

На правах рукописи

ДЕМИНА Юлия Андреевна

**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ХРАНЕНИЯ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.16.01

«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институт Metallургии и Материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Ботвина Людмила Рафаиловна
(ИМЕТ РАН)

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
кафедры «Технологии металлов»
Матюнин Вячеслав Михайлович
(Национальный исследовательский
университет «МЭИ»)

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Материаловедения»
Зорин Евгений Евгеньевич
(Московский государственный
машиностроительный университет -
«МАМИ»)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им.
И.П. Бардина» (ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина»)

Защита диссертации состоится « _____ » марта 2014 г. в 14 час. 00 мин. на
заседании диссертационного совета Д 002.060.01 в ИМЕТ РАН по адресу:
119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН.

Автореферат разослан « _____ » февраля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



В.М. Блинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы Проблема обеспечения надежности материала различных конструкций сохраняет свою актуальность многие годы. В последние десятилетия она стала еще более острой в результате снижения ресурса конструкций из-за деградации материала в процессе эксплуатации, приводящей к необходимости уточнения норм прочности и рекомендаций по продлению ресурса при длительных сроках службы. Эта проблема вызвала интерес многих исследователей (Е.Е. Зорина, А.Я. Красовского, Н.А. Махутова, А.В. Митрофанова, Г.И. Нестеренко, Г.Н. Никифорчина, П.Д. Одесского, Г.А. Филиппова, W.A. Curtin, S. Hong, Y. Murakami и др.), которые посвятили ей свои работы.

Для решения этой проблемы, помимо оценки механических свойств материала элементов конструкций, важно изучение закономерностей накопления повреждений и выявление преимущественных механизмов разрушения, поскольку необратимые изменения структуры и физико-механических свойств материала при его длительном использовании могут приводить к интенсификации процессов зарождения и накопления дефектов. Кроме того, изменение структуры и свойств материала в процессе службы увеличивают риск преждевременного разрушения, поэтому возникает необходимость оценки вероятности разрушения и установления взаимосвязи статистических характеристик материала с механизмами разрушения, а также развития методов фрактодиагностики, позволяющих по параметрам изломов определять причину и характеристики разрушения.

Это означает, что анализ влияния длительной эксплуатации и хранения на работоспособность конструкционных материалов требует междисциплинарных исследований, включающих определение механических свойств материала после его длительной службы, изучение механизмов разрушения и эволюции повреждений, а также оценку статистических характеристик. Исходя из этого, задача комплексного исследования влияния длительной эксплуатации и хранения на механические характеристики и механизмы разрушения конструкционных материалов представляется актуальной.

Цель работы состояла в комплексном исследовании влияния длительной эксплуатации и хранения на механические свойства, особенности разрушения и кинетику процесса накопления повреждений в конструкционных материалах при

различных видах нагружения, а также в установлении взаимосвязи статистических характеристик с параметрами нагружения и механизмами разрушения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи**:

Ø Оценить механические свойства и изучить закономерности разрушения сталей и сплавов после их длительной эксплуатации и хранения при статическом, ударном и усталостном нагружениях.

Ø Провести исследование кинетики накопления повреждений в исследуемых материалах с использованием методов механики разрушения, реплик и акустической эмиссии.

Ø Изучить влияние длительной эксплуатации и хранения на параметры поврежденности материала и механизмы разрушения.

Ø Развить вероятностный подход, позволяющий устанавливать взаимосвязь статистических характеристик с параметрами нагружения и механизмами разрушения.

Ø Выполнить оценку величины разрушающего напряжения по фрактографическим характеристикам усталостных изломов.

В качестве **объекта исследования** были выбраны конструкционные стали и сплавы различного уровня прочности (стали 20, 45, 09Г2С, Э76Ф и алюминиевый сплав АМгб) после их длительной эксплуатации и хранения в течение 15 и более лет. Статистический анализ выполнен с использованием данных ударных испытаний образцов из сталей 20 и 09Г2С, а также данных усталостных испытаний стали 35CD4 (российский аналог сталь 35ХМ), алюминиевого 2024-T4 и титанового BT3-1 сплавов, взятых из работ К. Okado, Т. Sakai и Л.В. Лимаря.

Научная новизна работы

1. Установлено, что длительное хранение в течение 15 и более лет сталей 20 и 45 вызывает значительное снижение циклической прочности (~ на 40 %) во всем интервале изменения долговечности, включая ее уменьшение на базе 10^8 циклов нагружения. Преимущественный механизм такого снижения связан с образованием многочисленных пор и расслоений по межфазным границам.

2. Изучена кинетика накопления усталостных микротрещин в стали 20 после 15 лет хранения и оценены статистические критерии эволюции картин микротрещин.

Показано, что длительное хранение стали 20 приводит к сдвигу кривой кумулятивного распределения микротрещин по длине в сторону более длинных трещин, снижению максимального числа трещин и показателей в экспоненциальных соотношениях, описывающих указанные распределения.

3. Длительная эксплуатация стали Э76Ф (после пропуска по рельсам 480 млн. тонн брутто груза) приводит к снижению циклической прочности (на 24 %), обусловленному развитием усталостных микротрещин от эксплуатационных дефектов и расслоений, а длительное использование сплава АМг6 (более 15 лет) существенно не влияет на долговечность, но приводит к образованию расслоений.

4. Развита новый подход к статистическому анализу ударного и усталостного разрушений, позволяющий устанавливать взаимосвязь статистических характеристик с механизмами разрушения.

Практическая значимость работы

1. Оценено влияние длительной эксплуатации и хранения в течение 15 и более лет на механические свойства и механизмы разрушения конструкционных материалов различного уровня прочности.

2. Установлена взаимосвязь статистических характеристик вероятностных распределений ударной вязкости и циклической долговечности с параметрами нагружения, определяющими изменение механизмов разрушения.

3. Показано, что показатель степенной зависимости, связывающей длину фронта усталостной трещины на изломах компрессорных лопаток из сплава ВТЗ-1 с ее глубиной, чувствителен к амплитуде напряжения, глубине надреза и размеру лопаток, что дает возможность оценки по параметрам изломов величины разрушающего напряжения.

4. Результаты проведенного исследования могут быть использованы для прогнозирования надежности металлических конструкций и для диагностики причин аварийных разрушений.

Основные положения, выносимые на защиту

- Результаты оценки механических свойств и анализа особенностей кинетики усталостного разрушения сталей 20, 45 и Э76Ф после их длительного хранения и эксплуатации.

- Анализ влияния длительной эксплуатации на механические свойства и механизмы разрушения материала крупногабаритных емкостей из сплава АМгб.
- Результаты оценки механических свойств основного металла (сталь 09Г2С) продуктопровода после его длительной эксплуатации.
- Новый подход к статистическому анализу ударного и усталостного разрушений, устанавливающий взаимосвязь характеристик статистических распределений с механизмами разрушения.
- Метод оценки величины разрушающих напряжений по параметрам усталостных изломов рабочих лопаток компрессора авиационного газотурбинного двигателя из сплава ВТЗ-1.

Надежность и достоверность научных положений, результатов и выводов

обеспечены использованием современной аппаратуры; методов компьютерной обработки результатов экспериментов; комплексным анализом механических свойств, механизмов разрушения и кинетики процесса накопления повреждений в материалах после их длительной эксплуатации и хранения. Согласованность результатов настоящей работы с результатами других исследований и признание их на российских и международных конференциях свидетельствует об адекватности полученных выводов.

Личный вклад соискателя

Соискатель принимал непосредственное участие в обсуждении и постановке задачи и анализе результатов. Все экспериментальные результаты, включенные в диссертацию, получены самим соискателем или при его непосредственном участии. Анализ полученных результатов и подготовка публикаций выполнена при участии соавторов.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы послужили основой для оценки остаточного ресурса материала емкостей, прогнозирования эксплуатационной надежности изделий из сплава АМгб и принятия решения о возможности их дальнейшего использования на предприятии НИЦ РКС 4 ЦНИИ Минобороны России.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на следующих конференциях:

ü IV, VII - X Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (г. Москва, 2007, 2010 - 2013г.г.);

ü II, IV и V Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» - DFMN (г. Москва, 2007, 2011, 2013г.г.);

ü V Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (г. Оренбург, 2008 г.)

ü 19th European Conference on Fracture: Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety - ECF 19 (Kazan/ Russia, 2012 г.);

ü Третьей международной научно-практической конференции Интеллектуальные системы на транспорте «ИнтеллектТранс - 2013» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 работ в научных журналах и сборниках конференций, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка цитируемой литературы и приложения. Объем диссертации составляет 147 страниц, включая 60 рисунков, 18 таблиц и списка цитируемой литературы из 154 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности работы, отмечены ее научная новизна и практическая значимость. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен критический анализ литературных данных, посвященных исследованию влияния длительной эксплуатации и хранения на деградацию свойств материала, рассмотрены механизмы, управляющие факторы и критерии деградации; выполнен обзор вероятностных подходов к оценке механических характеристик и методов фрактодиагностики, используемых для анализа разрушения по параметрам изломов.

В главе 2 приведено описание материалов и экспериментальных методов, использованных в работе.

В качестве исследуемых материалов были выбраны конструкционные стали и сплавы, широко применяемые в машиностроении (мало- и среднеуглеродистые стали 20, 09Г2С и 45), авиационной и космической технике (алюминиевый сплав АМгб) и на железнодорожном транспорте (высокоуглеродистая сталь Э76Ф).

Образцы из указанных сталей и сплавов были вырезаны из заготовок после их длительного хранения или из элементов конструкций после длительной эксплуатации.

Заготовки для образцов из стали 20 и 45 хранились в течение 15 и 50 лет при комнатной температуре и низкой влажности.

Рельсовая сталь Э76Ф изучена в состоянии до и после эксплуатации (после пропуска по рельсам 480 млн. тонн брутто груза), а трубная сталь 09Г2С – после 25 лет эксплуатации в качестве материала продуктопровода (диаметр 530 мм; толщина стенки 14 мм; рабочая среда – углеводороды).

Исследования алюминиевого сплава АМгб осуществляли после 24 лет эксплуатации и года хранения в качестве материала емкостей для хранения коррозионно-активной среды (емкость 1) и нейтральной жидкости (емкость 2). Емкости состояли из обечаек (О) и сферических днищ (Д) толщиной 6 мм (обечайки О1 и днища Д1), 4 мм (обечайки О2) и 12,5 мм (днища Д2). Обечайки были изготовлены из нагартованного на 20 % сплава (АМгбН), а днища – из отожженного сплава (АМгбМ; отжиг 315°С, 1 ч., охл. на возд.).

Для установления взаимосвязи статистических параметров с параметрами нагружения и механизмами разрушения использовали результаты ударных испытаний образцов из стали 20 в состоянии поставки (отжиг 250°С, 1 ч., охл. на возд.) и стали 09Г2С после эксплуатации, а также данные усталостных испытаний стали 35CD4 (российский аналог сталь 35ХМ), алюминиевого 2024-T4 и титанового BT3-1 сплавов, взятые из работ К. Okado, Т. Sakai и Л.В. Лимаря.

Химический состав исследуемых материалов, выполненный на атомно-эмиссионном спектрометре тлеющего разряда фирмы Leco модель GDS850A, соответствовал марочному составу.

Металлографический анализ структуры исследуемых материалов, проведенный на оптическом микроскопе Neophot 30, выявил феррито-перлитную структуру сталей 20, 45 и Э76Ф со средним размером зерна 15 - 30 мкм, с сорбитоподобным перлитом в

структуре стали Э76Ф и строчечной направленностью структуры стали 20 после хранения, вероятно, связанной с предварительным деформированием заготовок на стадии их изготовления. Структура сплава АМгб состояла из зерен алюминиевого твердого раствора размером ~ 30 мкм с частицами β -фазы (Mg_2Al_3), расположенными вдоль направления прокатки и по границам зерен.

Стандартные механические характеристики исследуемых материалов определяли путем испытаний образцов на растяжение в соответствии с требованиями ГОСТ 1497 - 84 на машине Instron 3382 (максимальная нагрузка 100 кН, скорость нагружения 0,5 - 5 мм/мин). Цилиндрические образцы диаметром \varnothing 4; 5 и 6 мм были испытаны из сталей 09Г2С, 45 и Э76Ф после их эксплуатации и хранения. Испытания образцов из стали 09Г2С проводили в температурном интервале от плюс 25 до минус 60°С. Из стали 20 после 15 лет хранения были испытаны плоские образцы (толщиной $t = 2$ мм). Из сплава АМгб после 24 лет эксплуатации и года хранения помимо стандартных плоских (толщиной $t = 4$ мм из материала обечаек О1, О2 и днища Д1) и цилиндрических образцов (диаметром \varnothing 5 мм из днища Д2) были испытаны плоские и цилиндрические образцы, аналогичных размеров, но с надрезом длиной 5 и 0,75 мм, соответственно. Трещиностойкость алюминиевого сплава АМгб определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506 - 85 на установке фирмы ViSS (P), Ltd.

Усталостные испытания были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502 - 79 и включали в себя: 1 – испытания на машине МУП-150 в условиях *поперечного изгиба* ($f = 27$ Гц, $R = -1$) плоских образцов толщиной $t = 2$ мм из стали 20 после 15 лет хранения и из стали Э76Ф в состоянии до и после эксплуатации; 2 – испытания на машине типа НУ в условиях *чистого изгиба с вращением* ($f = 47$ Гц, $R = -1$) цилиндрических образцов диаметром \varnothing 7,5 мм из стали 45 после 50 лет хранения; 3 – испытания на машине Instron 8801 в условиях *повторного растяжения* ($f = 15$ Гц, $R = 0,1$) плоских образцов из обечайки О1 и днища Д1 толщиной $t = 6$ мм, из обечайки О2 толщиной $t = 4$ мм, а также гладких цилиндрических образцов диаметром \varnothing 5 мм из днища Д2.

Ударные испытания образцов Шарпи из трубной стали 09Г2С после 25 лет эксплуатации проводили в соответствии с требованием ГОСТ 9454 - 78 на инструментальном маятниковом копре Amsler RKP 450 в интервале температур от плюс 100 до минус 140°С с автоматической записью диаграмм «нагрузка – прогиб» и

последующей оценкой полной работы разрушения образцов (A_v), работы зарождения трещины (A_3), ударной вязкости (KCV), динамической трещиностойкости, оцениваемой по соотношению (Н. Qiu, 2001): $J_{id} = 2A_3/B(W-a)$ (1), где B , W и a – ширина, высота и длина надреза образца, а также нагрузки, соответствующих началу общей текучести P_{gy} , максимуму на диаграмме P_m , началу нестабильного хрупкого разрушения P_{iu} и остановке трещины P_a в области вязкого долома (стандарт ISO EN DIN 14556.2000). На указанном оборудовании были также проведены ударные испытания образцов Шарпи из стали 20 (отжиг 250°C , 1 ч., охл. на возд.) в интервале температур от плюс 40 до минус 60°C . За критическую температуру хрупкости (КТХ) принимали температуру, соответствующую 50 % вязкой составляющей в изломе (B) и ширине зоны стабильного роста трещины (l_c), наблюдаемой на изломе и равной 2 мм [MP - 581].

Для изучения закономерностей накопления повреждений на разных стадиях циклического нагружения снимали *силиконовые реплики* с полированной поверхности образцов из сталей 20 и Э76Ф после хранения или эксплуатации. Оценку длины и числа микротрещин вдоль траектории макротрещины осуществляли путем обработки в программе ImagePro картин микротрещин по снимкам реплик, сделанных на оптическом микроскопе Neophot - 32. Результаты измерений использовали для построения *кумулятивных кривых* распределения микротрещин по длинам в координатах: «суммарное число микротрещин (ΣN_c) с длиной большей l_{cr} – текущая длина микротрещин (l_{cr})». На основе статистической обработки данных измерения микротрещин оценивали параметр b_c , равный тангенсу угла наклона кумулятивных кривых распределения микротрещин, описываемых соотношением $\Sigma N_c \sim A_c \exp(-b_c \cdot l_{cr})$ (2), и концентрационный критерий $k = 1 / (L_{cp} \dot{\theta} n)$ (3), предложенный С.Н. Журковым и В.С. Куксенко в 1969 г., где n , L_{cp} – плотность и средняя длина микротрещин в пластической зоне.

Для контроля развития повреждений в сплаве АМгб в режиме реального времени использовали метод *акустической эмиссии* (АЭ). Регистрацию и обработку сигналов акустической эмиссии осуществляли при статическом нагружении материала с помощью прибора InterUnis A-Line 32D в диапазоне частот 50 - 500 кГц с использованием пьезоэлектрических приемников GT-200, имеющих резонанс на частоте 150 кГц. Амплитудный порог регистрации устанавливали равным 32 дБ.

После проведения таких испытаний выполняли анализ амплитудных распределений сигналов с оценкой их суммарного числа на всех стадиях нагружения (ΣN_{AE}) и амплитуды сигнала АЭ (A_{AE}). Для оценки b_{AE} - параметра, связывающего суммарное число сигналов с амплитудой в соответствии с соотношением $\log(\Sigma N_{AE}) = C_{AE} - b_{AE} \log A_{AE}$ (4), строили функцию кумулятивного распределения амплитуд в координатах «накопленное число сигналов эмиссии ΣN_{AE} с амплитудой α_{AE} , превышающей заданную A_{AE} »: $F_A = N_{AE} \{ \alpha_{AE} > A_{AE} \}$. Значения b_{AE} - параметра определяли как модуль тангенса угла наклона прямой, полученной путем линейной аппроксимации амплитудного распределения сигналов АЭ методом наименьших квадратов. Рассчитывали также активность АЭ, т.е. число сигналов в единицу времени (N_{AE}^*).

Фрактографические исследования проводили на оптическом микроскопе МБС - 10 и растровых электронных микроскопах LEO - 430i и JEOL JSM - 6610LV.

В главе 3 приведены результаты исследования влияния длительной эксплуатации и хранения на механические характеристики и особенности кинетики усталостного разрушения сталей 20, 45 и Э76Ф.

На рис. 1, а и б представлены кривые усталости сталей 20 и 45, а в табл. 1 даны их стандартные механические характеристики, взятые из литературных источников в качестве исходных свойств, а также оцененные после 15 и 50 лет хранения на воздухе при комнатной температуре.

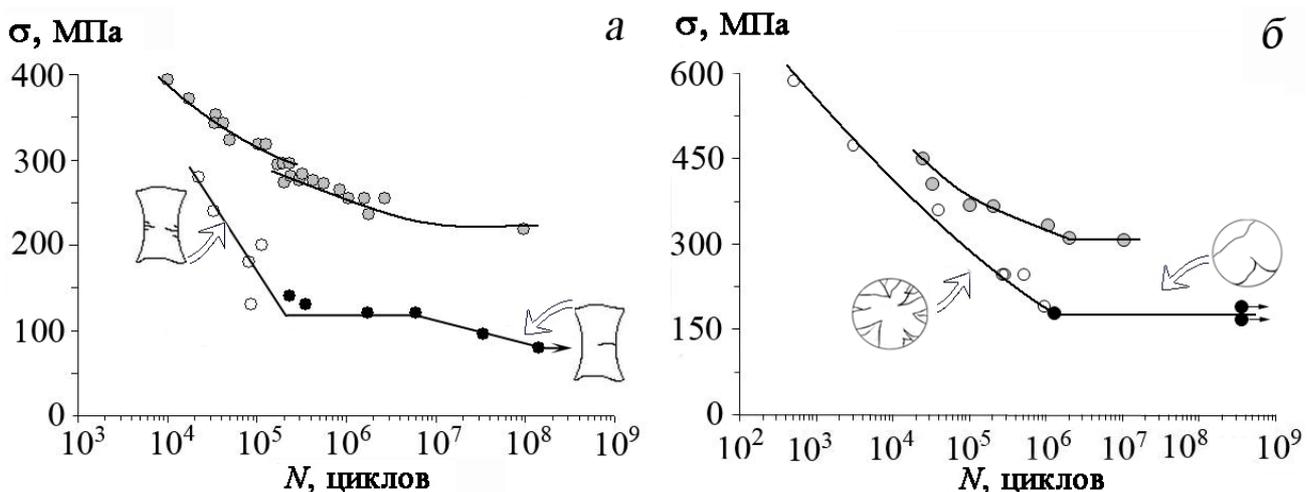


Рис. 1. Усталостные кривые образцов в исходном состоянии (○) и после длительного хранения (●, ○): а – сталь 20, б – сталь 45

Как видно из представленных кривых усталости и табл. 1, пределы прочности и текучести для стали 20 повышаются, а для стали 45 снижаются по сравнению с

исходным состоянием. Однако предел усталости для этих сталей резко уменьшается во всем интервале изменения долговечности, включая его снижение на базе 10^8 циклов нагружения, а разрушение сопровождается переходом от многоочагового зарождения усталостной трещины (○) при высоких амплитудах к одноочаговому (●) зарождению при низких амплитудах нагружениях (рис. 1).

Таблица 1. Механические свойства сталей

Сталь	Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	δ , %	σ_{-1} , МПа
20	Исходное	245	410	0,60	22	219
	После 15 лет хранения	307	488	0,63	19	130
45	Исходное	398	660	0,60	22	318
	После 50 лет хранения	374	641	0,58	26	178

Причина значительного снижения предела усталости была выяснена путем фрактографических исследований сталей, показавших, что его уменьшение связано с развитием множественных расслоений по границам структурных элементов, обнаруживаемых как на боковой поверхности образцов (рис. 2, а), так и на поверхности изломов (рис. 2, б). Образование расслоений, вероятно, является следствием предварительного деформирования заготовок на стадии их изготовления.

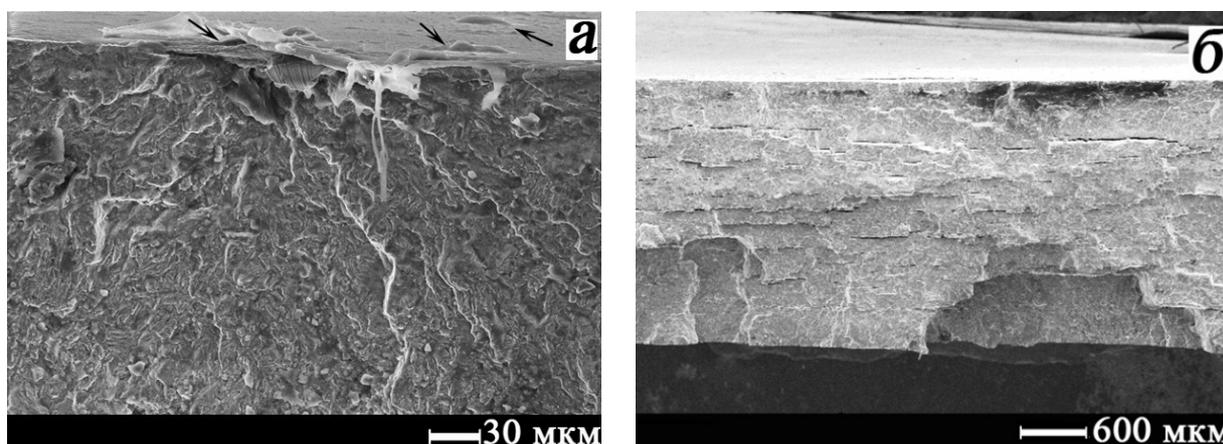


Рис. 2. Микрорельеф усталостных изломов стали 20 после 15 лет хранения при напряжениях σ , равных 96 (а) и 280 (б) МПа

Наличие таких расслоений на боковой поверхности образца из стали 20 (показаны стрелками на рис. 2, а) или в самом очаге излома образца из стали 45 свидетельствует о взаимосвязи расслоений с ранним зарождением усталостной трещины, происходящим при низких амплитудах напряжения.

Как следует из рис. 2, а, хотя длина начальных трещин расслоения на боковой поверхности образца близка размеру зерна (30 мкм), обнаруживаются и более значительные расслоения, служащие причиной формирования отслаивания на

глубину почти 1/3 толщины образца (рис. 2, б). Образование таких областей расслаивания, вероятно, является результатом слияния множественных мелких расслоений, также наблюдаемых на изломах (рис. 2, б).

Об интенсивном слиянии микротрещин в стали 20 после хранения свидетельствуют картины множественного усталостного разрушения, полученные методом реплик, снятых с боковой поверхности образцов на различных стадиях нагружения (рис. 3) в области малоциклового усталости.

Зарождение и рост микротрещин на всю ширину образца с многоочаговым разрушением происходит за небольшое число циклов (около 3000), причем этот рост сопровождается образованием малой зоны локальной пластической деформации, наблюдаемой лишь вблизи берегов макротрещины (рис. 3).

В образцах с одноочаговым разрушением процесс распространения макротрещины был связан с чередованием зарождения и слияния одиночных микротрещин в вершине макротрещины.

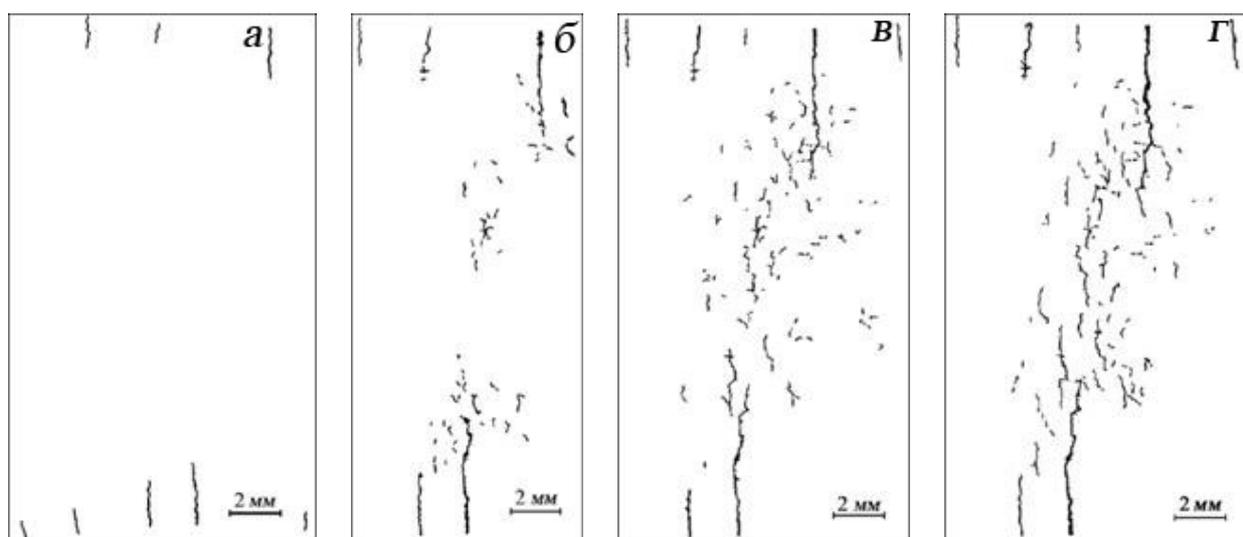


Рис. 3. Картины множественного разрушения в образце из стали 20 после длительного хранения при долговечностях N , равных 1830 (а), 20660 (б), 21550 (в) и 21650 (г) циклов ($\sigma = 280$ МПа)

Картины множественного разрушения, полученные с помощью реплик для стали 20 после ее длительного хранения (рис. 3), позволили построить кумулятивные кривые распределения усталостных микротрещин по длине в координатах «накопленное число микротрещин (ΣN_c) – их длина (l_{cr})».

Сравнение распределений усталостных микротрещин в образцах из стали 20 в исходном состоянии и после 15-летнего хранения (рис. 4) показывает, что оно приводит к увеличению длины микротрещин и уменьшению их числа в результате

слияния этих дефектов. Как следствие, кумулятивные распределения микротрещин сдвигаются в сторону более длинных трещин.

Помимо большей длины микротрещин, критерием деградации материала может служить и угловой коэффициент распределений микротрещин (параметр b_c в соотношении 2), который, как следует из рис. 4

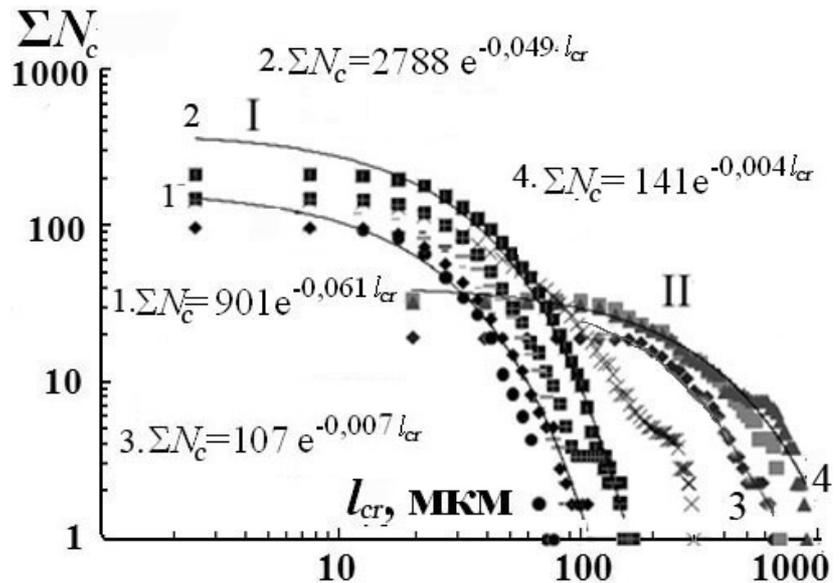


Рис. 4. Распределения микротрещин в образцах из стали 20 на различных стадиях усталости в исходном состоянии (I) и после 15 лет хранения (II)

снижается при испытании материала после хранения.

В качестве критерия множественного разрушения был использован и концентрационный k -параметр (соотношение 3). Анализ данных показал, что с увеличением числа циклов k -параметр снижается почти на порядок. Это означает, что процесс слияния микротрещин превалирует над процессом их зарождения.

Оба параметра b_c и k могут служить диагностическими признаками изменения состояния материала в процессе его службы.

Длительная эксплуатация рельсовой стали Э76Ф привела к более резкому снижению долговечности по сравнению с ее снижением при испытании сталей 20 и 45 после хранения (рис. 5, а), обусловленному развитием усталостных микротрещин от эксплуатационных дефектов (темная область на рис. 5, б - в) и расслоений. Причем долговечность на этапе зарождения трещины образцов из стали после эксплуатации ($N \sim 4 \cdot 10^3$ цикл.) значительно меньше долговечности ($N \sim 9 \cdot 10^4$ цикл.) образцов из стали в исходном состоянии.

Кроме того, изменились и механические свойства стали (см. табл. 2): предел прочности и относительное удлинение снизились, предел текучести немного увеличился, ограниченный предел выносливости на базе $3 \cdot 10^5$ циклов также снизился по сравнению с пределом усталости на базе $6 \cdot 10^6$ циклов. Фрактографические исследования усталостных образцов также обнаружили наличие множественных

очагов зарождения трещины на контактно-усталостных дефектах, а также большое количество расслоений на изломах и боковой поверхности образцов из стали Э76Ф как в состоянии до (рис. 6, а), так и после эксплуатации (рис. 6, б). Длина этих расслоений, а также их раскрытие и количество увеличились после эксплуатации.

Кроме этого, на изломах образцов были обнаружены множественные неметаллические включения (алюмосиликаты кальция), которые также служили очагами зарождения трещины.

Таблица 2. Механические свойства стали Э76Ф

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	δ , %	σ_{-1} , МПа
Исходное	904	1341	0,67	12,98	450 ($N = 6 \cdot 10^6$)
После пропуска по рельсам 480 млн. тонн брутто груза	919	1054	0,87	3,7	400 ($N = 3 \cdot 10^5$)

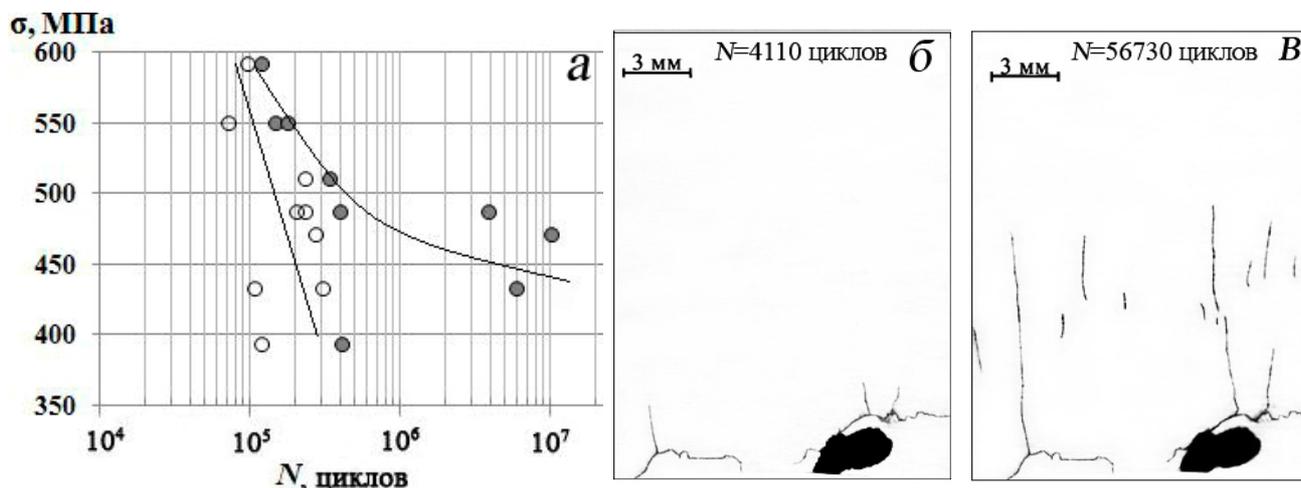


Рис. 5. (а) Кривые усталости и (б, в) картины микротрещин ($\sigma = 550$ МПа) образцов из стали Э76Ф до (●, а) и после (○, а - в) эксплуатации

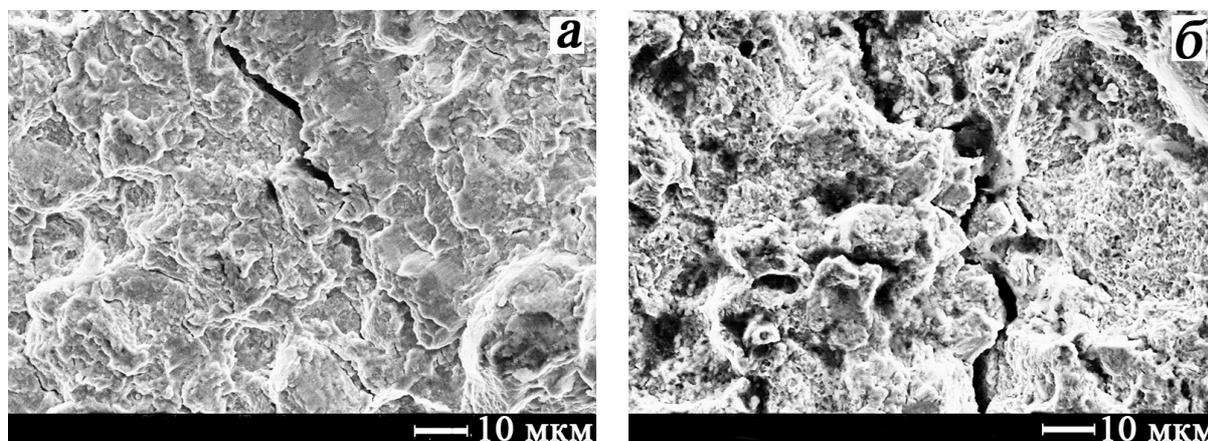


Рис. 6. Микрорельеф усталостных изломов стали Э76Ф до (а) и после (б) эксплуатации при $\sigma = 592$ МПа

В главе 4 представлены результаты исследования влияния длительной эксплуатации на механические свойства и механизмы разрушения материала крупногабаритных емкостей из сплава АМгб.

Анализ стандартных механических свойств материала емкостей после эксплуатации показал, что они не претерпели значительных изменений и отвечают требованиям конструкторской документации (табл. 3).

Однако наличие коррозионно-активной среды обуславливает меньшие значения коэффициента чувствительности к надрезу σ_B^H / σ_B (отношения пределов прочности надрезанного и гладкого образцов) образцов из обечайки О1 (см. табл. 3) по сравнению со значением этого параметра для образцов из обечайки О2, используемой для хранения нейтральной жидкости. Хотя этот показатель не включен в перечень характеристик конструкторской документации, его снижение свидетельствует об увеличении чувствительности материала к локальным концентраторам напряжений.

Кроме этого, исследования структуры материала элементов емкостей обнаружили многочисленные коррозионные повреждения днища Д1 в области контакта с рабочей средой (рис. 7, а - б), размер которых достигал 25 - 50 мкм, а анализ изломов образцов, испытанных при статическом нагружении, выявил участки сдвигового разрушения, в основании которых наблюдались расслоения, параллельные боковой поверхности образцов (рис. 7, в).

Таблица 3. Механические свойства конструктивных элементов емкостей из сплава АМгб после 24 лет эксплуатации и года хранения, оцененные при испытании гладких и надрезанных образцов

Конструктивный элемент	Гладкие образцы				Образцы с надрезом	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	σ_B , МПа	σ_B^H / σ_B
Обечайка О1	296	412	16,4	0,72	247	0,60
Обечайка О2	271	394	14,0	0,69	260	0,66
	Требования к материалу обечайки					
	≥ 284	≥ 372	$\geq 10,0$			
Днище Д1	170	359	24,0	0,47	199	0,55
Днище Д2	181	355	17,4	0,51	410	1,15
	Требования к материалу днища					
	≥ 157	≥ 314	$\geq 15,0$			

По данным испытания на трещиностойкость была оценена критическая длина сквозной трещины, которая намного превышала длину наблюдаемых поверхностных

коррозионных дефектов и расслоений. Это привело к заключению, что на данной стадии эксплуатации наблюдаемые дефекты не оказывают влияния на несущую способность емкостей, но свидетельствуют о развитии процесса накопления повреждений, опасного для элементов, находящихся в контакте с коррозионной средой.

Для выявления возможной деградации материала емкостей были проведены испытания гладких образцов при циклическом растяжении, которые не обнаружили снижения усталостных свойств сплава АМгб после эксплуатации по сравнению с исходным (после отжига при 315°С, 1 ч. и охлаждения на воздухе) состоянием материала, но выявили расслоения (рис. 7, *з*) по границам структурных элементов, раскрытие и протяженность которых возрастала с увеличением амплитуды напряжения.

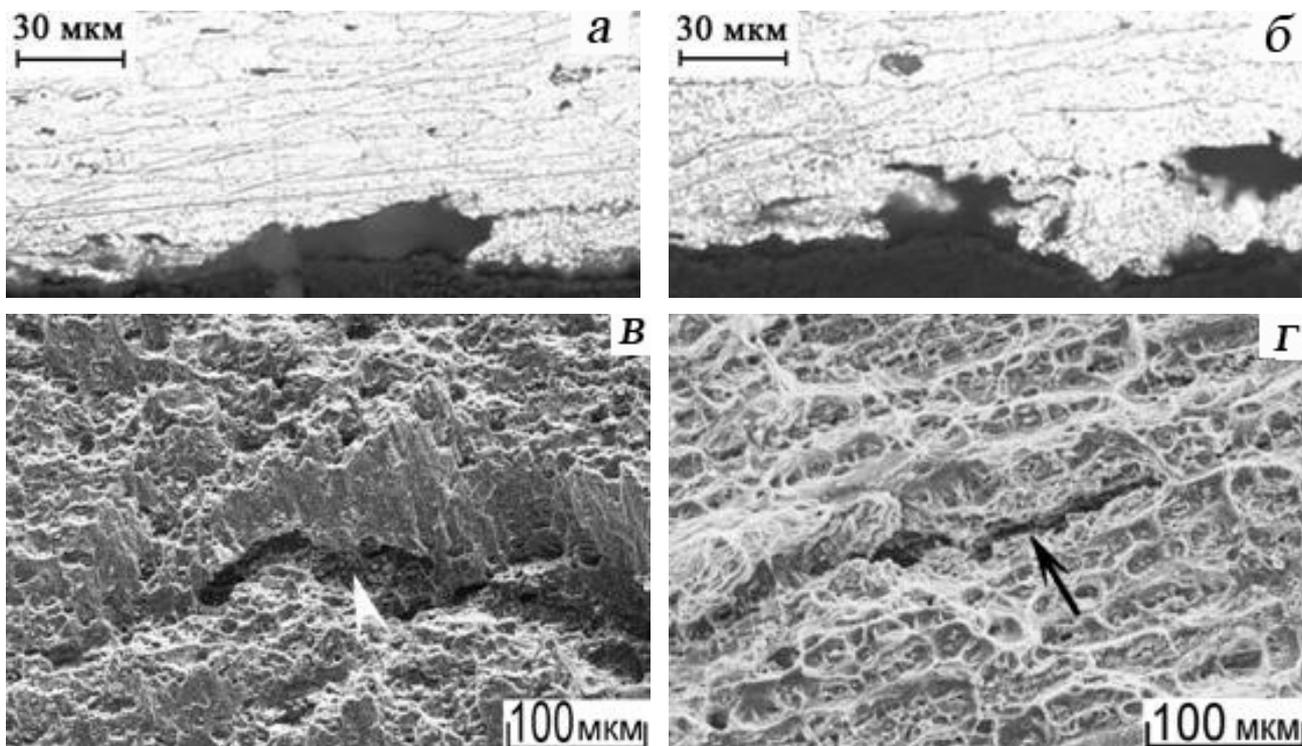


Рис. 7. (*а, б*) Поверхностные коррозионные повреждения днища Д1 в области контакта с рабочей средой и (*в, г*) микрорельеф изломов образцов из обечайки О2 (*в*) и днища Д1 (*г*), испытанных при (*в*) статическом и (*г*) циклическом растяжении ($\sigma = 155$ МПа)

В процессе растяжения плоских образцов осуществляли непрерывную регистрацию сигналов АЭ. Было обнаружено, что при испытании образцов с надрезом пик максимальной активности АЭ смещался в сторону больших нагрузок (рис.8, *а - б*), и характеристики АЭ зависели от прочностных свойств материала элементов емкостей.

Так, образцам с более низким пределом текучести, т.е. образцам из обечайки О2 и днища Д1, соответствовали более высокие значения b_{AE} - параметра (4) и общего числа сигналов АЭ (см. табл. 4), связанные с тем, что в материале с более низким пределом текучести пластическая деформация начинается на более ранней стадии нагружения и развивается более интенсивно.

Уменьшение b_{AE} - параметра в образцах из обечайки О1 по сравнению с образцами из обечайки О2 свидетельствует о большей поврежденности материала обечайки О1 в результате воздействия коррозионно-активной среды и о преобладании сигналов с большой амплитудой, обусловленных либо развитием общей текучести в начале деформирования, либо ростом трещины перед разрушением, тогда как сигналы с малой амплитудой соответствуют развитию и движению дислокаций. Это означает, что снижение b_{AE} - параметра можно использовать в качестве диагностического признака развития поврежденности на различных стадиях деформирования.

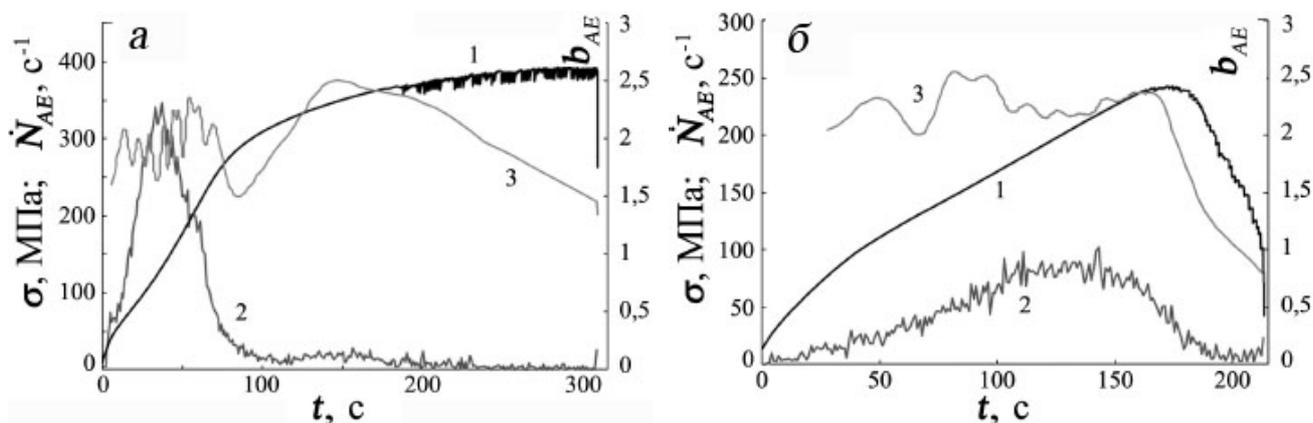


Рис. 8. Диаграммы растяжения (1), график активности акустической эмиссии (2) и временные изменения b_{AE} - параметра (3) для гладких (а) и надрезанных (б) образцов из обечайки О2

В Главе 5 приведены результаты исследования механических свойств основного металла (стали 09Г2С) продуктопровода после его эксплуатации в течение 25 лет.

Испытания на растяжение при комнатной температуре образцов, вырезанных из продуктопровода, показали (табл. 5), что после

Таблица 4. Значения параметров АЭ для образцов, вырезанных из конструктивных элементов емкостей из сплава АМгб

Конструктивный элемент	b_{AE} -параметр	ΣN_{AE} , число сигналов
Обечайка О1	1,15/0,90	1960/1279
Обечайка О2	1,85/2,05	12865/8755
Днище Д1	1,3/1,45	69320/36235

Примечание. В числителе и знаменателе приведены значения оцененных характеристик для гладких и надрезанных образцов соответственно.

эксплуатации пределы текучести и прочности, а также характеристики пластичности повышаются. Понижение температуры испытания не привело к изменению характеристик прочности и пластичности, однако исследование изломов обнаружило многочисленные расслоения (рис. 9, а).

Подобные расслоения на поверхности изломов были выявлены и при ударных испытаниях (рис. 9, б), обнаруживших увеличение ударной вязкости и критической температуры хрупкости после эксплуатации (табл. 5). Это не означает, что свойства материала улучшаются в процессе его службы, скорее он оказывается поврежденным по многим поверхностям раздела, что приводит к увеличению полной работы разрушения, затрачиваемой на развитие расслоений. Подобное увеличение указанных характеристик наблюдали А.Т. Инглиш, Л.Р. Ботвина и другие исследователи при испытании слоистых материалов.

Таблица 5. Механические свойства стали 09Г2С

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	δ , %	Ψ , %	KCV, кДж/м ²	КТХ, °С
Исходное	345	490	0,79	21	55	600	-30
После 25 лет эксплуатации	438	569	0,77	37	70	1180	-50

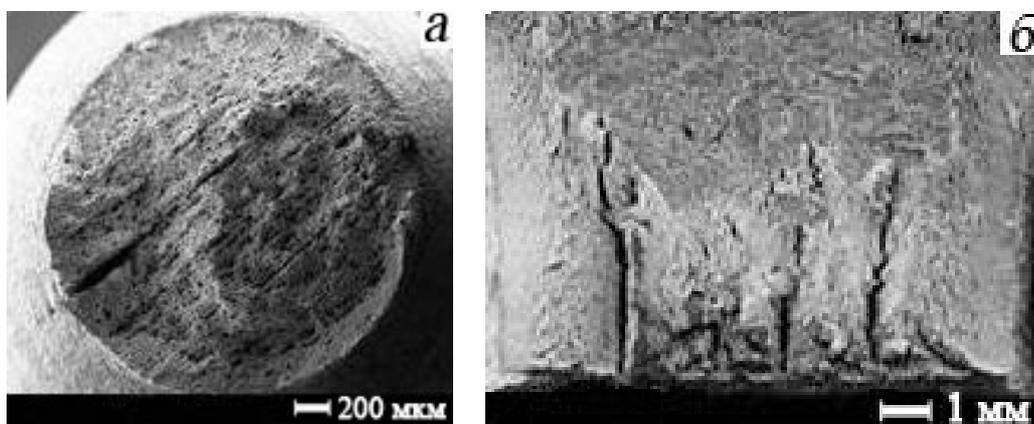


Рис. 9. Фрактограммы образцов из стали 09Г2С, испытанных на растяжение (а) и ударный изгиб (б) при температурах T , равных -50°C (а) и -40°C (б)

Анализ диаграмм ударного деформирования (рис.10) показал, что с понижением температуры испытаний работа зарождения трещины становится больше работы ее распространения, что сопровождается увеличением нагрузки общей текучести (P_{gy}) и уменьшением максимальной нагрузки (P_m) (кривая 3 на рис. 10, а). Хрупкое разрушение образца происходит при нагрузке, соответствующей общей текучести (кривая 4). При комнатной температуре (кривая 1) наблюдается стабильное вязкое разрушение без образования участков скола. Из анализа температурных зависимостей полной работы разрушения (A_v) и зарождения (A_3) трещины, а также динамической

трещиностойкости (J_{id}) следует, что полная работа разрушения снижается с уменьшением температуры более интенсивно по сравнению с динамической трещиностойкостью, так как последняя характеризует только работу зарождения трещины. Построение зависимости полной работы разрушения от динамической трещиностойкости (рис.10, б) обнаружило разрыв кривой « $J_{id} - A_v$ » в области 500 кН/м, соответствующий КТХ $\sim 50^\circ\text{C}$. Установленная взаимосвязь может быть полезна при выборе оптимальной структуры материала, обеспечивающей высокую динамическую трещиностойкость при равных значениях полной работы разрушения.

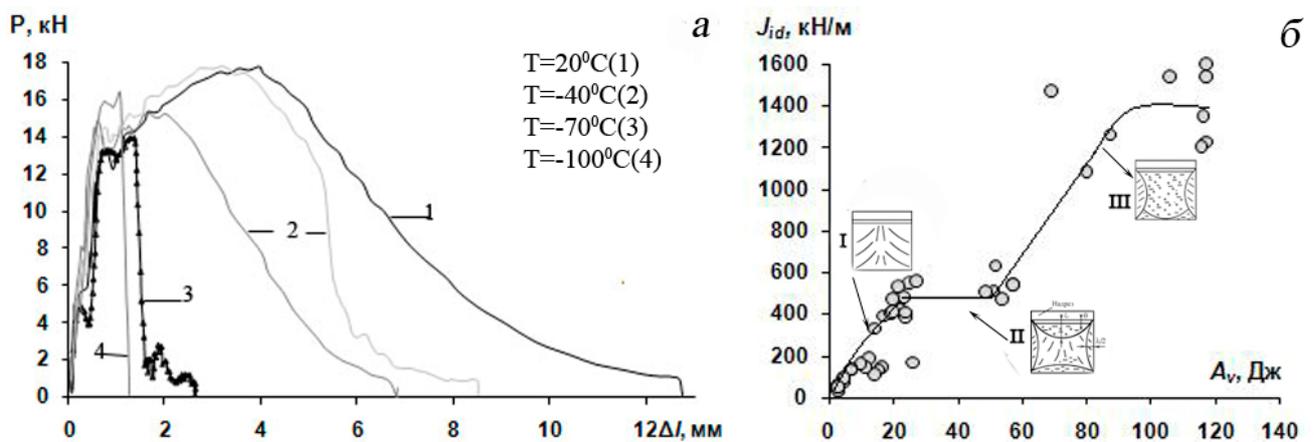


Рис. 10. (а) Диаграммы нагрузка – прогиб и (б) взаимосвязь динамической трещиностойкости с полной работой разрушения для стали 09Г2С

Обнаруженная деградация сталей и сплавов в процессе хранения и эксплуатации делает необходимой оценку вероятности разрушения материала и установления взаимосвязи статистических характеристик с механизмами разрушения.

Глава 6 посвящена оценке вероятности разрушения и установлению взаимосвязи статистических характеристик с параметрами нагружения и механизмами разрушения путем использования как экспериментальных (стали 20 и 09Г2С; ударные испытания), так и литературных данных Т. Sakai и К. Okado (сталь 35CD4 и алюминиевый сплав 2024-T4; усталостные испытания). Результаты оценки ударных характеристик стали 09Г2С были представлены в главе 5; ударные свойства стали 20 (отжиг 250°C , 1 ч., охл. на возд.) соответствуют стандартным характеристикам ($\sigma_{0,2} = 258$ МПа, $\sigma_B = 434$ МПа, $\delta = 37$ %, $\Psi = 42$ %, КТХ = -7°C).

Для обработки экспериментальных данных изначально было выбрано двухпараметрическое распределение Вейбулла: $W = 1 - \exp(-(X/D)^\beta)$ (5), где $W = m / (M + 1)$ – кумулятивная вероятность распределения; X – ударная вязкость KCV при анализе ударных испытаний или долговечность N при анализе циклических

испытаний; m и M – общее число образцов, для которых указанные характеристики не более X , и суммарное количество испытанных образцов для каждого вида испытаний; β и D – параметры распределения Вейбулла.

Было обнаружено, что кумулятивные вероятностные кривые распределения ударной вязкости и долговечности описываются соотношением Вейбулла с показателями, чувствительными к смене механизма разрушения и коэффициентом корреляции не ниже 0,96. Однако в интервале вязко-хрупкого перехода и в области смены механизма усталостного разрушения экспериментальные вероятностные кривые отклоняются от прямой линии, построенной в координатах « $\lg(-\ln(1-W)) - \lg(X)$ », поэтому для их описания уже необходимо использовать не двухпараметрическое, а трехпараметрическое распределение Вейбулла с весовыми коэффициентами. Это усложняет процесс аппроксимации экспериментальных данных и возможность установления взаимосвязи статистических параметров с механизмами разрушения, а также вносит дополнительную погрешность при оценке вероятности разрушения. Сложность получения взаимосвязи вероятностных распределений долговечности при циклическом нагружении с параметрами трехпараметрического распределения Вейбулла отмечает и D.G. Harlow, который считает необходимым развитие научно обоснованной модели усталостного разрушения в широком интервале чисел циклов, определяющей форму кумулятивных распределений. Согласно самому Вейбуллу, предложенное им распределение не несет никакого физического смысла, а является лишь удобным способом обработки экспериментальных данных.

С целью установления взаимосвязи статистических параметров с механизмами разрушения был проведен анализ вероятностных распределений характеристик ударного и циклического нагружений, который показал, что угловой коэффициент вероятностных кривых зависит от параметров нагружения (температуры, напряжения и др.), а сами кривые описываются экспоненциальным соотношением: $X = A \cdot \exp(\gamma \cdot P)$ (6), где $P = m / (M + 1)$ – кумулятивная вероятность распределения; X – ударная вязкость KCV при анализе ударных испытаний или долговечность N при анализе циклических испытаний; m и M – общее число образцов, для которых указанные характеристики не более X , и суммарное количество испытанных образцов для каждого вида испытаний; γ , A – параметры распределения.

На рис. 11, *a* представлены кумулятивные вероятностные кривые распределения ударной вязкости (*KCV*) стали 09Г2С при различных температурах. Сплошные линии на рис. 11, *a* соответствуют экспоненциальным соотношениям (6) с коэффициентом корреляции не ниже 0,95. Угловой коэффициент этих кривых снижается с понижением температуры, причем в интервале вязко-хрупкого перехода наблюдается разброс значений указанной характеристики (см. рис. 11, *б*).

Анализ температурных зависимостей γ_K -показателя и доли вязкой составляющей в изломе (*B*) позволил выделить три области, отражающие смену механизма разрушения: область I *хрупкого разрушения*, *переходную* область II и область III *вязкого разрушения*. При критической температуре хрупкости, соответствующей *B* = 50 %, на « $\gamma_K - T$ » зависимости наблюдается «пик». Подобные зависимости были получены и для стали 20.

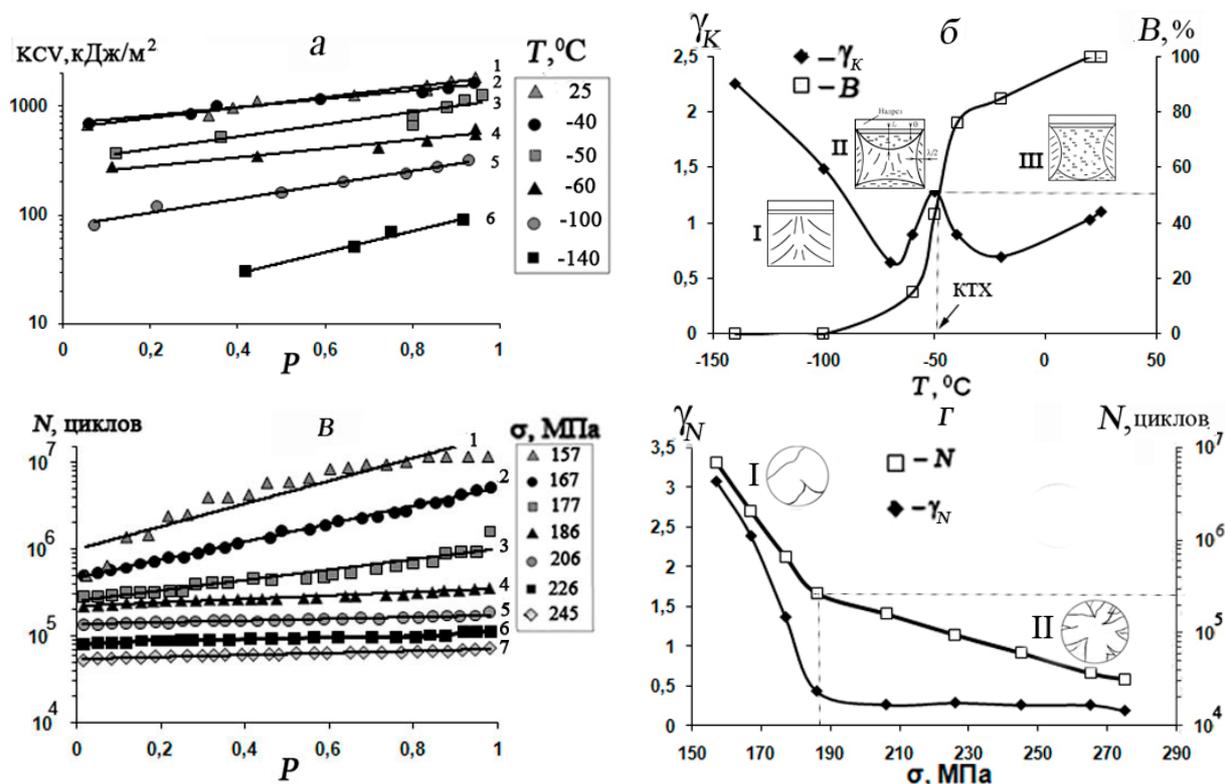


Рис. 11. Кумулятивные вероятностные кривые распределения ударной вязкости (*KCV*) стали 09Г2С (*a*) и долговечности (*N*) сплава 2024-Т4 (*с*), а также зависимости (*б*) показателя (γ_K) и доли вязкой составляющей в изломе (*B*) от температуры и зависимости (*д*) показателя (γ_N) и долговечности (*N*) от напряжения (σ)

Для подтверждения взаимосвязи статистических характеристик с механизмами разрушения, а также для апробирования предложенного γ - параметра, был проведен статистический анализ распределений циклической долговечности алюминиевого сплава 2024-Т4 и стали 35СD4, который позволил установить, что эти распределения

также подчиняются экспоненциальной зависимости (рис. 11, в) с коэффициентом корреляции не ниже 0,94. При переходе от мало- к многоциклового усталости на зависимости « $\gamma_N - \sigma$ » для исследуемых материалов, как и на усталостной кривой, наблюдается перелом (см. рис. 11, з). Наличие такого перелома связано с изменением механизма усталостного разрушения и переходом от много- (область II, рис. 11, з) к одноочеговому (область I, рис. 11, з) разрушению при уменьшении напряжения.

Предполагается, что использование указанного распределения позволит избежать неверных оценок вероятности разрушения, связанных со сменой механизма разрушения.

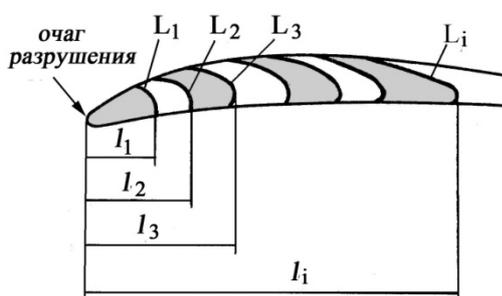


Рис. 12. Схема измерения глубины (l) и длины (L) линии фронта трещины на изломах лопаток по данным Л.В. Лимаря

компрессора из сплава ВТЗ-1, на изломах которых Л.В. Лимарем были обнаружены светлые и темные макрополосы (рис.12). Образование полос связано со сменой механизма разрушения в процессе роста усталостной трещины – переходом от сдвига с преобладанием вязкого ямочного разрушения (темная полоса) к отрыву с преобладанием усталостных бороздок (светлая полоса). Анализ результатов оценки глубины (l) и длины (L) линии фронта трещины, полученных Л.В.Лимарем, позволил установить, что указанные параметры связаны друг с другом степенной зависимостью: $L = C \cdot l^a$ (7) с высоким коэффициентом корреляции ($r \geq 0,98$). Согласно полученным данным (табл. б), показатель α чувствителен к амплитуде

Зависимость γ_N - параметра от амплитуды напряжения при циклическом нагружении привела к идее использования предложенного подхода для оценки величины напряжения разрушения по параметрам усталостного излома.

Решение такой обратной задачи важно при определении причин усталостного разрушения элементов различных конструкций и, в частности, рабочих лопаток «0»-й и «IV»-й ступеней

Таблица 6. Значения показателя α (соот. 7) для лопаток компрессора из сплава ВТЗ-1

σ , МПа	Лопатка 0 ступени		Лопатка IV ступени	
	α	r	α	r
150	0,67	0,98		
250	0,81	0,99	0,76	0,99
350	0,86	0,99	0,83	0,99
400			0,82	0,99
250*	0,95	0,99		
250**	0,99	0,99		

Примечание:* – надрез глубиной 3 мм, ** – надрез глубиной 5 мм

напряжения (σ), глубине надреза и размеру лопаток (высота лопатки «0»-й ступени – 175 мм, «IV»-й – 135 мм) и повышается с их увеличением. Причем кривая « $\alpha - \sigma$ » также соответствует степенной зависимости: $\alpha = Q \cdot s^{\mu}$ (8), с показателем μ , снижающимся от 0,3 до 0,16 при уменьшении размера лопаток. Таким образом, установленные зависимости могут быть использованы в практических целях при расчете уровня напряжения, приводящего к разрушению детали.

В заключении сформулированы общие выводы по диссертационной работе.

1. Изучено влияние длительной эксплуатации и хранения в течение 15 и более лет на механические свойства при статическом, ударном и циклическом нагружениях, кинетику накопления микротрещин и механизмы разрушения мало- (сталь 20, 09Г2С), средне- (сталь 45) и высокоуглеродистой (Э76Ф) сталей. Показано, что:

- длительное хранение сталей 20 и 45 вызывает значительное снижение циклической прочности (~ на 40 %) во всем интервале изменения долговечности, включая ее снижение на базе 10^8 циклов нагружения; преимущественный механизм такого снижения связан с образованием многочисленных пор и расслоений по межфазным границам;

- длительное хранение стали 20 приводит к изменению статистических характеристик эволюции картин поврежденности на стадии зарождения усталостной макротрещины, сдвигу кривой кумулятивного распределения микротрещин по длине в сторону более длинных трещин, снижению максимального числа трещин и показателей в экспоненциальных соотношениях, описывающих указанные распределения;

- в результате длительной эксплуатации (после пропуска по рельсам 480 млн. тонн брутто груза) рельсовой стали Э76Ф циклическая прочность при долговечности $3 \cdot 10^5$ циклов снижается на 24 %, вследствие развития усталостных микротрещин от эксплуатационных дефектов и расслоений;

- влияние длительной эксплуатации и хранения на стандартные механические свойства исследованных материалов неоднозначно:

- прочностные свойства сталей 20 и 09Г2С после эксплуатации и хранения повышаются (σ_B – на 19 и 16 %, а $\sigma_{0,2}$ – на 25 и 27 %, соответственно); стали 45 – снижаются (σ_B – на 3 %, $\sigma_{0,2}$ – на 6 %); σ_B стали Э76Ф снижается на 21 %, а $\sigma_{0,2}$ возрастает на 2 %;

– пластичность (δ) стали 20 и Э76Ф падает на 14 и 72 %, а сталей 45 и 09Г2С - возрастает на 18 и 76 %, соответственно;

– подобные изменения могут быть обусловлены конкуренцией различных процессов, вызывающих деградацию материалов.

2. Анализ влияния длительной эксплуатации на механические характеристики и механизмы разрушения алюминиевого сплава АМгб при статическом и циклическом нагружении показал, что:

- длительная эксплуатация сплава АМгб не вызывает значительного изменения стандартных механических свойств, циклической прочности и долговечности, но приводит к образованию расслоений и участков малоэнергоемкого сдвигового разрушения;

- воздействие коррозионно-активной среды приводит к увеличению поврежденности материала обечайки О1, характеризуемой уменьшением b_{AE} - параметра акустической эмиссии и снижением коэффициента чувствительности к надрезу σ_B^H / σ_B .

3. Разработан новый подход к статистическому анализу ударного и усталостного разрушения, который позволяет связать статистические характеристики с параметрами нагружения, определяющими изменение механизмов разрушения.

4. Предложено степенное соотношение, связывающее длину фронта усталостной трещины на изломах компрессорных лопаток с ее глубиной; показатель в этом соотношении чувствителен к амплитуде напряжения, глубине надреза и размеру лопаток, что расширяет возможности оценки параметров нагружения по параметрам изломов.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Кравцова Ю.А. (Демина Ю.А.), Ботвина Л.Р. Оценка состояния продуктопровода после его длительной эксплуатации // Заводская лаборатория, 2007, №2, Т. 73, С. 54-60.

2. Ботвина Л.Р., Петрова И.М., Гадолина И.В., Левин В.П., Демина Ю.А., Солдатенков А.П., Тютин М.Р. Высокоцикловое усталостное разрушение малоуглеродистой стали после ее длительного старения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2009, Т. 75, № 6, С. 44-51.

3. Ботвина Л.Р., Демина Ю.А. О связи параметров статистических распределений циклической долговечности и динамической трещиностойкости с механизмами разрушения // Доклады академии наук, 2010, Т. 431, № 4, С. 475-478.

4. Петрова И.М., Гадолина И.В., Ботвина Л.Р., Демина Ю.А., Тютин М.Р. Влияние длительного старения на характеристики усталости стали 45 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2011, Т. 77, № 3, С. 43-50.

5. Лимарь Л.В., Демина Ю.А., Ботвина Л.Р. О скачкообразном росте усталостной трещины в компрессорных лопатках // Деформация и разрушение материалов, 2013, №2, С.36-42.

6. Ботвина Л.Р., Жаркова Н.А., Тютин М.Р., Солдатенков А.П., Демина Ю.А., Левин В.П. Развитие пластических зон и поврежденности при различных видах нагружения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2013, № 5, Т. 79, С.46-56.

7. Ботвина Л.Р., Будуева В.Г., Остапенко А.А., Тютин М.Р., Демина Ю.А., Солдатенков А.П., Жаркова Н.А. Механические свойства и механизмы разрушения материала крупногабаритных емкостей из сплава АМгб после длительной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов, 2013, № 12, С.28-35.

Публикации в сборниках и трудах конференций

8. Демина Ю.А. Взаимосвязь параметров статистических распределений с механизмами разрушения // Сборник материалов VII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», 8–11 ноября 2010 г., Москва, С. 129–130.

9. Демина Ю.А., Ботвина Л.Р. Взаимосвязь статистических и физических характеристик разрушения // Сборник материалов IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», 25–28 октября 2011 г., Москва, С. 57–59.

10. Демина Ю.А. Деградация усталостных характеристик стали в результате длительного старения // Сборник материалов VIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», 15–18 ноября 2011 г., Москва, С. 57–59.

11. Демина Ю.А. Новый подход к оценке вероятности разрушения при ударных и циклических нагружениях // Сборник материалов IX Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», 23–26 октября 2012 г., Москва, С. 57–59.

12. Botvina L., Demina Yu., Tyutin M., Arsenkin A. The interrelation between statistical distributions of impact toughness and fracture mechanisms // In: Proc. 19th European Conference on Fracture (ECF 19), 26-31 august 2012, Kazan, Russia (on disk).

13. Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Солдатенков А.П., Демина Ю.А., Левин В.П., Шур Е.А., Борц А.И., Светозарова И.В., Махутов Н.А., Петрова И.М., Гадолина И.В. Деструкция рельсовых сталей в условиях тяжеловесного и высокоскоростного движения //Материалы Третьей международной научно-практической конференции «ИнтеллектТранс-2013», 03-05 апреля, 2013г., Санкт-Петербург, С. 307-313.

14. Демина Ю.А. Оценка напряжения разрушения компрессорных лопаток по параметрам изломов // Сборник материалов X Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», 22 – 25 октября 2013 г., Москва, С.31-33.

15. Махутов Н.А., Демина Ю.А., Петрова И.М., Гадолина И.В., Жаркова Н.А., Шур Е.А., Борц А.И., Светозарова И.В., Ботвина Л.Р. Усталостное разрушение рельсовой стали после эксплуатации // Сборник материалов V международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», 26 – 29 ноября 2013 г., Москва, С. 87-88.