнения Пэриса (1.9). Уравнение Пэриса описывает стадию II из кривой роста трещины. Ограничением является то, что оно описывает поведение трещины только на стадии II. Оно не учитывает влияние коэффициента асимметрии цикла. Эксперименты показывают, что испытания сталей при различных асимметриях приводит к получению семейства прямых параллельных друг другу. Это означает, что величина n одинакова для всех испытаний с различной асимметрией. Значение C является специфичным для конкретного соотношения напряжений. Достоверность формулы Пэриса была подтверждена большим количеством экспериментальных работ,

проведенных на материалах сильно отличающихся по механическим характеристикам [22, 23].

Модель Уолкера

Для улучшения модели Пэриса Уолкер [49] предложил вместо параметра ΔK являющимся эквивалентом отнулевого нагружения $R=0$ ввести коэффициент интенсивности напряжений K_{\max} и различные комбинации коэффициента асимметрии R , т.к. модель Пэриса этого не учитывала:

$$\overline{\Delta K} = K_{\max} (1 - R)^{\gamma_w} \quad (1.16)$$

$$\overline{\Delta K} = \frac{\Delta K}{(1 - R)^{1-\gamma_w}} \quad (1.17)$$

С помощью введения $\overline{\Delta K}$ Уолкер решил проблему зависимости параметров C и n от коэффициента асимметрии цикла: экспериментальные данные в двойных логарифмических координатах при любых R лежат на одной прямой.

Тогда предложение Уокера можно записать:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\overline{\Delta K})^n \quad (1.18)$$

$$\frac{da}{dN} = C \left[\frac{\overline{\Delta K}}{(1 - R)^{1-\gamma}} \right]^n \quad (1.19)$$

Значения γ – параметр, который объединяет все параллельные прямые в логарифмических координатах для различных асимметрий в одну прямую линию. Этот прием осуществляется методом подбора для конкретных условий эксперимента. Если γ эквивалентно единице, то уравнение (1.19) не может быть использовано.

Модель Формана

Форман [24] предложил модель, способную описывать стадию III кривой диаграммы усталости роста трещины (КДУР).

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1 - R)K_c - \Delta K} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1 - R)(K_c - K_{\max})}, \quad (1.20)$$

которую также можно записать в виде [17]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^{n-1} \cdot K_{\max}}{K_c - K_{\max}} \quad (1.21)$$

где K_c – критическое значение коэффициента интенсивности напряжения, C , n – параметры материала, которые определяются экспериментально.

Уравнение показывает, что приближение K_{\max} к K_c приводит к увеличению скорости роста трещины к бесконечности.

Дальнейшая модификация выражения Формана представляет описание всех трех стадий развития трещины, включая пороговую интенсивность напряжений K_{th} [50].

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K - \Delta K_{th})^n}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (1.22)$$

Уравнение (1.22) описывает сигмовидную форму кривой КДУР. Одним из недостатков использования уравнения является то, что ΔK_{th} чувствительна к R , и требуется конкретное значение ΔK_{th} для любой заданной R . Кроме того, правильное значение K_c должно быть использовано для данной толщины образца.

Модель Чанга

В основе модели положено предположение, что при стационарном циклическом нагружении трещина продвигается за цикл на расстояние, на которое максимальное нормальное напряжение в устье трещины превышает критическое напряжение разрушения материала [51]. Модель была успешна в прогнозировании усталостной трещины за исключением того, что не учитывалось притупление кончика трещины и модель использует материальные константы, не имеющие физического смысла. Модель была улучшена авторами [52] путем изменения статистики разрыва и получение констант из механических свойств материала при растяжении. Отмечено, что затупление трещины происходит при нагрузке раскрытия трещины при

напряжении порогового перелома как ΔK_{th} . Для разрыва используется параметр $\Delta K_{\phi} = K_{\max} - K_{th}$ вместо $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$, так как трещины не развиваются ниже ΔK_{th} . Тогда:

$$\frac{da}{dN} = x_f = x(\sigma = \sigma_{ff}), \quad (1.23)$$

где напряжение в направлении приложенной нагрузки вдоль трещины выражено:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi x}} \quad (1.24)$$

$$x_f = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_{ff}^2} \quad (1.25)$$

Объединив уравнения (1.24) и (1.25), используя новый параметр разрушения ΔK_{ϕ} получим:

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{2\pi\sigma_{ff}^2} K_{rff}^2 = \frac{1}{2\pi\sigma_{ff}^2} (K_{\max} - K_{th})^2 \quad (1.26)$$

Учитывая, что σ_{ff} эквивалентно $\sqrt{E\sigma_f\varepsilon_f}$, где $\sigma_f = \sigma_B(1 + \psi)$, $\varepsilon_f = -\ln(1 - \psi)$, где σ_i , ε_f – истинные напряжения и деформации при разрушении растяжением, σ_B – предел прочности материала.

Получим:

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{2\pi E \sigma_f \varepsilon_f} (K_{\max} - K_{th})^2 \quad (1.27)$$

При $R = 0$, $\Delta K = K_{\max}$ и $\Delta K_{th} = K_{th}$ и уравнение имеет вид:

$$\frac{da}{dN} = B(\Delta K - \Delta K_{th})^2, \quad (1.28)$$

где $B = \frac{1}{2\pi E \sigma_f \varepsilon_f}$, а пороговое значение коэффициента интенсивности

напряжений ΔK_{th} при других асимметрия R :

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0} (1 - R)^\gamma, \quad (1.29)$$

где $0 < \gamma < 1$ определяется из опыта.

Модель Чанга позволяет прогнозировать рост трещины в стадиях I и II. Параметры определяются из механических свойств материалов.

1.8 Модели роста трещин при переменной амплитуде напряжения

В эксплуатационных условиях конструктивные элементы не испытывают постоянную амплитуду напряжения (последовательность нагрузок). Различное взаимодействие нагрузок может значительно изменить кинетику роста трещины. Темпы роста трещин при постоянной амплитуде нагружения не учитывают это взаимодействие, следовательно, не могут точно описывать этот процесс. Наибольший эффект на рост трещины оказывает перегрузка. Наиболее полный анализ взаимодействия переменных последовательностей напряжений на темп роста усталостной трещины даны в [53, 54]. Было выявлено, что возникающая в вершине трещины пластическая зона при перегрузке вносит важный вклад в замедление трещины. Влияние величины этой пластической зоны в вершине трещины зависит от величины и продолжительности, вида напряженного состояния, толщины материала и предела текучести материала. При перегрузке скорость роста трещины не достигает минимального значения сразу после перегрузки, скорее минимум достигается после того, как трещины вырастет на расстояние примерно от одной восьмой до одной четвертой расстояния в зоне пластической перегрузки. Такое поведение называется задержкой отсталости. Недогрузки обычно вызывают ускорение роста трещины. Недогрузка после перегрузки обычно уменьшает задержку роста трещины. Периодические перегрузки не всегда выгодны. В некоторых тестах низкой технической усталости периодические перегрузки вызывают ускорение роста трещины.

Многие модели роста трещины пренебрегают эффектами взаимодействия, что дает возможность получения консервативной оценки продолжительности роста трещины, что является достаточным для предварительного расчета. Такой подход является простым и не требует большого времени для вычислительного процесса. Другие модели используют при учете взаимодействия наиболее значимые эффекты или

введение постоянных параметров, учитывающих эффекты задержки роста трещины.

Рассмотрим некоторые модели, учитывающие эффекты взаимодействия при переменных амплитудах (последовательностях нагрузок).

Модель Уилера [55].

Согласно модели Уилера замедление роста трещины происходит вследствие прорастания ее через зону пластических деформаций, образованную циклом перегрузочного воздействия. Степень замедления пропорциональна уровню перегрузки и, как следствие, отношению монотонной R_y и перегрузочной пластических зон (рис. 1.12). Она применима к любым уравнениям роста трещины $da/dN = f(\Delta K, R)$. Скорость роста трещины определяется по модифицированному уравнению Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = \phi_R \cdot (C \cdot (\Delta K)^n) \quad (1.30)$$

$$\text{где } \phi_R = \begin{cases} \left(\frac{R_y}{a_{ol} - a} \right)^y & \text{для } (a + R_y) < a_{ol} \\ 1 & \text{для } (a + R_y) \geq a_{ol} \end{cases} \quad (1.31)$$

где ϕ_R – параметр замедления трещины после перегрузки; R_y – объем текущей пластической зоны; y – фактор формирования пластической зоны от перегрузки; $a_{ol} - a$ – расстояние от вершины трещины до окончания пластической зоны перегрузки.

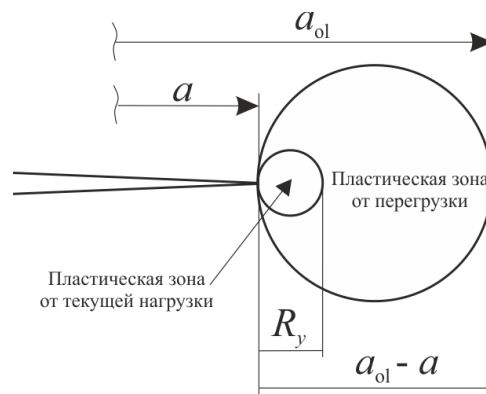


Рис. 1.12 – Схема модели роста трещины Уилера

Когда трещина распространяется по перегрузке, то скорость трещины определяется наибольшей пластической зоной и $\Delta a = 1$, это соответствует отсутствию задержки трещины, и скорость трещины будет соответствовать постоянной амплитуде нагружения. Размер пластической зоны вычисляется с использованием соответствующего уравнения, которое предлагается использовать для состояния плоской деформации.

$$R_y = \frac{1}{4\pi\sqrt{2}} \left(\frac{K_1}{\sigma_T} \right)^2 \quad (1.32)$$

Показатель y в формуле 1.31 определяется эмпирически на основании теста с переменными амплитудами. Он обычно зависит от материала и типа спектра нагружения. Таким образом, определив значение y , прогнозирование долговечности осуществляют для подобного материала и типа спектра нагружения. Для другого материала и типа нагрузки значение y необходимо определять снова.

Эта модель успешна с единичными или периодическими перегрузками или с постоянным типом случайного нагружения. Она не учитывает недогрузочные режимы, увеличивающие темп роста трещины. Однако ускорение роста трещины непродолжительно и постоянный темп роста трещины восстанавливается быстро. Взаимодействие недогрузки с перегрузкой, как показано ранее [54], снижают степень влияния перегрузки на продолжительность роста трещины. Это позволяет получать приемлемые результаты долговечности роста трещины при переменном нагружении. С помощью модели Уилера нельзя предсказать остановку трещины после высокой перегрузки, потому что параметр замедления ϕ_R сразу же после перегрузки не будет равен нулю. Модель не учитывает участок замедления в зоне влияния перегрузки [80].

Модель Уилленборга.

Модель Уилленборга основана на предположении, что торможение роста трещины обусловлено сжимающими остаточными напряжениями, действующими в вершине трещины. Она является развитием модели Уилера

путем определения величины задержки в виде функции коэффициента интенсивности напряжений необходимой для прохода пластической зоны перегрузки. Модель Уилленборга, схема модели показана на рис. 1.13, не требует определения эмпирических параметров, для материала должен быть известен только предел текучести. Модернизированный коэффициент интенсивности остаточных напряжений напряжений, включает в себя эффект торможения трещины:

$$K_r = (K_{\max})_{OL} \cdot \left(1 - \frac{\Delta a}{r_{OL}}\right)^{1/2} - K_{\max} \quad (1.33)$$

где $(K_{\max})_{OL}$ – максимальный коэффициент интенсивности напряжений при перегрузке; Δa – величина трещины после цикла перегрузки; r_{OL} – размер пластической зоны при перегрузке.

Джонсон [56] определял зону пластической деформации при перегрузке уравнением:

$$z_{OL} = \frac{1}{\beta\pi} \left[\frac{(K_{\max})_{OL}}{\sigma_T} \right]^2, \quad (1.34)$$

где β - определяет вид напряженного состояния в вершине трещины.

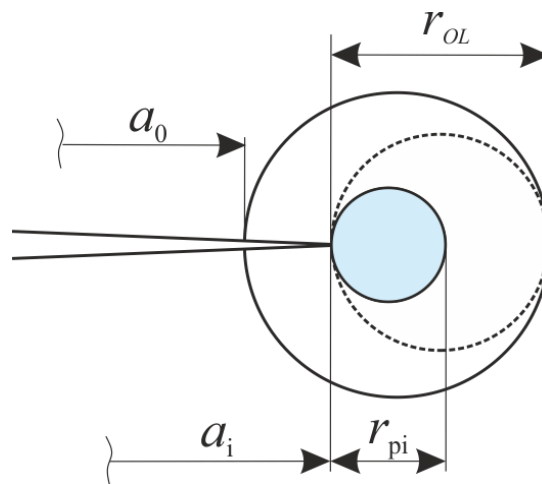


Рис.1.13 – Схема модели роста трещины Уилленборга:

a_i – удлинение трещины за i цикл; r_{pi} – зона пластики за i цикл

Как только текущая зона пластичности будет расширена до величины зоны перегрузки ($\Delta a = z_{OL}$), то $K_r = 0$. Здесь используется эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K_{\text{эф}} = K_{\text{max эфф}} - K_{\text{min эфф}}$, где $\Delta K_{\text{max эфф}} = K_{\text{max}} - K_r$; $\Delta K_{\text{min эфф}} = K_{\text{min}} - K_r$. Тогда эффективный коэффициент асимметрии равен $R_{\text{эфф}} = \frac{K_{\text{min эфф}}}{K_{\text{max эфф}}}$. В случае $\Delta K_{\text{min эфф}} < 0$ его значение и $R_{\text{эфф}}$ приравнялись к нулю. В этом случае замедление было результатом уменьшения эффективных значений R и ΔK .

Для определения скорости роста трещины в модели Уилленборг использовал формулу Формана:

$$\frac{da}{dN} = C_F \frac{(\Delta K_{\text{эфф}})^n}{(1 - R_{\text{эфф}})K_c - \Delta K_{\text{эфф}}} \quad (1.35)$$

Данная модель не содержит эмпирических коэффициентов, она основана на анализе действительного напряженного состояния материала перед вершиной трещины.

Модель Барсома [76]

Сравнивая экспериментальные кривые РУТ, полученные при регулярном и нерегулярном нагружениях, некоторые исследователи предположили, что случайному процессу нагружения можно подобрать эквивалентный по повреждающей способности регулярный процесс нагружения. Эквивалентность заключается в равенстве скоростей роста трещины при регулярном и случайном процессах нагружения. Это возможно осуществить с использованием среднеквадратичного подхода. Эти методики обеспечивают среднюю скорость усталостных трещин без учета эффектов взаимодействия нагрузки. Следует отметить обобщенную модель Уилленборга, предложенную Галахером и Нунгом [57], основанную на эффективных значениях интенсивности напряжений диапазона (SIF) для учета в связи с замедлением роста трещины при перегрузке. Этот метод

эффективен при вычислении роста трещины в зоне перегрузки. Эта модель не учитывает взаимодействия, связанные с недогрузкой.

Барсом применил этот метод для описания скоростей роста трещины в стальных образцах при различных вариантах переменного нагружения. В его модели [58] диапазон эффективного коэффициента интенсивности напряжений показан в терминалах (RMS) – среднеквадратичного отклонения:

$$\Delta K_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta K_i^2}, \quad (1.36)$$

где ΔK_i – коэффициент интенсивности напряжений в i -цикл при последовательности циклов n . Эта модель является эмпирической и не учитывает последовательности эффектов нагрузки, такие как изменение скорости трещины при перегрузке. Барсом стремился описать скорость роста трещины при постоянных и переменных амплитудах нагрузки с помощью одного параметра – интенсивности напряжений K_{RMS} . Для этого подхода требуется, чтобы спектр был представлен непрерывной функцией распределения (нормальной, логнормальной, плотностью вероятности Рэлея), а условие нагрузки должны привести в относительно гладкую непрерывную длину трещины при циклическом нагружении. Предлагается следующее уравнение:

$$\frac{da}{dN} = A_B (\Delta K_{RMS})^{m_B}, \quad (1.37)$$

где A_B и m_B – постоянные и:

$$\Delta K_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta K_i^2}{n}} \quad (1.38)$$

где ΔK_{RMS} – среднеквадратичные отдельных циклов в спектре.

Нагрузки взаимодействия не включены, но предполагается, что этот метод определяет среднюю скорость роста усталостных трещин при эквивалентной амплитуде постоянной нагрузки. Наиболее точный прогноз

может быть сделан для большого числа случайных циклов близко расположенных друг к другу.

Развитие модели Барсома получило в модели [59], где для использования модели регулярного нагружения CAL (Constant Amplitude Load) в модели нерегулярного VAL (Variable Amplitude Load) было принято:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C}{\sigma_T E} (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) \left(1 + \frac{\Delta K}{K_c - K_{max}}\right) \quad (1.39)$$

В этой модели определена скорость роста трещины не менее 10^{-4} мм/цикл и таким образом, вклад от статических режимов в уравнении (1.39) $\Delta K/(K_c - K_{max})$ можно пренебречь. Теперь с учетом средней скорости роста трещины при переменной нагрузке $(da/dN)_{cp}$ может быть принята равным среднему вкладу от каждого из циклов по приращению в уравнении (1.39).

$$\frac{da}{dN} = \frac{C}{\sigma_T E} \sum_{1-N}^{1-N-\Delta N} \frac{\Delta K_1^2}{\Delta N} - \Delta K_{th}^2, \quad (1.40)$$

где $\sum \frac{\Delta K_1^2}{\Delta N}$ – есть квадрат ΔK_{RMS} .

Таким образом, конечное уравнение по сравнению с уравнением Барсома включает в себя пороговое значение.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{cp} = \frac{A}{\sigma_T E} (\Delta K_{RMS}^2 - \Delta K_{th}^2) \quad (1.41)$$

За последние десятилетия разработаны ряд моделей учета взаимодействия при переменных нагрузках для прогнозирования роста трещин. Эти модели были использованы для прогнозирования трещин под различными спектрами нагрузки и в целом согласуются с соответствующими результатами теста.

Модель Хадсона [61]

Использовался среднеквадратический подход, подобный предложению Барсома, для прогнозирования роста трещин для самоходных конструкций при случайном спектре нагружения. Этот подход требует анализа категорий нагружения для каждого образца, определение среднеквадратического

максимального и минимального напряжения. Поскольку нагрузка носит случайный характер, то разумно, что взаимодействие будет мало и будет компенсировать взаимоотношение нагрузок друг с другом.

Максимальное и минимальное среднеквадратичное значение напряжения будут рассчитаны:

$$\sigma_{\max \text{ RMS}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_{\max i})^2 \right]^{0.5}, \quad (1.43)$$

$$\sigma_{\min \text{ RMS}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_{\min i})^2 \right]^{0.5}, \quad (1.44)$$

Где $\sigma_{\max i}$; $\sigma_{\min i}$ – максимальные и минимальные напряжения спектра.

Среднеквадратическое значение асимметрии:

$$R_{RMS} = \frac{\sigma_{\min \text{ RMS}}}{\sigma_{\max \text{ RMS}}} \quad (1.45)$$

Среднеквадратичные максимальные и минимальные коэффициенты интенсивности напряжений вычисляются соответственно в сочетании с поправочным коэффициентом для центра трещин образца.

$$K_{\max \text{ RMS}} = \sigma_{\max \text{ RMS}} \sqrt{\pi a \sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)}, \quad (1.46)$$

$$K_{\min \text{ RMS}} = \sigma_{\min \text{ RMS}} \sqrt{\pi a \sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)}, \quad (1.47)$$

где a – длина трещины, W – ширина образца.

$$\Delta K_{RMS} = K_{\max \text{ RMS}} - K_{\min \text{ RMS}} \quad (1.48)$$

Хадсон использовал среднеквадратический подход в сочетании с уравнением Формана.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K_{RMS}^n}{(1 - R_{RMS}) K_c - \Delta K_{RMS}}, \quad (1.49)$$

где K_c – упругий коэффициент вязкости разрушения.

Приведенные выше уравнения на основе численного интегрирования позволяет прогнозировать долговечность роста трещины от начального до критического размера дефекта.

Модель Ньюмена [62].

К ней относятся и модели с $\sigma_{отк}$. Модель Ньюмена предсказывает напряжения открытия трещины на основании итерационного решения процедуры цикл за циклом. Он использовал подход, что закрытие трещины основано на концепции модели Дагдейла [63], путем оставления пластически деформированного объема вслед за наступающими трещинами напряжения $\sigma_{отк}$, в зависимости от длины трещины и нагрузки истории рассчитывают из аналитической модели. Был рассчитан эффективный коэффициент интенсивности напряжений диапазона. Закон изменения роста трещины представлен по:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \left[\frac{\Delta K_{эфф}}{1 - \left(\frac{K_{max}}{C_3} \right)^2} \right]^{C_2} \quad (1.50)$$

где $K_{эфф} = (\sigma_{max} - \sigma_{отк}) \cdot Y \cdot \sqrt{\pi a}$; $C_1 - C_3$ – определены при постоянной амплитуде загрузки на основании регрессионного анализа методом наименьших квадратов, Y – граничный поправочный коэффициент. Другое представление Ньюмана [64]:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K_{эфф}^{C_2} \left[\frac{1 - \left(\frac{\Delta K_0}{\Delta K_{эфф}} \right)^2}{1 - \left(\frac{K_{max}}{C_5} \right)^2} \right] \quad (1.51)$$

где $\Delta K_0 = C_3 \left(1 - C_4 \frac{\sigma_0}{\sigma_{max}} \right)$ и $K_{max} = \sigma_{max} Y \sqrt{\pi a}$.

Другая модель развития пластической полосы была предложена Конингом [75], в отличие от модели Ньюмена она заключается в

определении коэффициента ограничения на пластичность, который представляет отношение максимального напряжения к пределу текучести.

Модель Джонсона [56].

В этой модели задержка роста трещины при перегрузке и ускорение при недогрузке проводится за счет уменьшения или увеличения коэффициента асимметрии через $R_{эфф}$:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C\Delta K^n}{(1 - R_{эфф})K_c - \Delta K}, \quad (1.52)$$

где $n=1$ при $R_{эфф} > 0$ и $n=2$ при $R_{эфф} < 0$.

$R_{эфф}$ регулирует взаимодействия последовательностей нагружения цикл-за-циклом для каждого цикла нагружения. Параметры C и n определяют из испытания с постоянной амплитудой нагружения. Если значения $\Delta K < \Delta K_{th}$, то уравнение (1.52) не применяется и рост трещин не происходит.

Пороговое значение для цикла определяют:

$$\Delta K_{th} = (1 - R_{эфф}) \cdot \Delta K_{th 0}, \quad (1.53)$$

где $\Delta K_{th 0}$ – пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при $R = 0$.

Эффективный КИН определяют:

$$R_{эфф} = \frac{K_{min} - K_R}{K_{max} - K_R} = \frac{K_{min}^{эфф}}{K_{max}^{эфф}}, \quad (1.54)$$

где K_R – остаточная интенсивность напряжений. Может быть положительным или отрицательным в зависимости от замедления и ускорения роста трещины.

Максимально допустимый коэффициент асимметрии определяют:

$$R_{max} = \left[\frac{0,2 \cdot Z_{OL}}{t} \right] + 0,6, \quad (1.55)$$

где Z_{OL} – пластическая зона при K_{max} , t – толщина образца.

Были проанализированы экспериментальные исследования продолжительности роста усталостных трещин алюминиевого сплава и

малоуглеродистой стали, проведенные в работе [45] на примере регулярного и блочного нагружений типа «недогрузка-перегрузка» и «перегрузка-недогрузка» с различной асимметрией и величиной перегрузного воздействия. Данные исследования подверглись сравнительному анализу по модели закрытия Эльбера, статистической модели Бансома, пластичности Уиллера и Уилленборга. Коэффициенты корреляции r между экспериментальными результатами и полученными по моделям представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения коэффициента корреляции между экспериментальными и расчетными значениями продолжительности роста трещины по классическим моделям [45]

Материал	Значение коэффициента корреляции r по модели			
	Эльбера	Барсома	Уилера	Уилленборга
Алюминиевый сплав	0.32	0.23	0.33	0.49
Малоуглеродистая сталь	0.56	0.63	0.72	0.74

По проведенному анализу можно сделать вывод, что данные модели по прогнозированию кинетики роста трещины не позволяют в полной мере оценивать продолжительность роста трещины для данных типов нагружения в виду относительно низких коэффициентов корреляции. Можно отметить, что расчетные данные при регулярном режиме нагружения с разной асимметрией показали значения весьма схожие с экспериментальными. Модели не наблюдает разницы между последовательностями «недогрузка-перегрузка» и «перегрузка-недогрузка» и выдают одинаковые значения, таким образом, оценка последовательности нагружения не производится. В связи с этим, весьма актуальной задачей является разработка модели прогнозирования роста усталостных трещин, способной производить оценку характера и влияния последовательности нагружения на кинетику распространения трещины.

1.9 Современные программные продукты оценки трещиностойкости материалов

На данный момент существует множество программных комплексов позволяющих моделировать повреждаемость, в том числе усталостную, и рост трещин в твердых телах. Обычно эти коммерческие продукты организованы в виде систем автоматизированного проектирования (САПР).

Среди тяжелых САПР можно выделить Ansys и Abaqus, которые позволяют решать механические, тепловые, гидродинамические задачи, рассчитывать излучения и т.д. Данные программные продукты являются универсальными, позволяющие решать различными численными методами задачи по усталостной долговечности и механике разрушения [65]. В Ansys моделировании роста трещин подразумевается разьединение поверхностей, которое может моделироваться методами: 1) Метод воображаемого закрытия трещины (Virtual Crack Closure Technique), используемый для оценки скорости выделения энергии при развитии трещины по заданной траектории в квазистатической постановке; 2) Метод связанной зоны (Cohesive Zone Method), представляющий неразрушенный материал в воображаемом продолжении трещины как конечные элементы, соединенные нелинейными связями, последовательно разрушаемыми при достижении экспериментально аппроксимируемого напряжения связи; 3) Модель разрушения Гурсона, используемая для пластичных пористых материалов и моделирующая зарождение, расширение и слияние пор материала через скорости зарождения и роста пор, макроскопическую пластическую деформацию, функцию доли сегрегированных частиц и включений и т.д. [45, 66].

NASGRO – программа расчета роста усталостных трещин и определения долговечности простых тел с трещинами при нагружении, разработана в космическом центре Джонсона (NASA) для анализа и контроля за разрушением в космических системах при сотрудничестве NASA и Lockheed Martin с такими экспертами в области усталости и разрушения, как

Формэнном, Шивакумаром, Метту, де Конингом и другими, имеет достаточно широкую функциональность. Позже была дополнена для использования в анализе прочности повреждения самолетов для сертификации в Федеральном управлении гражданской авиации США. Разработка и поддержка программы в настоящее время осуществляется NASA совместно с Юго-Западным Исследовательским Институтом (SwRI). NASGRO представляет собой набор программ, предназначенный для выполнения задач: анализ роста усталостных трещин и разрушения; оценка долговечности конструкций; определение характеристик усталостных трещин; анализ зарождения (возникновения) усталостных трещин. Единый графический интерфейс NASGRO объединяет следующие модули:

- NASFLA - ключевая программа, содержит библиотеки коэффициентов интенсивности напряжений для различных конструктивных элементов и свойства материалов и выполняет анализ роста трещин. NASFLA использует различные модификации уравнений Вилленборга, Уолкера для анализа роста трещины. Доступно определение da/dN , N для K_{Ic} , a для K_{th} , a для K_{Ic} ,

- NASBEM – программа для расчета коэффициентов интенсивности напряжений и полей напряжений в двухмерных гранично-элементных задачах. Решатель NASBEM разработан в Университете Техаса.

- NASMAT – обширная база данных свойств материалов по усталости и разрушению. База данных содержит 9000 наборов общих свойств, 3000 наборов усталостных свойств, 6000 точек вязкости разрушения. Доступны материалы: стали, ферросплавы, чугуны, алюминиевые, титановые, никелевые, медные, магниевые и прочие справы

- NASFORM – программа анализа зарождения усталостной трещины, включающая модель оценки срока службы по методу напряжений и четыре модели по методу деформаций [67].

FASTRAN – программа для прогнозирования срока службы на основе концепции закрытия трещины. Используется для прогнозирования

зависимости длины трещины от числа циклов для различных конфигураций начальных трещин, что удобно при учете эффекта взаимодействия нагрузок. Разработана при сотрудничестве Fatigue and Fracture Associates и Southwest Research Institute во многом на основании работ Ньюэна. Программа использует аналитические модели. Модель основана на усталостной трещине с пластичностью, и используется для вычисления уровня напряжений, при которых вершина трещины полностью открывается в течение циклического нагружения. Допускается приложение постоянной, переменной или квазислучайной нагрузки. Встроены полетные спектры TWIST, Mini-TWIST, FALSTAFF, Felix-28 и прочие спектры Space Shuttle и Гауссово распределение. Имеется 17 различных 17 конфигураций трещин.

AFGROW – программа расчета допустимых повреждений, позволяющая анализировать инициацию трещин, усталостный рост трещин и прогноз долговечности металлических конструкций. Программа основана Исследовательской Лабораторией Военно-Воздушных Сил США, сейчас разрабатывается LexTech Inc. Программа имеет множество применений, но в первую очередь предназначена для аэрокосмических приложений. В AFGROW заложено 30 различных видов трещин для случаев растяжения, изгиба, нагрузки от подшипников. AFGROW поддерживает расчет развития двух независимых трещин, для чего использует метод конечных элементов. Для определения скорости роста трещины используются модели Формана, Уолкера, Хартера, уравнения NASGRO, табличные представления. В качестве моделей взаимодействия нагрузок используются модели закрытия FASTRAN, Хсу, Уилера, обобщенная модель Уилленборга, деформационная модель. Помимо моделей развития трещин используется подход допускаемых повреждений. В программе имеется возможность внедрение собственных подпрограмм расчета интенсивности напряжений.

1.10 Кривые циклического деформирования

Циклическое деформирование в упругопластической области сопровождается образованием петли гистерезиса, характеризующей работу упругопластического деформирования за полный цикл измения усилий. Связь между напряжениями и деформациями при циклическом нагружении за пределами упругости выражают диаграммами деформирования по параметру числа полуциклов [20]. На рис. 1.14 показана кривая деформирования при растяжении-сжатии при циклическом изменении внешних напряжений от $-\sigma$ до $+\sigma$, при $\sigma > \sigma_T$. Для большинства конструктивных металлических сплавов пределы текучести при растяжении и сжатии одинаковы: $\sigma_T^+ \approx \sigma_T^-$. Пластическая деформация приводит к повышению мгновенного предела текучести. Если в точке В снизить нагрузку до нуля, а затем снова произвести нагружение, то переход к пластическому деформированию начнется при $\sigma \geq \sigma(\epsilon_p)$ и процесс нагружения пойдет по начальной кривой деформирования.

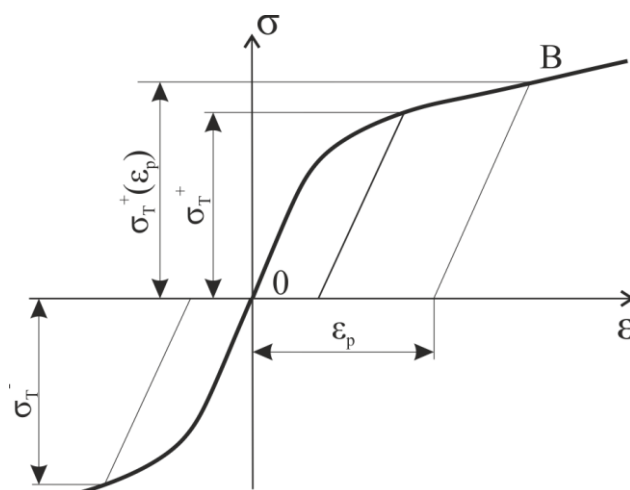


Рис. 1.14 – Кривая деформирования при растяжении-сжатии:

σ_T^+ – предел текучести при растяжении, σ_T^- – предел текучести при сжатии

[74]

Рассмотрим деформирование типа «растяжение-сжатие» при циклическом изменении внешних напряжений от $-\sigma$ до $+\sigma$, причем $\sigma > \sigma_T$ (рис.

1.15а). При первом нагружении точка, изображающая состояние материала в плоскости σ, ε движется по кривой OAB.

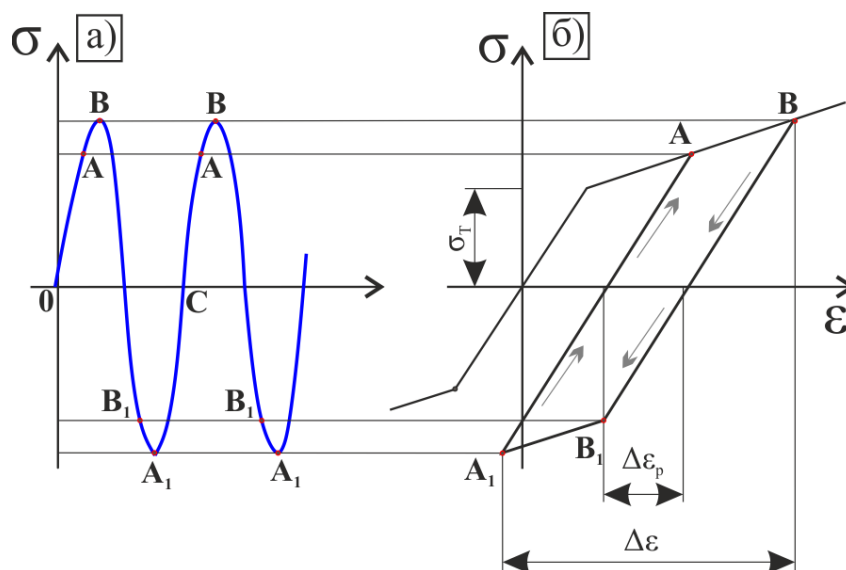


Рис. 1.15 – Циклическое деформирование:
а) схема нагружения; б) цикл деформации

Далее напряжение уменьшаются, и точка продолжает движение по участку BB_1A . После достижения минимального напряжения в точке A_1 снова начинается движение по кривой. На рис. 1.15б, показан цикл деформаций, сопровождающий цикл изменения нагрузки.

После достижения точки B начинается изменение знака нагружения – начинается разгрузка. Напряжения при разгрузке уменьшаются в пределах упругости на величину $\sigma_0 + \sigma_T'$ (где σ_T' – предел текучести после разгрузки). При дальнейшем нагружении сжатие в точке A_1 достигается напряжение $\sigma_1 = \sigma_0$, из-за симметричности нагружения. Участок BB_1A_1 характеризует первый полупериод нагружения. После этого знак нагружения меняется, т.к. начинается разгрузка в пределах упругости, и в точке C первый цикл заканчивается. Предел текучести после разгрузки из точки B меньше исходного ($\sigma_T' < \sigma_0$), это явление именуется эффектом Баушингера [60].

Выводы по первой главе

1) Проведен литературный обзор, выполнен анализ моделей и методов исследования усталостных трещин. Установлено, что в настоящее время в большинстве случаев рост трещин конкретной формы и размеров изучают с позиций механики разрушения. Большинство моделей расчета усталостной долговечности сформулировано для режима Пэриса и экстраполировано на соседние участки КДУР. Однако использование классических формул для определения скорости роста усталостных трещин таких, как формула Пэриса, не позволяет учесть всего разнообразия и сложности нагружаемых тел, размеров и формы трещин, а также учесть различие способов нагружения.

2) Увеличение или снижение скорости роста усталостных трещин объясняется развитием пластических деформаций металла в зоне вершины трещины, формированием полей остаточных напряжений и деформаций, влиянием размеров образцов и вида нагружения. При недогрузочных режимах нагружения наблюдается уменьшение уровня напряжений в области вершины трещины, появление напряжений сжатия, при перегрузочных – поле напряжений увеличивается и наблюдается торможение скорости роста трещины.

3) Явление закрытия трещины оказывает влияние на кинетику роста трещины при асимметрии $R < 0.7$. Ослабление роли закрытия трещины по мере роста коэффициента асимметрии объясняют тем, что при повышении коэффициента асимметрии происходит сближение значений минимального коэффициента интенсивности напряжения K_{\min} и коэффициента интенсивности напряжения, характеризующего момент открытия трещины $K_{ор}$, следовательно, возрастает эффективный размах $\Delta K_{эфф}$. Формула для учета закрытия трещины через коэффициент U , выведенная Эльбером на примере регулярного нагружения, не в полной мере позволяет учесть закрытие для нерегулярного нагружения, т.к. уровень асимметрии циклов в

данном случае непостоянен. Поэтому требуется разработать методику по учету закрытия трещины при данном типе нагружения, которая учитывала бы эту нерегулярную последовательность циклов с разной асимметрией.

4) Анализ данных позволяет сделать вывод о том, что классические модели прогнозирования продолжительности роста трещины не в полной мере могут оценить взаимодействие последовательности нагружения при различных типах нерегулярного нагружения. Поэтому весьма актуальной задачей является разработка моделей, позволяющих прогнозировать кинетику роста усталостной трещины с возможностью оценки характера нерегулярного нагружения, а также порядка и взаимодействия последовательности нагружения.

2 МАТЕРИАЛ, ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Анализ материалов, используемых при испытаниях на трещиностойкость

В качестве материалов для исследования использовались следующие марки сталей: AISI 4030, 09Г2, 40 и 40Х, а также алюминиевый сплав AL 2024-T3. Сталь AISI 4030 - это термообработанная и низколегированная сталь, содержащая хром, никель и марганец. Она обладает высокой прочностью и прочностью в условиях термической обработки. В основном используется в передачах и валах, шасси летательных аппаратов и других конструктивных элементах. Конструкционная низколегированная сталь 09Г2 используется для изготовления сварных конструкций – хребтовые балки, верхние обвязки, стойки ферм, двутавры, детали вагонов, работающие в интервале температур $-40 +4500\text{C}$. Как и все легированные конструкционные стали, сталь марки 40Х применяется в сфере производства тяжело нагруженных механизмов машин. Связано это, прежде всего, с необходимостью подвергания таких элементов закалке с дальнейшим высоким отпуском для достижения высокого порога конструктивной прочности. Ведь выдержать подобные условия могут только материалы с достаточным уровнем прокаливаемости [77]. Из стали 40 – конструкционной углеродистой качественной стали — изготавливают крепежные детали, валы, диски, роторы, фланцы, зубчатые колеса, втулки для длительной и весьма длительной службы. Алюминиевый сплав AL 2024-T3 хорошо зарекомендовал себя в механике разрушения. Алюминий 2024-T3 – дуралюминий системы легирования Al-Cu-Mg, термоупрочняемый сплав нормальной прочности, встречающийся в аэрокосмической технике [78]. Состояние T3 означает термическую обработку в виде закалки с последующей холодной деформацией. Наиболее близким по механическим свойствам отечественным аналогом 2024 считают Д16.

Механические характеристики исследованных металлов при статическом и регулярном симметричном циклическом нагружении были получены экспериментально. Результаты этих исследований представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Механические свойства исследуемых металлов

Металл	Характеристики прочности			Характеристики выносливости		
	Предел прочности σ_s (МПа)	Предел текучести $\sigma_{0.2}$ (МПа)	Относительное удлинение $\delta, \%$	Число циклов N_0	Коэффициент наклона m	Предел выносливости σ_{-1} (МПа)
Сталь AISI 4030	870	690	13	800000	17.8	420
09Г2	496	303	30	-	-	-
Сталь 40X	630	330	15	1000000	11.8	250
Сталь 40	580	340	18	1200000	14.6	200
AL 2024-T3	483	345	30	-	-	-

Контроль химического состава рассматриваемых металлов выполнен в лаборатории ВолгГТУ с применением оптико-эмиссионного спектрометра PNI-MASTER UVR и показан в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Анализ химического состава металлов

Металл	Массовая доля элементов, %											Марка сплава аналога
	Fe	Mn	C	Si	Остальное							
					Ni	Cr	Mo	Cu	W	Al	Nb	
Сталь AISI 4030	96.2	0.73	0.31	0.28	1.2	1.1	0.1	0.05	-	-	-	34XH1M
Сталь 09Г2	98.9	0.928	0.01	-	-	0.0095	-	0.0132	-	0.0121	0.0322	1.0421 St 52.0S
Сталь 40	98.1	0.74	0.37	0.3	0.11	0.09	-	0.15	0.03	-	-	30Г, 35Л, 40Г, 40ГР, 40Л, Ст35, Ст40
Сталь 40X	97.5	0.6	0.36	0.34	0.13	0.76	-	0.19	0.02	-	-	30Л, Ст40X
AL 2024 T3	0.25	0.46	-	0.14	-	-	-	4.36	-	93.21	-	Д16, Д16А

2.2 Образцы для испытания на распространение трещин

В качестве объектов для проведения серий тестов на распространение усталостных трещин были выбраны компактные образцы растяжения C(T), представляющие собой образцы с надрезом и являющиеся стандартными в соответствии со стандартами ASTM и ISO [78, 80]. Цель использования образца с надрезом – создать усталостную трещину путем циклирования образца от минимальной до максимальной нагрузки. Трещина начинает расти с точки надреза, который необходим для ее образования, и проходит через образец. Такой тип образцов имеет преимущество, заключающееся в почти немедленном образовании трещины при приложении циклической нагрузки.

C(T) образцы широко используются в области механики разрушения и испытаний на коррозию, чтобы установить значения вязкости разрушения для материала. В соответствии со стандартами ограничивающий размер образца C(T) представляет собой толщину материала. Такие образцы используются для экспериментов, где имеется нехватка материала из-за их компактной конструкции. Для прокатных материалов надрез должен быть выровнен с направлением проката. Преимущества компактных образцов: не требуют большого количества материала; необходима достаточно низкая нагрузка для получения приемлемых результатов, что может быть полезно, если мощность испытательной машины ограничена. Для проведения испытаний использовалась I мода деформаций, представляющая собой трещину отрыва, при которой точки поверхности трещины смещаются в направлении, перпендикулярном поверхности трещины, а нагрузка симметрична относительно линии трещины [81].

Геометрия используемого стандартного образца C(T) показана на рис. 2.2 на основе ASTM E647 [80]. Было использовано два типа геометрии образцов. Толщина B и ширина W могут варьироваться в определенных пределах. Для образцов C(T) рекомендуется, чтобы толщина была в

диапазоне $W/20 \leq B \leq W/4$. Могут также использоваться образцы, имеющие толщину вплоть до $W/2$, включая $W/2$.

Для построения кривых роста трещины и КДУР необходимо оценивать длину трещины в течение испытания. Наиболее распространенным методом для измерения длины трещины является метод податливости. Он предусматривает использование датчика открытия трещины, в данном исследовании использовался датчик раскрытия трещины BISS Vi-06-201, измеряющего расстояние между кромками образца. Измерения проводятся согласно выражению [77]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{a}{W}; \\ \alpha = A_0 + A_1 \cdot u_x + A_2 \cdot u_x^2 + A_3 \cdot u_x^3 + A_4 \cdot u_x^4 + A_5 \cdot u_x^5; \\ u_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{E \cdot \nu \cdot B}{P} + 1}}; \end{array} \right. \quad (2.1)$$

где a – длина трещины; W – ширина образца; $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ – коэффициенты податливости; u_x – податливость образца; E – модуль упругости; ν – смещение между кромками образца; B – толщина образца; P – нагрузка.

Материал для испытаний образца второго типа представлял собой листы толщиной 5 мм, что не позволило их использовать для создания стандартных С(Т) образцов, поэтому было принято изготовить образцы отличной от геометрии стандартного, она показана на рис. 2.3. Отличия в геометрических параметрах были следующие: 1) толщина образца B составляет 5 мм вместо стандартной толщины 12.5 мм; 2) диаметр отверстий составляет 6 мм вместо стандартного диаметра 12.5 мм. Тем не менее, толщина образца входит в рекомендованный стандартом диапазон [80]. Изменение геометрии вызвало необходимость определения коэффициентов податливости для корректного определения длины трещины в течение испытаний. Сравнение визуально различимой длины трещины и расчетной при стандартных коэффициентах в процессе регулярных нагружений

испытываемого образца позволило определить коэффициенты податливости для последнего аппроксимацией методом наименьших квадратов 6-го порядка. Стандартные и предлагаемые коэффициенты податливости приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Коэффициенты податливости

Образец	A0	A1	A2	A3	A4	A5
Стандартный образец С(Т) В=12.5 мм	2143.6	2533.8	2143.6	2533.8	2143.6	2533.8
Используемый образец С(Т) В=5 мм	1214.9	693.45	1214.9	693.45	1214.9	693.45

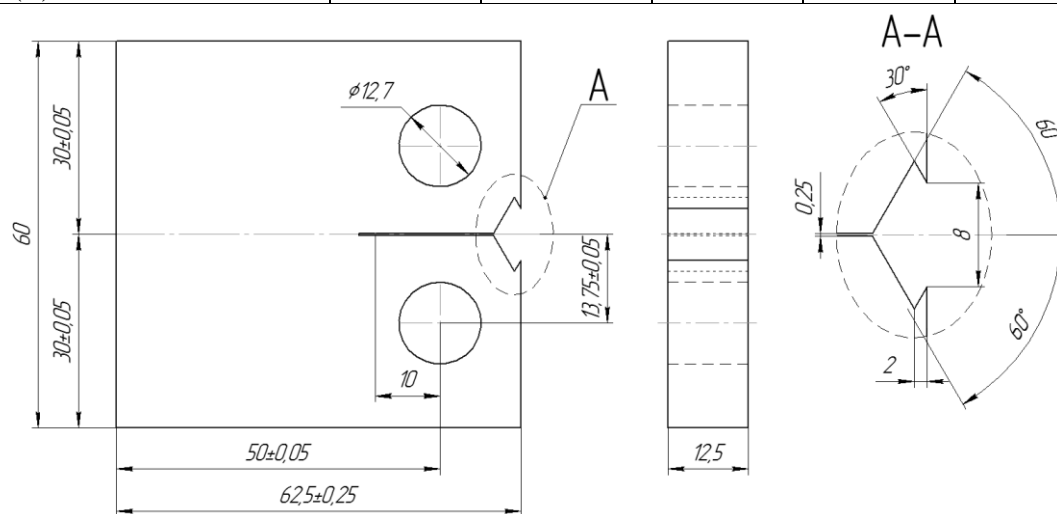


Рис. 2.2 – Геометрия стандартного образца для испытаний

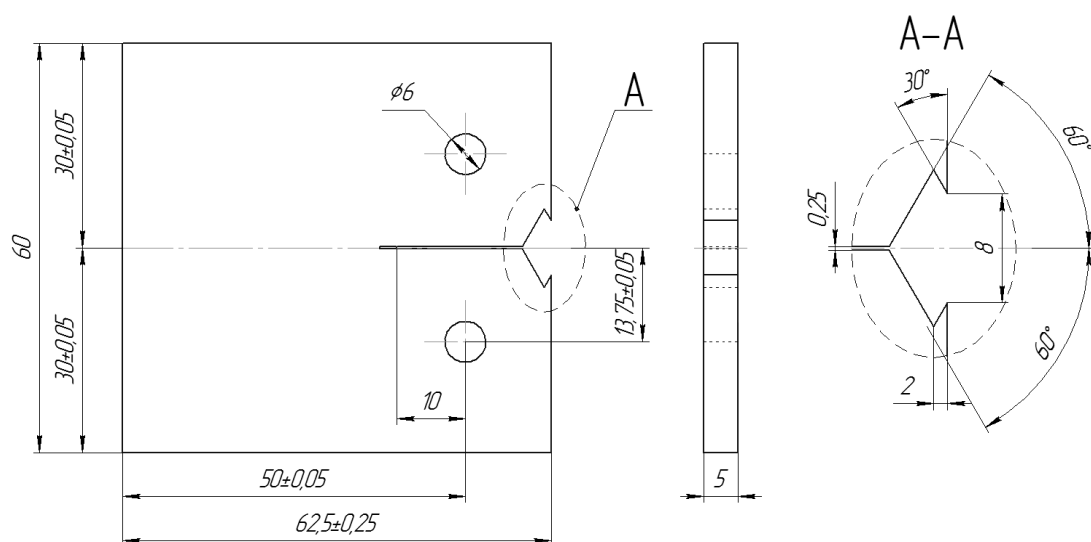


Рис. 2.3 – Геометрия нестандартного образца для испытаний

В большинстве испытуемых образцов имела место ориентация трещины L-T, при которой направление проката перпендикулярно направлению роста трещины, однако в исключительных случаях использовались и образцы T-L, в которых направление проката совпадает с направлением роста трещины. Для контроля положения вершины усталостной трещины в процессе испытаний боковые поверхности образцов с обеих сторон вдоль направления развития трещины были зачищены и отполированы до получения зеркальной поверхности. На зачищенную рабочую часть образцов поперек распространения трещины были нанесены тонкие индикаторные полосы через каждые 2 мм.

Предварительное усталостное растрескивание трещины в образце проводилось с учетом коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K . Его необходимо проводить для того, чтобы конечное значение K_{\max} во время растрескивания не превышало максимального K_{\max} , характерного для роста трещины при основном испытании. Следовательно, нагрузка при предварительном растрескивании должна быть ниже, чем при основном испытании. Важно, чтобы K_{\max} за время цикла не превышала 60% от величины критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} . Большая величина K в процессе образования усталостной трещины может привести к слишком большому ее притуплению и к неверной оценке K_{IC} .

Результаты испытаний роста усталостной трещины использовались для анализа взаимосвязи между длиной трещины (a) и количеством циклов (N), а также между da / dN и диапазоном КИН (ΔK).

Коэффициент интенсивности напряжений для используемых С(Т) образцов определяется по формуле 2.2 [80, 81]:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{1.5}} \cdot (0.886 + 4.64 \cdot \alpha - 13.32 \cdot \alpha^2 + 14.72 \cdot \alpha^3 - 5.6 \cdot \alpha^4), \quad (2.2)$$

где ΔP – размах нагружения, который является алгебраической разницей между максимальной и минимальной нагрузкой [82], $\alpha = a/W$, при условии, что $\alpha \geq 0.2$.

2.3 Испытательное оборудование и программы автоматической обработки экспериментальных данных для испытаний на трещиностойкость

Эксперименты проводились в лаборатории испытаний материалов кафедры «Соппротивление материалов» ВолгГТУ. Целям исследований наиболее соответствовала сервогидравлическая машина BISS Nano 25 kN (рис. 2.4а) [83].

Для фиксации образца использовались специальные захваты, которые показаны на рис. 2.4б. К их конструкции предъявлялись требования: 1) обеспечить жесткое крепление образца в захвате; 2) фиксация образца в захвате стержнями; 3) минимальный зазор для установки образца, отсутствие зазоров между стержнями фиксации.

Испытательные машины оснащены программным обеспечением, позволяющим автоматически обрабатывать результаты испытаний. Основными программами являются MTL32 (Multi Tool Language), VuPoint и TestBuilder. Пример работы программ в процессе испытания показан на рис. 2.4. MTL32 обеспечивает взаимодействие между испытательной машиной и микроконтроллером, позволяет пользователю производить PID-регулировку сигналов, калибровать датчики, устанавливать пределы нагружения, производить простейшее нагружение и т.д.; однако, MTL32 не подходит для выполнения испытаний. VuPoint – программа визуализации сигналов в режиме реального времени, например, нагрузки, положение штока и прочих. TestBuilder – программа, позволяющая задавать жесткое и мягкое нагружение: монотонное, циклическое постоянной амплитуды, блочное циклическое, циклическое переменной последовательности нагрузок. TestBuilder позволяет выполнить любое нагружение, используется как в натуральных экспериментах, и для испытаний материалов, однако в силу своей универсальности не позволяет, например, ни отслеживать длину трещины, ни

строить петли усталостного гистерезиса: для решения подобных задач разработаны специальные программы.



Рис. 2.4 – (а) Сервогидравлическая испытательная машина BISS Nano 25 kN
(б) захваты для крепления образца и датчик раскрытия трещины

Для испытаний на распространение трещины применяют приложение VAFCP (Variable Amplitude Fatigue Crack Propagation), позволяющее проводить нагружение: регулярное, нерегулярное, блочное, с перегрузками и недогрузками, переменной последовательности нагрузок. VAFCP оценивает длину трещины, строит кривую роста трещины и КДУР, однако в программе отсутствуют функции аппроксимации кривой и подбора коэффициентов

кривой. Измерение длины трещины цикл-за-циклом в VAFCP не предусмотрено, но возможно измерять податливость образца с помощью TestBuilder, а затем рассчитать длину трещины, построить кривую роста трещин и получить КДUR. Интерфейс используемого программного обеспечения показан на рис. 2.5.

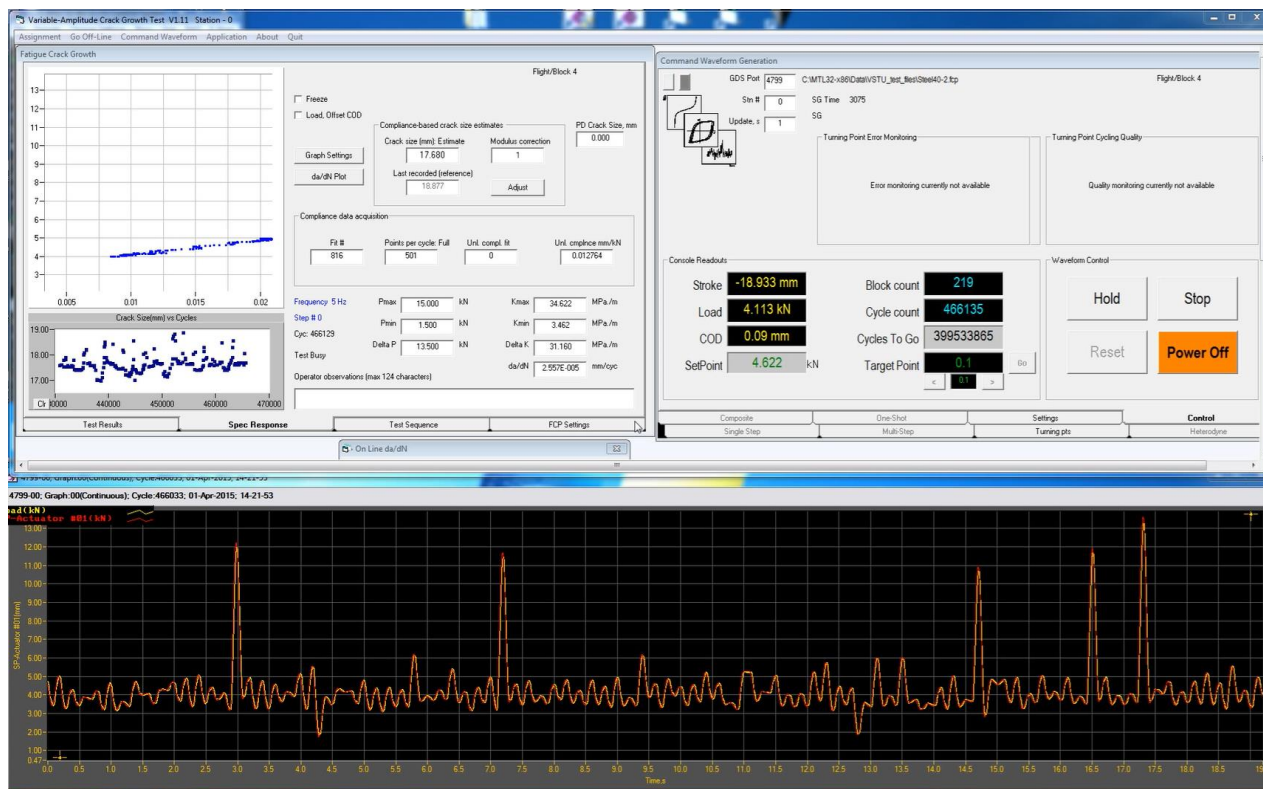


Рис. 2.5 – Используемое программное обеспечение для оценки скорости распространения усталостной трещины

2.4 Моделирование квазислучайного нагружения, характерного для условий эксплуатации конструкций

Экспериментальные исследования усталости материалов составляют важное направление в механике деформируемого твердого тела, так как усталость, являясь необратимым процессом постепенного накопления повреждений материала под действием переменных нагрузок, приводит к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению. Характер изменения нагрузок во времени подразделяется на регулярный

(CAL) и нерегулярный (VAL). Регулярное нагружение характеризуется периодическим законом изменения нагрузок с одним максимумом и одним минимумом в течение одного периода при постоянстве параметров цикла напряжений в течение всего времени испытания. Все виды нагружений, которые не удовлетворяют определению регулярного, называют нерегулярным нагружением, к этому понятию относят блочное, случайное, бигармоническое, полигармоническое нагружения. В большинстве случаев имеет место случайный характер изменения нагрузок, поэтому необходимо определение усталостных свойств материала при нагружениях, отражающих реальные условия эксплуатации, к таким типам нагружений относят и квазислучайное. В инженерной практике для расчетов получили развитие стандартизированные спектры нагрузки для различных технических объектов, которые получают на основании изучения эксплуатационной нагруженности реальных аналоговых технических объектов. В работах [84-86] приводится анализ существующих стандартных спектров случайного нагружения. Они были разработаны за последние 30 лет исследователями Европы и США для различных конструктивных элементов технических объектов [87].

Для сравнительных испытаний, без изменения физических процессов повреждаемости в локальных областях образца, было проведено усечение существующих полных спектров нагружения, где большая часть повреждения вносится наибольшими амплитудами напряжений с отбрасыванием части спектра с низкоамплитудной нагрузкой. Также для разбиения комплексной хронологии нагрузок в спектрах в набор простых циклов напряжения использовалась схематизация спектров по методу дождевого потока «Rainflow» [88]. Затем спектры нормализовались по параметру $P_{ai} / P_{a\max}$ и формировались с положительными амплитудами нагрузки ($R > 0$).

Моделированные спектры формировались на основании характерных спектров различных технологических объектов, например автомобилей:

SEASUS - спектр нагружения передней подвески легкового автомобиля; SAEBRACKET - спектр нагружения тормозного механизма автомобиля; SAETRANS - спектр нагружения трансмиссии автомобиля. Стандартные спектры FALSTAFF и TWIST разработаны для оценки нагруженности в месте крепления крыла к фюзеляжу. FALSTAFF предназначено для боевых самолетов, повреждающая нагрузка которых связана с воздушным маневрированием объекта при выполнении боевой задачи, а TWIST – для транспортных самолетов, основная нагрузка исследуемого конструктивного элемента связана с выполнением технологической задачи взлет – набор высоты – стационарное движение – снижение – посадка. Для ускорения усталостных испытаний были смоделированы спектры miniFALSTAFF (MFS) и miniTWIST (MTW) путем отбрасывания малых амплитуд, не оказывающих влияние на накопление материалом конструктивного элемента усталостных повреждений.

Остальные модельные спектры формировались на основании автокорреляционного подхода по распределению Релея, наиболее характерного для отказов технических объектов и конструкций, подверженных усталости и износу [89]. Особенностью спектра А является значительная нестационарность нагружения. Характерные пики спектра связаны с постепенным выходом на максимум нагрузки с последующим ее постепенным снижением. Средняя величина нагрузки нормализованного спектра А составляла 0.409. Следует ожидать повышенное его воздействие на трещинообразование. Спектр С отличается по характеру воздействия от спектра А, имеющиеся в спектре пики носят единичный характер. Большинство пиков расположены в диапазоне (0.8-0.6) от P_{max} . Среднее значение нагрузки нормализованного спектра С составляет 0.278, что ниже значений спектра А. Поэтому его силовое воздействие на продолжительность роста усталостной трещины более мягкое.

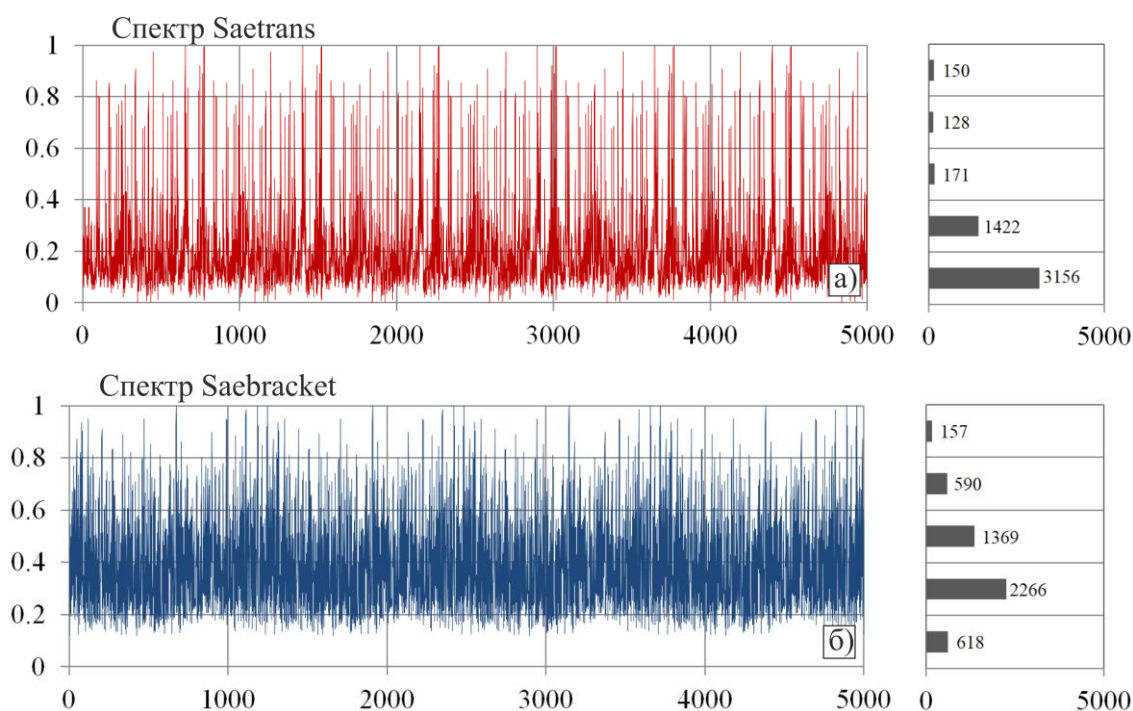
Модельный спектр В был получен с различной асимметрией цикла $R > 0$ и изменением размаха напряжений при постоянном максимальном

напряжении. Спектр М также имеет разную асимметрию, но, в отличие от спектра В, сохраняет постоянное значение амплитудного напряжения при различных значениях максимального напряжения [90,91]. Соотношение для амплитудного P_a , среднего P_m и максимального значения нагрузки P_{max} серии спектров В и М представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики спектров нагружения В и М по параметрам переменного нагружения

Спектр нагружения	Коэффициент асимметрии (R)	$\frac{P_a}{P_{max}}$	$\frac{P_m}{P_{max}}$	$\frac{P_{amax}}{P_{max}}$
В1	0,60	0,2	0,8	1,0
В2	0,40	0,3	0,7	1,0
В3	0	0,5	0,5	1,0
М1	0,455	0,3	0,8	1,1
М2	0,40	0,3	0,7	1,0
М3	0,25	0,3	0,5	0,8

Некоторые из спектров нагружения, используемые для проведения исследований в данной диссертации на трещиностокость металлов, показаны на рис. 2.6. Остальные представлены в приложении А на рис. А1 и А2.



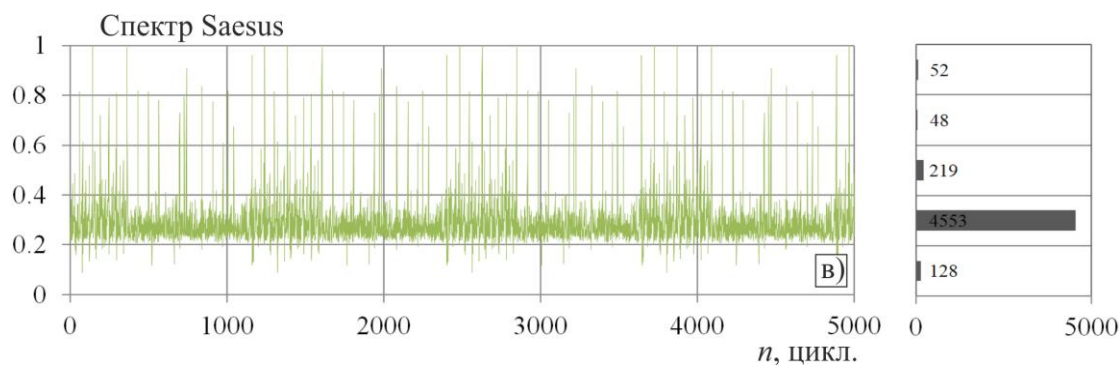


Рис. 2.6 – Спектры нагружения

2.5 Определения порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений

Наибольший эффект от взаимодействия последовательности нагрузок проявляется в околопороговой области КДУР, причем если раньше считалось значение K_{th} постоянным материала, то при циклическом нагружении эта величина может изменяться в зависимости от характера нагрузки. Значения K_{th} часто используются в расчетных зависимостях по оценке кинетики роста трещины. Поскольку в дальнейших исследованиях при оценке скорости роста трещины мы будем его учитывать, покажем алгоритм его экспериментального определения при переменном нагружении.

На рис. 2.7 показаны виды режимов нагружения, которые были задействованы для определения порогового КИН на примере алюминиевого сплава AL 2024-T3. В течение испытания нагружение (рис. 2.7а) изменяется в зависимости от выполнения критериев, которые будут рассмотрены ниже; характерные изменения режима нагружения показаны на рис. 2.7 б, в, г. Перегрузки используются для создания маркирующих признаков на поверхности излома образцов, а также для снижения уровня закрытия трещины. В течение испытания максимальная нагрузка цикла P_{max} постоянна, а минимальная нагрузка P_{min} может увеличиваться, что позволяет почти полностью исключить влияние монотонной пластической зоны на величину ΔK_{th} . Начальная асимметрия цикла выбирается таким образом, чтобы

минимизировать влияние закрытия трещины на ΔK_{th} ; рекомендуется $R=0.4$. Начальная длительность блока постоянной амплитуды $N_i=10^4$ циклов. Размах КИН цикла ΔK выбирается из условий $\Delta K \approx \Delta K_{th}$ и $\Delta K > \Delta K_{th}$. Так, при допущении постоянства ΔK_{th} для алюминия 2024-T3 обычно принимают значение из диапазона $\Delta K_{th} \approx 1 \dots 5$ МПа $\sqrt{м}$. Поэтому примем начальный размах КИН $\Delta K \approx 4.5$ МПа $\sqrt{м}$, задав $P_{max}=2$ кН. Для определения ΔK_{th} метод предлагает уменьшать размах КИН ΔK и приближать его значение к искомому пороговому размаху КИН $\Delta K \rightarrow \Delta K_{th}$, а также увеличивать длительность блока постоянной амплитуды N_i до тех пор, пока не будут выполнены условия $N_i \geq 2.5 \cdot 10^5$ циклов ($N_i \geq N_{max}$) и $\Delta a_i < 0.025$ мм ($\Delta a_i < \Delta a_{incr}$).

Алгоритм определения порогового КИН метода реализован в некоммерческой модификации приложения Variable Amplitude Fatigue Crack Propagation (VAFCP) для испытательных машин компании ViSS. Пороговый размах КИН ΔK_{th} считается достигнутым в течение испытания, если скорость роста трещины не превышает 10^{-7} мм/цикл, т.е. если за 10^7 циклов приращение трещины в 1 мм не зафиксировано [80]. Воспроизводимость результатов оценки длины трещины с использованием метода падения податливости на С(Т) образце требует принятия значения допустимого различного приращения трещины не ниже $\Delta a_{min} \geq 0.025$ мм. Таким образом, ΔK_{th} можно считать достигнутым, если за $2.5 \cdot 10^5$ циклов не было зафиксировано приращения. Если нагружение переменное, то и ΔK_{th} переменное, однако если нагружение регулярное и максимальный КИН цикла K_{max} не изменяется в течение испытания, то ΔK_{th} имеет постоянное значение.

Блок-схема алгоритма метода представлена на рис. 2.8; последовательности действий, вытекающие вследствие удовлетворения или неудовлетворения критериев алгоритма (обозначены А, В и С) соответствуют изменениям режима нагружения на рис. 2.7.

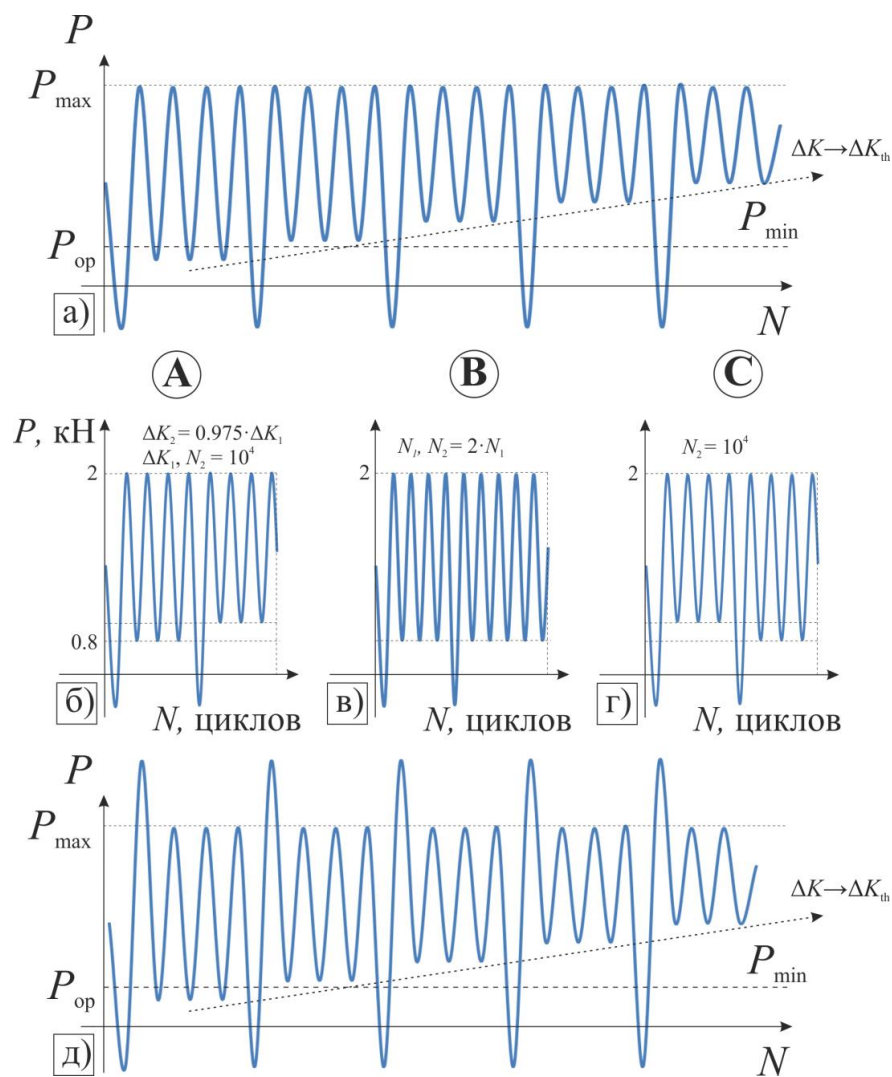


Рис. 2.7 – (а) Общий вид режима нагружения постоянной амплитуды для определения порогового размаха КИН; (б)-(г) Смена режима нагружения постоянной амплитуды при удовлетворении критериев А, В и С блок-схемы алгоритма; (д) Общий вид режима нагружения с растягивающими перегрузками для определения порогового размаха КИН [81]

Первый блок нагружения имеет длительность блока постоянной амплитуды $N_1=10^4$ циклов, как сказано выше. Если по истечении блока N_1 рост трещины $\Delta a_i \geq 0.025$ мм имел место, то снижаем амплитуду блока на 2.5 %, т. е. $\Delta K_2 = 0.975 \cdot \Delta K_1$, задаем длительность блока $N_2 = N_1 = 10^4$ циклов; если по истечении блока N_1 рост трещины $\Delta a_i \geq \Delta a_{\text{incr}}$ ($\Delta a_i \geq 0.025$ мм) отсутствовал, то сохраняем амплитуду блока $\Delta K_2 = \Delta K_1$ и удваиваем длительность блока, т. е. $N_2 = 2 \cdot N_1 = 2 \cdot 10^4$ циклов.

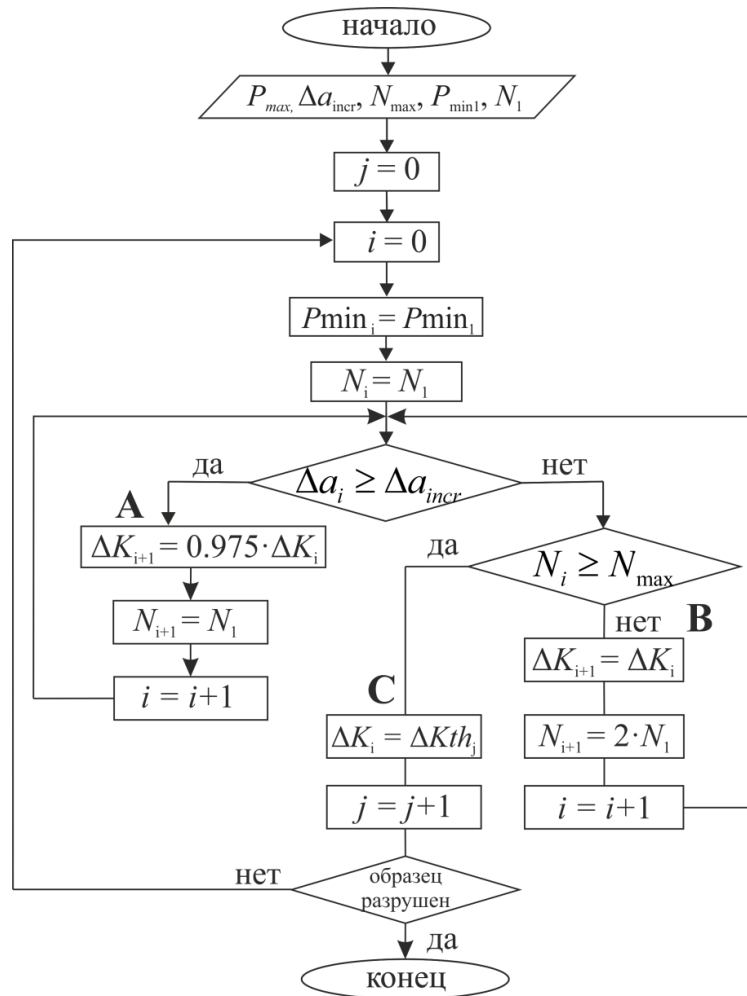


Рис. 2.8 – Блок-схема алгоритма определения порогового размаха КИН

По истечении последующих блоков повторяем вышеуказанное сравнение и снижаем амплитуду блока нагружения, либо увеличиваем продолжительность блока до тех пор, пока не наступит ситуация, при которой по истечении блока постоянной амплитуды $N_i \geq 2.5 \cdot 10^5$ циклов рост трещины $\Delta a_i \geq 0.025$ мм будет отсутствовать. В этом случае пороговый размах КИН считается определенным, т. е. $\Delta K_i = \Delta K_{th}$. После этого настройки блока возвращаются к начальным и алгоритм повторяется снова. Таким образом, многократно повторяя алгоритм испытания можно достичь нескольких значений ΔK_{th} , на основании которых можно определить среднее значение, которое и будет конечным результатом.

Настоящий метод можно использовать и для нагружения с растягивающими перегрузками (рис. 2.7д). Однако уровень перегрузки

должен быть одинаков в течение всего испытания. Очевидно, величины порогового размаха КИН в результате испытаний с регулярным нагружением и с растягивающими перегрузками будут отличаться.

Выводы по второй главе

1) В качестве материалов для испытаний были выбраны алюминиевый сплав и малоуглеродистые стали, применяющаяся в автомобилестроении. Алюминиевый сплав 2024-T3 считается модельным материалом в механике разрушения, кроме того, тенденция снижения содержания стали в несущих конструкциях транспортных средств в пользу алюминиевых сплавов и композитных материалов подчеркивает актуальность применения этого материала. Малоуглеродистая сталь является традиционным и хорошо известным в автомобилестроении материалом, поэтому изучение эффекта последовательности нагрузок при переменном нагружении может убедить в важности поднимаемого в настоящей работе вопроса. В качестве образцов были использованы образцы типа С(Т). Образцы из стали представлены следующими марками: AISI 4030, 40, 40X, 09Г2.

2) Для исследования материалов была выбрана машина индийского производства ViSS – Nano 25kN. Испытания проводились в лаборатории кафедры «Сопротивление материалов» Волгоградского государственного технического университета.

3) Представлена методика по определению порогового КИН ΔK_{th} . Значение ΔK_{th} заключается в том, что если $\Delta K_{эфф} \leq \Delta K_{th}$, то процессы скольжения и сдвига затрудняются и трещина останавливается. Наоборот, при $\Delta K_{эфф} > \Delta K_{th}$ рост трещины имеет место, но при приближении $\Delta K_{эфф} \rightarrow \Delta K_{th}$ рост трещины замедляется и теряет устойчивость. Поэтому важно учитывать значение порогового КИН на скорость роста трещины в виду его влияния на распространение усталостной трещины на первом участке КДУР.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РОСТА ТРЕЩИН ПРИ РЕГУЛЯРНОМ, БЛОЧНОМ С РАЗЛИЧНЫМИ ПЕРЕГРУЗКАМИ И КВАЗИСЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

3.1 Изучение кинетики роста трещин для материалов при регулярном циклическом нагружении

Детали, длительное время подвергающиеся повторно-переменной нагрузке, разрушаются при напряжениях значительно меньших предела прочности материала при статическом нагружении. Различают регулярные и нерегулярные режимы циклического нагружения. Эксплуатационное нагружение элементов конструкций всегда нерегулярное, поэтому одна из проблем прогнозирования сопротивления усталости заключается в оценке усталостного повреждения, создаваемого нерегулярным процессом нагружения, и замене его эквивалентным по повреждаемости регулярным. Это возможно с помощью гипотезы линейного суммирования повреждений, предложенная Пальмгреном в 1924 году [92] и усовершенствованная Майнером. Наиболее изученным циклическим нагружением является регулярное нагружение. Оно характеризуется периодическим законом изменения нагрузки с одним максимумом и одним минимумом в течение одного периода. В данной подглаве изучается кинетика роста трещин при регулярном циклическом нагружении. Все экспериментальные результаты продолжительности роста трещин N_s (млн. циклов) по исследуемым материалам представлены в приложении А, таблица А1, колонка 6.

Алюминиевый сплав AL 2024-T3

Программа испытаний на трещиностойкость заключалась в проведении испытаний на алюминиевом сплаве AL 2024-T3 [93] при регулярном

нагрузении (CAL) при разной асимметрии блока R от 0 до 0.75 и величине максимального нагружения до 3.5 кН. Тип образца показан на рис. 2.2.

На рис. 3.1 показаны примеры кривых скорости роста и КДУР (рис. 3.1а), все результаты проведенных испытаний приведены в таблице А1 в приложении А. На основании зависимостей кинетики роста трещины a -lg N , полученных с использованием датчика раскрытия трещины, командоаппарат испытательной машины автоматически оценивает скорость роста da/dN и размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK в устье трещины. Эти результаты позволяют построить кинетические диаграммы усталостного разрушения КДУР (рис. 3.1б) полученные при анализе роста усталостных трещин на среднем участке.

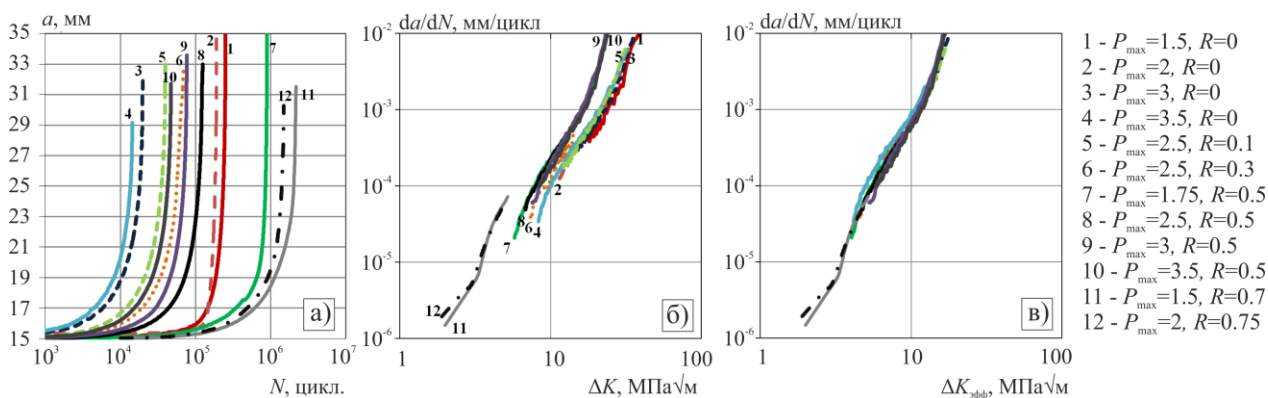


Рис. 3.1 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний при регулярном нагружении с различной асимметрией блока нагружения R для AL 2024-T3

На скорость роста оказывает влияние значение максимального нагружения P_{\max} и асимметрия. Из рис. 3.1 видно, что при $P_{\max} \geq 2.5$ кН для данного материала скорость роста не превышает 125 тыс. циклов, кривая 8, а при $P_{\max} \leq 2$ кН долговечность существенно возрастает до нескольких миллионов. Сравнение испытаний с одинаковым P_{\max} но разной R , показало, что увеличение асимметрии приводит к увеличению продолжительности роста трещины, вследствие уменьшения размаха коэффициента ΔK , кривые 4 и 10, 1 и 11, 2 и 12. На положение КДУР также оказывает влияние асимметрия, на рис. 3.1б отчетливо видно, что кривые с низкой асимметрией $R \leq 0.5$, а именно кривые 1-6, образуют отдельную область, которая

расположена правее, а остальные испытания при асимметриях 0.5 и выше – левее, так как скорость роста трещин при данных испытаниях ниже. Кривые роста и КДУР 11 и 12 на рис. 26 соответствуют испытаниям при асимметрии 0.7 и 0.75. Предполагается, что при таких асимметриях R не наблюдается эффект закрытия трещины [94], поэтому эти кривые КДУР располагаются обособлено от остальных кривых. Следовательно, положение кривых КДУР блока нагружения регулярного нагружения (рис. 3.1б) существенно зависит от асимметрии цикла R .

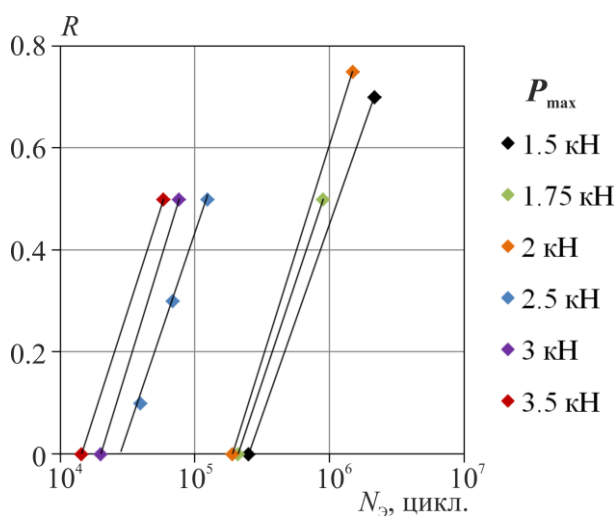


Рис. 3.2 – Взаимосвязь экспериментальных N_z значений продолжительности роста усталостных трещин при регулярном нагружении от асимметрии R

Сталь 09Г2

Программа испытаний низколегированной стали 09Г2 состояла в проведении испытаний на трещиностойкость при разной асимметрии блока R от 0 до 0.75 и одинаковой величине максимального нагружения $P_{max}=5$ кН. Тип используемых образцов показан на рис. 2.2. На рис. 3.3 показаны результаты испытаний низколегированной стали (рис. 3.3а) и КДУР (рис. 3.3б).

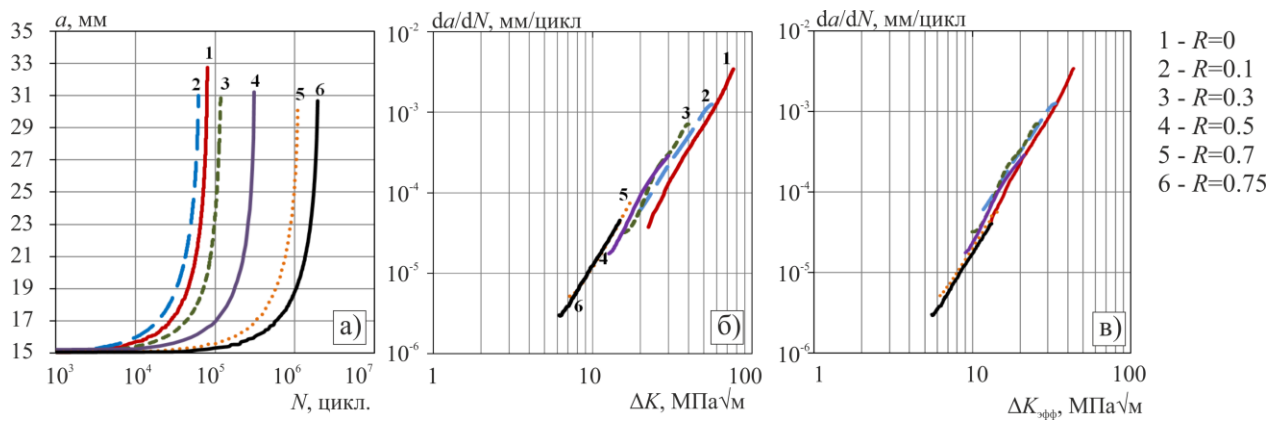


Рис. 3.3 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний при регулярном нагружении с различной асимметрией блока нагружения R для стали 09Г2

Испытания стали при различных величинах асимметрии блока нагружения $R = 0-0.75$ показали, что все кривые КДУР имеют тенденцию к параллельности в логарифмических координатах ($\lg(da/dN) - \lg(\Delta K)$). Из рис. 3.3а видно, что при постоянном $P_{\max} = 5$ кН и $R \leq 0.5$ для данного материала продолжительность едва превышает 300 тыс. циклов, а при $R \geq 0.7$ долговечность существенно возрастает до миллионов циклов.

На положение КДУР как и в случае с алюминиевым сплавом AL 2024-T3 также оказывает влияние асимметрия, на рис. 3.3б отчётливо видно, что при повышении асимметрии кривые с 1 по 6 располагаются ниже и левее, так как скорость роста трещин при повышении асимметрии уменьшается. Кривые роста и КДУР 5 и 6 на рис. 3.3 соответствуют испытаниям при асимметриях 0.7 и 0.75. При таких асимметриях R не наблюдается эффект закрытия трещины, который влияет на кинетику роста трещины (КДУР).

Стали AISI 4030, 40 и 40X

Следующая программа испытаний при регулярном нагружении была проведена на сталях AISI 4030, 40 и 40X. Для исключения влияния асимметрии и уровня максимальной нагрузки были проведены испытания с одинаковым $P_{\max} = 15$ кН и одинаковой асимметрией $R=0$. Тип используемых

образцов показан на рис. 2.3. На рис. 3.4 приведены результаты полученных скоростей роста (а) и КДУР (б).

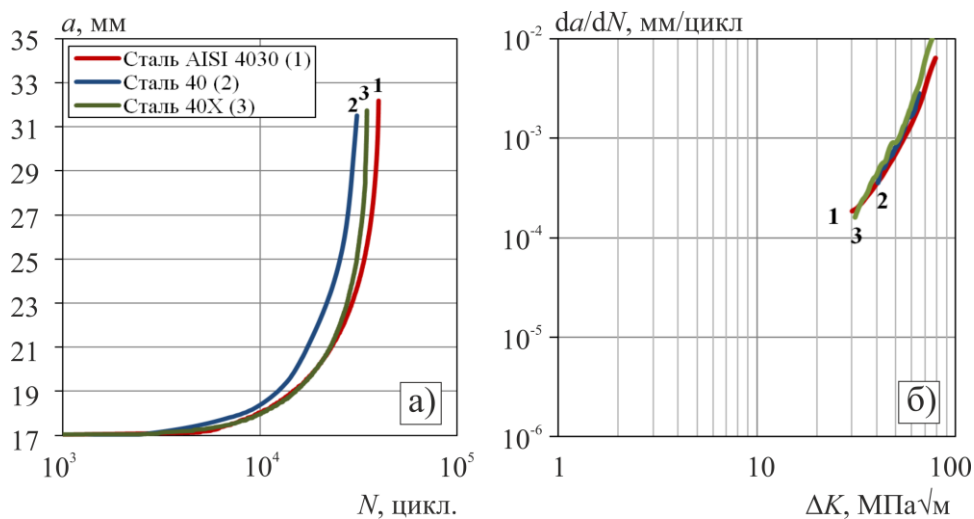


Рис. 3.4 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний при регулярном нагружении для сталей AISI 4030, 40 и 40X

Результаты испытаний при таких параметрах нагружения относятся к испытаниям при малоциклового усталости, т.к. число циклов не превысило 10^4 . Наибольшую трещиностойкость имеет сталь AISI 4030, затем сталь 40X и сталь 40. Сталь AISI 4030 как показано в таблице 2.1 имеет более высокий предел выносливости. Если сравнивать стали 40 и 40X, которые были представлены в нормализованном состоянии, то прочность 40X объясняется более высокими механическими характеристиками, предел прочности и предел текучести у нее в два раза выше, чем у стали 40.

3.2 Анализ влияния характера переменного нагружения на продолжительность роста усталостной трещины с оценкой фрактографических особенностей

3.2.1 Влияние последовательностей перегрузок и недогрузок на кинетику роста усталостных трещин на примере алюминиевого сплава

В процессе эксплуатации напряжения периодически изменяют свое направление. Это связано с изменением направления действующих нагрузок

(например, ветра), наложением напряжений сжатия от внешней нагрузки на остаточные сварочные напряжения, значительным влиянием усилий от собственного веса конструкций, веса установленного оборудования и т.д. [95]. При изменении действующих нагрузок в сечениях элементов реализуются перегрузки типов «перегрузка-недогрузка» и «недогрузка-перегрузка» [41]. Изучению влияния недогрузок в сочетании с перегрузками посвящены работы [43].

Для изучения влияния последовательности перегрузок и недогрузок на кинетику роста усталостных трещин была подготовлена программа нагружения, показанная на рис. 3.5. Испытания проводились на алюминиевом сплаве AL 2024-T3. Особенностью данной программы нагружений было наложение на регулярное нагружение с асимметрией $R=0.7$ ($P_{\max}=2.5$ кН, $P_{\min} = 1.75$ кН) различных видов возмущающих воздействий. Которые показывают влияние перегрузок и недогрузок на кинетику роста усталостной трещины. Такая асимметрия была выбрана, чтобы при регулярном нагружении не было закрытия трещины и ΔK представляло эффективное значение $\Delta K_{\text{эфф}}$.

Описание схемы блочного нагружения:

– *схема а*: одна перегрузка $P_{\max}=3.5$ кН через 1 тыс. циклов регулярного нагружения $P_{\max}=2.5$ кН, $P_{\min} = 1.75$ кН, $f=15$ Гц;

– *схема б*: переменное количество перегрузок от 1 до 5 одинаковой величины с $P_{\max}=3.5$ кН через 1 тыс. циклов регулярного нагружения $P_{\max}=2.5$ кН, $P_{\min} = 1.75$ кН, $f=15$ Гц;

– *схема в*: переменное количество перегрузок от 1 до 5 разной величины ($P_{\max1} = 2.7$, $P_{\max2} = 2.9$, $P_{\max3} = 3.1$, $P_{\max4} = 3.3$, $P_{\max5} = 3.5$) через 1 тыс. циклов регулярного нагружения $P_{\max}=2.5$ кН, $P_{\min} = 1.75$ кН, $f=15$ Гц;

– *схема г*: однократная недогрузка $P_{\min}=0$ кН через 1 тыс. циклов регулярного нагружения $P_{\max}=2.5$ кН, $P_{\min} = 1.75$ кН, $f=15$ Гц;

– *схема д*: переменное количество недорезок от 1 до 5 одинаковой величины с $P_{\min}=0$ кН через 1 тыс. циклов регулярного нагружения $P_{\max}=2.5$ кН, $P_{\min} = 1.75$ кН, $f=15$ Гц;

– *схема е*: переменное количество недогрузок от 1 до 5 разной величины ($P_{\min1} = 1.4$, $P_{\min2} = 1.05$, $P_{\min3} = 0.7$, $P_{\min4} = 0.35$, $P_{\min5} = 0$) через 1 тыс. циклов регулярного нагружения $P_{\max}=2.5$ кН, $P_{\min} = 1.75$ кН, $f=15$ Гц.

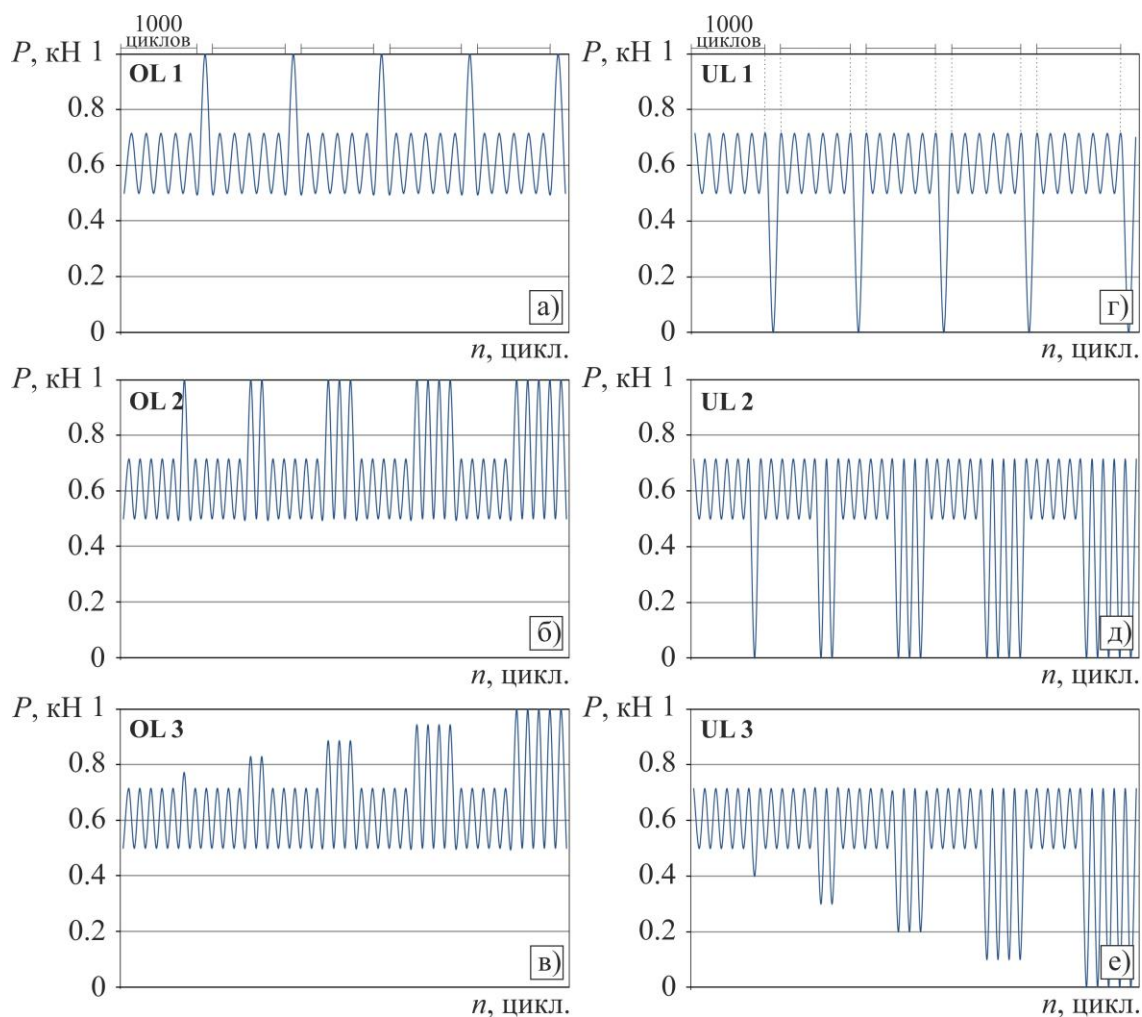


Рис. 3.5 – Диаграммы испытаний алюминиевого сплава 2024-T3 при перегрузочных (а) и недогрузочных (б) возмущающих воздействиях

Уровень перегрузочных и недогрузочных возмущающих воздействий для данного типа испытаний, по сравнению с описанным базовым регулярным нагружением, составлял не более 40% [91]. Данные исследования были выполнены для дальнейшего изучения фрактографии разрушения на микроскопе и оценки скорости роста трещины за цикл

нагружения по усталостным бороздкам. В дальнейшем предлагается использовать обозначения испытаний данного типа OL (Overload), что означает наличие полуциклов перегрузки и UL (Underload) – полуциклы недогрузки.

В результате аппроксимации экспериментальных данных, были получены кривые роста $a-N$ и КДУР $da/dN-\Delta K$, которые показаны на рис. 3.6.

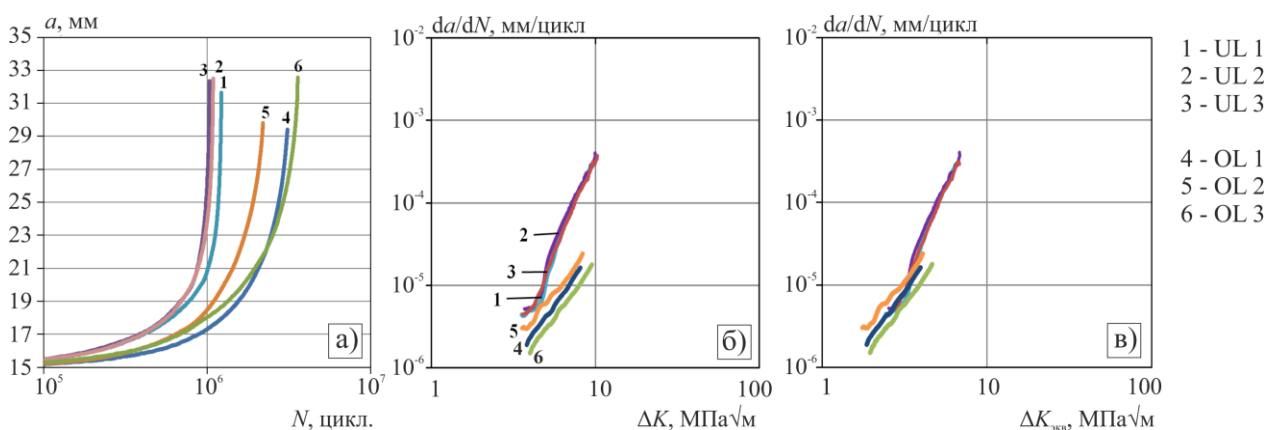


Рис. 3.6 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний при регулярном нагружении с недогрузочными (кривые 1-3) и перегрузочными (кривые 4-6) возмущающими воздействиями

Кривые 1-3 соответствуют программе испытаний ε - δ на рис.3.5, а кривые 4-6 – программе a - b . На рис. 3.6а показаны результаты скорости роста, из данных кривых видно, что наибольшее воздействие на кинетику роста трещины оказывают перегрузочные возмущения, кривые 4-6. Похожие результаты наблюдаются и на кривых КДУР. КДУР с недогрузками располагаются выше КДУР с перегрузками (рис. 3.6б). Следует заметить, что недогрузки, как возмущающее воздействие не полностью реализуют свое влияние, поскольку для них будет наблюдаться закрытие трещины [96].

Для перегрузочного режима характерно, что после первой перегрузки идет снижение скорости роста трещины. Для малых трещин такое снижение менее выражено. Перегрузочные возмущения, как показывает опыт [40, 43, 102], оказывают более существенное влияние на продолжительность роста усталостной трещины. При воздействии перегрузки происходит увеличение

длины трещины и создается значительная пластическая деформация вблизи кончика трещины с образованием множества микроразрывов в ней. Поэтому после перегрузки происходит ускоренное развитие трещины через поврежденную микроразрывами область. Затем следует интенсивное снижение скорости роста трещины. Если эффект перегрузки усилить изменением последовательного количества циклов перегрузки (рис. 3.5д), а также их уровнем (рис. 3.5е), то это не вызовет существенных изменений в скорости распространения трещины, и эффект торможения роста трещины будет проявляется почти одинаково. Однако увеличивающееся количество последовательных перегрузок сильнее замедлит распространения трещины, чем одиночные или с разным уровнем. Это может быть связано с тем, что каждая последующая перегрузка вызывает увеличение пластической деформации в вершине трещины, а при разноуровневых перегрузках (рис 3.5д) величины P_{\max} от малой перегрузки недостаточно для возникновения эффекта торможения, и трещина распространяется как при регулярном нагружении. Следовательно, можно сделать вывод, что на скорость распространения трещины влияет не только наличие перегрузок, но и их уровень по отношению к базовому нагружению.

В случае недогрузочных возмущающих воздействий рост трещины происходил медленнее, чем при перегрузочных, но ни увеличение количества недогрузок, ни изменение их уровня существенно не сказалось ни на уменьшении, ни на увеличении скорости распространения усталостной трещины.

Было проведено изучение структуры разрушения данного алюминиевого сплава на электронном микроскопе Versa 3D DualBeam, позволяющему получать рельефную картину разрушения в виде усталостных полосок, характеризующих продвижение усталостной трещины за цикл нагружения, т.е. ее скорость за цикл нагружения. Алюминиевый сплав относится к пластичным материалам, и, как показывают опыты [40, 97], возмущающие воздействия при рассмотрении фрактографии разрушения

проявляются в виде маркирующих признаков, позволяющих оценивать рост трещины вплоть до одного цикла нагружения. Поскольку после возмущающего воздействия (перегрузка или недогрузка) нагружение носит регулярный характер с $R = 0.7$, то это четко проявляется на структуре разрушения.

На рис. 3.7 показана фрактография разрушения алюминиевого сплава (увеличение 8000-10000) на разных стадиях разрушения с различной длиной усталостной трещины при переменном перегрузочном режиме нагружения OL3.

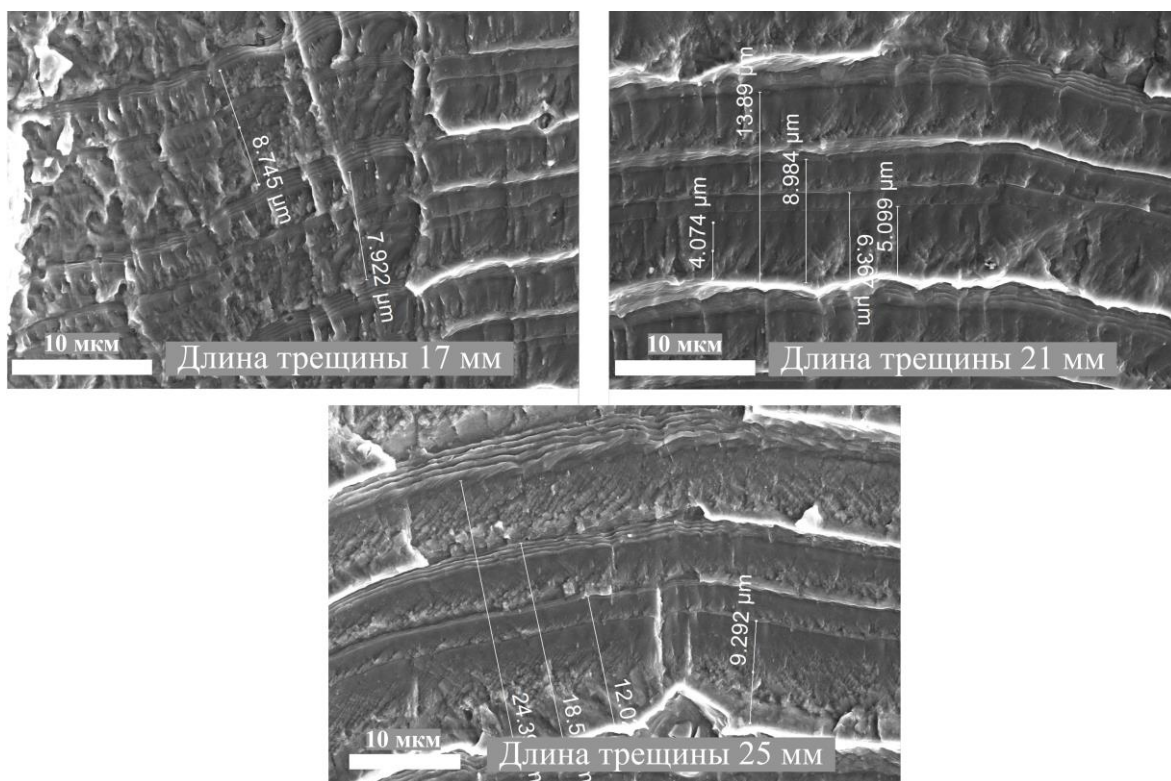


Рис. 3.7 – Фрактографии разрушения алюминиевого сплава при переменном перегрузочном нагружении

На фрактографии четко зафиксирован один блок нагружения, где перегрузки изменяются от 1 до 5 значений. Четко просматриваются валики, соответствующие возмущающему воздействию одного перегрузочного цикла нагружения. Между возмущающими воздействиями во время разрушения на фрактографиях проявляется губчатая структура с тенденцией продвижения трещины под углом 30-40° по отношению к направлению развития

магистральной трещины. Это особенно видно при большем увеличении (рис. 3.8).

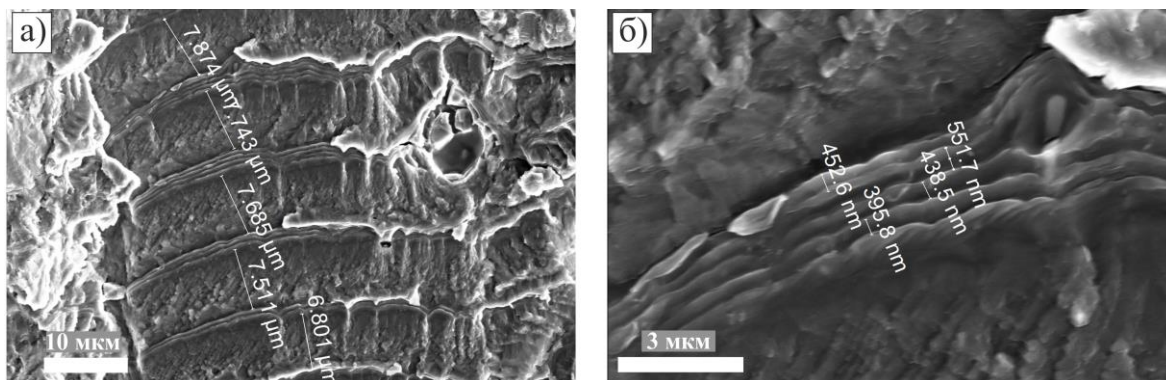


Рис. 3.8 – Фрактографии разрушения алюминиевого сплава при перегрузочном режиме нагружения (1-5 перегрузок на 1 тыс. циклов): а) блок нагружения; б) фрагмент структуры с 5 перегрузками (длина трещины 23 мм)

Как показано на рис. 3.9, продвижение трещины, характер ее развития зависит от фрагментов структуры сплава, наличия включений, искажающих поле напряжений локального места разрушения, что приводит к задержке или ускорению трещины в этом месте.

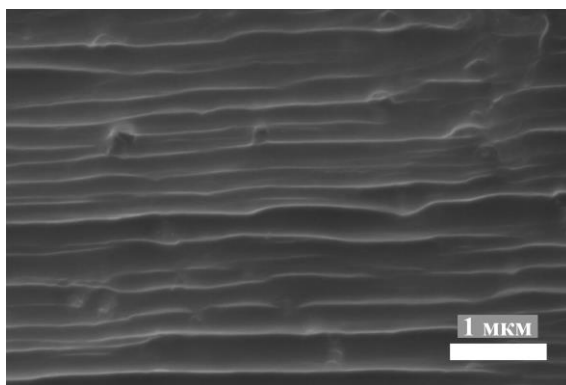


Рис. 3.9 – Усталостные полосы на фрактографии разрушения алюминиевого сплава, соответствующие одному циклу нагружения, при недогрузочном режиме нагружения (1-5 недогрузок на 1 тыс. циклов) при длине трещины 31 мм

Что касается влияния недогрузочных режимов, то в зависимости от величины ΔK наблюдается заминание поверхности структуры разрушения

вследствие наличия сжимающих напряжений при возмущающих воздействиях. Бороздки на фрактографии разрушения, соответствующие продвижению трещины за один цикл нагружения, проявляются достаточно четко, но только при повышенных скоростях продвижения трещины (рис. 3.8) как при недогрузочном, так и перегрузочном режимах нагружения.

Возмущающие воздействия на кинетику роста трещины можно оценить по фрактографии разрушения на участках между смежными воздействиями, учитывая, что участок регулярного нагружения составляет 1 тыс. циклов. На рис. 3.10 показаны изменения скорости роста трещины da/dN между ступенями нагружения для перегрузочного режима с одной перегрузкой OL1 (рис. 3.10а) и недогрузочного UL1 (рис. 3.10б) также с 1 недогрузкой для различных длин трещин.

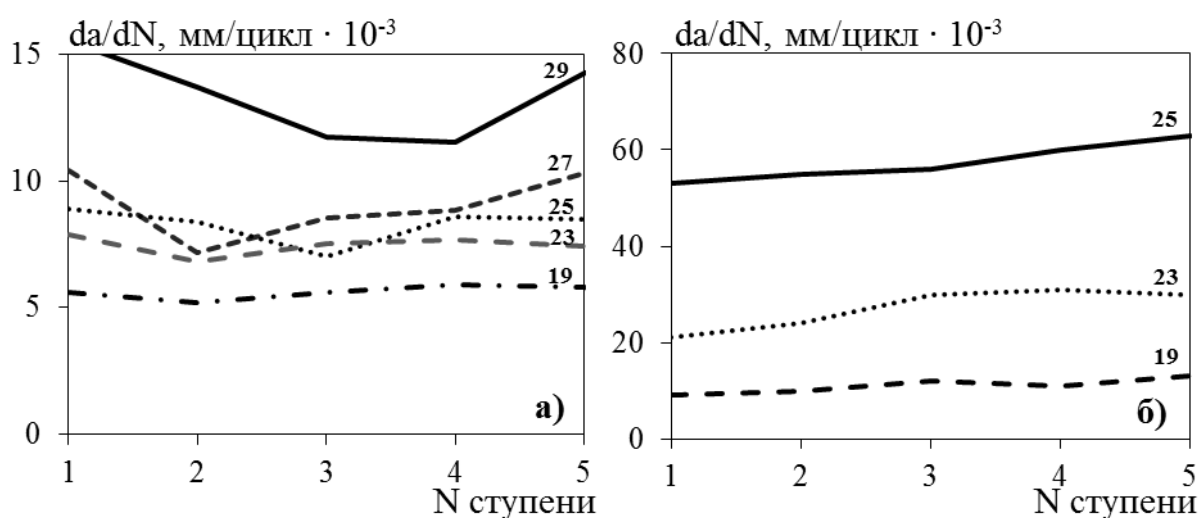


Рис. 3.10 – Изменение скорости da/dN роста усталостной трещины при перегрузочных (а) и недогрузочных (б) циклах нагружения, наложенных на регулярное циклическое нагружение с асимметрией $R=0.7$ через каждую 1000 циклов, цифрами показана величина усталостной трещины, при которой оценивалось это изменение за блок нагружения

Для перегрузочного режима характерно, после первой перегрузки идет снижение скорости роста трещины. Для малых трещин такое снижение менее

выражено. При увеличении интегральной скорости роста трещины такое воздействие более значимо. После блока нагружения скорость роста возвращается к исходному значению, то есть наблюдается колебательное изменение скорости роста, это может свидетельствовать о том, что воздействие перегрузки может быть по продолжительности в разном соотношении с интегральной скоростью ее развития. Недогрузочное воздействие приводит к увеличению скорости роста трещины в блоке нагружения, которое сохраняется и передается на следующий блок нагружения.

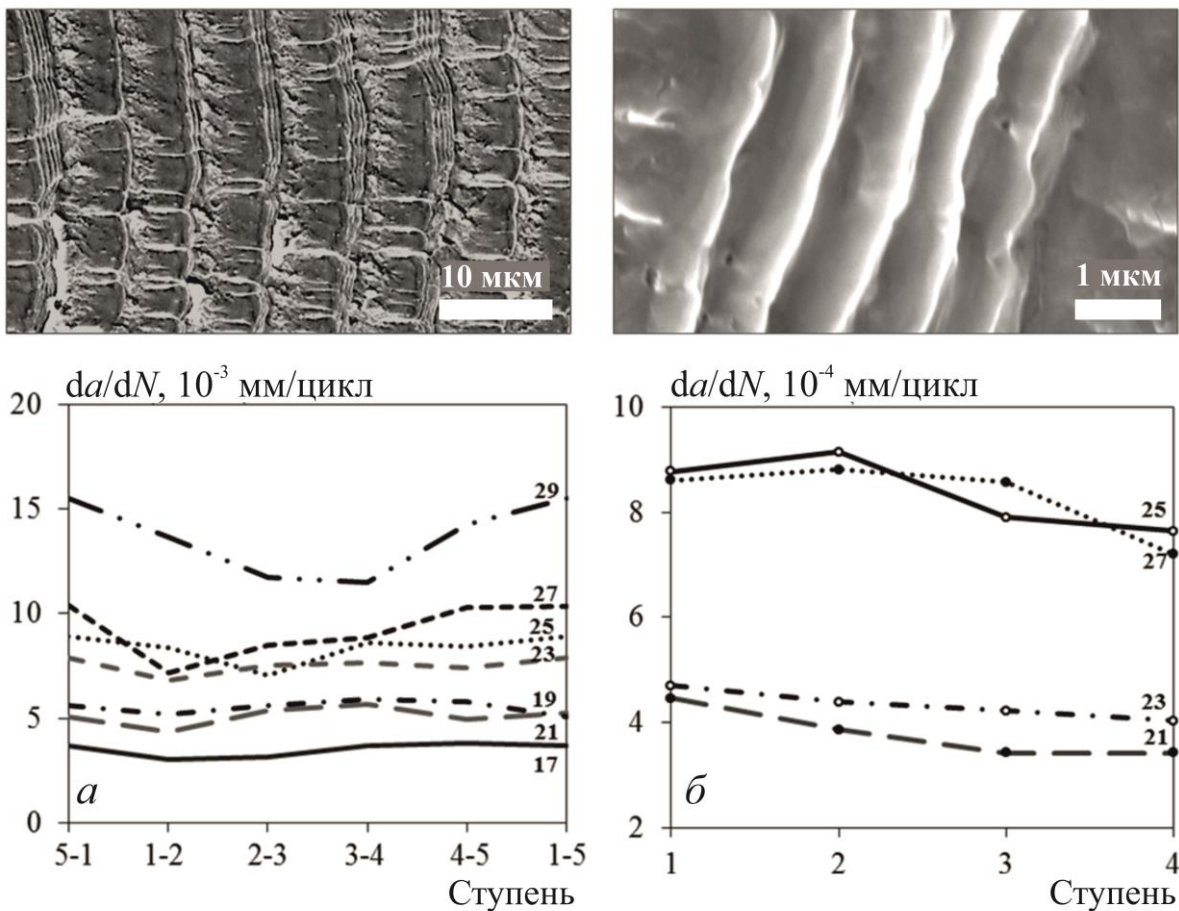


Рис. 3.11 – Изменение скорости роста трещины за блок (а) и цикл (б) нагружения при различных величинах трещины в блоке с переменной перегрузкой от 1 до 5

Интересным является воздействие возмущающего характера при переменной перегрузке за блок нагружения (рис. 3.11). Так, после последовательной перегрузки $\times 5$, наблюдается постепенное снижение

локальной скорости роста трещины (рис. 3.11а). Интенсивность ее снижения зависит от интегральной величины скорости трещины. При малых значениях трещины 17-23 мм это снижение незначительно и заканчивается на 2-3 перегрузке (наблюдается колебательный процесс). При более развитой усталостной трещине 25-29 мм уменьшение ее скорости более значительно, но в конце блока нагружения интегральная скорость роста пересиливает возмущающие воздействия, и скорость становится близкой к интегральной. После перегрузки $\times 5$ процесс повторяется.

Было проведено исследование последовательной перегрузки $\times 5$ на скорость роста трещины (рис. 3.11б). Так по мере увеличения количества перегрузок скорость роста трещины постоянно уменьшается и после окончания последней перегрузки сохраняет эту тенденцию. Можно предположить, что пластическая зона в устье трещины при перегрузке $\times 5$ значительна, чем после $\times(1-2-3)$ и требуется более значительная энергия на ее преодоление.

При наличии возмущающих воздействий в виде перегрузок и недогрузок на регулярное нагружение показало увеличение продолжительности роста трещин при перегрузках и уменьшение при недогрузках. Перегрузки переменного характера способствуют значительному увеличению продолжительности по сравнению с регулярным нагружением.

Известно, что недогрузка следующая за перегрузкой способна снизить эффект торможения роста усталостной трещины. Однако следующая программа испытаний, представленная на рис. 3.12 отличается тем, что направлена на изучение влияния дополнительной перегрузки или недогрузки после цикла перегрузка-недогрузка или недогрузка-перегрузка на скорость распространения усталостной трещины, а также влияния двух последующих недогрузок одинаковой величины. При введении перегрузки после недогрузки наблюдается снижение эффекта недогрузки и рост трещины замедляется. Была внесена дополнительная недогрузка после недогрузки-

перегрузки, рис. 3.12б, для оценки скорости распространения трещины и ее выход на прежний уровень роста. После эффекта недогрузки может наблюдаться ускорение роста трещины.

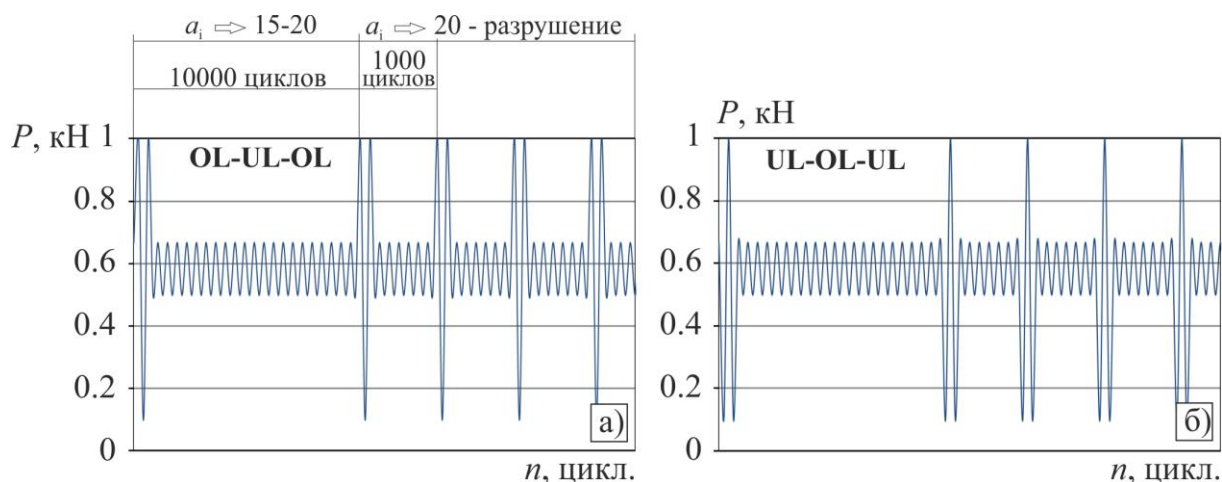


Рис. 3.12 – Диаграммы испытаний алюминиевого сплава 2024-T3 при перегрузочных-недогрузочных-перегрузочных (а), недогрузочных-перегрузочных-недогрузочных (б) возмущающих воздействиях

Схема нагружения, представленная на рис. 3.12, имеет обозначение следующих друг за другом возмущающих воздействий, например, OL-UL-OL – это последовательность трех следующих друг за другом возмущающих воздействий, а именно полупериод перегрузки, недогрузки и снова перегрузки [41]. Данная программа испытаний заключалась в наложении на регулярное нагружение, как и предыдущее исследования на алюминиевом сплаве, с $R=0.75$ ($P_{\max}=2$ кН, $P_{\min}=1,5$ кН) возмущающих воздействий в виде отдельных перегрузок или недогрузок. Количество циклов между первой и второй перегрузкой составило 10000, а между вторым и третьим и последующим в программе – 1000 циклов. Общее число циклов в программе – 14000, после завершения блок нагружения повторялся до полного разрушения образца. Во втором случае (рис. 3.12б) силовые параметры нагружения совпадали с первым, но изменилась последовательность – недогрузка-перегрузка-недогрузка.

Описание схемы нагружения на рис. 3.12:

– *схема а*: первый двухблочный шаг от 15 до 20 мм (перегрузка-недогрузка-перегрузка, $P_{\max}=3$ кН, $P_{\min}=0.3$ кН, $f=0.1$ Гц), второй шаг - $P_{\max}=2$ кН, $P_{\min}=1.5$ кН ($R=0.75$), $f=150$ Гц – 10000 циклов, второй блок от 20 мм до разрушения-(перегрузка-недогрузка-перегрузка, $P_{\max}=3$ кН, $P_{\min}=0.3$ кН, $f=0.1$ Гц), второй шаг - $P_{\max}=2$ кН, $P_{\min}=1.5$ кН ($R=0.75$), $f=150$ Гц – 1000 циклов;

– *схема б*: первый двухблочный шаг от 15 до 20 мм (недогрузка-перегрузка-недогрузка, $P_{\max}=3$ кН, $P_{\min}=0.3$ кН, $f=0.1$ Гц), второй шаг - $P_{\max}=2$ кН, $P_{\min}=1.5$ кН ($R=0.75$), $f=150$ Гц – 10000 циклов, второй блок от 20мм до разрушения-(недогрузка-перегрузка-недогрузка, $P_{\max}=3$ кН, $P_{\min}=0.3$ кН), второй шаг - $P_{\max}=2$ кН, $P_{\min}=1.5$ кН ($R=0.75$), $f=150$ Гц – 1000 циклов.

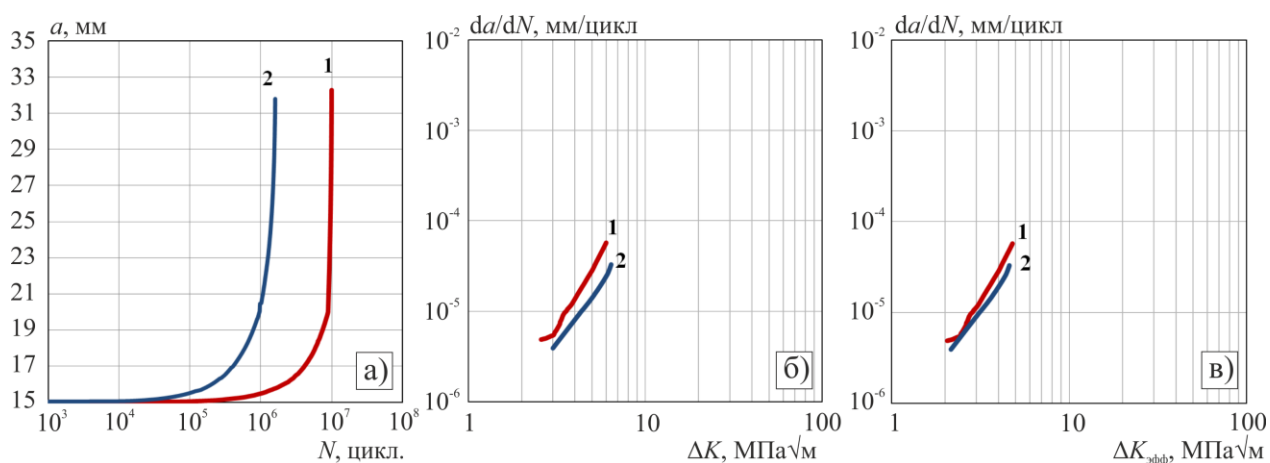


Рис. 3.13 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний с последовательностями перегрузка-недогрузка-перегрузка (1) и недогрузка-перегрузка-недогрузка (2)

Из анализа рис. 3.13 видно, что скорость распространения трещины при режиме перегрузка-недогрузка-недогрузка (а) быстрее, чем при недогрузка-перегрузка-недогрузка (б), это связано, как было сказано выше, со снижением влияния эффекта недогрузки после перегрузки. Разница в скорости более чем в 6 раз, это позволяет судить о том, что эффект недогрузки полностью исчезает между двумя перегрузками [41].

По меткам, нанесенным на боковую поверхность образца, фиксировалась длина трещины и число циклов нагружения для дальнейшего

изучения фрактографии разрушения при увеличении от 500 до 200000 раз и оценки скорости роста трещины за цикл нагружения по усталостным бороздкам.

На рис. 3.14, 3.15 и 3.16 показаны фрагменты фрактографий разрушений по представленной программе нагружения. Характерной особенностью трещинообразования в алюминиевом сплаве 2024-T3 является четкие бороздки, связанные с блочной схемой нагружения сплава и создающие замкнутые участки разграничиваемые друг от друга ступеньками, как показано на рис. 3.13а.

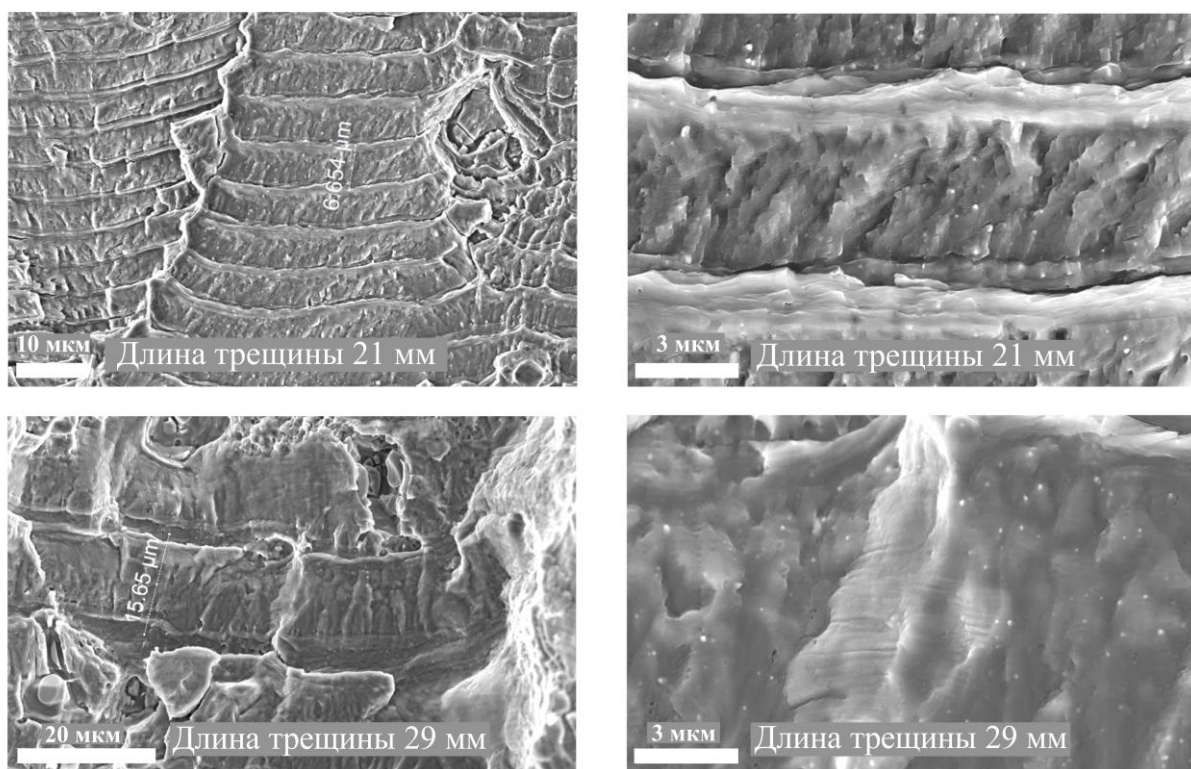


Рис.3.14 – Фрактография роста трещины при нагружении по схеме *a* (рис. 3.12) при различном увеличении

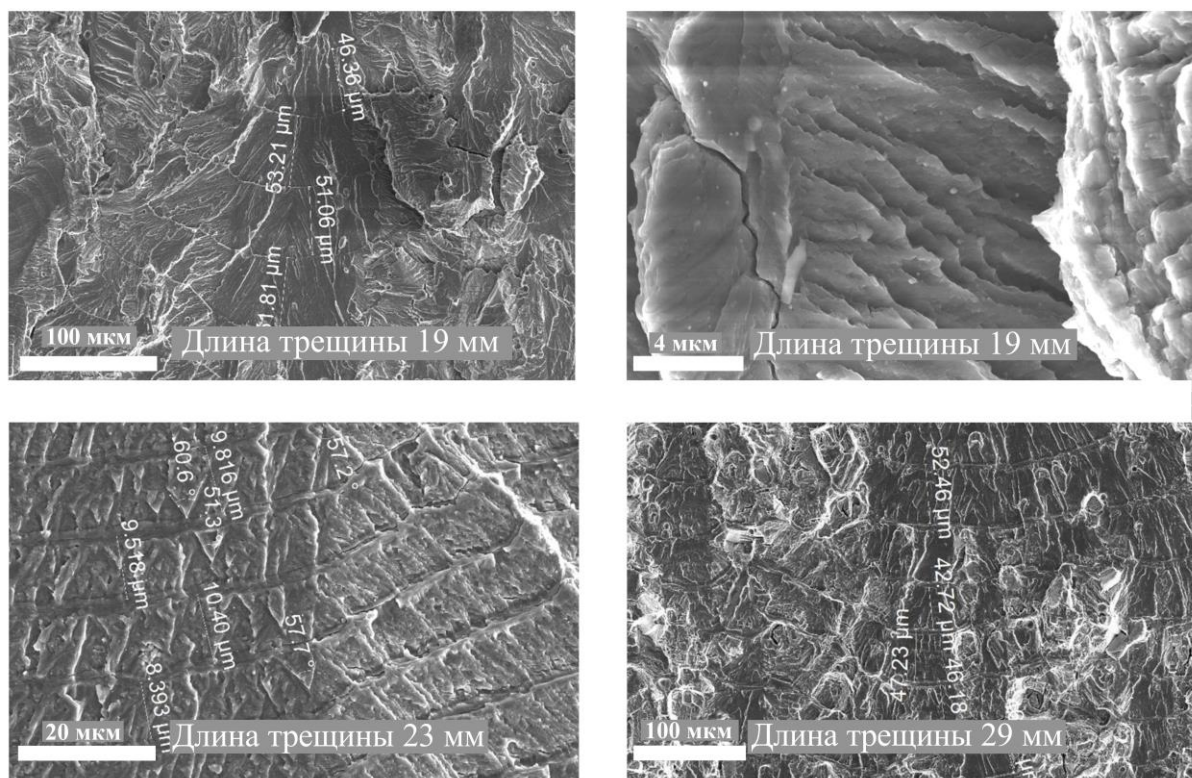


Рис. 3.15 – Фрактографии роста трещины при нагружении по схеме б (рис. 3.12) при различном увеличении

В большинстве эти участки, как правило, вытянуты вдоль направления продвижения магистральной трещины. На рис. 3.13 для $a=21$ и $a=29$ мм между бороздками укладывается 1000 циклов стационарной нагрузки $P_{\max} = 2$ кН, $P_{\min}=1.5$ кН ($R=0.75$). Такая же картина наблюдается и в случае нагружения сплава по схеме б. Для трещины $a=19$ мм между бороздками укладывается 10000 циклов.

Увеличение фрагмента фрактографии области сплава между бороздками до $a=25$ мм для всех видов нагружения не выявило усталостных бороздок, соответствующих одному циклу нагружения. Фрактография разрушения сплава показывает картину хрупкого разрушения с грубыми гребнями и выемками, направленными вдоль линии продвижения трещины с некоторыми отклонениями (рис. 2а и 2б увеличение до 25000 раз). Это согласуется с выводами работы [98], что для алюминиевого сплава диффузия в сочетании с абсорбцией и химабсорбцией уменьшает поверхностную

энергию в вершине трещины в загрузочный полупериод, способствует росту хрупких усталостных микротрещин в околопороговой области нагружения. Для этого механизма разрушения и доминирующего его влияния необходимо значительное время контакта образующихся поверхностей разрушения в вершине трещины, что и выполняется при малых скоростях продвижения трещины в околопороговой области.

Проведенное исследование химического состава сплава по различным фрагментам разрушения показало (рис. 3.16, таблица 3.1), что в усталостных бороздках между блоками нагружения для испытания перегрузка-недогрузка-перегрузка и длине трещины $a=19$ мм содержание кислорода составляло 0.38 % (ошибка измерения 36.2%), а в промежутке между блоками 0.45% (ошибка измерения 23.6%), т.е. скорость продвижения трещины при этом виде испытания в обоих фрагментах разрушения примерно одинаковы.

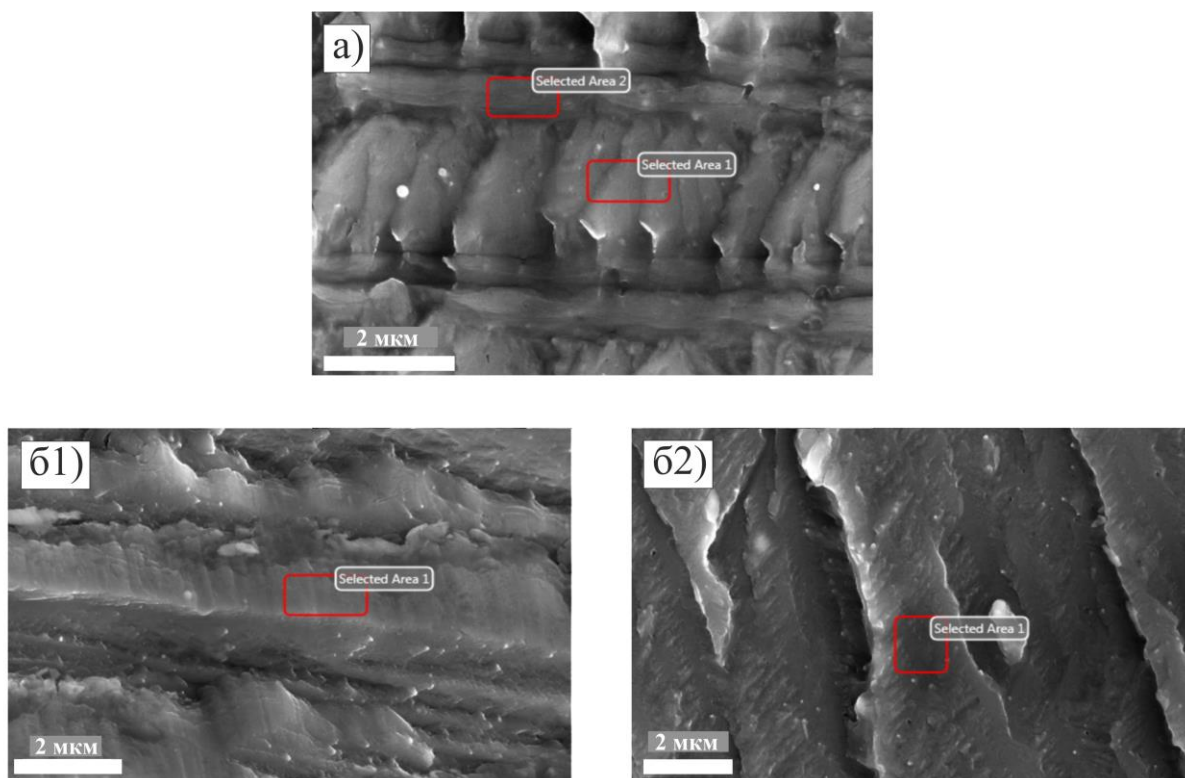


Рис. 3.16 – Фрагменты фрактографии с различными видами нагружения с оценкой окислительных процессов на поверхности разрушения

Для недогрузочных возмущающих воздействий недогрузка-перегрузка-недогрузка (схема б, рис. 3.12) содержание кислорода в поперечных бороздках доходит до 4.98 %, что свидетельствует о повышенном процессе химабсорбции окисления и охрупчивании металла в трещине, способствующие ускоренному ее продвижению, и, следовательно, снижению долговечности до разрушения. В другом фрагменте (рис. 3.16б2) разрушения в продольном направлении она составляет 0.43%, что характерна для предыдущего режима нагружения.

Таблица 3.1 – Содержание кислорода в различных фрагментах фрактографии разрушения алюминиевого сплава 2024-T3 при различных схемах нагружения

Схема нагружения	Возмущающие циклы нагружения	Область замера	Содержание кислорода в %	Ошибка измерения в %
а	перегрузка--недогрузка-перегрузка	1	0.45	23.6
		2	0.38	36.2
б	недогрузка--перегрузка-недогрузка	б1	4.98	9.55
		б2	0.43	22.89

Конкуренция между механизмом микроразрушения в вершине трещины, связанная с абсорбцией и химабсорбцией образующихся в поверхностях в усталостной трещине сплава, а также процессами скольжения с увеличением скорости роста трещины, приводит к уменьшению первого механизма и увеличению процесса скольжения.

На рис. 3.18 показано соответствие интегральной (1) и локальной (2) кривой изменения скорости da/dn роста трещины в зависимости от величины трещины усталости a_i .

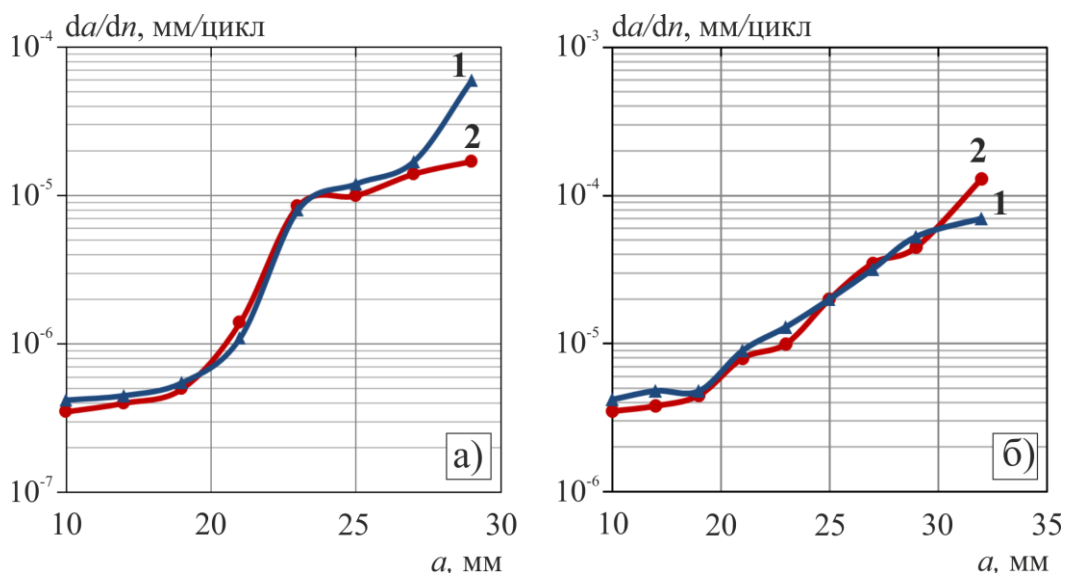


Рис. 3.18 – Соответствие скорости роста трещин da/dn , полученное по замеру датчика раскрытия трещины (интегральная кривая 1) и измерению усталостных полос скольжения (локальная кривая 2) для различных схем нагружения (рис. 3.12)

На кривой трещиностойкости по первой схеме нагружения (рис. 3.12а, перегрузка-недогрузка-перегрузка) наблюдается перегиб кривой, связанный с переходом от блоков нагружения стационарным нагружением ($P_{\max}=2$ кН, $P_{\min}=1,5$ кН ($R=0.75$), $f=150$ Гц – 10000 циклов) к блокам со стационарным нагружением ($P_{\max}=2$ кН, $P_{\min}=1,5$ кН ($R=0.75$), $f=150$ Гц – 1000 циклов), после достижения трещиной величины $a=20$ мм.

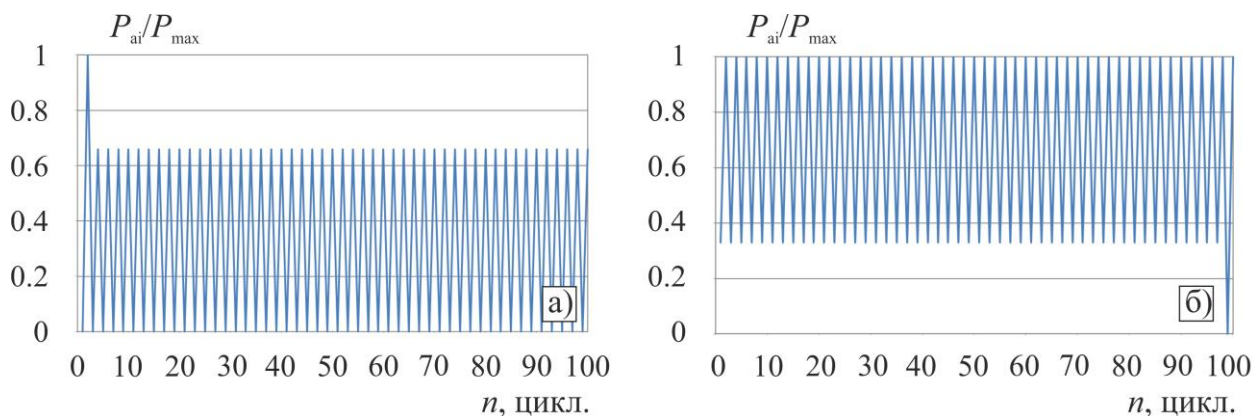
При другом виде нагружения (рис. 3.12б) этого скачка не наблюдается, и скорость трещины плавно переходит от первой ко второй стадии роста трещины. Такое же хорошее соответствие для этих видов нагружения получено на основании замера скорости трещины с помощью датчика ее раскрытия (интегральные кривые 1) и по замеру усталостных бороздок (локальные кривые 2). Это подтверждает физическую обоснованность полученных данных.

Сравнение кривых роста трещин усталости при различном возмущающем воздействии перегрузок и недогрузок, полученных на основании датчика раскрытия трещины и замера усталостных бороздок

блоков нагружения, показало их хорошее соответствие, что говорит о физической обоснованности полученных результатов. Установлено, что возмущающее воздействие на рост усталостной трещины при перегрузка-недогрузка-перегрузка в сравнении с недогрузкой-перегрузкой-недогрузкой, может приводить к значительному увеличению долговечности ее распространения, что не объясняется современными моделями механики разрушения. Анализ характера разрушения сплава и химсостава различных фрагментов фрактографий излома показал, что рост усталостных трещин в алюминиевом сплаве определяется суперпозицией двух механизмов разрушения – хрупкого микроразрушения и механизма пластического скольжения. Первый связан с абсорбцией и химабсорбцией новых поверхностей разрушения в устье трещины в околороговой области нагружения, а второй проявляется в продвижении усталостной трещины в виде полос скольжения в околосредней области нагружения.

3.2.2 Анализ характера блочного нагружения на кинетику роста усталостных трещин на примере низколегированной стали

Испытания проводились на низколегированной конструкционной стали AISI 4030. Схемы нагружений представлены на рис. 3.19: а, б) одиночные перегрузки и недогрузки; в, г) пять последовательных перегрузок и недогрузок; д, е) трехступенчатые блоки нагружения – БСМ – большая, средняя, малая нагрузка; МСБ – малая, средняя, большая нагрузка.



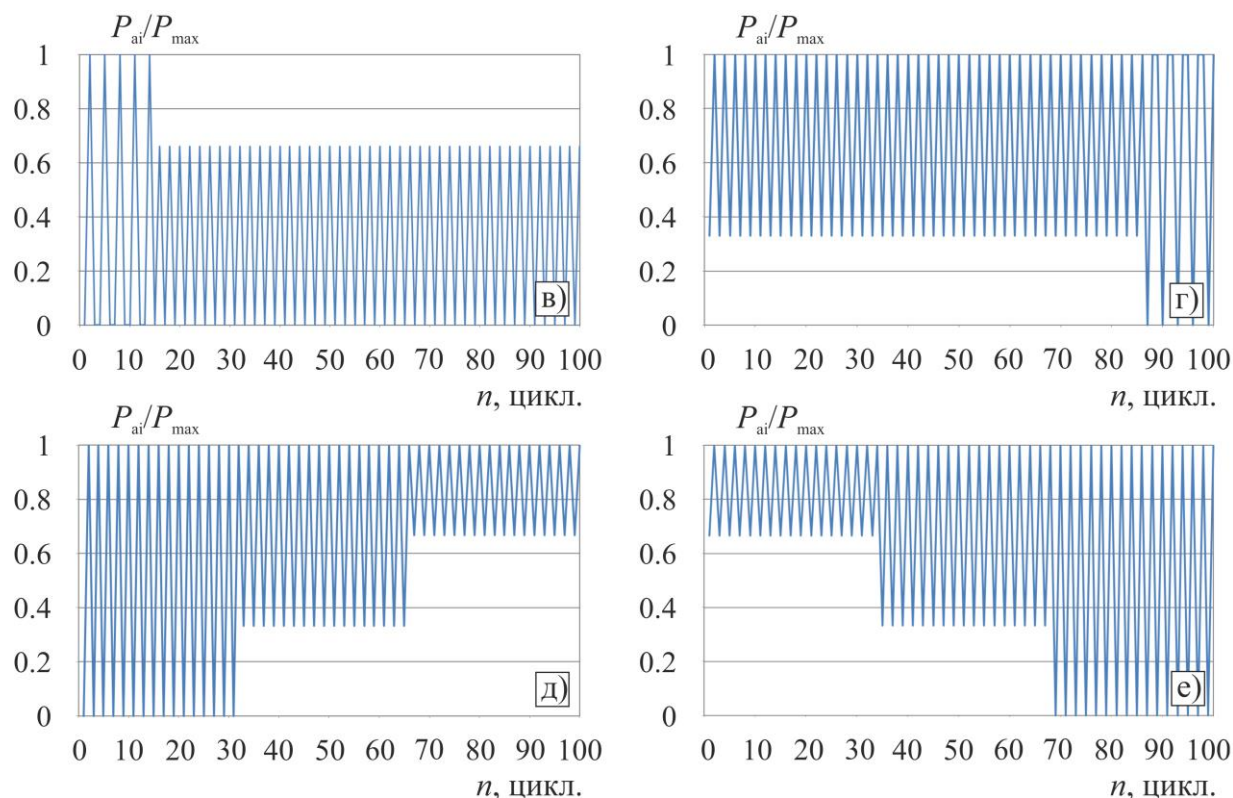


Рис. 3.19 – Блоки нагружения для исследования продолжительности роста трещин стали AISI 4030

Блок нагружения для такой ступенчатой нагрузки состоял из 99 циклов, каждая ступень нагружения составляла 33 цикла нагружения. Максимальная нагрузка на образец P_{\max} составляла 15 кН [91]. Данный тип блочного нагружения был смоделирован для оценки влияния одной или нескольких перегрузок или недогрузок на скорость распространения усталостной трещины (рис. 3.19а-г) в стали AISI 4030, а также уровня и последовательности ступеней нагружения с различной асимметрией (рис. 3.19 д,е). На рис. 3.20 показаны кривые роста трещин и КДУР согласно виду нагружения.

Кинетика роста трещины при одной перегрузке и одной недогрузке (кривые 1 и 2) по скорости развития и конечной долговечности близка к значениям испытания с пятью перегрузками и недогрузками (кривые 3 и 4) соответственно. Следовательно, можно сделать вывод о том, что вклад четырех последующих перегрузок и недогрузок после первой несущественно сказывается на распространении трещины в анализируемой стали.

Испытания стали на трещиностойкость при 3-х ступенчатом нагружении (БСМ) и (МСБ) показали значение роста трещины для режима МСБ большим на 7500 циклов по сравнению с режимом БСМ. Основную повреждающую часть в распространении трещины будет иметь одинаковый участок у обоих режимов с P_{\max} и $R=1$, остальные два участка будут вносить не такой вклад, так как их асимметрия больше нуля. В данном случае важную роль имеет последовательность именно этих двух участков с разной асимметрией.

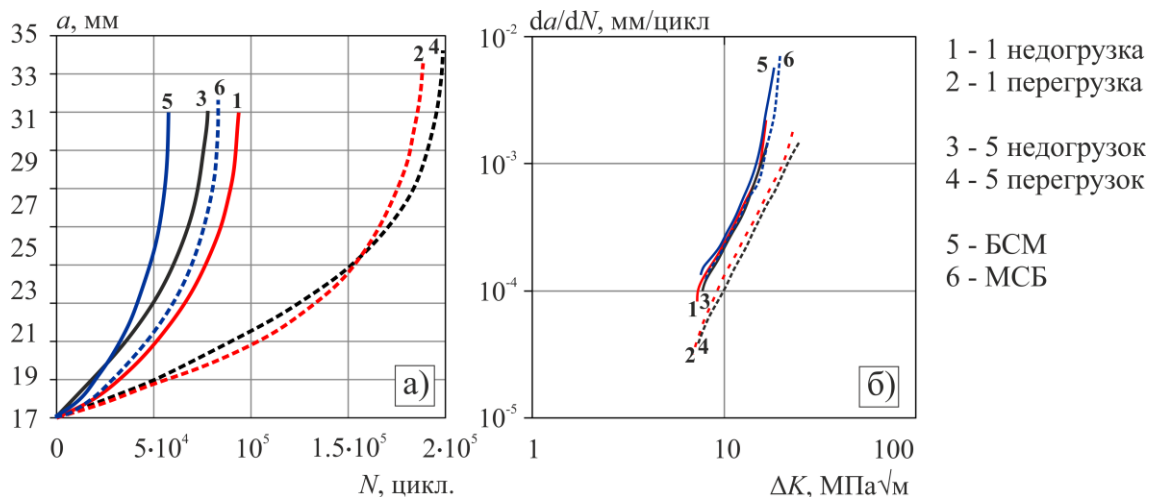


Рис. 3.20 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний стали AISI 4030 при различных типах блочных воздействий

Выше расположены кривые КДУР на рис. 3.20б, связанные с недогрузочными режимами нагружения (кривые 1 и 3). А также при испытаниях с трехблочными нагружениями БСМ и МСБ (кривые 5 и 6). Для этой группы кривых режимы нагружения проведены с положительными значениями асимметрии цикла R больше нуля. Ниже расположена группа кривых, связанных с перегрузками (кривые 2 и 4). Эти испытания соответствовали отнулевому нагружению $R=0$. Таким образом, нагружения с положительной асимметрией цикла R смещают кинетические диаграммы усталостного разрушения вверх. Похожее положение кривых можно наблюдать на рис. 3.6 при анализе перегрузочных и недогрузочных режимов алюминиевого сплава.

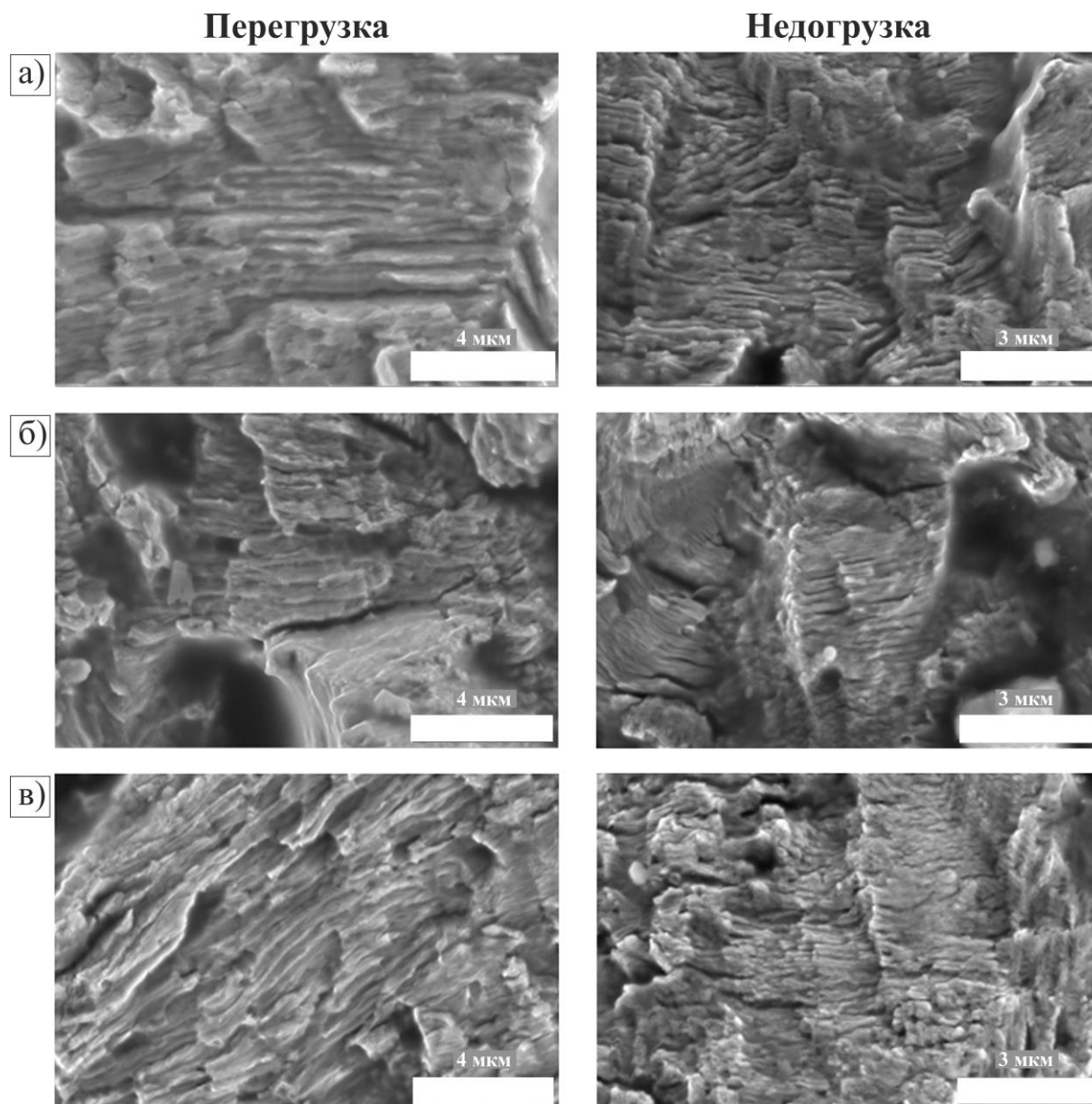


Рис. 3.21 – Усталостные полосы, определяющие локальную скорость усталостной трещины стали AISI 4030 при испытании с одной перегрузкой и одной недогрузкой: а) трещина 19 мм; б) трещина 21 мм; в) трещина 23 мм

Следует заметить, что характер разрушения исследуемого материала сопровождается изменением направления фронта продвижения трещины в различных фрагментах сплава. На рис. 3.21 показаны фрагменты развития усталостных полосок в стали, полученные с увеличением 25000 для одноперегрузочного (рис. 3.21а) и однонедогрузочного (рис. 3.12б) режимов нагружения для различных значений усталостных трещин. Усталостное

разрушение стали в поперечном, по отношению к прикладываемой нагрузке, направлении сопровождается развитием продольных разгрузочных трещин.

По мере роста трещины ширина усталостных полосок увеличивается, что отвечает росту ее скорости. На рис. 3.22 показано изменение локальной скорости развития трещины, определяемой как средняя величина пяти замеров ширины полосок в исследуемом фрагменте, соответствующем характерной величине развития трещины. На этом же рисунке показано изменение интегральной скорости развития трещины, полученной по показанию датчика раскрытия трещины.

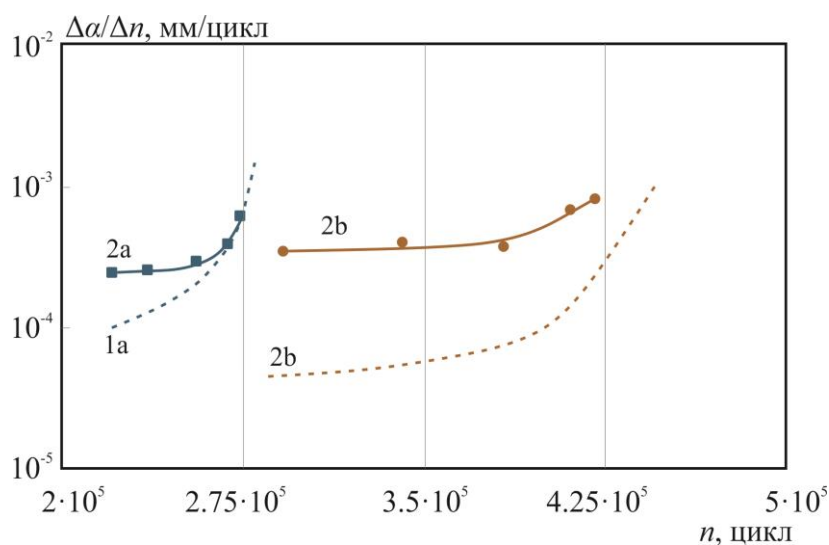


Рис. 3.22 – Сравнение интегральной (1) и локальной (2) скорости развития усталостной трещины стали AISI 4030 на среднем участке КДУР при недогрузочном (а) и перегрузочном (б) режиме циклического нагружения (блок нагружения 100 циклов, недогрузка и перегрузка по 5 циклов)

Отмечено, что характер изменения интегральной и локальной трещины усталости идентичны. Однако, интенсивность развития локальной трещины выше, чем ее значение в интегральной зависимости. Возможное объяснение этому может быть связано с тем, что замеры интенсивности локальной трещины усталости проводились посередине толщины образца, где материал находится в условиях плоского деформированного состояния по сравнению с его краями, которые испытывают плоское напряженное состояние. Скорость

развития трещины посередине образца при плоской деформации выше, чем по краям.

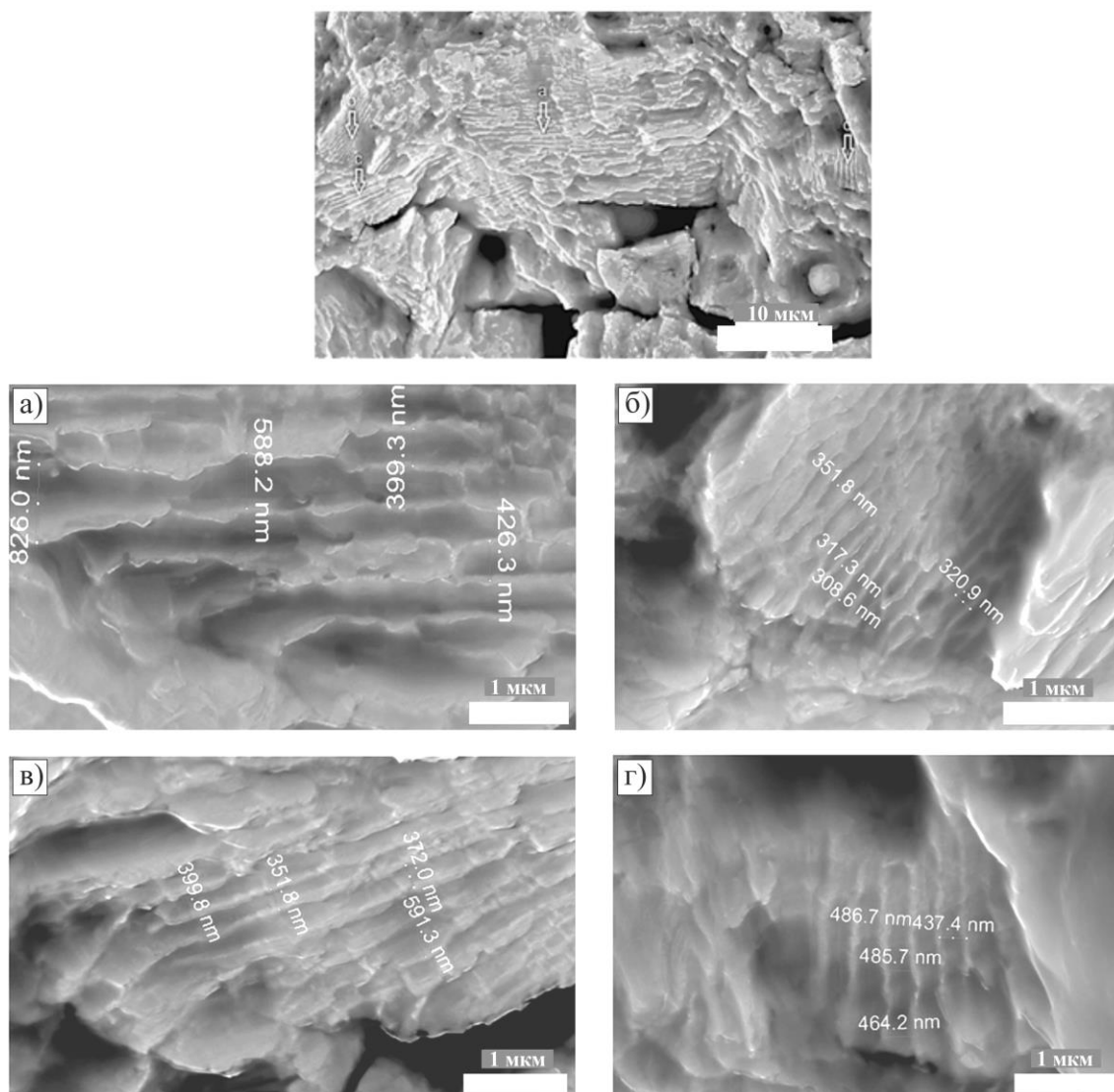


Рис. 3.23 – Ширина усталостных полосок, определяющих локальную скорость усталостной трещины стали AISI 4030 при испытании компактного образца на трещиностойкость для зерен с различной ориентацией минимальной прочности по отношению с интегральным ее продвижением а) – 0; б) – 28; в) – 65; г) – 90 градусов, длина трещины 30 мм

Поэтому показанная локальная скорость роста трещины может быть выше, чем интегральная скорость, являющейся средней скоростью продвижения трещины. Как отмечалось выше, направленность развития усталостной трещины весьма разнообразна.

Это показано на рис. 3.23, где на одном фрагменте структуры разрушения сплава наблюдается различная направленность усталостных полос, определяющих локальную скорость развития трещины от 0 до 90 градусов. Здесь же для различно ориентированных трещин был проведен их замер при одинаковом увеличении (50000 раз).

На рис. 3.24 показаны изменения локальной скорости роста усталостной трещины при длине 30 мм и различных видах нагружения в зависимости от их ориентации по сравнению с интегральным направлением движения трещины. Это может быть связано с различной прочностной ориентацией фрагментов структуры сплава.

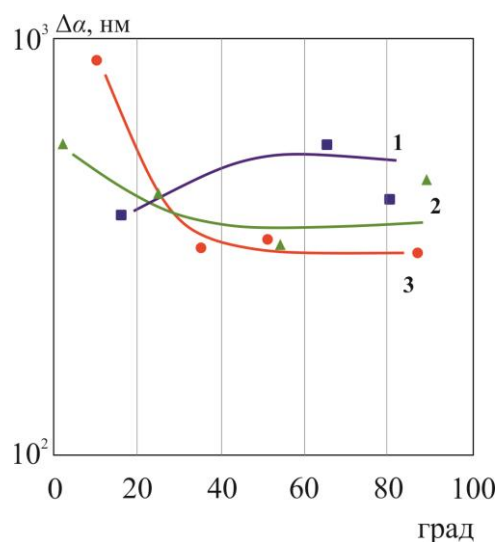


Рис. 3.24 – Изменение ширины усталостных полосок при нагружении компактного образца в зависимости от их наклона: 1 – недогрузка 5 циклов; 2 – БСМ; 3 – регулярное нагружение

Из проведенного исследования следует, что в пределах от 20 до 80 градусов по отношению к интегральному направлению развития трещины значения ширины усталостных полосок примерно одинаковы. Изменения наблюдаются в пределах от 0 до 20 градусов, когда трещина развивается в направлении интегрального ее развития. При совпадении направленности развития трещины с интегральной направленностью ее развития

увеличивается скорость ее продвижения (кривые 2 и 3). Для недогрузочного режима нагружения таких особенностей не выявлено.

Для высокопрочной низколегированной стали AISI 4030 характерно разновекторное распространение усталостной трещины, связанное с микронеоднородной зеренной структурой. Продольные трещины, возникающие по мере продвижения поперечной трещины, способствуют разгрузке жесткости напряженного состояния структурных элементов.

Сравнение локальной, связанной с изменением ширины усталостных полос в структуре сплава, и интегральной, определяемой по датчику раскрытия трещины, скорости трещины показали, что характер изменения скоростей распространения в обоих случаях идентичен. Различие в ее значениях определяется видом напряженного состояния, при котором оценивали локальную скорость ее распространения. Скорость трещины при плоской деформации выше, чем при плоском напряженном состоянии.

3.2.3 Влияние вида квазислучайного нагружения на кинетику роста усталостных трещин

Важным моментом в проведении прочностных расчетов является включение квазислучайной реальной нагрузки в оценку силового нагружения и надежности конструкций. При этом необходимо обеспечить сравнение полученных результатов между собой для обеспечения новых технологических и конструктивных решений. Поэтому в инженерной практике для расчетов получили развитие стандартизированные спектры нагрузки для различных технических объектов, которые получают на основании изучения эксплуатационной нагруженности реальных аналоговых технических объектов. Рассматривается рост макротрещин при квазислучайном нагружении. Используемые спектры для проведения исследований в данной диссертации на трещиностокость металлов в нормализованном состоянии показаны на рис. 2.6, 3.25, 3.26.

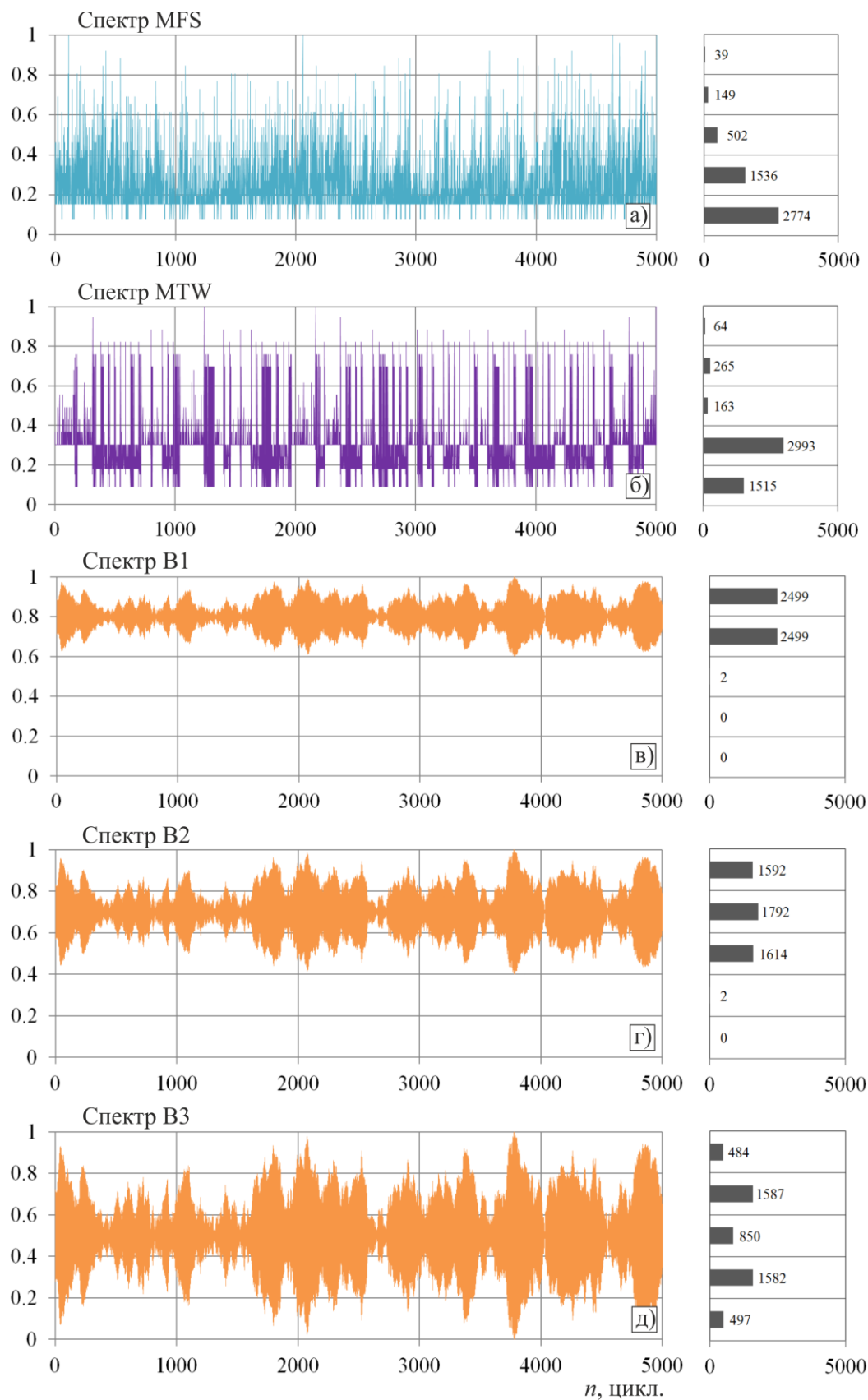


Рис. 3.25 – Используемые в диссертации спектры нагружения

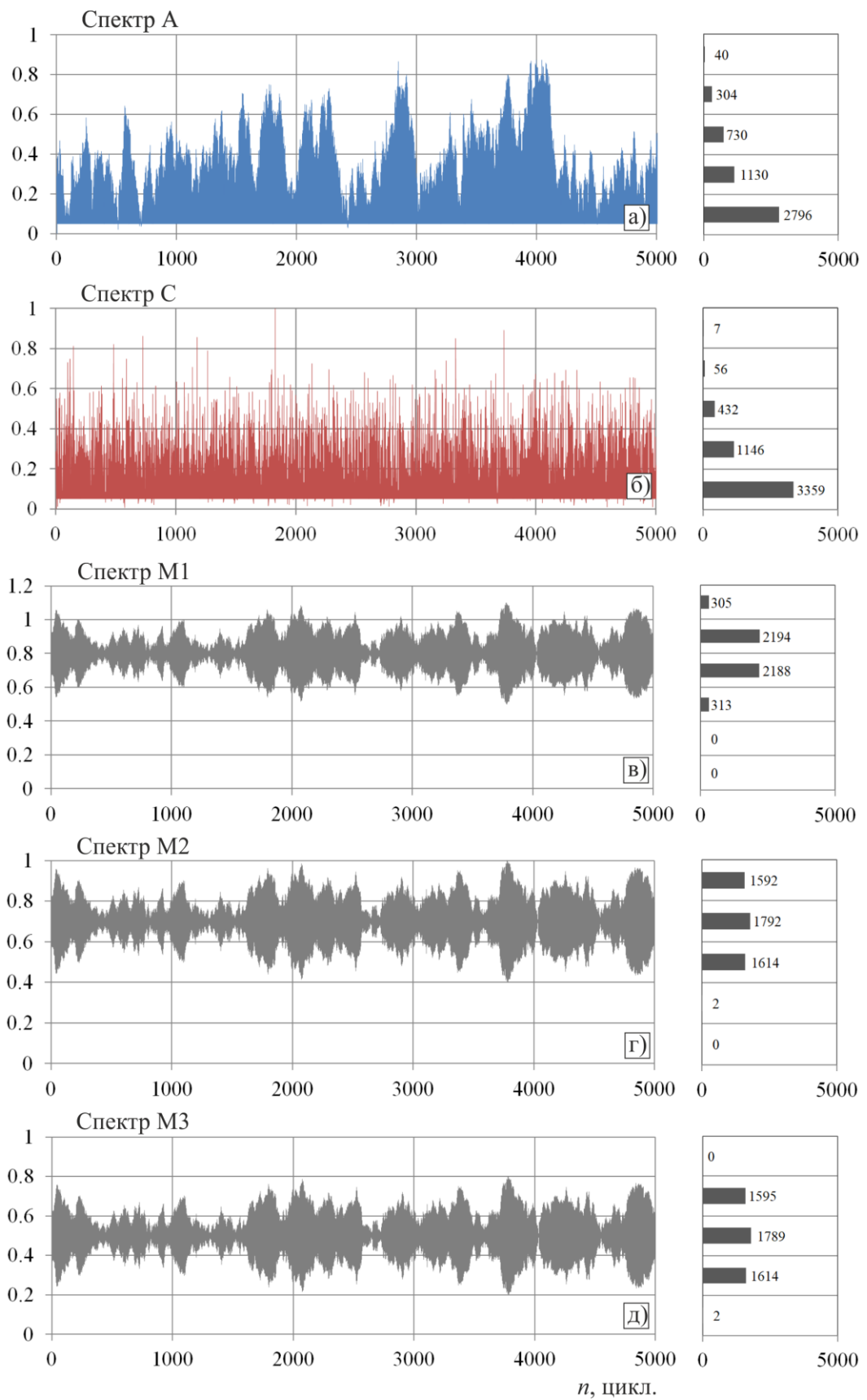


Рис. 3.26 – Используемые в диссертации спектры нагрузки

Алюминиевый сплав AL 2024-T3

Программа испытаний алюминиевого сплава при квазислучайном нагружении представлена спектрами Saetrans, MFS и MTW. На рис. 3.27 показаны результаты испытаний. Испытания проводились при разной асимметрии и P_{\max} . Для каждого спектра асимметрия были постоянна: для Saetrans $R=0$, MFS $R=0$, MTW $R=0.3$. P_{\max} варьировалось от 0 до 3.5 кН.

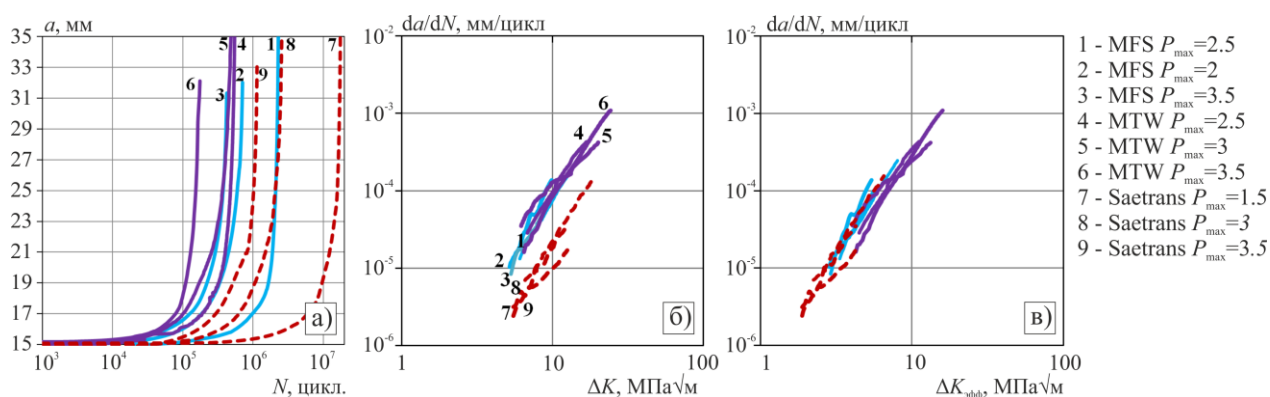


Рис. 3.27 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний алюминиевого сплава AL 2024-T3 при различных типах квазислучайного воздействия

Сравнительный анализ влияния силовых параметров при переменном нагружении спектрами показал, что для всех спектров нагружения с увеличением P_{\max} продолжительность роста усталостной трещины падает. Такое же влияние на кинетику роста трещины оказывает размах нагрузок ΔP . Особенностью полученных кривых КДУР является их группировка по различным спектрам нагружения с тенденцией их параллельности в рассматриваемых координатных осях друг с другом. Более высокую скорость роста трещин в различных спектрах нагружения имеют спектры с наибольшими значениями максимальной нагрузки.

С повышением асимметрии наблюдается снижение скорости роста трещины, это видно по испытаниям со спектром Saetrans, у которого $R=0.5$. Данный спектр имеет самое большое число циклов из рассматриваемых спектров в диапазоне 0.8-1.0 в нормализованном состоянии, что замедляет рост трещин, это видно на рис. 3.27а, серия КДУР расположены ниже других

испытаний (кривые 7-9). У спектра MFS основное количество циклов сконцентрировано в диапазоне 0-0.2, как и у спектра Saetrans, но асимметрия $R=0$ и число циклов в высоком диапазоне ниже, поэтому скорость роста выше, и КДУР расположены левее и выше (кривые 1-3). Спектр MTW с $R=0.3$ имеет основное скопление циклов в среднем диапазоне 0.2-0.4 и также небольшое количество циклов с высокой амплитудой. Спектр содержит группы циклов с одинаковой средней амплитудой следующих последовательно, что вносит больший вклад в развитие трещины, чем разноамплитудные циклы спектра MFS и Saetrans (кривые 4-6).

Стали AISI 4030, 40, 40X и 09Г2

Испытания на сталях AISI 4030, 40 и 40X со спектрами A и C, SAE, а также MFS и MTW для стали 40X, имели одинаковое значение максимальной нагрузки блока нагружения P_{\max} равное 15 кН. Для сталей AISI 4030, 40 и 40X результаты испытаний на рис. 3.28-3.31 представлены в сравнении с испытанием при регулярном нагружении для каждой стали соответственно, т.к. P_{\max} для этих испытаний постоянное. Для стали 09Г2 представлены только результаты квазислучайных испытаний. Максимальная нагрузка P_{\max} для стали 09Г2 варьировалась от 3.5 до 7 кН, а асимметрия $R=0-0.1$. Результаты испытаний по сталям при квазислучайном нагружении в виде кривых скоростей роста и КДУР показаны на рис. 3.28-3.31.

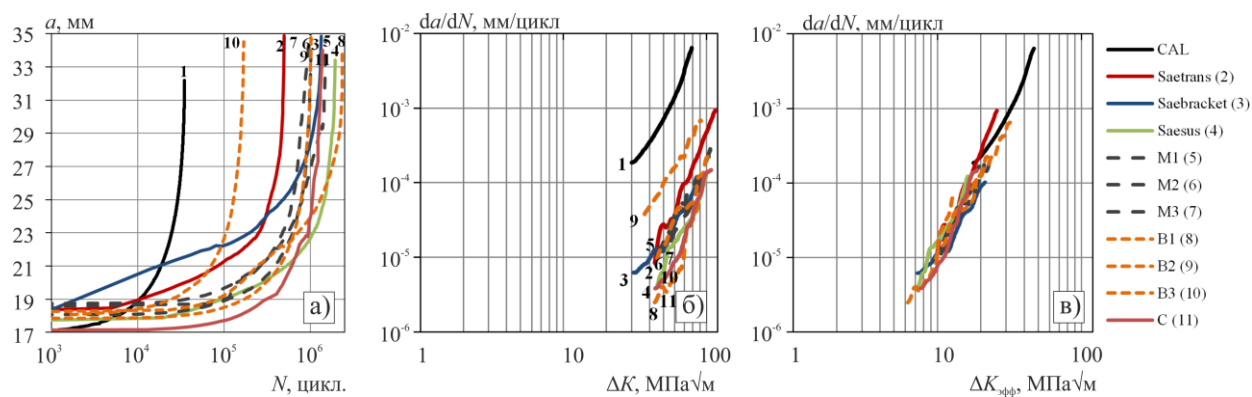


Рис. 3.28 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний стали AISI 4030 при квазислучайном нагружении

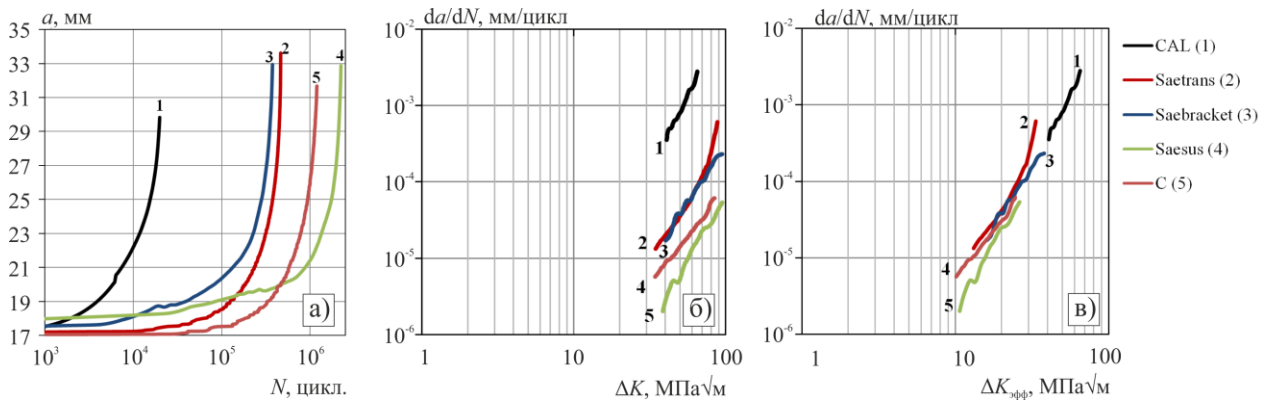


Рис. 3.29 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний стали 40 при квазислучайном нагружении

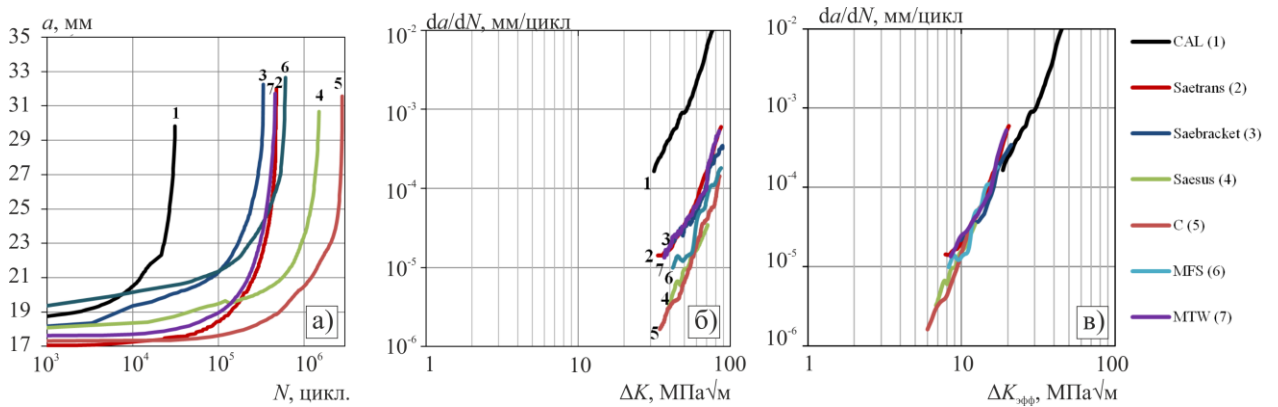


Рис. 3.30 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний стали 40X при квазислучайном нагружении

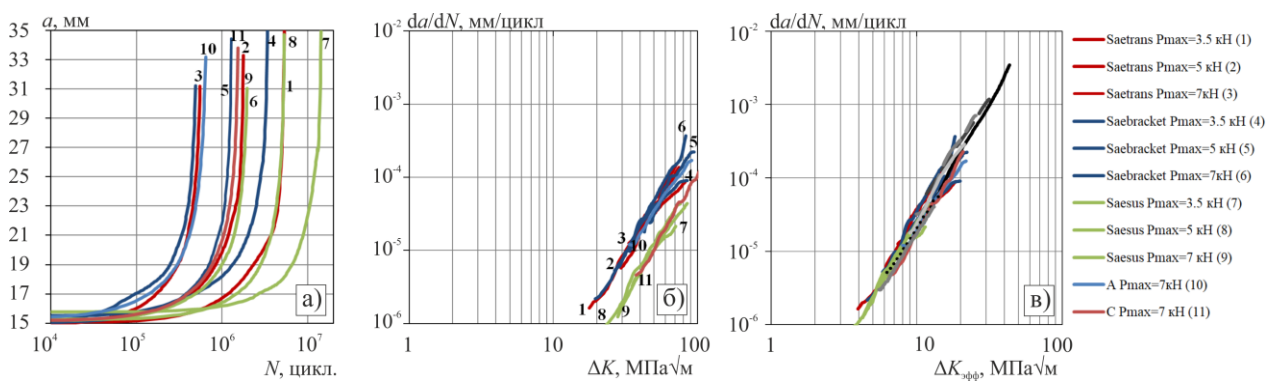


Рис. 3.31 – Кривые роста (а) и КДУР (б) для испытаний стали 09Г2 при квазислучайном нагружении

Исследование кинетики стали AISI 4030 спектрами В1-В3 с переменными значениями R (поз.8-10) рис. 3.28 выявили увеличение долговечности роста трещины от 0.168 до 2.5 млн. циклов с увеличением диапихона от 0 до 0.6, а, следовательно, уменьшением размахов ΔK в спектре нагружения. Нерегулярное нагружение спектрами М1-М3 с переменным P_{\max} от 16.5 до 12 кН с постоянным значением ΔK и уменьшением R от 0.455 до 0.25 (поз.5-7) показали, что такое изменение силовых параметров приводит к снижению долговечности роста трещины и увеличению влияния «закрытия» трещины и коэффициента нерегулярности [90]. Анализ КДУР спектров В и М показал, что наибольшее влияние на положение КДУР для этих спектров оказывает амплитуда нагрузки и асимметрия блока нагружения. При постоянной амплитуде нагружения спектра М кривые испытаний отличаются незначительно, что нельзя сказать о данных по спектру В, где постоянной было значение максимальной нагрузки.

Спектры А и С имеют схожее распределение циклов в нормализованном состоянии в диапазоне от 0 до 1 с шагом 0.2, однако у спектра С последовательность циклов более хаотична в отличие от спектра А, у которого наблюдаются участки с постепенно возрастающей амплитудой циклов до максимального значения, что будет более существенно будет вносить вклад в распространение трещины, в отличие от одиночных максимальных пиков спектра С, что можно увидеть на примере стали 09Г2.

Скорость распространения трещин для стали 09Г2 для спектра Saesus медленнее, чем для остальных спектров. На рис. 3.31а слева направо можно видеть увеличение скорости при повышении P_{\max} . Однако весьма важную роль в расположении этих кривых влияет характер квазислучайного нагружения.

Для стали AISI 4030 были проведены фрактографические исследования полученных изломов при испытаниях со спектрами А и С с целью определения характерных особенностей разрушения и сравнения локальной (по изучению разрушения структурных элементов) и интегральной (по

замеру датчиком раскрытия трещины) скорости распространения трещины на среднем участке КДУР.

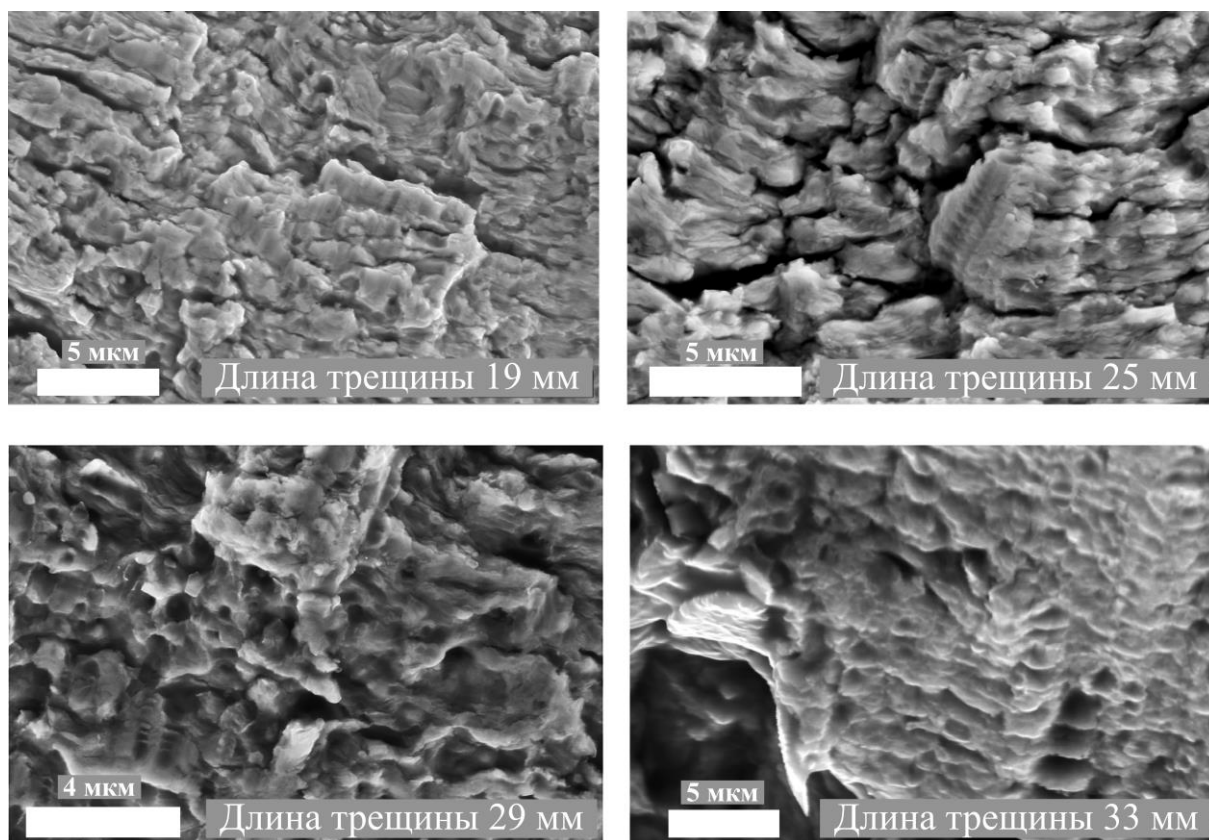


Рис. 3.32 – Фрактография излома стали AISI 4030 после разрушения спектром А с различной длиной трещины

На рис. 3.32 и 3.33 показаны фрактографии разрушения для различных величин трещин в процессе нагружения модельными спектрами А (рис. 3.32) и С (рис. 3.34). В обоих исследованиях характерен пластинчатый характер разрушения металла по фрагментам и блокам структуры (с увеличением 25000 раз).

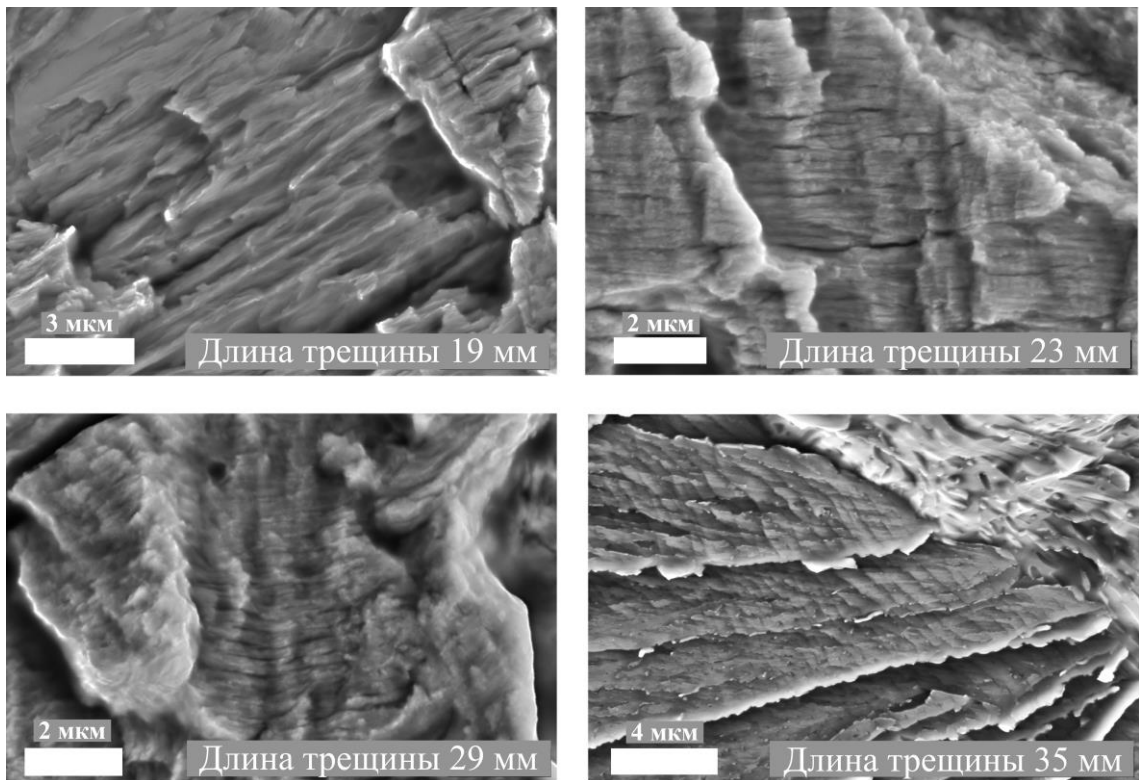


Рис. 3.33 – Фрактография излома стали AISI 4030 при спектре С с различной длиной трещины

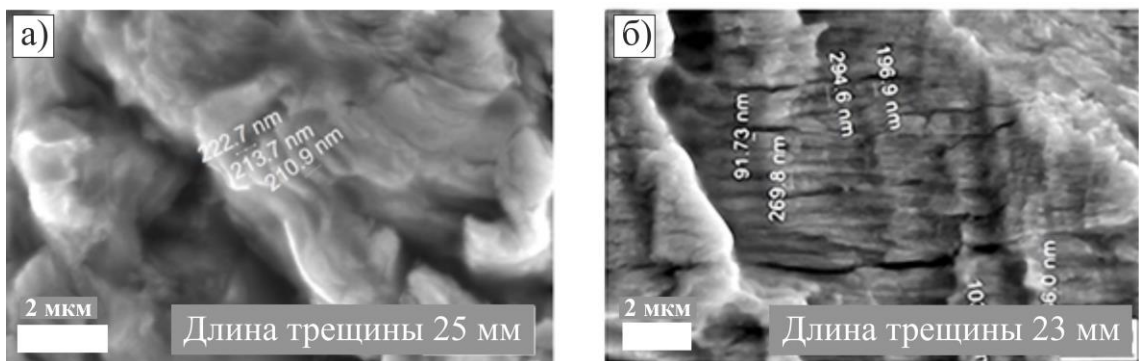


Рис. 3.34 – Виды усталостных бороздок в стали AISI 4030 при нагружении : а – спектр А, а = 25 мм; б – спектр С, а = 23 мм

Для сплава, нагруженного спектром А, наряду с пластинчатым разрушением, особенно для развитых трещин 23-33 мм, наблюдаются бугорки, что может быть связано с нормальным отрывом берегов трещины при ее продвижении. На фрагментах при длине трещины 25-29 мм видны «траковые» следы, связанные с движением выделенных из структуры

твердых включений в процессе циклирования при контактном взаимодействии берегов трещины. Фрактографии фрагментов в плоскости развития трещины при нагружении спектром С показали, что и в этом случае характер разрушения носит пластинчатый вид, но более упорядоченный, в чем просматривается влияние характера квазислучайного спектра нагружения.

В процессе изучения фрактографий фрагментов излома, полученных при разрушении, проводился замер усталостных бороздок, соответствующих фиксированным величинам усталостной трещины. По фрагменту излома замерялось 10 бороздок и вычислялось их среднее значение, соответствующее данной длине трещины. Было принято, что одна бороздка соответствует продвижению трещины за один цикл нагружения.

Хотя для спектра С (рис. 3.35) общая локальная скорость на среднем участке КДУР выше, чем для спектра А, однако в переходной области от среднего участка к критическому развитию, скорость для спектра А (кривая 1) увеличивается и опережает скорость движения по спектру С (кривая 2), поэтому продолжительность движения трещины от спектра А ниже, чем продолжительность роста трещины от спектра С. Одной из причин такого явления можно объяснить тем, что замер раскрытия трещины датчиком раскрытия трещины проводится в условиях силового взаимодействия с накладыванием на процесс внешнего силового воздействия и действующих на процесс остаточных напряжений. Замер усталостных бороздок на фрактографии излома проводится на поверхности трещины, когда структура сплава находится в равновесном состоянии и действие остаточных напряжений незначительно.

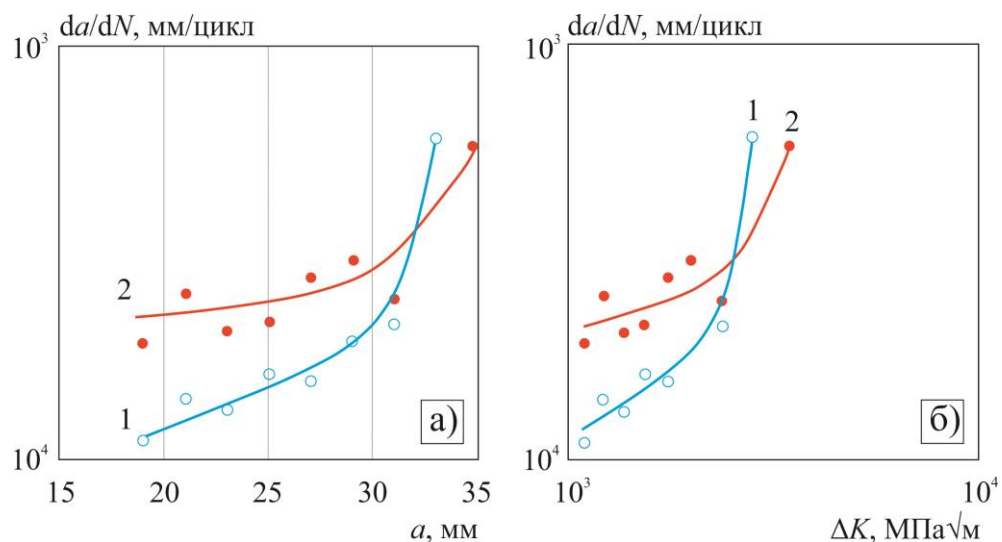


Рис. 3.35 – Изменение скорости роста трещины для стали AISI 4030 в зависимости от величины усталостной трещины (а) и размаха коэффициента интенсивности напряжений (б) на основании изучения фрактографии сплава

На рис. 3.36 показана КДУР развития трещин под внешним воздействием спектров А и С, полученная замером раскрытия трещины с помощью датчика раскрытия трещины (2) и такая же кривая, полученная на основании замера усталостных бороздок на фрактографии излома (1).

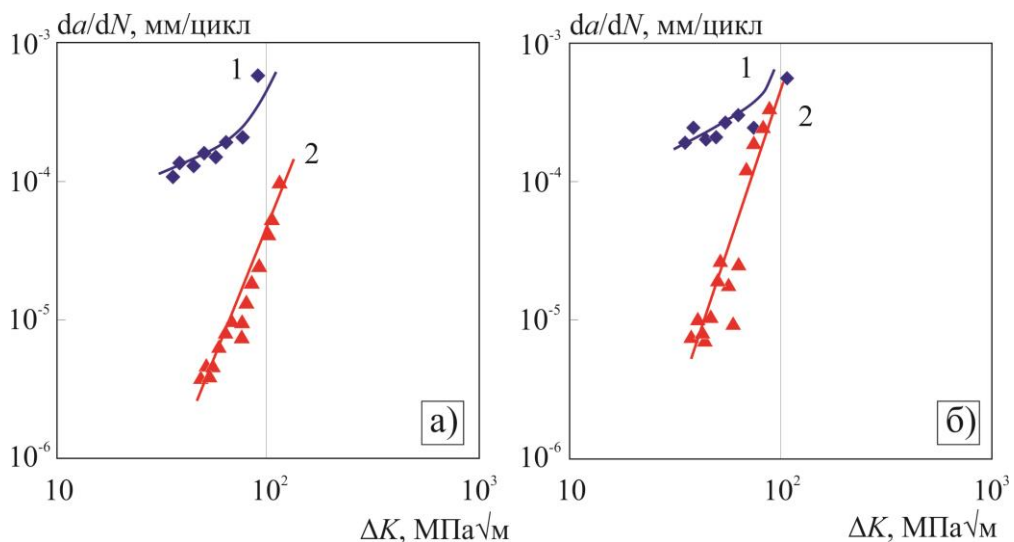


Рис. 3.36 – Изменение скорости роста трещины для спектра А (а) и спектра С (б) в зависимости от размаха коэффициента интенсивности напряжений на основании фрактографии сплава (1) и замера скорости трещины с помощью датчика раскрытия трещины (2)

Результаты показывают, что для этого испытания скорость роста трещины при изменении размаха коэффициента интенсивности на среднем участке выше при ее определении на фрактографии излома, чем при оценки таковой по раскрытию трещины с помощью датчика раскрытия трещины. По мере развития трещины и ее ускоренному развитию интенсивности кривых КДУР при разных замерах практически совпадают, а для спектра С совпадают и значения скорости.

Различный характер квазислучайного нагружения оказывает влияние на кинетику развития усталостной трещины не только при измерении ее продвижения с помощью замера датчиком раскрытия устья трещины, но и замера ее скорости по усталостным бороздкам на фрактографии излома. Отмечено, что измеренная локальная скорость продвижения трещины, полученная замером бороздок для исследуемой стали выше интегральной, полученной замером ее раскрытия датчиком раскрытия трещины на всей длине ее роста. Совпадение значений наблюдалось только для спектра С в критической области роста трещины при большой продолжительности ее развития.

3.3 Оценка характера нерегулярного нагружения и учет закрытия трещины на кинетику ее роста

Мера нерегулярности на основе общего сопротивления материала усталостному разрушению

Оценивать различия нерегулярного нагружения предлагается использованием коэффициента полноты (нерегулярности) блока программного нагружения V , определяемого по уравнению 3.1:

$$V = \left[\frac{1}{v_b} \left[\sum_{i=1}^{v_b} v_{ai} \left(\frac{\Delta P_{ai}}{P_{\max}} \right)^m \right] \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3.1)$$

где v_b , v_{ai} – продолжительность используемой выборки и блока переменного нагружения с нагрузкой ΔP_{ai} ; P_{max} – максимальная нагрузка блока нагружения; $\Delta P_{ai} / P_{max}$ – нормированная i -ая амплитуда нагружения, коэффициент где m – коэффициент наклона кривой выносливости при симметричном циклическом нагружении в координатах $(lg - lgN)$. Для используемых стандартных спектров нагружения $v_{ai}=1$.

Взаимосвязь характеристики нерегулярности по формуле 3.1 с продолжительностью роста усталостной трещины, на примере сталей AISI 4030, 40 и 40X и алюминиевого сплава AL 2024-T3, показана в рис. 3.37. Где N_{Σ} – экспериментальная продолжительность роста усталостной трещины при нерегулярном нагружении, N_{CAL} – экспериментальная продолжительность роста при регулярном нагружении с силовыми параметрами не изменяемыми в процессе циклического нагружения. Для регулярного нагружения величина V равна единице. Для других блоков и спектров нагружения значение V уменьшается с уменьшением количества пиковых нагрузок [99].

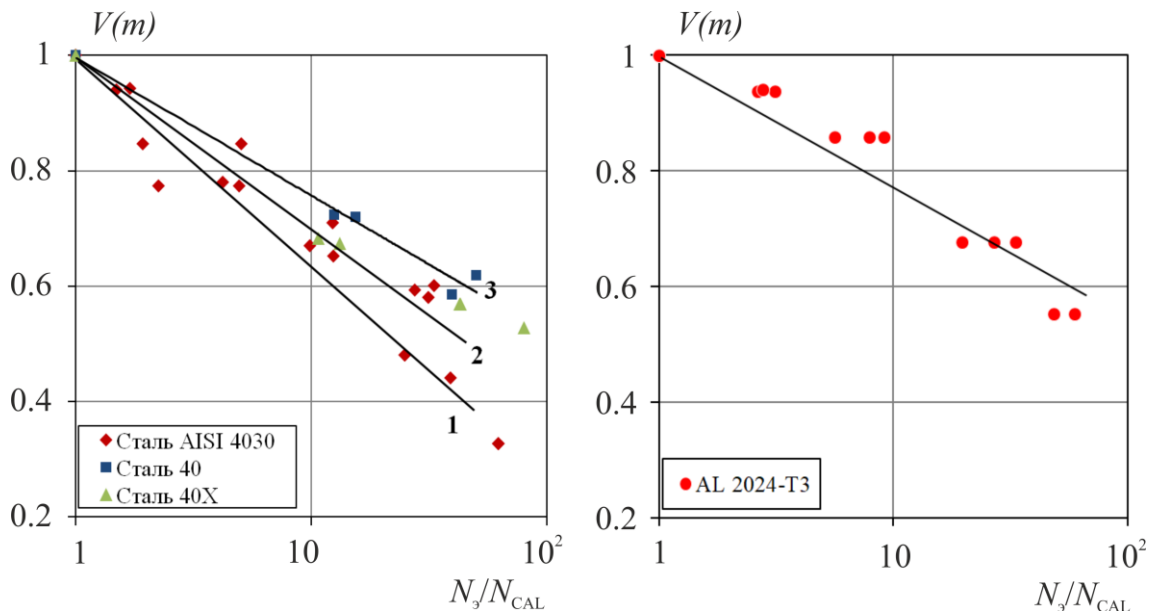


Рис. 3.37 – Оценка относительной долговечности роста трещины от величины коэффициента нерегулярности $V(m)$ блоков и спектров нагружения для сталей и алюминиевого сплава

Оказывает влияние на значение V угол наклона кривой выносливости m , что отражено на рис. 3.37, где $V(m)$ – расчетные значения коэффициента нерегулярности по формуле 3.1. Данную зависимость предлагается использовать в качестве первого критерия для оценки нерегулярности нагружения. Как видно из рис. 3.37, данный критерий нерегулярности переменного нагружения $V(m)$ для блоков и различных спектров нагружения достаточно хорошо связан с долговечностью роста трещины на ее среднем участке разрушения. Различный наклон этих кривых по разным сталям свидетельствует о том, что на кинетику роста усталостной трещины могут оказывать влияние механические свойства металла, в частности ее пластические свойства. Чем выше пластичность стали, тем больше энергии затрачивается на формирование пластической зоны в устье трещины, больше продолжительность роста трещины при одинаковых силовых воздействиях. Поэтому сталь 40 лучше сопротивляется продвижению трещины, чем сталь AISI 4030 и сталь 40X. Описание взаимосвязи кинетики роста трещин для сталей с характером квазислучайного нагружения, определяемого мерой нерегулярности V , показывает, что эту связь можно описать одинаковой степенной функцией, но с разными постоянными определяющими их наклон в полулогарифмических координатах $V - \lg N$ и связанными с пластическими свойствами материалов.

Мера нерегулярности на основе сопротивления материала трещиностойкости.

Для определения V по уравнению 3.1 необходимо знать не только статистические параметры внешнего переменного нагружения, но параметр m , что требует, по меньшей мере, построение кривой выносливости. Изучение кинетики роста усталостной трещины должно быть связано не только с характером внешнего переменного нагружения, но и критериальными параметрами, описывающими взаимосвязь внешнего нагружения и кинетики роста трещины. Поэтому было бы удобно представить уравнение 3.1 в другом виде, приняв $m = n$, где n – коэффициент

наклона кривой КДУР в координатах $(da/dN-\Delta K)$ при регулярном нагружении. Учитывая, что значения n для разных материалов и видов нагружения могут принимать различные величины, было бы целесообразным принять для исследуемых сталей этот коэффициент постоянным, равным его среднему значению, для сталей принимаем $n=3.5$, а для алюминиевого сплава AL 2024-T3 этот коэффициент будет равен 3.35. В этом случае уравнение 3.1 примет следующий вид [96] и его предлагается использовать в качестве второго критерия нерегулярности нагружения:

$$V = \left[\frac{1}{v_b} \left[\sum_{i=1}^{v_b} v_{ai} \left(\frac{\Delta P_{ai}}{P_{\max}} \right)^n \right] \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3.2)$$

Зависимость меры нерегулярности V по второму критерию по формуле 3.2 для различных сталей и характера переменного нагружения показаны на рис. 3.38, где $V(n)$ – расчетные значения коэффициента нерегулярности по формуле 3.2.

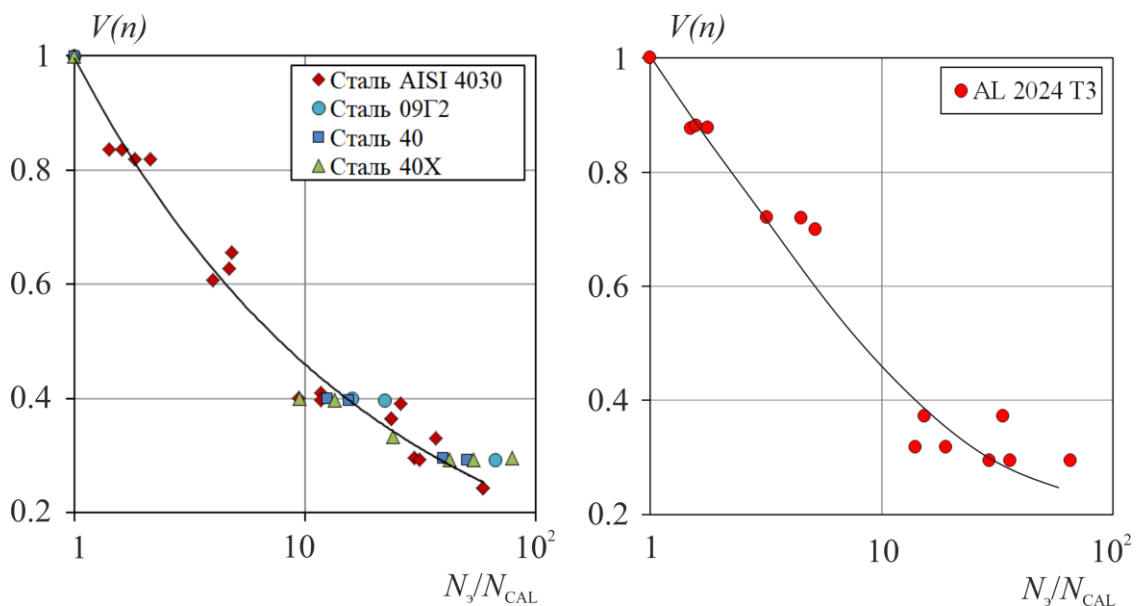


Рис. 3.38 – Оценка относительной долговечности роста трещины по второму критерию от величины нерегулярности $V(n)$ блоков и спектров нагружения для сталей и алюминиевого сплава

Следует заметить, что такой подход позволяет отказаться от дополнительных испытаний гладких образцов исследуемых сталей при

симметричном циклическом нагружении для определения наклона кривых выносливости m в двойных логарифмических координатах. Расчетные значения коэффициента нерегулярности определены через n для каждого используемого переменного нагружения и приведены в таблице А1 в колонке 4. Все последующие расчеты в данной работе используют именно V , определяемые по формуле 3.2.

Таблица 3.2 – Значение параметров, входящих в уравнение 3.2 для материалов

Наименование	Обозн.	сталь AISI 4030	сталь 09Г2	сталь 40Х	сталь 40	AL 2024- Т3
Учет наклона кривой выносливости	m	17.8	12	11.8	14.6	11
Учет наклона кривой КДУР	n	3.5	3.5	3.5	3.5	3.35

Для автоматизации вычислений при подготовке настоящей работы была разработана программа, облегчающая нахождение параметра меры нерегулярности для различных типов нагружения. Было подготовлено 2 модификации программы – для блочных испытаний с различными типами перегрузок и недогрузок и для квазислучайных нагружений [100, 101]. Интерфейс программ показан на рис. 3.39 и 3.40.

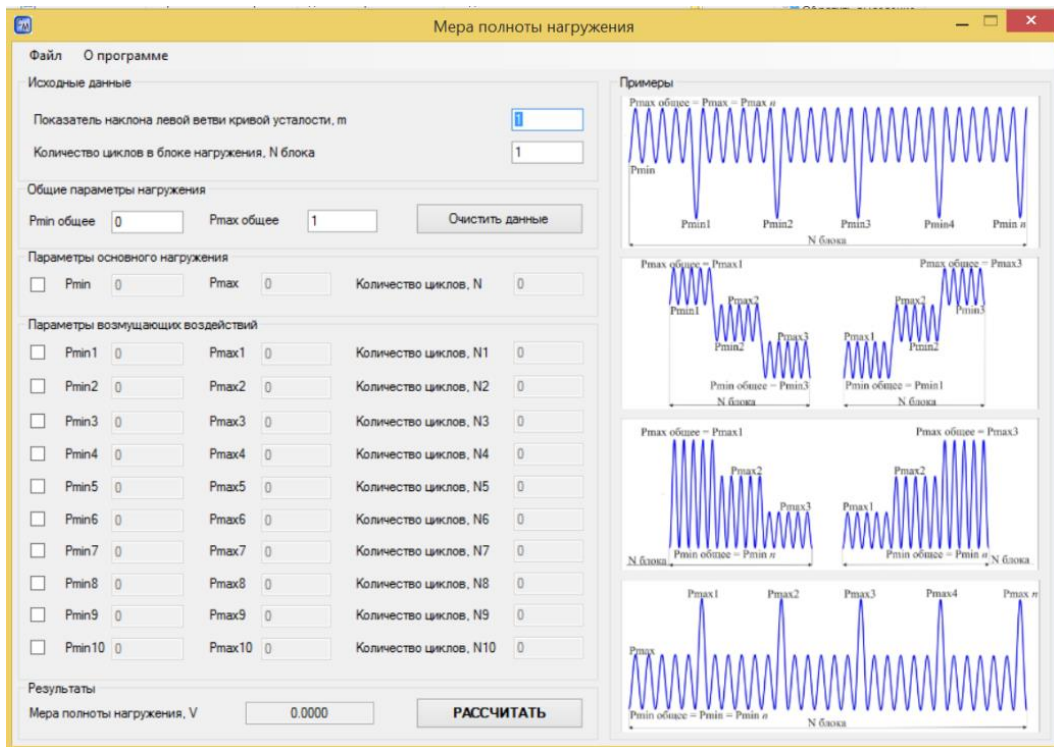


Рис. 3.39 – Интерфейс программы по расчету меры нерегулярности для оценки различных форм внешнего блочного возмущающего воздействия при нерегулярном циклическом нагружении

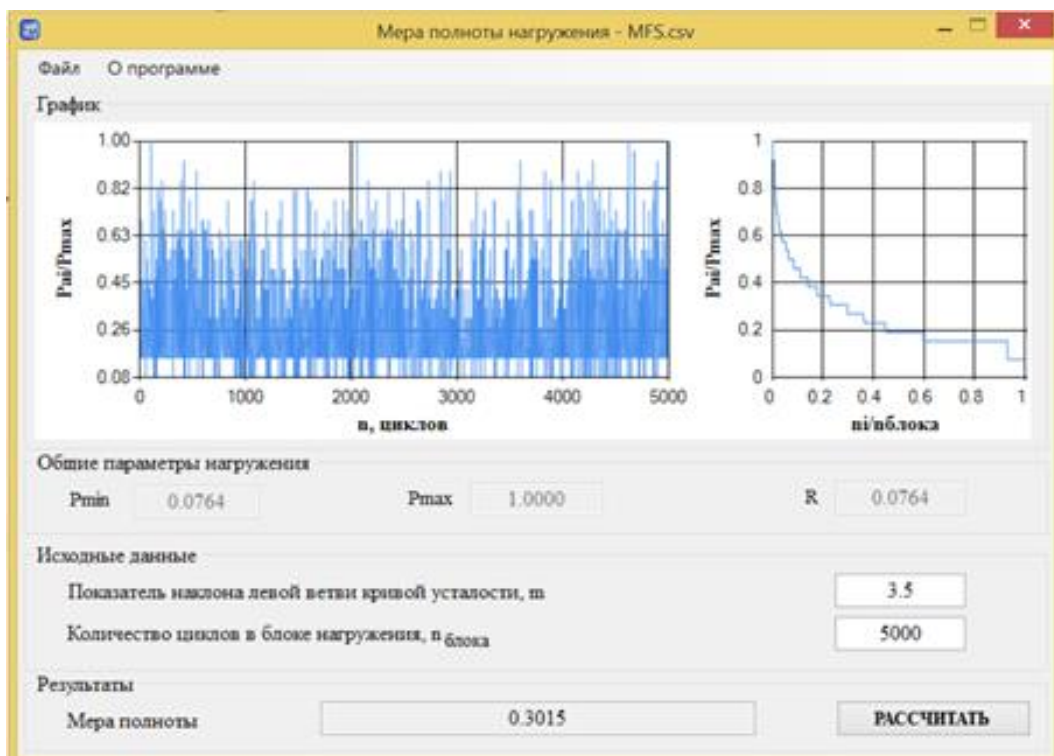


Рис. 3.40 – Интерфейс программы по расчёту меры нерегулярности блока спектра квазислучайного нагружения

Оценив характер нерегулярного нагружения, и рассмотрев КДУР для разных материалов в блоках с переменной нагрузкой различного характера можно сказать, что расположение этих кривых в основном определяется величиной меры нерегулярности нагружения V . Чем меньше величина V для спектра при постоянной максимальной нагрузке, тем скорость роста трещины меньше и продолжительность ее выше.

Для учета явления «закрытия» трещины, имеющем место при асимметриях цикла R менее 0.6-0.7, и снижающем скорость роста трещины за счет уменьшения размаха ΔK вводится параметр U . Который был предложен Я. Схайве [29], описывающий закрытие трещины с асимметрией $0.1 \leq R \leq 0.7$ на алюминиевом сплаве 2024-T3 и определяемый по формуле (1.11) для алюминиевого сплава и (1.13) для сталей.

В нашем исследовании использован принцип по замене нерегулярного циклического нагружения эквивалентным регулярным нагружением по повреждаемости соответствующем нерегулярному, путем введения меры нерегулярности блока нагружения V , определяемым по формуле (3.2). В результате использования коэффициента V размах эффективного КИН в устье трещины при нерегулярном и регулярном нагружении предлагается определять по формуле:

$$\Delta K_{\text{эфф}} = \Delta K_i \cdot V \cdot U \quad (3.3)$$

Данная формула учитывает влияние «закрытия» трещины, выраженное через асимметрию блока нагружения R на скорость роста трещины, а также характер нерегулярного нагружения через V .

Было проведено перестроение кривых КДУР для алюминиевого сплава и сталей с учетом эффективного коэффициента интенсивностей напряжений $K_{\text{эфф}}$ (3.3). Принятый подход показал правильность принятых допущений. Кривые КДУР для исследуемых материалов при регулярном и нерегулярном нагружении различными спектрами и силовыми параметрами стремятся сгруппироваться на одни эквивалентные кривые. Эффективные КДУР для

отдельных материалов или типов испытаний приведены на рис. 3.1в, 3.3в, 3.13в, 3.28-3.31в.

Проведена попытка совместной группировки всех исследуемых сталей и алюминиевого сплава при различных видах нерегулярного нагружения на одну кривую КДУР на основании введенного значения $\Delta K_{эфф}$. Общий график для алюминиевого сплава (а) и сталей (б) приведен на рис. 3.41.

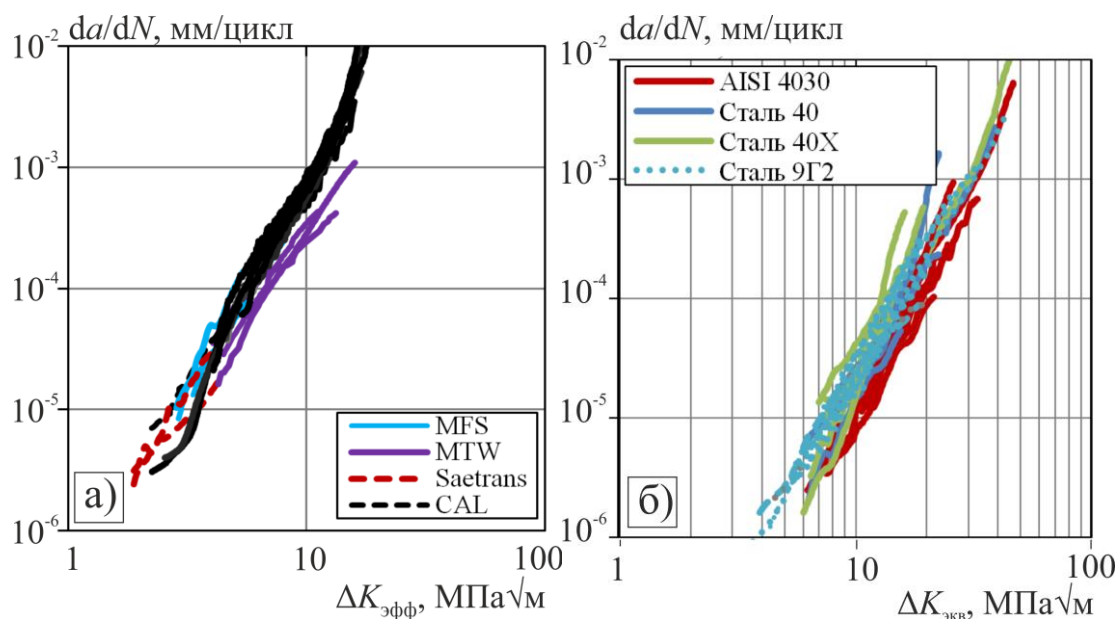


Рис. 3.41 – Обобщенные эффективные КДУР для: а) алюминиевого сплава; б) сталей

На рис. 3.41 показано совмещение эффективных КДУР, полученных при регулярном и нерегулярном нагружениях через их представление с эффективным коэффициентом интенсивности напряжений $\Delta K_{эфф}$. Такой подход однозначно может описывать влияние различных силовых параметров и характер нерегулярного нагружения на интенсивность напряжений в устье растущей усталостной трещины.

Выводы по третьей главе

1) Для интегральной оценки влияния характера внешнего циклического нагружения на рост трещин введен параметр нерегулярности блочного и случайного нагружения V . Проведенный анализ продолжительности роста исследуемых материалов при нерегулярном нагружении показал наличие связи параметров долговечности и V .

2) Проведены испытания компактных образцов при регулярном и нерегулярном циклическом нагружении на трещиностойкость при различных силовых параметрах и характере квазислучайного нагружения. Они показали, что использование эффективного КИН, учитывающего «закрытие» трещины» и нерегулярность переменного нагружения позволяет свести кривые КДУР к эквивалентной кривой.

3) Проведено фрактографическое исследование структуры разрушения материалов для оценки изменения скорости роста трещин при переменном нагружении. Возмущающие воздействия в виде перегрузок и недогрузок накладываемые на регулярное нагружение приводят к изменению долговечности роста трещин при измерении усталостных бороздок.

4 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

4.1 Анализ продолжительности роста усталостных трещин по различным моделям и программным продуктам

Для получения корректных результатов необходимо использовать модели, учитывающие воздействие перегрузок и недогрузок на величину пластической зоны в устье трещины в процессе регулярного циклического нагружения. Этому вопросу посвящены разработки многих исследователей [103, 104]. В источнике [45] приведены результаты сравнительного анализа кинетики роста трещин по существующим моделям оценки продолжительности роста усталостной трещины для испытаний с перегрузками. Показано, что модели Элбера, Барсома, Уилера и Уилленборга не учитывают последовательность перегрузок в перегрузочном блоке, т.е. не способны учитывать взаимодействие последовательностей нагружения. Однако существуют программные продукты, способные оценивать продолжительность роста усталостной трещины с учетом данного явления. Одной из таких программ является NASGRO. Функциональность данной программы [105] достаточно широка и позволяет прогнозировать усталостный срок службы $S(T)$ образцов при нагружении с переменной последовательностью нагрузок (амплитуд). Данный программный продукт разработан NASA для оценки трещиностойкости авиационных материалов и конструктивных элементов.

В NASGRO внедрено несколько моделей расчета усталостной долговечности (модели закрытия трещины и учета пластичности вблизи трещины), однако наиболее признаваемы разработчиками как наиболее эффективные – модификации модели Уилленборга [106, 107] отличается тем, что они не содержат параметров, которые необходимо определять экспериментально [108]. Модель Уилленборга основана на предположении,

что торможение роста трещины обусловлено сжимающими остаточными напряжениями, действующими в вершине трещины. Обобщенная модель расчета кинетики роста трещины Уиллерборга была предназначена для учета последовательности перегрузок в блоке нагружения.

Рассмотрена возможность прогнозирования продолжительности роста трещины при нагружении с перегрузочными и недогрузочными воздействиями типа UL и OL, а также OL-UL-OL и UL-OL-UL на примере алюминиевого сплава AL 2024-T3 и малоуглеродистой стали AISI 4030, схемы нагружения которых представлены на рис. 3.5, 3.12 и 3.19.

На рис. 4.1 показаны гистограммы прогноза долговечности роста усталостной трещины NASGRO при регулярном циклическом нагружении с различными перегрузочными и недогрузочными возмущающими воздействиями AL 2024-T3 по сравнению с экспериментальными данными. Как видно из рис. 4.1 расчет испытаний по недогрузкам показал, что модели Уилленборга не чувствуют влияние недогрузочных возмущений на кинетику роста усталостных трещин.

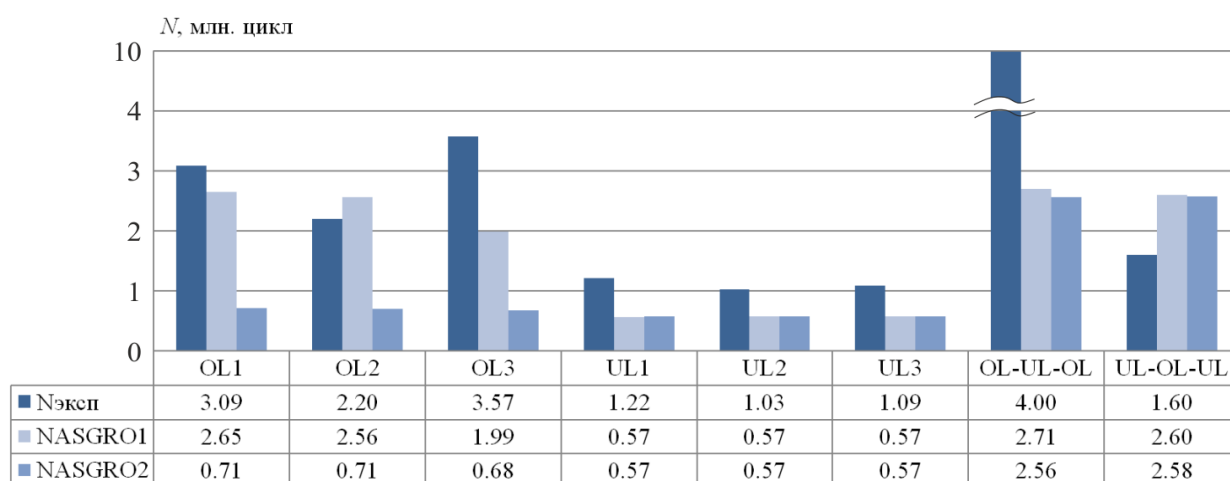


Рис. 4.1 – Гистограммы распределения долговечностей алюминиевого сплава AL 2024-T3: NASGRO 1 – расчет по модифицированной модели Уилленборга; NASGRO 2 – расчет по обобщенной модели Уилленборга

Перегрузочные возмущения, как показывает опыт, оказывают более существенное влияние на продолжительность роста усталостной трещины.

Моделирование этого влияния по Уилленборгу показало, что обобщенная модель не чувствует это возмущение в отличие от его модифицированной модели, которая дает более близкие результаты к значениям эксперимента. В модифицированной модели Уилленборга большая погрешность отмечена при значении продолжительности роста усталостной трещины по программе OL3. Это свидетельствует о том, что при приближении к околопороговой области кинетики роста трещины могут оказывать влияние на продолжительность роста трещины и другие механизмы повреждаемости, не учитываемые в этих моделях [95, 109]. При перегрузках лучшие результаты показала модифицированная модель Уилленборга, хотя и ее способность чувствовать переменные перегрузки незначительна.

Аналогичный расчет по моделям Уиллеборга в NASGRO был произведен для блочного нагружения стали AISI 4030. Результаты данного расчета приведены на рис. 4.2. Как и при анализе результатов алюминиевого сплава в стали выявлено отсутствие чувствительности моделей Уилленборга к режимам нагружения с недогрузками. Результаты расчета и эксперимента разходятся в 2-3 раза. Данные модели не позволяют оценивать долговечности представленных типов блочного нагружения, расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет от 2 до 6 раз.

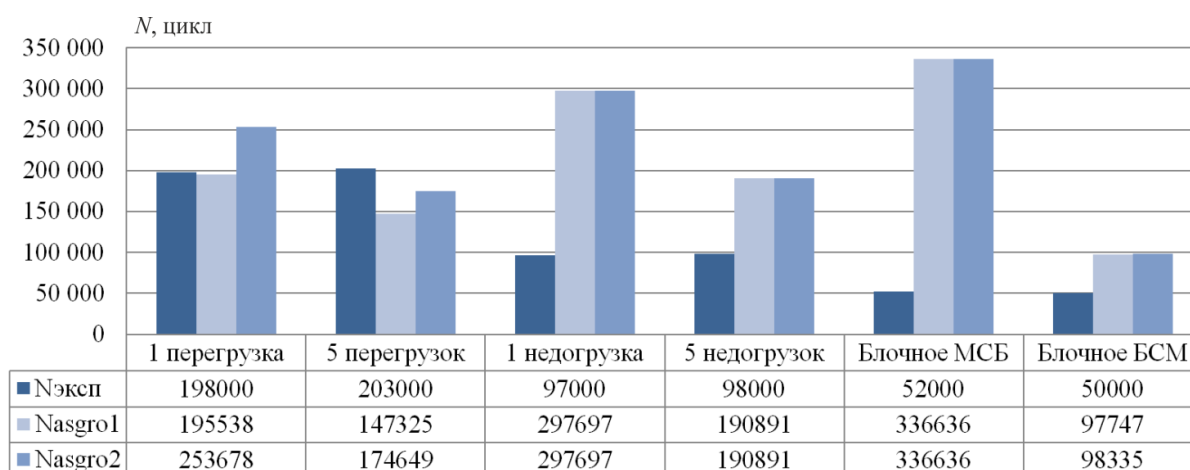


Рис. 4.2 – Гистограммы распределения долговечностей стали AISI 4030:
 NASGRO 1 – расчет по модифицированной модели Уилленборга;
 NASGRO 2 – расчет по обобщенной модели Уилленборга

В виду нечувствительности представленных моделей NASGRO к последовательностям с недогрузочными режимами нагружения, возникает необходимость в разработке модели, которая позволяла бы прогнозировать продолжительность роста усталостных трещин независимо от типа нагружения и последовательности циклов, в том числе как регулярного, так и нерегулярного, представленных блочным и квазислучайным нагружениями.

4.2 Использование принципа эквивалентности при оценке характера переменного циклического нагружения

Оценка продолжительности роста трещины при переменном эксплуатационном нагружении сопряжена с определенными трудностями. Так, для моделирования роста трещины необходимо иметь квазистатическую выборку случайного спектра нагружения, прошедшую схематизацию по методу “Rainflow” с целью выделения циклов нагружения и расчета долговечности. Далее, в модели, используемой для расчета продолжительности роста трещины, должны быть отражены ведущие механизмы, описывающие кинетику роста усталостной трещины, которые могут быть разными на различных стадиях развития КДУР. Такой подход приводит к усложнению расчета, в зависимости от той стадии роста трещины с которой осуществляется моделирование. Более просто эта задача решается с учетом оценки продолжительности роста трещины на среднем участке КДУР, когда величина начальной трещины определяется экспериментально известными неразрушающими методами контроля. Сравнивая экспериментальные кривые РУТ, полученные при регулярном и нерегулярном нагружениях, рядом исследователей предложено заменить квазислучайный процесс нагружения эквивалентным по повреждающей способности регулярном процессом нагружения. Эквивалентность заключается в равенстве скоростей роста трещины при регулярном и

нерегулярном процессах нагружения. Вариации данного принципа описаны в работах [61, 112].

Предлагается оценивать продолжительность роста трещины при переменном нагружении N_{VAL} , основанном на предложении рассматривать кинетику роста трещины при регулярном нагружении N_{CAL} с учетом характера переменного нагружения через коэффициент нерегулярности V при одинаковых силовых параметрах P_{max} и R . В этом случае, учет взаимодействие последовательности нагрузок в спектре нагружения не учитывается. Такой подход может быть использован для квазислучайного нагружения, в котором отсутствуют большие пиковые перегрузки, а случайные амплитуды нагружений достаточно перемешаны. На основании взаимосвязи характера квазислучайного нагружения V с продолжительностью роста трещины для конкретного материала (рис. 3.37), предлагается определять продолжительность роста трещины для нерегулярного нагружения по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} N_{VAL} &= N_{CAL} \cdot Q \\ Q &= 10^{(1+A \cdot \lg n) \cdot (1-V)}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где A – нормирующий параметр для исследуемых материалов, Q – коэффициент увеличения продолжительности роста усталостной трещины при квазислучайном нагружении по сравнению с регулярным циклическом нагружении с теми же силовыми параметрами P_{max} и R , V – мера нерегулярности блока нагружения, n – коэффициент наклона среднего участка КДУР при регулярном нагружении. Параметр A для исследуемых сталей принимался равным 2, а для алюминиевого сплава 2024-T3 – 1.8.

Для использования данной методики требуется:

- 1) провести испытание по оценке роста усталостной трещины при регулярном нагружении с теми же P_{max} и R с оценкой долговечности N_{CAL} ;
- 2) для схематизированного эксплуатационного блока нагружения определить коэффициент нерегулярности нагружения V по формуле (3.2);

3) определить нормирующий параметр A , если тип материала отличается от исследуемых в данной работе;

4) рассчитать продолжительность роста трещины N_{VAL} по уравнению (4.1). При изменении параметров блока нерегулярного нагружения P_{max} и R необходимо экспериментально определять N_{CAL} каждый раз для получения N_{VAL} .

Если программа испытаний отличается лишь характером нерегулярного нагружения V при одинаковых P_{max} и R и параметр A уже заранее известен, то понадобится всего один образец для экспериментального определения N_{CAL} , что можно отнести к достоинствам метода. Предложенный метод эквивалентности достаточно прост. Он не требует дополнительных реализаций нерегулярного нагружения для вычисления продолжительности РУТ. Если они представлены стандартными спектрами нагружения для конкретных конструктивных элементов. Это является важным, поскольку при прогнозировании срока службы элементов конструкций информация об эксплуатационном воздействии, как правило, ограничена.

На рис. 4.4 показана зависимость в двойных логарифмических координатах экспериментальной продолжительности роста трещины N_{Σ} от расчетной, определенной по принципу эквивалентности N_{VAL} для алюминиевого сплава AL 2024-T3 (а) и исследованных сталей (б). Численные значения приведены в таблице А1.

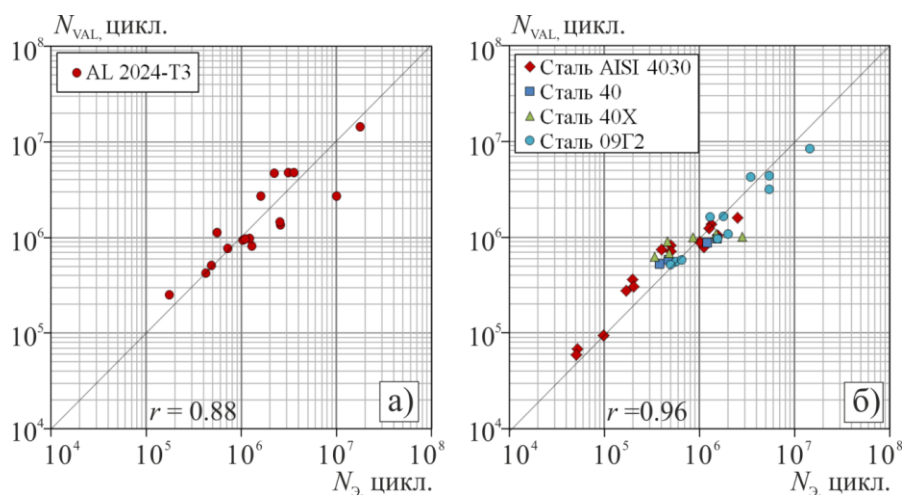


Рис. 4.4 – Расчет продолжительности роста трещины по принципу эквивалентности

Для оценки полученных результатов был определен статистический показатель зависимости между экспериментальными и расчетными значениями продолжительности роста трещины, а именно коэффициент корреляции. Он показан на каждом рисунке для конкретного материала и используемого метода.

При известных входящих в уравнение (4.1) данных использование коэффициента нерегулярности при прогнозировании роста трещины позволяет получить достоверные значения продолжительности роста усталостной трещины. При применении данной модели коэффициент корреляции r для алюминиевого сплава составил 0.88, а для сталей – 0.96 [113].

4.3 Моделирование роста усталостных трещин при нерегулярном циклическом нагружении поцикловым методом с учетом закрытия трещины и характера нагружения

Скорость роста трещины оценивается КДУР и может различаться в широких пределах даже для одного материала [114]. Основными характеристиками КДУР являются C , n , ΔK_{th} и K_c , поэтому их следует учитывать при определении скорости роста трещины. Уравнения скорости роста трещины, основанные на законе Пэриса, опираются на размах КИН ΔK , выражающий циклическое скольжение, и асимметрию цикла R , характеризующую влияние среднего напряжения на долговечность и описывают поведение трещины на втором участке КДУР. К настоящему времени для описания всех трёх участков кинетической диаграммы предложено большое количество математических моделей, которые содержат от четырёх до восьми подлежащих экспериментальному определению параметров. Модифицированное уравнение Формана-Мэтту оценивает скорость роста трещины на всех трех участках КДУР, для этого в уравнение вводятся дополнительные константы трещиностойкости материала:

пороговое значение КИН ΔK_{th} на околопороговый участок скорости ее роста и КИН K_c – вязкость разрушения на участке устойчивого отрыва [115]:

$$da/dN = C \cdot \Delta K_{эфф}^n \cdot \left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_{эфф}}\right)^p / \left(1 - \frac{K_{max}}{K_c}\right)^q \quad (4.2)$$

Для уравнения Формана-Мэтту необходимо получить экспериментальным путём три параметра: C , n и критическое значение коэффициента интенсивности напряжения K_c . p , q – коэффициенты аппроксимации. Эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K_{эфф}$ в устье трещины принимали как:

$$\Delta K_{эфф i} = \Delta K_i \cdot U \cdot V \quad (4.3)$$

Таким образом, учитывается влияние «закрытия» трещин через коэффициент асимметрии R блока нагружения на скорость роста трещины, а характер переменного нагружения, через коэффициент нерегулярности V .

В данном исследовании значения ΔK_{th} и K_c принимались постоянными, соответствующие регулярному циклическому нагружению, взаимодействия последовательностей нагрузок не учитывались.

Суммирование приращений длин трещин на каждом цикле или в результате каждого повторения блока истории нагружения позволяет определить долговечность:

$$N_f = \frac{a_f - a_0}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{da}{dN}\right)_{ij}}, \quad (4.4)$$

где a_f – критическая длина трещины; a_0 – начальная длина трещины; n – число циклов истории нагружения; m – число повторений блока истории нагружения; $(da/dN)_{ij}$ – скорость роста трещины и приращение на i цикле j повторения блока истории нагружения [116, 117].

Расчет роста трещины поцикловым методом «цикл-за-цикл» достаточно трудоемкая процедура, требующая оценки ее роста за каждый цикл нагружения. Как правило, такие вычисления проводятся с использованием компьютера. Если последовательность нагружения известна,

то процесс оценки кинетики роста трещины можно описать алгоритмом, представленным на рис. 4.5.

После каждого приращения длины трещины выполняется сравнение текущей длины трещины с предельной. По достижению длиной трещины предельной величины подсчет числа отработавших циклов завершается, представляющих собой расчетный срок службы конструкции до отказа. На рис. 4.2 показана блок-схема алгоритма расчета по принципу «цикл-за-цикл». Цветом разделены участки, расчет по которым будет проводиться согласно уравнению (1.2) или (4.2), а также необходимые для расчета исходные данные.

В качестве исходных данных используют:

1) параметры уравнения Пэриса C и n , значения начальной длины трещины a_0 и ее критическое значение a_f , геометрические параметры стандартного компактного образца B и W и коэффициенты его податливости A , характер блочного или квазислучайного нагружения V и асимметрия блока нагружения R ;

2) задаются параметры циклического нагружения ΔP_i , $P_{\max i}$, $P_{\min i}$ и вычисляются КИН ΔK_i , $K_{\max i}$, $K_{\min i}$;

3) для данного вида нагружения в зависимости от коэффициента асимметрии вычисляется коэффициент закрытия трещины U и эффективный размах КИН $\Delta K_{\text{эфф } i} = \Delta K_i \cdot U \cdot V$;

4) определяется приращение трещины за цикл нагружения Δa_i по предложенному уравнению Пэриса (1.2) или Форману-Метту (4.2) и новая длина трещины $a_i = a_{i-1} + \Delta a_i$. Алгоритм заканчивается при достижении трещиной ее критического значения a_f .

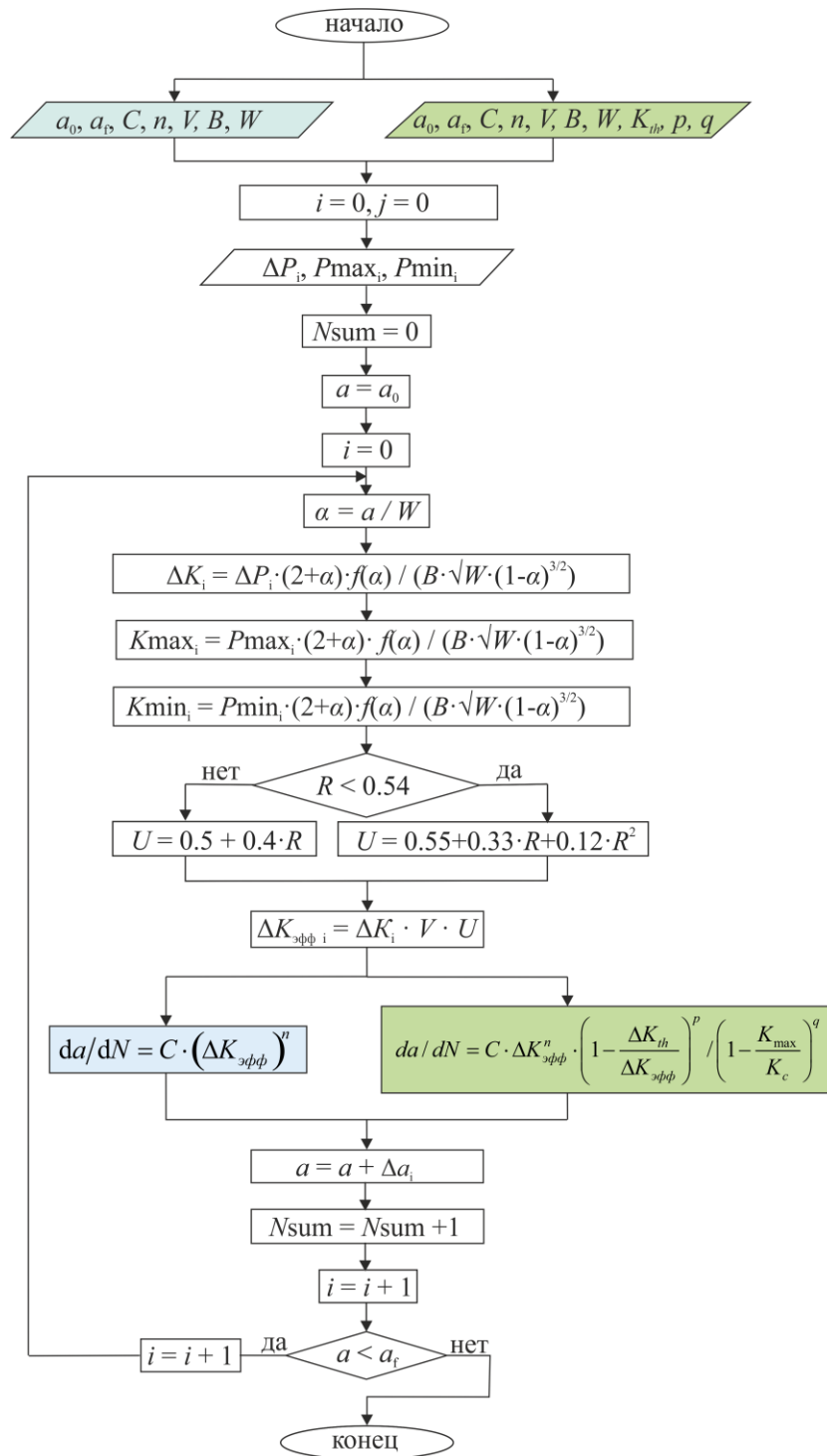


Рис. 4.5 – Блок-схема расчета продолжительности роста трещины при квазислучайном нагружении по принципу «цикл-за-цикл»

На рис. 4.6 и 4.7 показаны соотношения экспериментальной продолжительности роста трещины N_{Σ} и расчетной N_{Π} , определенной с использованием модели «цикл-за-цикл» по уравнению Пэриса (1.2) и Формана-Мэтту (4.2) с учетом эффективного значения КИН. Анализ

результатов расчета и эксперимента показал их хорошую сходимость как при высокой, так и низкой продолжительности роста усталостной трещины. Регулярное нагружение выделено отдельными фигурами в виде «крестиков».

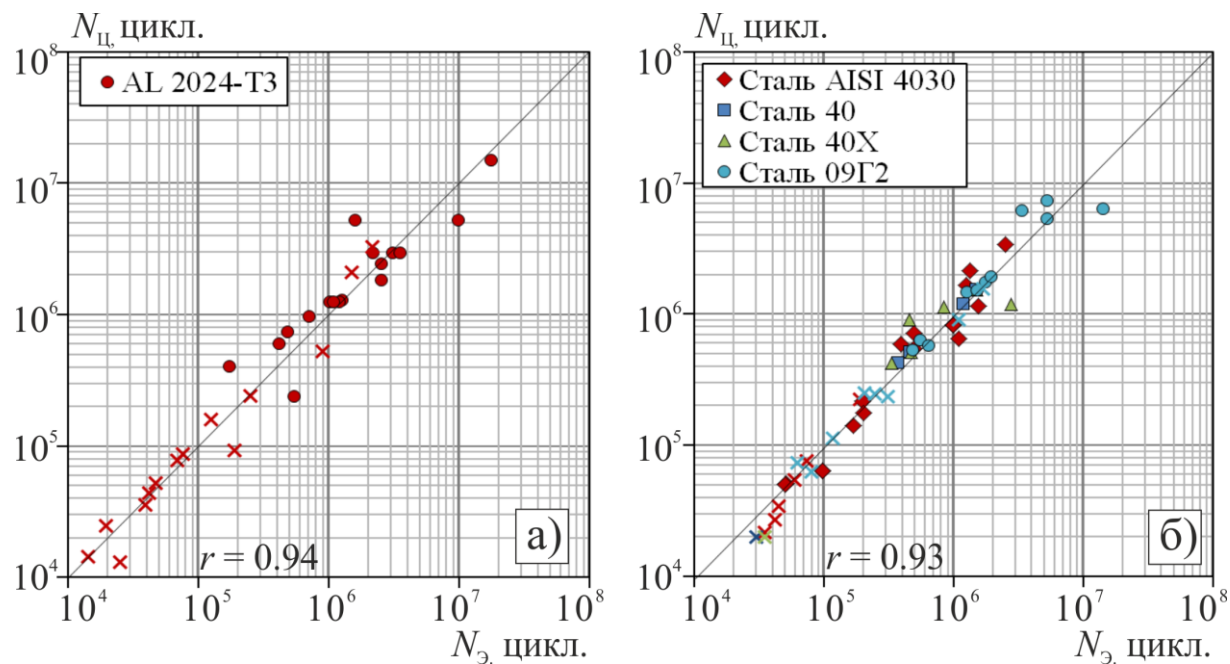


Рис. 4.6 – Расчет продолжительности роста трещины методом «цикл-за-цикл» по Пэрису

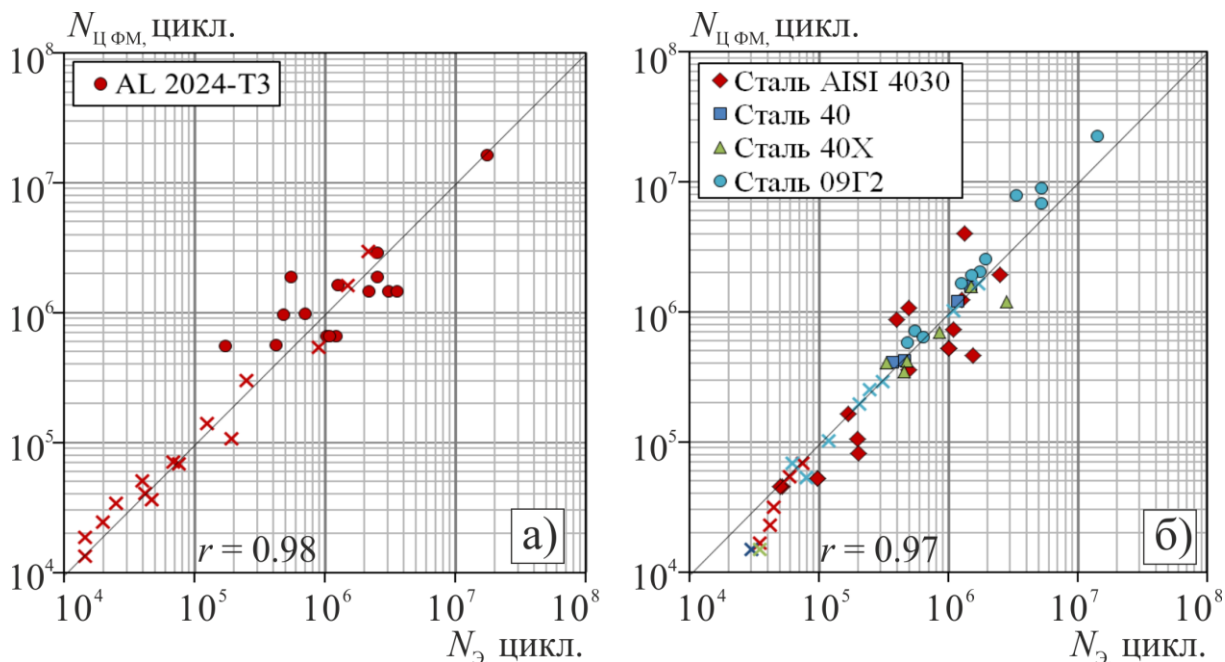


Рис. 4.7 – Расчет продолжительности роста трещины методом «цикл-за-цикл» по модифицированной формуле Формана-Мэтту

Полученные коэффициенты корреляции довольно высоки, что свидетельствует о том, что введение параметра $\Delta K_{эфф}$ в данные модели однозначно может описывать влияние различных силовых параметров и характер нерегулярного нагружения на интенсивность напряжений в устье растущей усталостной трещины. Если судить по общим значениям коэффициента корреляции для сталей и алюминиевого сплава, то предлагаемая модель «цикл-за-цикл» на базе формулы Формана-Мэтту с учетом закрытия трещины демонстрирует более сильную степень тесноты связи, что говорит о ее большей эффективности.

Несмотря на достаточно высокие значения коэффициента корреляции расчетных и экспериментальных значений продолжительности роста усталостных трещин, выявлено, что наибольшая погрешность отмечается при регулярном нагружении с возмущающими воздействиями в околопороговой области роста трещины. Это требует разработки модели, которая сможет вместить в себя как эффект закрытия трещины, так и влияние остаточных напряжений в устье трещины для учета последовательности нагрузок в истории нагружения, на что представленные модели продолжительности роста трещин, показанные выше, неспособны.

4.4 Формирование гибридной модели, описывающей кинетику роста усталостных трещин с учетом локальных напряжений в устье усталостной трещины и изменения критериальных параметров КДУР

Для сложных последовательностей нагружений, например квазислучайных, простое суммирование роста трещины без учета последовательности нагружений и эффектов, имеющих место в устье усталостной трещины, можно получить результаты, значительно отличающиеся от экспериментальных [118]. Основная проблема успешного применения методов механики разрушения особенно в околопороговой области КДУР, заключается в том, чтобы получить четкое представление о

влиянии последовательности нагружения на рост усталостной трещины [119].

Большинство современных исследовательских работ посвящено обобщению моделей закрытия трещины, введена классификация механизмов его вызывающих: пластичность [127-130], шероховатость поверхности [131-135], поверхностное окисление [136-139], и др. Однако даже качественное описание кинетики роста трещины в околопороговом диапазоне скоростей при некоторых последовательностях нагружения с помощью моделей закрытия до сих пор вызывает затруднения. Более того, уравнения, используемые в рамках данного класса моделей при прогнозировании роста трещины, содержат большое количество коэффициентов, которые не имеют ярко выраженного физического смысла, а, значит, не могут быть определены напрямую из эксперимента. Выше приведенные обстоятельства ставят под вопрос достоверность и устоявшуюся в науке «единственность» данного подхода.

Для корректного прогнозирования продолжительности роста усталостных трещин необходимо разработать модель, описывающую и объясняющую влияние на развитие усталостной трещины эффектов взаимодействия нагрузок в устье усталостной трещины. Эффекты последовательности нагружения, например, замедление роста трещины при наличии перегрузки в базовом блоке нагружения, проявляются на околопороговом участке роста трещины [54, 140, 141]. При этом рост трещины при циклическом нагружении традиционно ассоциируется с образованием полос локального скольжения («усталостные бороздки») на участке Пэриса (скорости роста менее $10^{-4} - 10^{-2}$ мм/цикл) [122], которые характеризуются чисто сдвиговым механизмом роста трещины. Влияние среднего напряжения и истории нагружения на усталость никак не связано с данным механизмом, определяемым величиной размаха КИН ΔK .

Известно, что бороздки в околопороговой области роста трещины (скорости роста менее 10^{-4} мм/цикл), не обнаруживаются даже с помощью

электронной микроскопии, а структура излома выглядит как хрупкий межзеренный скол (рис. 4.8) [120].

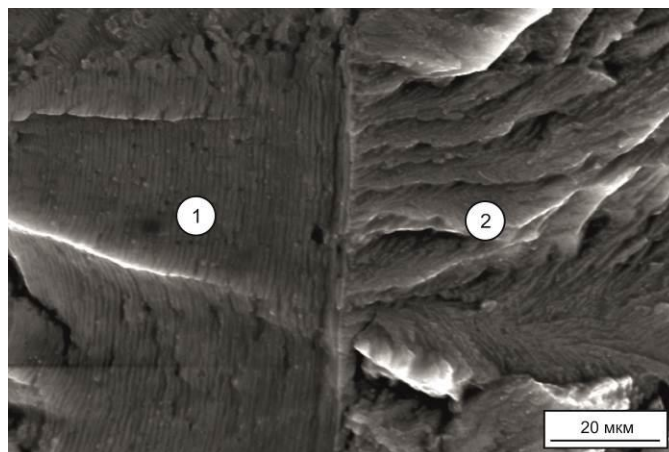


Рис. 4.8 – Микрофотография излома, полученная при блочном нагружении на алюминиевом сплаве 2024-Т3, при переходе от больших амплитуд (1 — участок Пэриса) к малым (2 — околопороговая область)

Данные исследования, а также исследования других авторов, в том числе в глубоком вакууме и различных окружающих средах, позволили сформулировать качественную теорию хрупкого разрушения в околопороговой области [120, 123-125]. Эта теория объясняет природу замедления трещины процессами вблизи ее кончика, а именно поглощением активных частиц кислорода и водорода, выделяющихся в результате химических реакций атмосферной влаги и поверхности около кончика трещины с образованием оксидов и гидроксидов (рис. 4.9 а). Доминирующую роль в микроразрушении играет поглощенный водород [72, 121, 142-144], а влияние кислорода в нормальных условиях незначительно, однако присутствие кислорода в разрушенных слоях позволяет судить о присутствии водорода, т.к. интенсивность поглощения активных частиц обуславливается одним механизмом.

Автору [120, 121] удалось получить график $\Delta K_{th}=f(\sigma^*)$ (рис. 4.9б). Узкий S-образный вид кривой, образованной аппроксимацией полученных точек указывает на наличие взаимосвязи между этими величинами. Форма полученного графика $\Delta K_{th}=f(\sigma^*)$ совпадает с формой графика $da/dN=f(p_p)$, где

p_p – парциальное давление влаги окружающей среды. На рис. 4.9б можно выделить 3 участка:

- правый нижний участок (I) соответствует результатам испытаний без перегрузок и связывается с высоким уровнем напряжений вблизи вершины трещины, который вызывает диффузию насыщенной поверхности в течение восходящего полупериода. Рост σ^* на I участке вызывает слабый, но заметный рост ΔK_{th} ;

- изменение σ^* на среднем участке (II) вызывает сильное изменение ΔK_{th} . Отмечается возможность смещения II участка влево и вправо в зависимости от частоты нагружения, парциального давления влаги и температуры окружающей среды.

- левый верхний участок (III) представляет собой горизонтальную линию, свидетельствующую об исчезновении корреляции между σ^* и ΔK_{th} . Величина ΔK_{th} , характерная для III участка оказалась равна величине $\Delta K_{th,vac}$, полученная при испытаниях в глубоком вакууме [120].

Таким образом, условия глубокого вакуума пришли в соответствие с испытаниями с перегрузками в атмосферной окружающей среде, в которых диффузия частиц исключена сжимающими остаточными напряжениями, наведенными нисходящими полупериодами перегрузок. Значение ΔK_{th} на III участке велико, что означает высокую долговечность в этих испытаниях. Стоит отметить, что при гигацикловой усталости ($N > 10^8$ циклов) рост трещины начинается не на поверхности образца, а изнутри материала в отсутствие влияния частиц окружающей среды, что делает условия среды в окрестности трещины подобными глубокому вакууму. В результате теория на данном этапе развития связывает пороговый размах КИН ΔK_{th} и напряжение раскрытия трещины вблизи ее вершины σ^* (рис. 4.9 б).

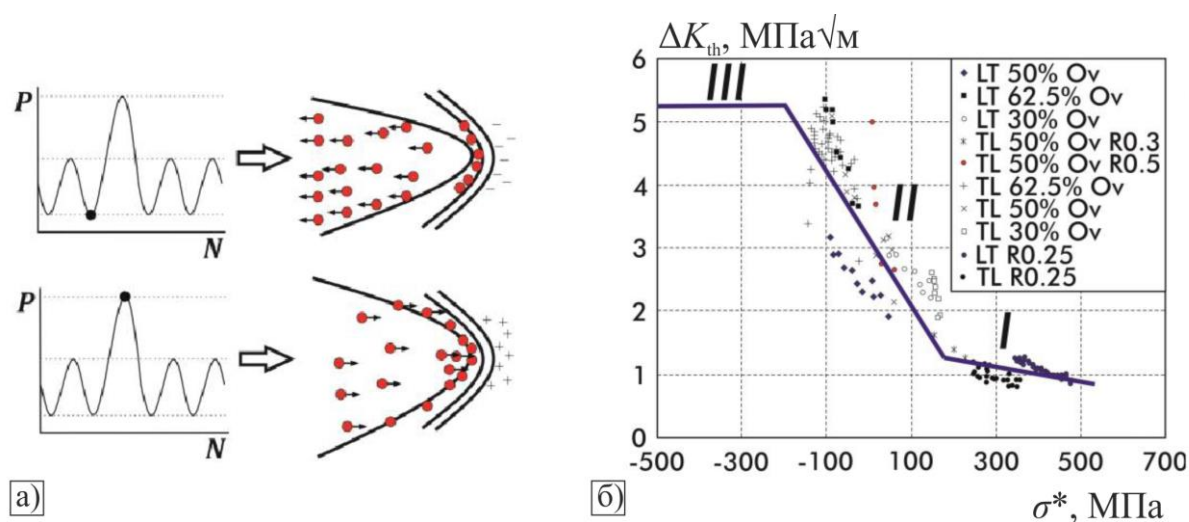


Рис. 4.9 – (а) Отложение активных частиц из влаги вершины трещины при минимальной нагрузке и их скопление в наиболее напряженных объемах у вершины при росте нагрузки; (б) зависимость порогового размаха КИН от напряжения вблизи трещины σ^* для алюминиевого сплава 2024-T3 [121]

Предложенная в [45, 121] модель применяет подход местных напряжений и деформации для оценки местного остаточного напряжения σ^* в концентраторе напряжений, который представляет сама трещина. В основе модели лежит методика расчета локальных напряжений в окрестности трещины и их экспериментально установленная связь с пороговым КИН $\Delta K_{th} = f(\sigma^*)$. Таким образом, ΔK_{th} является переменным на каждом цикле нагружения и зависит от последовательности приложенных нагрузок. Кинетика роста трещин при этом пересчитывается на каждом возрастающем полупереме нагружения [54, 124-126].

Одним из решений, отличающим эту модель от прочих моделей прогнозирования усталостной долговечности является применение одного из подходов анализа усталости концентраторов напряжений - подхода местных напряжений и деформации, а именно его ключевой формулы - правила Нойбера (рис. 4.10а) [145]. А также применение уравнения Рэмберга-Осгуда, описывающего поведение упругопластического материала при одноосном растяжении-сжатии и местном напряжении σ .

Отличительной особенностью данной теории является применение закона Рэмберга-Осгуда, описывающего поведение упругопластического материала при одноосном растяжении и местном напряжении σ :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (4.5)$$

где K' и n' – параметры упрочнения материала.

Если при приложении цикла нагрузки происходит изменение местного напряжения на σ_a , то по закону Рэмберга-Осгуда соответствующая амплитуда цикла деформации ε_a составит:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (4.6)$$

где σ_a – амплитуда местного напряжения; ε_a – амплитуда местной деформации.

В таком случае, переходя к размахам полуциклов получим уравнение:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (4.7)$$

где $\Delta\sigma$ – размах местного напряжения; $\Delta\varepsilon$ – размах местной деформации.

Используя уравнения Нойбера и Рэмберга-Осгуда (рис. 4.10б) можно связать КИН K или его размах ΔK с местным напряжением σ^* на удалении от вершины трещины r^* для монотонного и циклического нагружений соответственно:

$$K = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot r^* \cdot E \cdot \sigma^* \cdot \left(\frac{\sigma^*}{E} + \left(\frac{\sigma^*}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right)}, \quad (4.8)$$

$$\Delta K = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot r^* \cdot E \cdot \Delta\sigma^* \cdot \left(\frac{\Delta\sigma^*}{E} + \left(\frac{\Delta\sigma^*}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right)}. \quad (4.9)$$

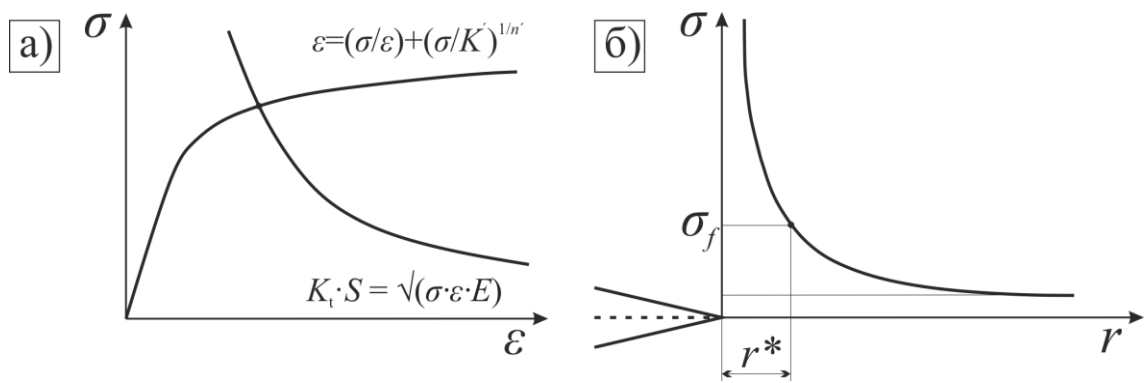


Рис. 4.10 – Иллюстрация сочетания правила Нойбера и уравнения Рэмберга-Озгуда (а); местное напряжение вблизи вершины трещины на некотором удалении от нее (б) [146,147]

Так как описанная модель предполагает расчет локального напряжения в окрестности трещины на каждом шаге нагружения, то необходимо разработать более эффективную методику расчета, учитывающую механическое поведение материалов при циклическом деформировании.

Ввиду наличия сингулярности напряжений у вершины трещины определять местное напряжение вблизи ее вершины необходимо на некотором удалении r^* (рис. 4.10б), причем это расстояние должно быть минимально возможным, чтобы воспроизвести физику явления [146]:

$$r^* = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{K_c^2}{\sigma_f \cdot \varepsilon_f \cdot E} \right), \quad (4.10)$$

где σ_f – местное напряжение разрушения; ε_f – местная деформация разрушения.

Вывод формулы характерного расстояния r^* аналогичен выводу формулы поправки Ирвина на пластичность, т. е. радиуса пластической зоны. Материальная точка, соответствующая расстоянию r^* попадает в циклическую область окрестности трещины.

В качестве основного соотношения описывающего кинетику роста трещины для предлагаемой модели было использовано модифицированное уравнение Формана-Мэтту (4.2), Поскольку расчет по этой модели

проводится цикл-за-цикл, поэтому смысл определения характера циклического переменного нагружения V теряется, поэтому значение эффективного КИН определялось по формуле:

$$\Delta K_{эфф i} = \Delta K_i \cdot U, \quad (4.11)$$

где U – коэффициент закрытия трещины, определялся для алюминиевого сплава по (1.11) и (1.13), а для стали – (1.15).

При этом параметры полной КДУР задаются для каждого материала отдельно, они показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры КДУР для материалов

Материал	Параметры кривой КДУР					
	C	n	K_{th}	K_c	p	q
AISI 4030	$5 \cdot 10^{-14}$	3.5	4.5	100	0.75	0.25
09Г2	$5 \cdot 10^{-14}$	3.5	4.5	80	0.25	0.25
40	$7 \cdot 10^{-14}$	3.5	3	85	0.75	0.25
40X	$7 \cdot 10^{-14}$	3.5	2.1	85	0.75	0.25
AL 2024 T3	$1.8 \cdot 10^{-12}$	3.35	1.8	37	0.5	1

В основе предлагаемой модели лежит методика расчета локальных напряжений в окрестности трещины, и их экспериментально установленная связь с пороговым КИН $\Delta K_{th} = f(\sigma^*)$ (рис. 4.9б). Таким образом, ΔK_{th} является переменным на каждом цикле нагружения и зависит от последовательности приложенных нагрузок. Кинетика роста трещин при этом определяется модифицированным уравнением Формана – Метту, где ΔK_{th} пересчитывается на каждом возрастающем полцикле нагружения.

Сундером получена экспериментальная кривая взаимосвязи размаха ΔK_{th} от местного напряжения σ^* для алюминиевого сплава AL 2024-T3 и различных перегрузок-недогрузок при регулярном нагружении.

Было проведено аналитическое описание этой кривой в виде полинома второй степени и распространен данный подход для других конструкционных материалов. При описании этих кривых был заложен

принцип их подобия, а постоянные полинома определялись на основании полученных аналогичных экспериментов для исследуемых материалов.

На рис. 4.11 показаны графики зависимости размаха ΔK_{th} от местного напряжения σ^* на удалении от вершины трещины r^* , на примере алюминиевого сплава AL 2024-T3 (а) и стали AISI 4030 (б), которые аналитически представлены в виде системы уравнений (4.12) с переменными коэффициентами А, В и С. Значения коэффициентов для остальных сталей были приняты аналогично стали AISI 4030. Эти коэффициенты показаны в таблице 4.2.

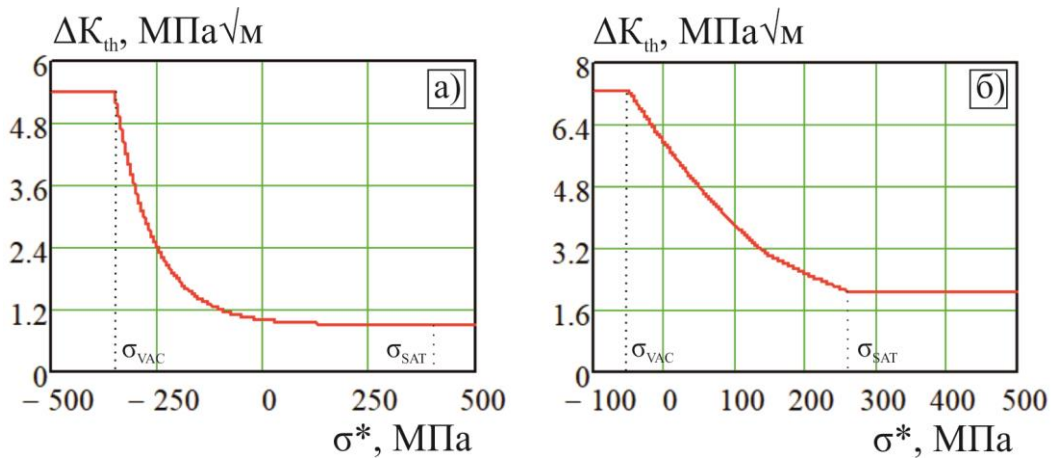


Рис. 4.11 – Взаимосвязь размаха ΔK_{th} с местным напряжением σ^* для AL 2024-T3 (а) и AISI 4030 (б)

Зависимость порогового значения ΔK_{th} от σ^* описывается системой уравнений в виде полиномов второй степени:

$$\Delta K_{th} = \begin{cases} A_1 \cdot (\sigma^*)^2 - B_1 \cdot (\sigma^*) + C_1, & \text{если } \sigma_{VAC} < \sigma^* < h \\ A_2 \cdot (\sigma^*)^2 - B_2 \cdot (\sigma^*) + C_2, & \text{если } h < \sigma^* < \sigma_{SAT} \end{cases} \quad (4.12)$$

где σ_{VAC} – напряжения, соответствующие максимальному значению ΔK_{th} ; σ_{SAT} – напряжения, соответствующие минимальному значению ΔK_{th} . h – координата пересечения уравнений (4.12) друг с другом.

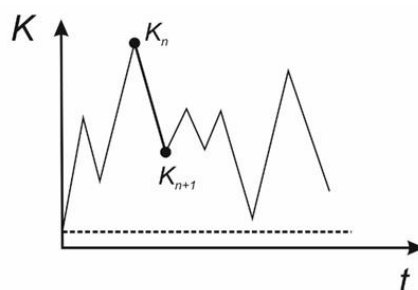
Таблица 4.2 – Значения коэффициентов для уравнения (4.12)

Материал	Параметры								
	A_1	A_2	B_1	B_2	C_1	C_2	σ_{VAC}	σ_{SAT}	h
AISI 4030, 09Г2, 40, 40X	$3.495 \cdot 10^{-5}$	$1.163 \cdot 10^{-5}$	$2.498 \cdot 10^{-2}$	$1.307 \cdot 10^{-2}$	5.95	4.7	-50	260	150
AL 2024- T3	$5.782 \cdot 10^{-5}$	$7.525 \cdot 10^{-7}$	$2.262 \cdot 10^{-3}$	$1.650 \cdot 10^{-3}$	1.5	1.5	-350	460	0

Был разработан алгоритм оценки продолжительности роста трещины по предложенному методу. Блок-схема алгоритма расчета представлена на рис. 4.12.

Алгоритм расчета локальных напряжений:

1) Расчет приращения КИН ΔK_{n+1} на текущем полупериоде нагружения (n – индекс шага нагружения);



2) Определение приращения полной локальной деформации в окрестности трещины $\Delta \epsilon_{n+1}^*$;

3) Расчет приращения локальных напряжений $\Delta \sigma_{n+1}^*$ согласно выбранной модели пластичности.

Ключевыми этапами алгоритма расчета являются определение приращения полной деформации в окрестности трещины и связанных с ними напряжений. Отметим, что выбранная последовательность расчета схожа с используемой в МКЭ, только вместо определения приращения полных перемещений и деформаций из вариационного уравнения предлагается приближенный подход. В связи с чем данная схема исключительно удобна для программной реализации при произвольных последовательностях нагружения.

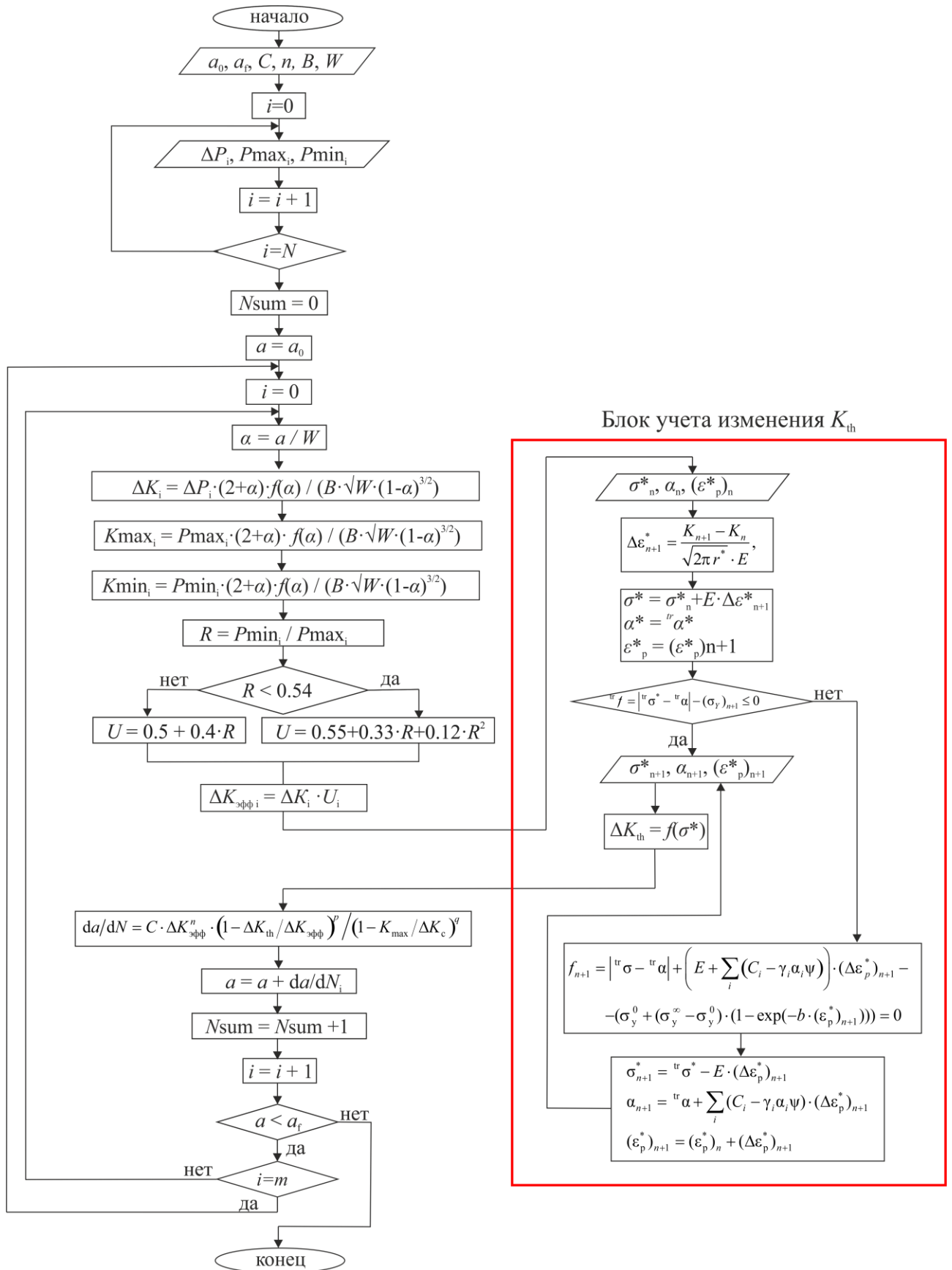


Рис. 4.12 – Блок-схема расчета продолжительности роста усталостной трещины по предлагаемой модели пластичности

Определение полной деформации можно осуществлять с помощью одного из известных правил для концентраторов (линейное правило, правило Нойбера, метод Глинки) [148]. В данной работе используется линейное правило определения деформаций в окрестности трещины по модели пластичности, то есть, приращение полной деформации считается равным его упругой части, которую можно определить по формуле линейной механики разрушения:

$$\Delta\varepsilon_{n+1}^* = \frac{\Delta K_{n+1}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r^* \cdot E}}, \quad (4.13)$$

Физически данное предположение обосновывается стесненностью деформации в вершине трещины, большая часть основного металла претерпевает упругие деформации с большим градиентом вдоль линии роста, что не дает материалу сильно деформироваться.

Расчет приращения локальных напряжений $\Delta\sigma_{n+1}^*$ связан с особенностями поведения исследуемого материала при циклических нагрузках. Выбор конкретной модели упрочнения зависит от испытуемого материала, однако он так или иначе связан с описанием эффекта Баушингера, то есть с использованием кинематического (трансляционного) упрочнения. При этом универсальная модель должна воспроизводить также изотропное упрочнение, чтобы иметь возможность для расчета циклически нестабильных материалов.

Отметим, что в дальнейших рассуждениях традиционно для теории пластичности подразумевается аддитивное разложение полной деформации на упругую и пластическую составляющие вида:

$$\Delta\varepsilon^* = \Delta\varepsilon_e^* + \Delta\varepsilon_p^*, \quad (4.14)$$

где $\Delta\varepsilon_e^*$ – приращение упругой деформации; $\Delta\varepsilon_p^*$ – приращение пластической деформации.

В данной работе предлагается использовать вариант комбинированной модели упрочнения в рамках критерия Мизеса:

$$f = |\sigma^* - \alpha| - \sigma_T(\varepsilon_p^*) \leq 0, \quad (4.15)$$

где f – функция текучести; α – середина упругого участка циклической кривой (в многомерной интерпретации координата середины поверхности текучести) (рис. 4.13). Неравенство в условии (4.15) означает, что напряжения не могут выходить за пределы циклической кривой на текущем участке нагружения. При этом предел текучести $\sigma_T(\varepsilon_p^*)$ является функцией накопленной пластической деформации, он может увеличиваться (циклический упрочняющийся материал), уменьшаться (модель разупрочняющегося материала) или быть постоянным (стабильный материал). Отметим, что в данной трактовке предел текучести не константа материала, а переменная равная половине длины упругого участка циклической кривой (рис. 4.13).

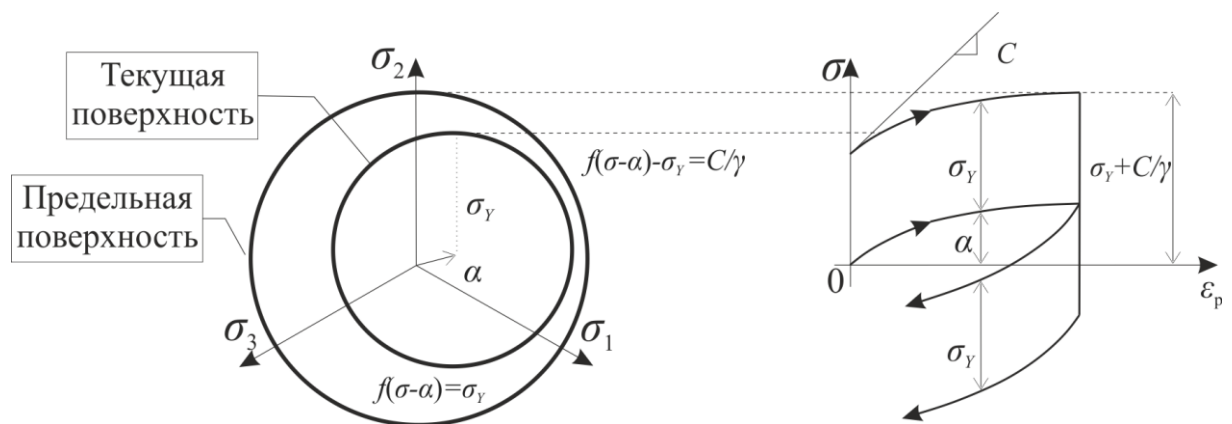


Рис 4.13 – Модель Фредерика-Армстронга в пространстве главных напряжений (слева) и соответствующая диаграмма линейного растяжения (справа)

Смещение середины циклической кривой (поверхности нагружения) основано на правиле суммирования смещений Шабози [149,150]. При этом каждое из суммирований подчиняется кинематическому упрочнению по закону Фредерика – Армстронга [151]:

$$\alpha = \sum_i \alpha_i \quad \Delta \alpha_i = (C_i - \gamma_i \alpha_i \psi) \cdot \Delta \varepsilon_p^*, \quad (4.16)$$

где α – суммарное смещение поверхности нагружения; α_i – индивидуальные смещения; C_i, γ_i – константы материала; ψ – параметр нагружения («-1» – сжатие, «+1» – растяжение). Отметим, что введение данного смещения (кинематическое упрочнение) позволяет реализовывать эффект Баушингера, направления смещения определяется знаком деформации (растяжение/сжатие).

Изотропное расширение/сужение поверхности нагружения определяется на основе следующего соотношения [152]:

$$\sigma_T(\varepsilon_p^*) = \sigma_T^0 + (\sigma_T^\infty - \sigma_T^0) \cdot (1 - \exp(-b \cdot \varepsilon_p^*)), \quad (4.17)$$

где σ_T^0 — начальный предел текучести; σ_T^∞ — асимптотический предел текучести; b — константа материала.

Константы материала C_i, γ_i, b определяются экспериментально при инкрементальном испытании с циклическим нагружением по жесткому циклу. В течение такого испытания происходит постепенное увеличение амплитуды нагружения при сохранении асимметрии цикла постоянной $R = -1$ вплоть до разрушения.

Алгоритм определения приращения напряжений представляет собой процедуру проецирования напряжений на циклическую диаграмму (поверхность нагружения). После определения по формуле (4.17) приращения полной деформации необходимо определить приращение напряжений и локальное напряжение на текущем шаге $n+1$ -ом нагружения. Для этого на первом этапе (упругое приближение) предполагаем, что вся деформация упругая:

$$\begin{aligned} {}^{\text{tr}} \sigma^* &= \sigma_n^* + E \cdot \Delta \varepsilon_{n+1}^*, \\ {}^{\text{tr}} \alpha &= \alpha_n, \quad {}^{\text{tr}} \varepsilon_p^* = (\varepsilon_p^*)_n, \end{aligned} \quad (4.18)$$

где tr («trial») – индекс упругого приближения. Если условие текучести выполняется, $f_{n+1} = |{}^{\text{tr}} \sigma^* - {}^{\text{tr}} \alpha| - (\sigma_T)_{n+1} \leq 0$, то есть точка, соответствующая текущему напряженному состоянию, не вышла за пределы диаграммы

(упругого участка), значит первый этап становится окончательным. Следовательно, нагрузка/разгрузка упругая и центр циклической диаграммы, а также накопленная пластическая деформация остаются неизменными с прошлого шага нагружения:

$$\sigma_{n+1}^* = {}^{\text{tr}} \sigma^*, \quad \alpha_{n+1} = {}^{\text{tr}} \alpha, \quad (\varepsilon_p^*)_{n+1} = {}^{\text{tr}} \varepsilon_p^*, \quad (4.19)$$

В противном случае $f_{n+1} = |{}^{\text{tr}} \sigma^* - {}^{\text{tr}} \alpha| - (\sigma_T)_{n+1} > 0$, напряжение необходимо скорректировать с учетом накопленной пластической деформации (спроецировать вертикально вниз на диаграмму). При этом пластическая доля деформации определяется из решения нелинейного уравнения, выражающего условие принадлежности напряженного состояния циклической диаграмме на текущем шаге нагружения $n+1$:

$$\begin{aligned} f_{n+1} = & \left| \sigma_{n+1}^* - \alpha_{n+1} \right| - \sigma_T (\varepsilon_p^*)_{n+1} = \left| {}^{\text{tr}} \sigma^* - {}^{\text{tr}} \alpha \right| + \\ & + \left(E + \sum_i (C_i - \gamma_i \alpha_i \psi) \right) \cdot (\Delta \varepsilon_p^*)_n - \\ & - \left(\sigma_T^0 + (\sigma_T^\infty - \sigma_T^0) \cdot (1 - \exp(-b \cdot (\varepsilon_p^*)_n)) \right) = 0 \end{aligned}, \quad (4.20)$$

Данное нелинейное уравнение итерационно решалось методом Ньютона до возвращения напряженного состояния на циклическую диаграмму с заданной точностью.

Окончательные выражения для скорректированного значения локального напряжения σ_{n+1}^* на текущем шаге нагружения, а для центра кривой циклического деформирования и накопленной пластической деформации примет следующий вид

$$\begin{aligned} \sigma_{n+1}^* = & {}^{\text{tr}} \sigma^* - E \cdot (\Delta \varepsilon_p^*)_{n+1}, \\ \alpha_{n+1} = & {}^{\text{tr}} \alpha + \sum_i (C_i - \gamma_i \alpha_i \psi) \cdot (\Delta \varepsilon_p^*)_{n+1}, \quad (\varepsilon_p^*)_{n+1} = (\varepsilon_p^*)_n + (\Delta \varepsilon_p^*)_{n+1}. \end{aligned}, \quad (4.21)$$

Далее на рис. 4.14 представлен пример определения напряжений в окрестности трещины согласно представленной модели на примере AL 2024-T3. Типы используемых для примера нагружений: недогрузка-перегрузка (а) и перегрузка с последующей недогрузкой (б).

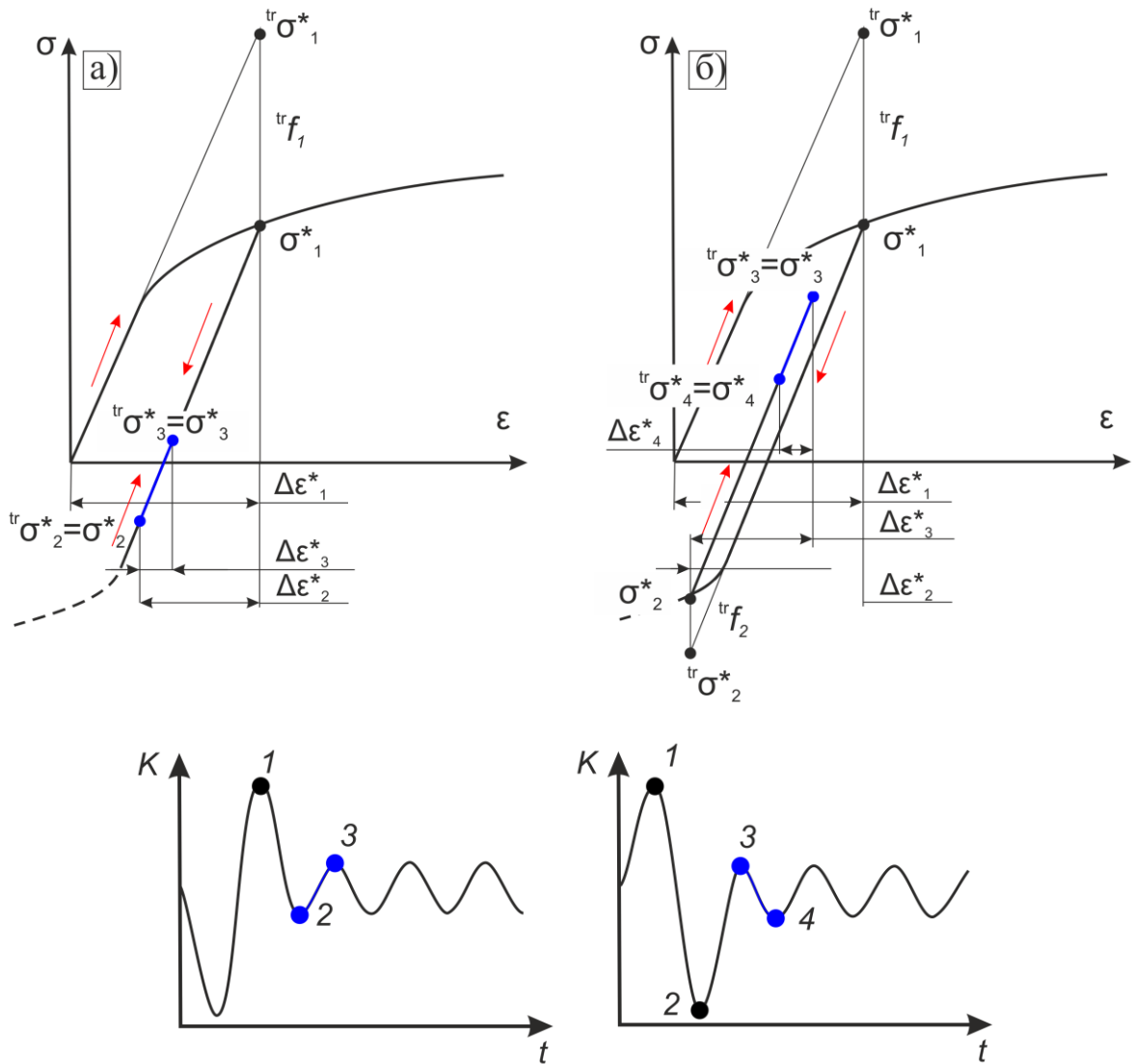


Рис. 4.14 – Графическая интерпретация методики определения напряжений в окрестности трещины при различных последовательностях нагружения: недогрузка – перегрузка (а); перегрузка – недогрузка (б)

Экспериментальные исследования по продолжительности роста усталостных трещин по предлагаемой модели с учетом локальных напряжений можно разделить на несколько блоков:

- испытания на компактных образцах с регулярным нагружением и однократными перегрузками/недогрузками с целью определения констант, входящих в уравнение (4.2) и установления зависимости $\Delta K_{th} = f(\sigma^*)$;
- определение кривой циклического деформирования на гладких образцах при ступенчатом нагружении;

- верификация разработанной модели на эксплуатационных спектрах.

Согласно этим блокам была проведена серия из 5 испытаний с регулярным нагружением на компактных образцах при максимальной нагрузке $P_{max} = 2$ кН, с частотой нагружения $F = 5$ Гц и асимметриями цикла $R_1 = 0,1$, $R_2 = 0,3$, $R_3 = 0,5$, $R_4 = 0,7$ и $R_5 = 0,75$. На основании данных экспериментов определялись константы C , n , p , q . Затем проведены испытания с перегрузками различной величины (130%–150% по сравнению с базовой амплитудой цикла) при асимметрии базового цикла 0.7. Верификация модели осуществлялась на спектрах MiniFALSTAFF, MiniTWIST и SAETRANS.

При расчете долговечности величины C , n , p , q и K_c являются константами материала, а учет истории нагружения связан с пересчетом на каждом цикле ΔK , K_{max} и ΔK_{th} . Учет закрытия трещины осуществлялся согласно уравнению Схайве вида $U=f(R)$. Долговечность определялась на основе интегрирования уравнения (4.4) [153].

На рис. 4.15 показаны примеры результатов моделирования, по описанной модели, кинетики роста усталостных трещин с учетом локальных напряжений в устье усталостной трещины испытаний алюминиевого сплава с блоком регулярного нагружения при наложении на него последовательностей перегрузки-недогрузки и недогрузки-перегрузки с уровнем перегрузки в 1,5 раза выше в сравнении с последующим регулярным нагружением. Описание схемы нагружения, показанной на рис. 4.15:

– *схема 1-2*: первый двухблочный шаг (перегрузка-недогрузка или недогрузка-перегрузка) $P_{max}=2.55$ кН, $P_{min}=0.2$ кН, второй шаг - $P_{max}= 1.7$ кН, $P_{min}=1.2$ кН, блок содержит 10000 циклов;

– *схема 3-4*: первый шаг $P_{max}=2.38$ кН, $P_{min}=0.2$ кН (перегрузка или недогрузка), второй шаг $P_{max}= 1.7$ кН, $P_{min}=1.2$ кН, блок содержит 10000 циклов;

– *схема 5-б*: первый двухблочный шаг (перегрузка-недогрузка-перегрузка или недогрузка-перегрузка-недогрузка) $P_{\max}=3$ кН, $P_{\min}=0.2$ кН, второй шаг - $P_{\max}= 2$ кН, $P_{\min}= 1.5$ кН, блок содержит 10000 циклов.

Перегрузочный блок, состоящий из недогрузки-перегрузки, замедляет рост трещины в 9 раз по сравнению с блоком из перегрузки-недогрузки, что близко к результатам, полученным в эксперименте. На рис. 4.15 показано изменение при таких испытаниях значения размаха порогового КИН ΔK_{th} в зависимости от длины трещины. Замедление роста трещины при последовательности недогрузка-перегрузка по сравнению с перегрузкой-недогрузкой связано с уменьшением расчетного значения напряжения у вершины трещины σ^* и, как следствие, с увеличением порогового значения КИН ΔK_{th} в процессе циклического нагружения по сравнению с номинальным значением, соответствующем базовой части – регулярному нагружению. При этом с ростом трещины значение КИН перегрузки увеличивается, в связи с чем расчетные значения σ^* падают, размах порогового КИН согласно зависимости (рис. 4.9б) увеличивается. Таким образом, эффект замедления с ростом трещины с точки зрения порогового КИН увеличивается. В то же время размах КИН базового блока регулярного нагружения так же увеличивается, что согласно зависимости (4.2) уменьшает влияние околопорогового участка на кинетику роста трещины. В результате этого роста эффект влияния последовательности нагружения пропадает на участке Пэриса.

Аналогично проведено моделирование испытания алюминиевого сплава при различных видах блочного нагружения, сформированного на основании стандартных квазислучайных спектров нагружения различных технических объектов (MiniFALSTAFF, MiniTWIST, SAETRANS). На рис. 4.16 показано моделирование испытания компактного стандартного образца по квазислучайным спектрам с силовыми параметрами, указанными на рис. 4.16. Асимметрия блока нагружения составляла $R=0.1$.

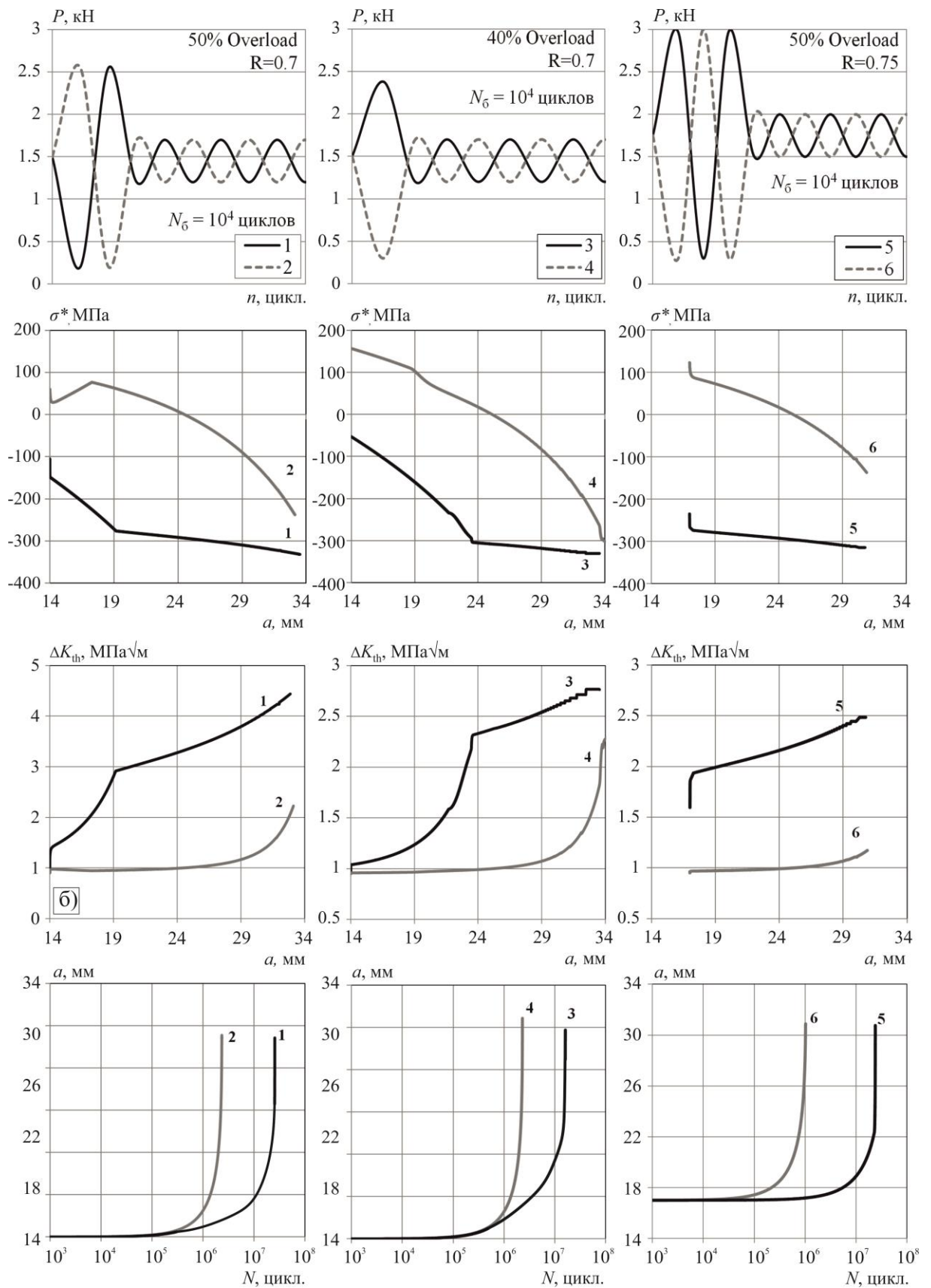


Рис. 4.15 – Кривые локального напряжения σ^* (а), изменение порогового КИН ΔK_{th} (б), кривые роста усталостной трещины (в) для перегрузочных режимов нагружений

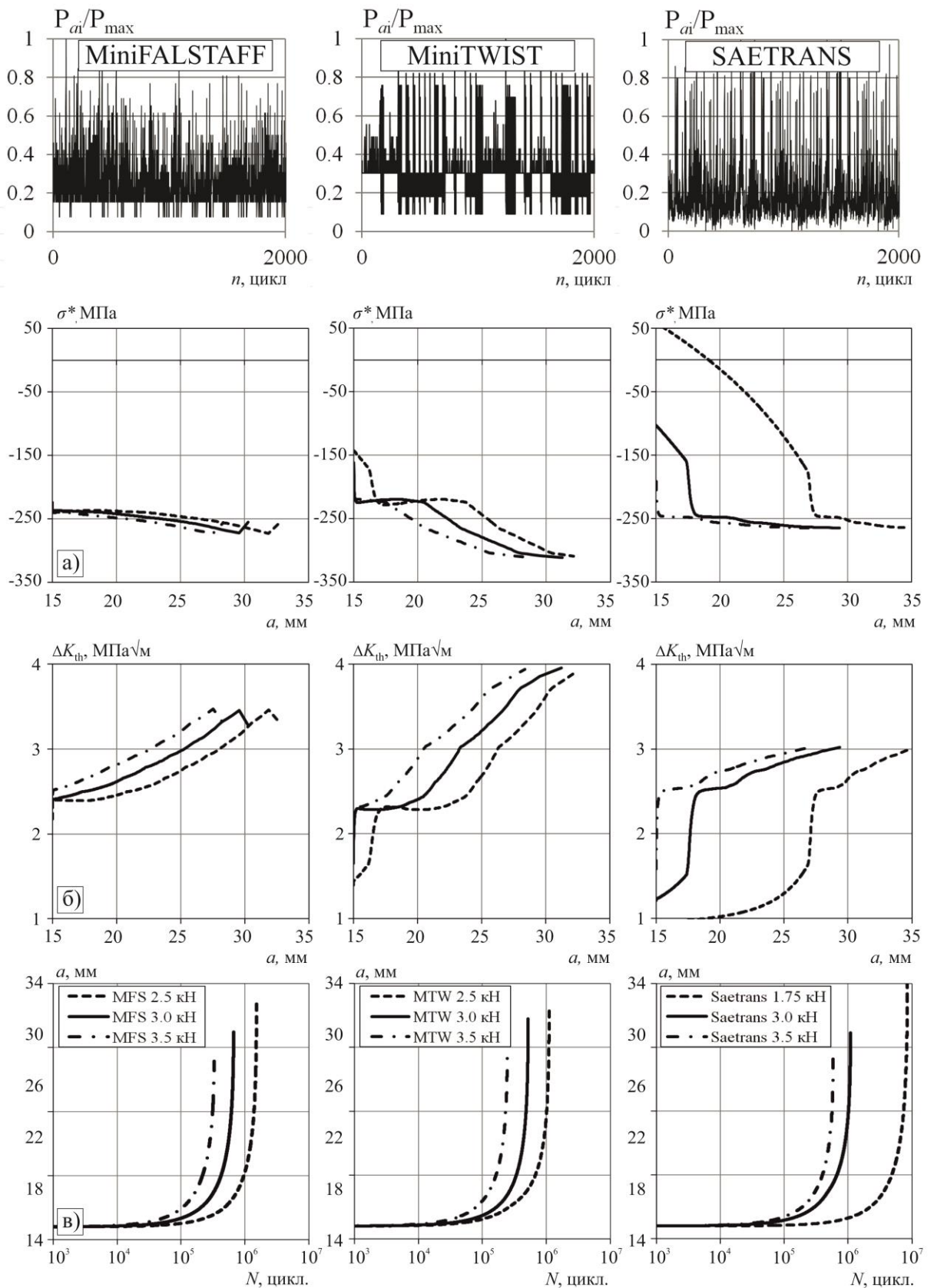


Рис. 4.16 – Кривые локального напряжения σ^* (а), изменение порогового КИН K_{th} (б), кривые роста усталостной трещины (в) для спектров MiniFALSTAFF, MiniTWIST и SAETRANS

Однако случайный характер прикладываемых к образцу нагрузок приводит к полю разброса точек изменения порогового КИН в зависимости от локального напряжения вблизи вершины трещины, что затрудняет исследование функции изменения этих параметров по мере роста усталостной трещины. Для изучения кинетики этих величин в процессе нагружения были подсчитаны средние их значения за блок нагружения и показано их изменение в процессе нагружения. Отмечено, что в зависимости от величины максимальной нагрузки блока квазислучайного нагружения локальное напряжение σ^* в течение 100-200 блоков нагружения остается постоянным, а затем уменьшается вплоть до разрушения. Пороговый КИН ΔK_{th} в начальный период нагружения остается практически постоянным. По мере роста усталостной он увеличивается, способствуя увеличению скорости роста усталостной трещины.

Взаимосвязь результатов применения предложенной модели по оценке продолжительности роста усталостной трещины с учетом локальных напряжений в устье трещины N_{BA} с полученными экспериментальными данными N_3 приведены на рис. 4.17 а и б. Численные значения показаны в приложении А, таблица А1.

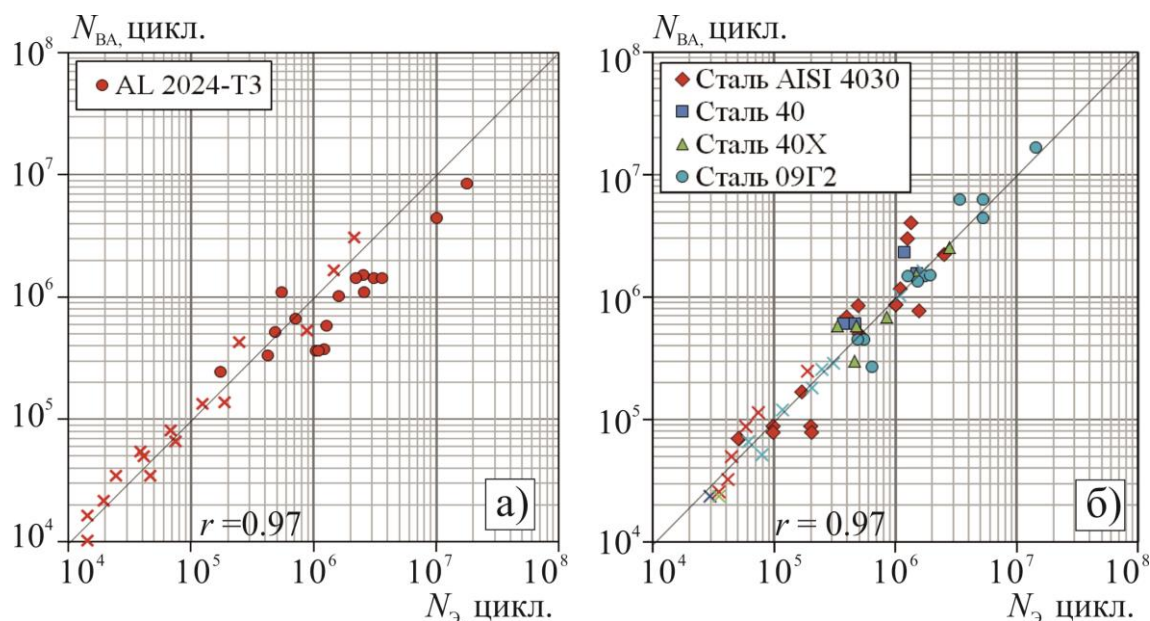


Рис. 4.17 – Расчет продолжительности роста трещины с учетом взаимодействия последовательностей нагрузок по модели пластичности

Особенностью использования разработанной модели является определение асимметрии каждого полуцикла циклического нагружения и закрытия трещины U и значений порогового КИН ΔK_{th} в зависимости от локальных напряжений вблизи вершины трещины, используемые в уравнении (4.10).

Хорошее совпадение расчетных зависимостей развития трещины с экспериментальными результатами, наглядно подтверждаются достоверность предложенной модели для описания кинетики усталостного разрушения в условиях взаимодействия последовательностей нагрузок [154] в отличие от моделей, которые это не учитывают [155]. Математическое моделирование продолжительности роста усталостной трещины особенно в околопороговой области ее роста показало, что для исследованного алюминиевого сплава 2024-T3 выявлена чувствительность роста трещины к различным видам силового воздействия, в том числе и разному характеру квазислучайного нагружения. Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных данных продолжительности роста трещины для различных видов внешнего воздействия составил $r = 0.97$ как для алюминиевого сплава, так и для сталей.

4.5 Учет последовательности при переменном нагружении на основании изменения порогового значения ΔK_{th} с учетом локальных напряжений по правилу Нойбера и кривой Рамберга-Осгуда и модели пластичности в устье трещины

Для подтверждения практической значимости предложенной в п. 4.4 гибридной модели был проведен проверочный расчет на базе экспериментальных данных, полученных в работе [45] и сравнение его с данными, полученными по предлагаемой модели. Сравнение производилось на алюминиевом сплаве AL 2024-T3. Типы используемых образцов совпадают, начальная длина трещины $a_0 = 14$ мм. План испытаний в [45] представлен регулярным нагружением, а также нагружениями типа

недогрузка-перегрузка, перегрузка-недогрузка. В таблице 4.3 приведены численные значения экспериментальных и расчетных результатов по представленной модели пластичности с учетом локальных напряжений по линейному правилу определения деформаций в окрестности трещины и модели учета местных напряжений по правилу Нойбера из [45].

Таблица 4.3 – Результаты продолжительности роста трещины AL 2024-T3 (экспериментальные $N_{\text{эксп}}$, по модели из [45] и по предлагаемой модели учета локальных напряжений $N_{\text{ВА}}$)

Нагружение	$N_{\text{эксп}}$, млн. цикл	$N_{\text{ВА}}$, млн. цикл	Расчет [45], млн. цикл
UL-OL R=0.7 50% Ov	34.3	25.7	31.2
OL-UL R=0.7 50% Ov	3.28	2.325	2.8
OL-UL R=0.7 40% Ov	1.98	2.33	1.67
UL-OL R=0.7 30% Ov	2.39	2.689	2.12
OL-UL R=0.7 30% Ov	1.97	2.33	1.56
OL R=0.7 40% Ov	57.3	16.18	19.2
UL R=0.7	1.9	2.312	1.9
UL-OL R=0.75 50% Ov	30.4	35.66	28.7
OL-UL R=0.75 50% Ov	3.18	2.057	2.72
UL-OL R=0.75 40% Ov	7.84	4.088	6.53
OL-UL R=0.75 40% Ov	2.09	2.063	1.81
UL-OL R=0.75 30% Ov	3.26	2.555	3.01
OL-UL R=0.75 30% Ov	1.77	2.069	1.52
UL R=0.75	1	2.067	1.75
ULc R=0.75	1.12	2.063	1.75
ULc-OL-ULc R=0.75	1.61	1.04	2.72
OL-UL-OL R=0.75	13.4	23.84	28.7
UL-OL-UL R=0.75	1.3	1.02	2.72
CAL R=0.7 Pmax=1.7	1.91	2.312	1.9
CAL R=0.75 Pmax=2	1.75	2.067	1.75
CAL R=0.7 Pmax=1.5	2.49	3.834	2.49
CAL R=0.1 Pmax=2.5	0.046	0.069	0.038
CAL R=0.3 Pmax=2.5	0.08	0.101	0.072
CAL R=0.5 Pmax=2.5	0.153	0.166	0.141
2UL R=0.75 Pmax=2	1.03	2.067	1.01

На рис. 4.18 показаны результаты расчета по представленной модели пластичности (красный цвет) и модели учета местных напряжений из анализируемого источника (синий цвет) в сравнении с экспериментальными данными.

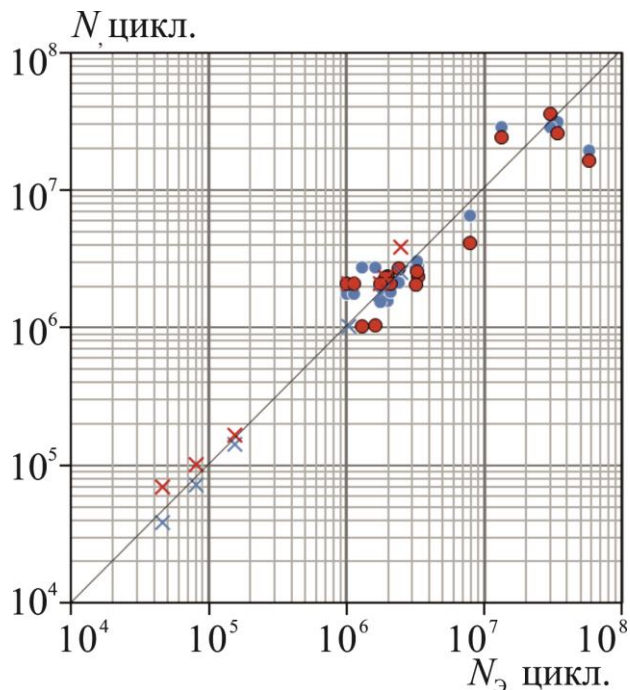


Рис. 4.18 – Взаимосвязь продолжительности роста трещины по предлагаемой модели пластичности (красные точки) и по модели [45] (синие точки) с экспериментальными данными из работы [45]

Полученные результаты по предложенной модели пластичности с учетом локальных напряжений обладают значением коэффициента корреляции равным 0.76. Можно сделать вывод, что модель применима не только к проведенным и представленным в работе типам испытаний, но и к испытаниям, проведенными другими авторами. Коэффициент корреляции экспериментальных и расчетных данных по источнику [45] составит 0.79. Обе модели дают примерно одинаковые результаты, что свидетельствует о том, что физические аспекты, заложенные в этих моделях позволяют решить проблему учета последовательности нагрузок при разных типах нагружения. Следует отметить, модель пластичности дает возможность более просто

математически описать процесс отпределения продолжительности роста трещины по сравнению с другой моделью.

Таблица 4.3 – Величины локальных напряжений в окрестности трещины согласно схеме нагружений на рис. 4.14 по различным различным моделям

Точка на рис. 4.14	1	2	3	4
<i>Модель 1</i>				
Напряжение по схеме (а)	354	-105	67	-105
Напряжение по схеме (б)	354	-274	232	60
<i>Модель 2</i>				
Напряжение по схеме (а)	354	-69	99	-69
Напряжение по схеме (б)	354	-241	228	57

Определение напряжений в устье трещины по модели пластичности (модель 1) и модели по уравнению Нойбера и кривой Рамберга-Осгуда (модель 2) на примере AL 2024–Т3 последовательностей нагружений типа недогрузка-перегрузка и перегрузка-недогрузка, согласно рисунку 4.14, представлены в таблице 4.3. В точке 2 оценивались локальные остаточные напряжения.

Выводы по четвертой главе

1) Проведенное моделирование продолжительности роста усталостной трещины при переменном нагружении по обобщенной и моделированной модели Уилленборга в NASGRO показало, что в обеих моделях выявлена нечувствительность к недогрузкам. При перегрузках лучшие результаты показала модифицированная модель, хотя и ее способность чувствовать переменные перегрузки незначительна.

2) Представлен подход по оценке продолжительности роста усталостной трещины с использованием принципа эквивалентности при оценке характера переменного циклического нагружения. Преимуществом данного метода является простота и отсутствие необходимости в

определении дополнительных коэффициентов для представленных материалов.

3) Разработана модель по оценке продолжительности роста усталостной трещины при регулярном и нерегулярном нагружениях с различными параметрами силового воздействия, которая учитывает «закрытие» трещины и характер квазислучайного нагружения. Данная модель основана на использовании метода «цикл-за-цикл». Использование эффективного КИН, учитывающего «закрытие» трещины и нерегулярность переменного нагружения позволяет свести кривые КДУР к эквивалентной кривой. Соответствие расчета и эксперимента показала перспективность предложенного метода.

4) Разработана модель для оценки кинетики роста усталостных трещин на всех участках КДУР в том числе в околопороговой области роста усталостной трещины на основании модели пластичности с учетом локальных напряжений в устье трещины и изменением порогового значения КИН ΔK_{th} в процессе циклического нагружения. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных долговечности, полученные при различных типах нерегулярного нагружения, показали удовлетворительное соответствие с высоким значением коэффициента корреляции.

5) Проведено сравнение расчетных значений продолжительности роста трещины при нерегулярном нагружении по представленной модели пластичности и экспериментальных, данных полученных другими авторами. Разработанная модель в достаточно высокой степени достоверности прогнозирует продолжительность роста трещины не только по полученным автором результатам экспериментов, но и по данным других литературных источников.

Основные результаты и выводы

1) Проведены испытания на трещиностойкость различных конструкционных материалов при регулярном и нерегулярном нагружениях. Нерегулярное нагружение представлено блочным с различным уровнем и количеством перегрузок или недогрузок, а также квазислучайными спектрами с разной асимметрией блока нагружения.

2) Фрактографическое исследование испытанных образцов из различных конструкционных материалов показало, что изменение скорости роста трещин при нагружении в виде перегрузки и недогрузки, полученное с помощью датчика раскрытия трещины соответствует замеру усталостных бороздок только для алюминиевого сплава. Для конструкционных сталей такое соответствие характерно для скоростей роста усталостной трещин выше 10^{-2} мм/цикл.

3) На основе проведенных исследований различных видов нерегулярного нагружения введен параметр меры нерегулярности переменного нагружения V для оценки влияния внешнего нерегулярного нагружения. Найдена взаимосвязь кинетики роста трещин и характера переменного нагружения, определяемого мерой нерегулярности.

4) Предложен учет закрытия трещины и характера переменного нагружения для различных конструкционных материалов через коэффициент закрытия U и меру нерегулярности V введением эффективного КИН $K_{эф}$. Такой подход позволяет полученные кривые КДУР нерегулярного нагружения совместить на одну кривую, характерную для испытаний при регулярном нагружении.

5) Разработаны новые полуфеноменологические модели прогнозирования кинетики роста усталостных трещин: для экспресс-анализа на среднем участке КДУР на основе принципа эквивалентности нерегулярного нагружения регулярному, а также на проведении поциклового расчета на всей длине роста трещины.

6) Введены аналитические зависимости для оценки изменения порогового значения КИН для разных материалов в зависимости от остаточных локальных напряжений в устье усталостной трещины, на основе которых разработана новая модель с учетом численно-аналитической методики расчета напряжений в окрестности вершины трещины, позволяющая учитывать последовательность нагружения.

7) Проведен сравнительный анализ предложенных моделей, позволяющий выявить эффективность использования модели, учитывающей последовательность нагрузок в околопороговой области нагружения КДУР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gouth, H.J. The fatigue of metals Gouth, H.J. The fatigue of metals / H.J. Gouth. – London, 1926.
2. Adetifa, O.A. A Model for Fatigue Crack Growth Delay under Two-level Block Loads / O.A. Adetifa, C.V.B. Gowda, T.H. Topper // ASTM STP 595. – 1976. – P. 142-156.
3. Ahn, Suneung. A Fatigue Life Model For Crack Propagation Under Variable-Amplitude Load / Suneung Ahn, Mendel Max B. // Mechanics Research Communications. – 1995. – Vol. 22(1). – P. 95-101.
4. Miner, M.A. in «Metal Fatigue» / ed. by G Sines. and J.L. Waisman. – N.Y. Toronto Lnd. – 1959. – P. 278-289.
5. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1965. – 456 с.
6. ГОСТ 23207-78 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – М.: Издательство стандартов, 1981.
7. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
8. Терентьев, В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интемет Инжиниринг, 2002. – 288 с.
9. Трощенко, В.Т. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
10. Furuya, Y. Gigacycle fatigue in high strength steels / Y. Furuya, H. Hirukawa, E. Takeuchi // Science and Technology of Advanced Materials. – 2019. – Vol. 20, Iss. 1, 31 – P. 643-656.
11. Hunter, M.S. Metallographic aspects of fatigue behavior of aluminium / M.S. Hunter, W.G. Friske // Proc. ASTM. – 1954. – Vol. 54. – P. 717-736.
12. Трощенко, В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках / Киев: Наукова думка, 1978. – 176 с.

13. Терентьев, В.Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева // Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской акад. наук. Москва : Наука, 2015. – 484 с.
14. Партон, В.З. Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. лит., 1990. – 240 с.
15. Irwin, G.R. Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate // Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME. – 1957. – Vol. E24, 1957. – P.351-369.
16. Мураками, Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах. – М.: Мир, 1990. – Т.1. – 448 с. – Т.2. – 566 с.
17. Матвиенко, Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
18. Трощенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1981. – 344 с.
19. Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов: учеб. пособие / В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев. – Изд-во НГТУ, Новосибирск, 2001. – 61 с.
20. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
21. Paris, P.C. The fracture mechanics approach to fatigue, fatigue an interdasciplinary approach / Syracuse University Press, Syracuse, N.Y. – 1964. – P. 107-132.
22. Johnson, H.U. The growth of fatigue cracks due to variations in load / H.U. Johnson, P.C. Paris // Journ. Fract.Mech. – 1968. – Vol. 1 – P. 1-45.
23. Нешпор, Г.С. Влияние условий нагружения на распространение усталостных трещин в листовых образцах из сплава Д16Т / Г.С. Нешпор, В.Г. Кудряшов, П.Г. Микляев // Проблемы прочности, 1972. – №8. – С. 66-68.

24. Forman, R.G. Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory / *Engineering Fracture Mechanics*. – 1972. – Vol. 4. No. 2. – P. 333-345.
25. Maymon, G. Probabilistic crack growth behavior of aluminum 2024-T351 alloy using the unified approach / *International Journal of Fatigue*. – 2005. – Vol. 27. – P. 828-834.
26. Панасюк, В.В. Механика разрушения и прочность материалов: справ. Пособие в 4 томах. – Киев: Наукова Думка, 1988. – 620 с.
27. Трощенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов: справочник. Ч. 1 и 2. – Киев: Наукова думка, 1987. – 1324 с.
28. Брок, Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. – М.: Высш. школа, 1980. – 368 с.
29. Schijve, J. *Fatigue of Structures and Materials* / Delft: Springer. – 2009. – 623 p.
30. Schijve, J. Fatigue crack closure: Observations and technical significance / Ed. J. C. Newman, W. Elber // *ASTM STP 982*. – 1988. – P. 5-35.
31. Elber, W. The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures / *ASTM STP 486* / Ed. C. W. Smith. – 1971. – P. 230-242.
32. Емельянов, О.В. Определение характеристик сопротивления стали развитию трещин при циклическом изменении нагрузки / О.В. Емельянов, И.А. Лядецкий // *Строительные материалы и изделия: Межвузовский сборник научных трудов*. Магнитогорск, МГТУ, 2002.
33. Antunes, F.V. Effect of crack closure on non-linear crack tip parameters / F.V. Antunes, T. Souda, R. Branco, L. Corrieis // *International Journal of Fatigue*. – 2015. – Vol. 71. – P. 53-63.
34. Yang, Y. Existence and insufficiency of the crack closure for fatigue crack growth analysis / Y. Yang, W. Zhang, L. Yongming // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – Vol. 62. – P. 144-153.

35. Sander, M. Fatigue crack growth under variable amplitude loading. Part I: experimental investigations / M. Sander, H.A. Richard // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 2006. – № 29. – P. 291-301.
36. Wei, R.P. Delay in fatigue crack growth / R.P. Wei, T.T. Shih // *International Journal of Fracture*. – 1974. – Vol. 10. №1. – P. 77-85.
37. Klysz, S. Effect of overloads on the fatigue crack growth in metals. // *Techn. Sc.* – 2005. – № 8. – P. 165-179.
38. Potter, J.M. The effect of load interaction and sequence on the fatigue behaviour of notched coupons / ASTM STP 519. – 1973. – P. 109-132.
39. Пелипенко, М.П., Влияние перегрузок на срок службы элементов металлических конструкций: дис. канд. техн. наук / Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. – 206 с.
40. Krkoska, M. Fatigue crack paths in AA2024-T3 when loaded with constant amplitude and simple underload spectra / M. Krkoska, S.A. Barterb, R.C. Alderliestenc, P. Whiteb, R. Benedictusc // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2010. – Vol. 77, Iss. 11. – P. 1857–1865.
41. Савкин, А.Н. Фрактографический анализ продвижения усталостных трещин при регулярном циклическом нагружении с перегрузками в алюминиевом сплаве 2024-T3 / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов // *Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. – Волгоград, 2018. № 3 (213). – С. 94-101.
42. Schijve, J. Fatigue damage accumulation and incompatible crack front orientation // *Eng. Fract. Mech.* – 1974. – Vol. 6. – P. 245-252.
43. Alzos, W.X. Effect of Single Overload/Underload Cycles on Fatigue Crack Propagation / W.X. Alzos, A.C. Skat, B.M. Hillbery // *Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads*. ASTM STP 595. – 1976. – P. 41 – 60.
44. Morteza, M. Influence of an overload applied within compressive base-line loading on crack propagation retardation in AM60B magnesium alloy / M. Morteza, T. Farid // *Materials Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 595. – P. 213-223.

45. Андроник, А.В. Оценка влияния последовательности нагрузок на нижний участок кинетической диаграммы усталостного разрушения в металлах: дисс. канд. техн. наук / Санкт-Петербург: Институт проблем машиноведения РАН, 2016. – 200 с.
46. Tiedemann, D. The Crack Propagation Rate According to Notches and Overload Levels / Dominic Tiedemann, Jurgen Bar, Hans-Joachim Gudladt // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 3. – P. 1359 – 1364.
47. *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, ASTM STP. 486. American Society for Testing and Materials. – 1971. – P. 251.
48. Сундер, Р. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis / Р. Сундер, А.В. Андроник, А.В. Бяков, А. Еремин, С.В. Панин, А.Н. Савкин // *International Journal of Fatigue*. – 2016. – Vol. 82, Part 3. – С. 667-675.
49. Walker, Е.К. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 aluminum. In: *Effect of environment and complex load history on fatigue life* / WASTM STP 462, Philadelphia: American Society for Testing and Materials. – 1970. – P. 1-14.
50. Hartman, A. The Effects of Environment and Load Frequency on the Crack Propagation law for Macro Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloys / A. Hartman, Schijve J. // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1970. – Vol. 1(4). – P. 615-631.
51. Li, J. Fatigue life prediction for some metallic materials under constant amplitude multiaxial loading / Jing Li, Chun-Wang Li, Yan-Jiang Qiao, Zhong-Ping Zhang // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – Vol. 68. – P. 10-23.
52. Zheng, X. Fatigue Crack Propagation in Steels / Xiulin Zheng, A. Manfred // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1983. – Vol. 18(3). – P. 965-973.
53. Skorupa, M. Load Interaction Effects during Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, a Literature Review. Part I .Empirical Trends / *Fatigue Fracture Engineering Materials and Structures*. – 1998. – P. 987-1006.

54. Skorupa, M. Load Interaction Effects during Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, a Literature Review. Part II: Qualitative Interpretation / Fatigue Fracture Engineering Materials and Structures. – 1999. – P. 905-926.
55. Wheeler, O.E. Spectrum Loading and Crack Growth / Journal of Basic Engineering. – 1972. – March, 94. – P. 181-186.
56. Johnson, W.S. Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth. Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random loading / W.S. Johnson, J.B. Chang, C.M. Hudson // ASTM STP 748, American Society for Testing and Materials. – 1981. – P. 85-102.
57. Gallagher, J.P. Influence of the Yield Strength on Overload Fatigue Crack Growth Behavior of 4340 Steel / J.P. Gallagher, T.F. Hughes // AFFDL-TR-74-27, Air Force Flight Dynamics Laboratory. Wright Patterson Air Force Base, OH. – 1979.
58. Barsom, J.M. Fatigue crack growth under variable amplitude loading in various bridge steels / In Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads. – 1976.
59. McEvily, A.J. Phenomenological and Microstructural Aspects of Fatigue / Presented at the Third International Conference on the Strength of Metals and Alloys, Cambridge, England; published by The Institute and The Iron and Steel Institutes, Publication. – 1974. – Vol. 36. – P. 204-213.
60. Серенсен, С.В. Сопротивление усталостному и хрупкому разрушению. Учеб. пособие для вузов. – М.: Атомиздат, 1975, – С. 192.
61. Hudson, C.M. A Root-Mean-Square Approach for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading, Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading / ASTM STP 748. American Society for Testing and Materials. – 1981. – P. 41-52.
62. Newman, Jr. Prediction of fatigue crack growth under variable amplitude and spectrum loading using a crack closure model / In Design of Fatigue and Fracture Resistant Structures. ASTM STP 761. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. – 1982. – P. 255-277.

63. Dugdale, D.S. Yielding of steel sheets containing slits / Journal of Mechanics and Physics Solids. – 1960. – Vol. 8. – P. 100–104.
64. Paris, P.C. Critical Analysis of Crack Propagation Laws / P.C. Paris, F. Erdogan / Journal of Basic Engineering; Transaction, American Society of Mechanical Engineers, Series D. – 1963. – Vol. 85. – P. 528-534.
65. Берендеев, Н.Н. Методы решения задач усталости в пакете Ansys Workbench: Учебно-методическое пособие/ – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 64 с.
66. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
67. NASA. Fatigue crack growth computer program «NASGRO», Version 4.12 – Reference manual. – 2004.
68. Бойцов, Г.В. О взаимосвязи стадии зарождения и кинетики развития усталостного разрушения / Механика разрушения, надежность и техническая диагностика тонкостенных конструкций : межвуз. сб. – Н. Новгород : Изд-во НГТУ. – 1996. – С. 9-16.
69. Прочность паровых турбин / под ред. акад. Л.А. Шубенко-Шубина. - 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1973. – 456 с.
70. Терентьев, В.Ф. Влияние размера зерна на сопротивление усталости металлов / В.Ф. Терентьев, В.Г. Пайда // В сб.: Усталость и вязкость разрушения метариалов. – М.: Наука, 1974. – С. 109-140.
71. Овчинников, И.И. Влияние водородсодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников // Науковедение, 2012. – № 4. – С. 3-31.
72. Ли, Ю. В. Водородное охрупчивание алюминиевых сплавов / Ю.В. Ли, А.В. Бочкарева, С.А. Баранникова // Материалы международной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», Томск, 2014. – С. 95-97.

73. Arijit R. Hydrogen enhanced fatigue crack growth in an HSLA steel / R. Arijit, I. Manna, S. Tarafder, S. Sivaprasad, S. Paswan, I. Chatteraj // *Materials Science and Engineering*. – 2013. – Vol. 588. P. 86-96.
74. Биргер, И.А. Сопротивление материалов: Учебное пособие / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.
75. Koning, E.J.L. Waterflooding under fracturing conditions, PhD Thesis, Delft Technical University. – 1988.
76. Barsom, J.M. Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads, (edited by R.P. Wei and R. I. Stephens). ASTM STP 595. Philadelphia. – 1976. – P. 217-235.
77. Драгунов, Ю.Г. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – М.: 2014. 1216 с.: илл.
78. Savkin, A.N. Advanced materials of automobile bodies in volume production / A.N. Savkin, A.V. Andronik, A.I. Gorunov, A.A. Sedov, M.A. Sukhanov // *European Transport – Trasporti Europei (Италия)*. – 2014. – Iss. 56, No. 10. – P. 1-27.
79. ISO 7539-6 Corrosion of metals and alloys - Stress corrosion testing - Part 6: Preparation and use of pre-cracked specimens for tests under constant load or constant displacement. 2nd Ed. – 2003.
80. ASTM E647-13ae1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates / ASTM International, West Conshohocken, PA. – 2013.
81. Kim, Seul-Kee. Estimation of Fatigue Crack Growth Rate for 7% Nickel Steel under Room and Cryogenic Temperatures Using Damage-Coupled Finite Element Analysis / Seul-Kee Kim, Chi-Seung Lee, Jeong-Hyeon Kim, Myung-Hyun Kim // *Metals - Open Access Metallurgy Journal*. – 2015. – P. 603-627.
82. Пестриков, В.М. Механика разрушения / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2012. – 552 с.
83. BiSS. Nano Servohydraulic testing machine [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа:

http://biss.in/cms/v2/index.php?option=com_content&view=article&id=252&catid=88&Itemid=323 (дата обращения 29.07.2018)

84. Schütz, W. ASTM. STP 1006 Standardized Stress. Time Histories-An Overview, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. – 1989. – P. 3-16.
85. Ten, Have, A.A. European Approaches in Standard Spectrum Development, ASTM STP 1006. American Society for Testing and Materials, Philadelphia. – 1989. – P. 17-35.
86. Heuler, P. Standardized load – time histories – a contribution on to durability issuer under Spectrum loading / P. Heuler, T. Bruder, H. Klätschke // Mat.-wiss. u. Werkstofftech. – 2005 – 36, No 11. – P. 669–677.
87. Савкин, А.Н. Стандартные спектры нагружения для различных технических объектов / А.Н. Савкин, А.А. Седов, А.В. Сиромехин, А.В. Андроник // Изв. ВолгГТУ. Серия "Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении". Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. – № 5. – С. 99-105.
88. Downing, S.D. Simple rainflow counting algorithms / S.D. Downing, D.F. Socie // International journal of fatigue. – 1982. – №1. – P. 31-40.
89. Савкин, А.Н. Прогнозирование усталостной долговечности высоконагруженных конструкций : монография / А. Н. Савкин, В. П. Багмутов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – 364 с.
90. Савкин, А.Н. Оценка влияния характера нагружения и силовых параметров случайного внешнего воздействия на рост усталостной трещины в низколегированной стали / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 7. – С. 40-45.
91. Савкин, А.Н. Исследование кинетики роста усталостных трещин в сталях в зависимости от характера переменного нагружения / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2018. – Т. 84, № 3. – С. 43-51.

92. Palmgren, A. Die Lebensdauer von Kugellagern // Z. Vereines Dentscher tag. – 1924. – 68, N14. – P. 339-341.
93. Савкин, А.Н. Влияние характера переменного нагружения на кинетику и продолжительность роста усталостных трещин / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.В. Андроник, А.А. Седов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Волгоград, 2016. – № 2 (181). – С. 53-60.
94. Савкин, А.Н. Влияние перегрузок на околопороговую скорость роста усталостных трещин в алюминиевом сплаве 2024–Т3. Влияние характера, величины и последовательности перегрузок на скорость роста усталостных трещин / А.Н. Савкин, Р. Сундер, А.В. Андроник, А.А. Седов // Металлы. 2018. – № 6 (ноябрь–декабрь). – С. 95-102.
95. Савкин, А.Н. Трещиностойкость алюминиевого сплава 2024-Т3 при регулярном циклическом нагружении с различными возмущающими воздействиями / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Деформация и разрушение материалов, 2018. – № 6. – С. 12-19.
96. Иванова, В.С. Количественная фрактография. Усталостное разрушение / В.С. Иванова, А.А. Шанявский // Челябинск: Металлургия, 1988. – 399 с. ил.
97. Sunder, R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. – 2011. – Vol. 9, №1.
98. Sunder, R. Binary coded event registration on fatigue / Pre-print of paper to be presented at SEE conference on «Digital Techniques in Fatigue». London. – 1983. – P. 22-30.
99. Савкин, А.Н. Оценка влияния полноты нагружения при перегрузочных и недогрузочных режимах в низколегированной автомобильной стали / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2016. - № 9 (188). - С. 79-83.
100. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017619354 от 24 августа 2017 г. Российская Федерация. Программа для расчёта меры полноты

- регулярного нагружения с возмущающими воздействиями / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов, А.О. Долуда; ВолгГТУ. – 2017.
101. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017664000 от 14 декабря 2017 г. Российская Федерация. Программа для расчёта полноты блока спектра псевдослучайного нагружения / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов, М.А. Климов; ВолгГТУ. – 2017.
102. Емельянов, О.В. Влияние перегрузок на скорость роста усталостных трещин / О.В. Емельянов, М.П. Пелипенко // Вестник ЮУрГУ, 2011. – №35. – С. 21–24.
103. Панасюк, В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / Киев: Наукова думка, 1991. – 416 с.
104. Kocanda, D. Variable amplitude load interaction in fatigue crack growth for 2024-N3 aluminum alloy / D. Kocanda, S. Kocanda, J. Torzewski // Proceedings of the 16th European Conference of Fracture, Greece. – 2006. – P. 177-178.
105. Jones, R. From NASGRO to fractals: Representing crack growth in metals / R. Jones, F. Chen, S. Pitt, M. Paggi, A. Carpinteri // International journal of fatigue. – 2015. – Vol. 82. – P. 540-549.
106. Willenborg, J. A Crack Growth Retardation Model Based on Effective Stress Concepts / J. Willenborg, R.H. Engle, H.A. Wood // Report AFFEL-TM-71-1- FBR, Dayton (OH): Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base. – 1971. – № 9. – 15 p.
107. Shan J. Comparative study between crack closure model and Willenborg model for fatigue prediction under overload effects / J. Shan, Z. Wei, H. Jingjing, W. Zili // Chinese Journal of Aeronautics. – 2016. – Vol. 29, Iss. 6. – P. 1618-1625.
108. Maierhofer, J. Modified NASGRO equation for physically short cracks / J. Maierhofer, R. Pippan, H.-P. Gänser // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 59. – P. 200-207.
109. Савкин, А.Н. Effect of character, value, and sequence of overloads on the fatigue crack growth in 2024-T3 aluminum alloy / А.Н. Савкин, А.А. Седов, Г.В.

- Бойко, К.А. Бадиков, Д.С. Денисевич // AIP Conference Proceedings. Vol. 1909: Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2017 (AMHS'17) (Tomsk, Russia, 9-13 October 2017) / ed by V.E. Panin [et al.]. – [AIP Publishing], 2017. – P. 020188-1 – 020188-4.
110. Нестенко, Б.Г. Трещиностойкость материалов обшивки конструкции гражданских самолетов / Научный вестник МГТУ МА, серия Аэромеханика, прочность, поддержание летней годности, 2010. –153. – С. 7-14.
111. Manjunatha, S.M. Fatigue Crack Growth Prediction under Spectrum Load Sequence in an Aluminum Alloy by K^* -RMS Approach / International Journal of damage mechanics, 2008. – Vol. 17. – P. 477-492.
112. Sullivan, A.M. Analysis of Fatigue-Crack Growth in a High-Strength Steel - Part 1: Stress level and stress ratio effects at constant amplitude / A.M. Sullivan, T.W. Crooker // Trans. ASME, J. Press. Vess. Tech. – 1976. – Vol. 98. – P. 179-184.
113. Савкин, А.Н. Кинетика роста усталостной трещины в алюминиевом сплаве 2024-T3 при переменном циклическом нагружении / А.Н. Савкин, Р. Сундер, А.А. Седов, К.А. Бадиков // Деформация и разрушение материалов, 2019. – №12. – С. 37-43.
114. Трощенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский // Киев: Наукова думка, 1987. – 175 с.
115. Savkin, A.N. Approximation algorithms of crack growth rate curve based on crack size variations / A.N. Savkin, A.V. Andronik, R. Koraddi // Journal of Testing and Evaluation. – 2016. – Vol. 44, No. 1. – P. 1-10.
116. Miner, M.A. Cumulative damage in fatigue, Journal of Applied Mechanics, ASME, USA. – 1945. – Vol. 12. – A159-A164.
117. Симонян А.М. К вопросу о суммировании усталостных повреждений материалов / А.М. Симонян, А.С. Арутюнян, Э.А. Акопян // Известия национальной академии наук Армении, 2014. – №4. – С 65-70.

118. Ricardo L.C.H. Crack simulation models in variable amplitude loading - a review / L.C.H. Ricardo, C.A.J. Miranda // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2016. – Vol. 35. – P. 456-471.
119. Schijve, J. Fatigue crack propagation in light alloy sheet material and structures, NLR, Report MP195, Amsterdam. – 1960.
120. Sunder, R. Fatigue as a process of brittle micro-fracture / *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 2005. – Vol. 28, № 3. – P. 289-300.
121. Sunder, R. Characterization of Threshold Stress Intensity as a Function of Near-Tip Residual Stress: Theory, Experiment, and Applications / *Materials Performance and Characterization*. – 2015. – Vol. 4. № 2.
122. Pugno, N. A generalized Paris' law for fatigue crack growth / N. Pugno, M. Ciavarella, P. Cornetti, A. Carpinteri // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* – 2006. – Vol. 54. – P. 1333-1349.
123. Noroozi, A.H. A study of the stress ratio effects on fatigue crack growth using the unified two-parameter fatigue crack growth drivin / A.H. Noroozi, G. Glinka, S. Lambert // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29. – P. 1616-1633.
124. Sun, Chengqi. Effects of stress ratio on crack growth rate and fatigue strength for high cycle and very-high-cycle fatigue of metallic materials / Chengqi Sun, Zhengqiang Lei, Youshi Hong // *Mechanics of Materials*. – 2014. – Vol. 69. – P. 227-236.
125. Партон, В.З. Динамика хрупкого разрушения / В.З. Партон, А.Г. Борисковский. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
126. Mills, W.J. Load interaction effects on fatigue crack propagation in 2024-T3 aluminum alloy / W. J. Mills, R. W.Hertzberg // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1976. – Vol. 8. – P. 665–667.
127. Budiansky, B. Analysis of Closure in Fatigue Crack Growth / B. Budiansky, J.W. Hutchinson // *Journal of Applied Mechanics*. – 1978. – Vol 45. – P. 267-276.

128. Führung, H. Dugdale crack closure analysis of fatigue cracks under constant amplitude loading / H. Führung, T. Seeger // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1979. – Vol. 11. – P. 99-122.
129. Newman, J.C. A Crack-Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth Under Aircraft Spectrum Loading / J.C. Newman Jr, T. Seeger // *ASTM STP 748*. – 1981. – P. 53-84.
130. Бакиров, В.Ф. Модель леонова-панасюка-дагдейла для трещины на границе соединения материалов / В.Ф. Бакиров, Р.В. Гольдштейн // *Прикладная математика и механика*, 2004. – Т.68, № 1. – С. 170-179.
131. Minakawa, K. On crack closure in the near-threshold region / K. Minakawa, A.J. McEvily // *Scripta Metallurgica*. – 1981. – Vol. 15. – P. 633-636.
132. Suresh, S. A geometric model for fatigue crack closure induced by fracture surface roughness/ S. Suresh, R.O. Ritchie // *Metallurgical Transactions A*. – 1982. – Vol. 13. – P. 1627-1631.
133. Morris, W.L. A simple model of stress intensity range threshold and crack closure stress / W.L. Morris, M.R. James, O. Buck // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1983. – Vol. 18. – P. 871-877.
134. Suresh, S. Fatigue crack deflection and fracture surface contact: micromechanical models // *Metallurgical Transactions A*. – 1985. – Vol. 16. – P. 249-260.
135. Федотов А.А. Исследование шероховатости поверхностей твердых тел применительно к задачам трибологии и механики разрушения / *Вестник Нижегородского ун-та им. Лобачевского. Серия Механика деформируемого твердого тела*, 2011. – №4(4). – С. 1825-1827.
136. Suresh, S. Oxide induced crack closure: an explanation for near-threshold corrosion fatigue crack growth behavior / S. Suresh, G.F. Zamiski // *Metallurgical Transactions A*. – 1981. – Vol. 12. – P. 1435-1443.
137. Suresh, S. Oxide-induced crack closure / S. Suresh, C. White, R.O. Ritchie. // *Metallurgical Transactions A*. – 1980. – Vol. 32. – P. 76-76.

138. McEvily, A.J. On crack closure in fatigue crack growth // ASTM International. – 1988. – P. 35-43.
139. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.: ил.
140. Sunder, R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue / Journal of ASTM International. – 2012. – Vol. 9. №1. – 32 p.
141. Sweitzer, K.A. Mean stress effect on random fatigue of nonlianer structures / K.A. Sweitzer, N.S. Ferguson // 12-th Intenational Congress on Sound and Vibration, Lisbon, 11-14 July 2005. P.91-98.
142. Шашгакова, Л.В. Исследование механизмов разрушения на трех стадиях развития водородного охрупчивания / Тамбов: Вестн. тамб. ун.-та. Сер. Естественные и технические науки, 2013. – №4, Т. 18. – С. 1562-1563.
143. Айткулов, Р.Р. Кинетика водородного охрупчивания и эффективность субструктурного взрывного упрочнения стали: дисс. канд. техн. наук / Оренбург: ОГУ, 2010. – 113 с.
144. Song, J. Atomic mechanism and prediction of hydrogen embrittlement in iron / J. Song, W.A. Curtin // Nature Materials. –2013. – Vol. 12. – P.145-151.
145. Добровольский, В.И. Определение параметров механики разрушения материала при длительном нагружении / В.И. Добровольский, С.В. Добровольский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2006. – № 6(72). – С. 47-55.
146. Sunder, R. Engineering Application of Threshold Stress Intensity / ASTM-ESIS Annual Symposium on Fracture Mechanics, USA, FL. – 2013. – P. 24-48.
147. Johnson, T.M. Fatigue life prediction of automotive-type load histories / In: Fatigue under complex loading: analysis and experiments. – 1977. – Vol. 6. – P. 85-93.
148. Knop, M. On the Glinka and Neuber methods for calculating notch tip strains under cyclic load spectra / M. Knop, R. Jones, L. Molent, C. Wang // International journal of fatigue. – 2000. – № 22. – P. 743-755

149. Chaboche, J.-L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories // *International Journal of Plasticity*. – 2008. – Vol. 24. – P. 1642-1692.
150. Chaboche, J.-L. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions / J.-L. Chaboche, P. Kanouté, F. Azzouz // *International Journal of Plasticity*. – 2012. – Vol. 35. – P. 44-66.
151. Armstrong, P.J. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect / P.J. Armstrong, C.O. Frederick // *CEGB Report No. RD/B/N/ 731*. – 1966.
152. Halama, R. Phenomenological Modelling of Cyclic Plasticity / R. Halama, J. Sedláč, M. Šofer // *Numerical Modelling*. – 2012. – 398 p.
153. Савкин, А.Н. Продолжительность роста трещины с учётом её закрытия и влияния местных напряжений у вершины трещины при нерегулярном нагружении / А.Н. Савкин, Р. Сундер, Д.С. Денисевич, А.А. Седов, К.А. Бадиков // XII Междунар. Конф. «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 21-25 мая 2018 г.) : сб. материалов / Федеральное агентство научных организаций (ФАНО) России, РФФИ, УрО РАН, Ин-т машиноведения УрО РАН, Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН. - Екатеринбург, 2018. - С. 327-329.
154. Bekal, S. Calculation growth on variable amplitude loading: Master thesis / S. Bekal. Manipal Institute of Technology. India. – 2013. – 112 p.
155. Carpinteri, A. Crack morphology models for fracture toughness and fatigue strength analysis / A. Carpinteri, A. Spagnoli, M. Terzano / *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 2019. – Vol. 42, Iss. 9. – P. 1965-1979.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 – Программы исследований (результаты экспериментов и расчетов)

Нагрузка	P_{\max} , кН	R	V	Q	N_{Σ} , млн. цикл.	N_{VAL} , млн. цикл.	$N_{Ц}$, млн. цикл.	$N_{Ц ФМ}$, млн. цикл.	$N_{ВА}$, млн. цикл.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Алюминиевый сплав AL 2024-T3</i>									
CAL	1.5	0	1	1	0.2513	-	0.239	0.300	0.4284
	2	0	1	1	0.1902	-	0.092	0.1065	0.1374
	2.5	0	1	1	0.0419	-	0.0436	0.0407	0.0502
	3	0	1	1	0.0197	-	0.0248	0.0245	0.0216
	3.5	0	1	1	0.0144	-	0.0144	0.0134	0.0101
	2.5	0.1	1	1	0.0395	-	0.0357	0.0508	0.0547
	2.5	0.3	1	1	0.0689	-	0.0779	0.0709	0.0810
	3	0.3	1	1	0.0249	-	0.0131	0.0345	0.0346
	3.5	0.3	1	1	0.0144	-	0.0080	0.0186	0.0162
	2.5	0.5	1	1	0.1252	-	0.1591	0.140	0.1346
	1.75	0.5	1	1	0.8956	-	0.5270	0.5392	0.533
	3	0.5	1	1	0.0762	-	0.0869	0.0684	0.0664
	3.5	0.5	1	1	0.0470	-	0.052	0.0365	0.0348
	1.5	0.7	1	1	2.160	-	3.271	2.982	3.08
2	0.75	1	1	1.490	-	2.082	1.612	1.652	
SAETRANS	1.75	0.5	0.373	17	17.686	14.506	14.730	16.210	8.46
	3	0.5	0.373	17	2.549	1.361	2.424	2.887	1.092
	3.5	0.5	0.373	17	1.275	0.827	1.275	1.605	0.5848
MFS	2.5	0	0.327	20	2.539	1.475	1.828	1.869	1.516
	3	0	0.327	20	0.710	0.776	0.963	0.968	0.6648
	3.5	0	0.327	20	0.421	0.428	0.592	0.558	0.3316
MTW	2.5	0.3	0.385	16	0.549	1.135	0.238	1.876	1.103
	3	0.3	0.385	16	0.483	0.517	0.734	0.963	0.6167
	3.5	0.3	0.385	16	0.174	0.254	0.399	0.550	0.245
UL1	-	-	0.878	23	1.220	0.985	1.248	0.658	0.3762
UL2	-	-	0.877	22	1.032	0.946	1.248	0.658	0.3651
UL3	-	-	0.881	22	1.088	0.967	1.248	0.658	0.362
OL1	-	-	0.72	34	3.093	4.814	2.916	1.437	1.437
OL2	-	-	0.721	33	2.195	4.771	2.916	1.437	1.437
OL3	-	-	0.7	33	3.572	4.793	2.916	1.437	1.437
OL-UL-OL	-	-	0.499	9	9.994	2.719	5.157	-	4.424
UL-OL-UL	-	-	0.499	9	1.597	2.719	5.157	-	1.022
<i>Сталь AISI 4030</i>									
CAL	15	0	1	1	0.035	-	0.021	0.016	0.025
	15	0.1	1	1	0.042	-	0.027	0.023	0.032
	15	0.25	1	1	0.044	-	0.034	0.031	0.049
	15	0.4	1	1	0.059	-	0.054	0.054	0.086
	15	0.455	1	1	0.074	-	0.076	0.068	1.112
	15	0.6	1	1	0.190	-	0.224	0.143	0.245

1 перегрузка	15	0	0.551	9	0.198	0.303	0.218	0.105	0.088
5 перегрузок	15	0	0.587	7	0.203	0.254	0.175	0.081	0.078
1 недогрузка	15	0	0.825	2	0.097	0.081	0.064	0.052	0.088
5 недогрузок	15	0	0.824	2	0.098	0.081	0.064	0.052	0.078
Блочное МСБ	15	0	0.834	2	0.052	0.077	0.051	0.045	0.069
Блочное БСМ	15	0	0.840	2	0.050	0.075	0.050	0.045	0.070
SAETRANS	15	0.1	0.398	18	0.495	0.824	0.711	1.062	0.842
SAEBRACKET	15	0.1	0.401	18	0.395	0.748	0.590	0.877	0.688
SAESUS	15	0.1	0.277	30	1.330	1.358	2.143	3.984	3.989
Спектр М1	16.5	0.455	0.331	25	1.5600	1.048	1.151	0.464	0.763
Спектр М2	15	0.4	0.365	21	1.000	0.890	0.818	0.525	0.858
Спектр М3	12	0.25	0.391	19	1.100	0.786	0.644	0.729	1.162
Спектр В1	15	0.6	0.243	38	2.500	1.599	3.387	1.922	2.213
Спектр В2	15	0.4	0.365	21	1.000	0.890	0.818	0.525	0.858
Спектр В3	15	0	0.608	7	0.168	0.277	0.140	0.165	0.168
Спектр С	15	0.1	0.298	29	1.260	1.240	1.660	1.243	3.000
Спектр А	15	0.1	0.410	17	0.496	0.717	0.541	0.359	0.496
<i>Сталь 09Г2</i>									
CAL	3.5	0.1	1	1	0.243	-	0.245	0.253	0.251
	5	0	1	1	0.080	-	0.063	0.053	0.051
	5	0.1	1	1	0.062	-	0.073	0.068	0.065
	5	0.3	1	1	0.118	-	0.112	0.120	0.118
	5	0.5	1	1	0.310	-	0.235	0.289	0.284
	5	0.7	1	1	1.090	-	0.911	1.023	1.018
	5	0.75	1	1	1.701	-	1.553	1.637	1.615
	7	0.1	1	1	0.206	-	0.250	0.196	0.178
SAETRANS	3.5	0.1	0.398	26	5.300	4.390	7.258	8.844	6.147
	5	0	0.398	26	1.770	1.660	1.733	2.014	1.458
	7	0.1	0.398	26	0.553	0.561	0.627	0.703	0.445
SAEBRACKET	3.5	0.1	0.401	26	3.404	4.319	6.068	7.780	6.147
	5	0	0.401	26	1.277	1.633	1.450	1.634	1.458
	7	0.1	0.401	26	0.488	0.522	0.525	0.578	0.445
SAESUS	3.5	0.1	0.277	51	14.317	8.474	6.289	22.400	16.490
	5	0	0.277	51	5.325	3.204	5.281	6.813	4.369
	7	0.1	0.277	51	1.957	1.083	1.907	2.506	1.485
Спектр А	7	0.1	0.410	25	0.641	0.583	0.573	0.637	0.267
Спектр С	7	0.1	0.298	45	1.523	0.977	1.512	1.896	1.328
<i>Сталь 40</i>									
CAL	15	0.1	1	1	0.030	-	0.020	0.015	0.0233
SAETRANS	15	0.1	0.398	18	0.464	0.588	0.509	0.421	0.593
SAEBRACKET	15	0.1	0.401	18	0.375	0.534	0.422	0.409	0.595
SAESUS	15	0.1	0.277	32	1.510	0.970	1.532	1.568	1.542
Спектр С	15	0.1	0.298	29	1.190	0.877	1.187	1.201	2.293
<i>Сталь 40Х</i>									
CAL	15	0.1	1	1	0.035	-	0.020	0.015	0.0233
SAETRANS	15	0.1	0.398	18	0.475	0.686	0.509	0.421	0.580
SAEBRACKET	15	0.1	0.401	18	0.334	0.624	0.422	0.409	0.581
SAESUS	15	0.1	0.277	30	1.493	1.094	1.532	1.568	1.522

Спектр С	15	0.1	0.298	29	2.794	1.023	1.184	1.201	2.530
MFS	15	0.1	0.302	25	0.847	1.004	1.129	0.702	0.688
MTW	15	0.1	0.322	19	0.456	0.912	0.903	0.348	0.299

Используемые обозначения в таблице А1:

P_{\max} – максимальное нагружение, кН;

R – асимметрия блока нагружения;

V – мера нерегулярности блока нагружения;

Q – коэффициент увеличения продолжительности роста усталостной трещины при квазислучайном нагружении по сравнению с регулярным циклическом нагружении с теми же силовыми параметрами P_{\max} и R ;

$N_{\text{Э}}$ – экспериментальная продолжительность роста трещины, млн. цикл.;

N_{VAL} – расчетная продолжительность роста трещины согласно принципу эквивалентности нерегулярного процесса нагружения эквивалентным по повреждающей способности регулярному, млн. цикл.;

$N_{\text{Ц}}$ – расчетная продолжительность роста трещины по принципу «цикл-за-цикл» согласно формуле Пэриса, млн. цикл.;

$N_{\text{Ц ФМ}}$ – расчетная продолжительность роста по принципу «цикл-за-цикл» согласно формуле Формана-Мэтту, млн. цикл.;

$N_{\text{ВА}}$ – расчетная продолжительность роста трещины согласно модели пластичности, млн. цикл.