

**На правах рукописи**

**БУРАКОВ ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ**

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали  
машин**

**Автореферат диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2004**

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель:

— доктор техн. наук, профессор *Носов Виктор Владимирович*

Официальные оппоненты:

— доктор техн. наук, профессор *Потапов Анатолий Иванович*

— кандидат физ-мат. наук *Нефедев Евгений Юрьевич*

Ведущая организация: *"Институт проблем машиноведения РАН", Санкт-Петербург.*

Защита диссертации состоится 7 декабря 2004 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

1 учебный корпус, аудитория 41

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан 29 октября 2004 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.229.12, к.т.н., доцент

*Евграфов А.Н.*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Сварные соединения - наиболее распространённый в машиностроении вид неразъемных соединений. Высокая технологичность, низкая стоимость, малая трудоёмкость изготовления и возможность снижения массы металлоконструкции позволяют эффективно использовать соединений при изготовлении изделий больших размеров. Это резервуары, трубопровода, корпуса сосудов и летательных аппаратов, железнодорожные вагоны, фермы мостов, кузовов автомобилей и др. Вместе с тем, сварные соединения лимитируют ресурс включающих их металлоконструкций, повреждаясь под длительным действием силовых и коррозионных факторов.

Задача по повышению надёжности сварных соединений решаются путём улучшения условий эксплуатации металлоконструкций, укрепления соединений посредством нанесения усиливающих наплавов, совершенствованием сварочных технологий, применением высококачественных хорошо свариваемых сталей, совершенствованием методов диагностики и оптимизации систем эксплуатационного контроля. Существенное значение в этом отношении приобретают знания о процессах, приводящих к отказу сварных соединений, особенностях и закономерностях эволюции микроструктуры материала в процессе изготовления и эксплуатации, причинах и механизмах повреждений сварных соединений, методах их расчёта и прогнозирования работоспособности, неразрушающего контроля и диагностирования состояния. Из всех средств неразрушающего контроля наиболее перспективным представляется метод, позволяющий вести наблюдение за процессом накопления повреждений в материалах посредством регистрации последствий повреждаемости – эмиссии акустических волн.

**Цель работы** состояла в разработке методики прогнозирования работоспособности и диагностики технического состояния сварных соединений на основе исследования процесса разрушения сварных соединений и неразрушающей оценки прочности с помощью метода акустической эмиссии. **Это включало в себя решение следующих задач:**

1. Анализ подходов к оценке прочности сварных соединений и характера их разрушения, обоснование методологии исследований.
2. Построение модели процесса разрушения сварных соединений и оценку её адекватности в условиях диагностического нагружения.
3. Подготовку к исследованиям измерительной автоматизированной акустико-эмиссионной системы и программного обеспечения к ней.
4. Исследование процесса разрушения сварных соединений, выбор диагностических параметров состояния и разработку способов их оценки.
5. Разработку метода оценки технического состояния сварных соединений, их проверку в условиях промышленных испытаний металлоконструкций и сосудов, нагруженных внутренним давлением.

**Методология исследований** базируется на результатах исследований прочности конструкционных материалов (Махутов Н.А., Павлов П.А., Мельников Б.Е., Гецов Л.Б., Судаков А.В., Жуков В.А.), положениях механики разрушения, кинетической теории прочности и микромеханики разрушения (Журков С.Н., Регель В.Р., Слуцкер А.К., Томашевский Э.Е., Куксенко В.С. Петров В.А., Веттегрень В.И.), статистическом и имитационном компьютерном моделировании (Овчинский А.С.), результатах исследований АЭ и методологии оценки прочности различного рода материалов и технических объектов (Иванов В.И., Грешников В.А., Дробот Ю.В., Башкарёв А.Я., Потапов А.И., Куксенко В.С., Носов В.В., Нефедьев Е.Ю., Трипалин А.С., Буйло С.И., Баранов В.М., Бырин В.Н. и др.), теоретических основах метрологии, математической статистике. Адекватность модели оценивалась сопоставлением результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований различных материалов (композиционных, металлов и их сплавов, сварных соединений, горных пород и др.) и технических объектов (сосудов давления, деталей машин, строительных и металлоконструкций, глубоких подземных сооружений, массива горных пород и др.) с использованием положений теории вероятности и математической статистики.

Экспериментальные исследования проведены с использованием соответствующей современным требованиям компьютеризированной двухканальной измерительной системы, позволяющей наблюдать за процессом накопления повреждений в реальном масштабе времени и автоматизировать обработку регистрируемой АЭ-информации.

**Научную новизну работы составляют:**

- модель разрушения сварных соединений, описывающая процесс накопления повреждений в условиях неоднородности их структуры и напряжённого состояния при различных режимах нагружения;
- микромеханическая модель акустической эмиссии гетерогенных материалов, связывающая это явление с процессом разрушения в условиях нестабильности параметров частотного, временного и амплитудного распределения сигналов АЭ;
- результаты исследования процесса разрушения сварных соединений на основе его имитационного моделирования и регистрации сигналов АЭ;
- методы, алгоритмы и компьютерные программы расчёта диагностических показателей состояния сварных соединений с учётом влияния внешних помех регистрации сигналов АЭ;
- методика прогнозирования работоспособности и неразрушающей оценки прочности сварных соединений;
- предложенные критерий степени опасности дефектов и система классификации выявленных источников АЭ.

**Практическая ценность работы.** Разработанная методика позволит повысить точность и снизить трудоёмкость оценки состояния сварных

металлоконструкций, сократить энерго- и материалоемкость машин и конструкций, перейти к форсированию режимов эксплуатации, сократить объем ремонтно-восстановительных работ, поможет решать актуальную проблему определения остаточного ресурса и продления сроков эксплуатации оборудования.

**Реализация работы** Результаты исследований использовались при диагностике сосудов давления кислородного производства листопрокатного цеха Новолипецкого металлургического комбината, в учебном процессе студентов СПбГПУ. По результатам работы 18.06.04 составлена заявка на способ оценки прочности изделий № 2004118473 .

**Апробация работы** результаты работы докладывались на международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование - 2003» (Санкт-Петербург 2003 г), международной научно-технической конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения», (Санкт-Петербург 2003 г), международной конференции «Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов» (Санкт-Петербург 2004 г.), семинарах кафедры «Прикладная механика» Липецкого государственного технического университета, «Машиноведение и детали машин» Санкт-Петербургского Государственного Политехнического университета.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 14 работ.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из четырёх глав, содержит 103 стр. текста, 60 рисунков, 10 таблиц, 125 наименований литературных источников и приложения. Во введении дан анализ состояния проблемы, показана её актуальность и подходы к решению, приведена общая характеристика работы.

**В первой главе** сформулированы цель и задачи исследований, определена методология и намечены пути их решения.

Проблемы прочности сварных соединений являются предметом интенсивного исследования специалистами в области материаловедения, механики материалов и физики прочности. Дан обзор методов оценки и обеспечения прочности. Разрушение, способность сопротивления которому и является прочностью, рассматривается в виде двухстадийного процесса образования и роста трещины. Циклическая прочность и долговечность сварных соединений на первой стадии процесса разрушения оценивается различными методиками по уравнениям различных кривых усталости. Определение ресурса  $\tau$  или числа циклов  $N_p$  до образования трещины ведут по кривым циклической или длительной прочности, данным о накоплении повреждений и одному из критериев разрушения конструкции. Выбор критериев предусматривает использование одной или нескольких моделей разрушения. При расчётах используются деформационные, энергетические и силовые критерии.

Повышение точности оценки прочности предполагает необходимость анализа структуры соединений.

Предложена модель разрушения сварных соединений, структура которых неоднородна. Материал при этом представляется в виде совокупности структурных элементов, а повреждаемость - в виде суперпозиции процессов пластического деформирования и разрушения. Прочностные характеристики и характер разрушения определяются результатом конкуренции этих процессов, протекающих независимо в каждой из зон сварного соединения. Установлено, что в области малого числа  $N_{ц}$  циклов до разрушения сварного соединения общая деформация определяется, главным образом, пластическим изменением формы и размеров образца. Обзор результатов металлографических исследований показал, что при малом числе циклов до разрушения ( $<10$ ) разрушение происходит с большими пластическими деформациями, выявляемые микротрещины практически отсутствуют, процесс разрушения образца сосредоточен в шейке, прочность соединения определяет основной металл и зона термического влияния. В области более высокого числа циклов материал деформируется упруго, основное значение для прочности соединения приобретают усталостные повреждения в сварном шве, ликвационные зоны которого характеризуются неоднородной структурой, повышенным содержанием перлита и неметаллических включений. Пластичность основного металла при этом минимальна и приближается к пластичности других зон.

При  $N_{ц} > 10^4$  зависимость  $\lg N_{ц} - \sigma$  аппроксимируется прямой линией. Основное влияние на работоспособность длительно работающих сварных соединений оказывают накапливаемые в условиях упругого деформирования усталостные разрушения, исследование которых должно стать основой оценки технического состояния сварных металлоконструкций.

Прогнозирование разрушения проводится по результатам оценки параметров процесса либо на первой, либо на второй его стадии. Применительно к методу акустической эмиссии (АЭ) отмечается, что реализация методик АЭ-диагностирования в промышленных условиях **требует**:

- инвариантности результатов диагностирования к форме, размерам и ориентации трещин по толщине материала, к виду и количеству трещин или концентраторов напряжений в контролируемом объёме, к условиям распространения и регистрации импульсов АЭ. Последние зависят от размеров, геометрической формы и акустических характеристик объектов контроля, качества акустического контакта преобразователя АЭ с объектом, наличия акустических и электромагнитных помех и других факторов, дестабилизирующих связь разрушения и упругого излучения;
- возможности расчёта диагностических параметров конструкций по результатам регистрации АЭ в ограниченном временном интервале;
- связи диагностических параметров с основными прочностными показателями сварных соединений металлоконструкций.

Однако существующие на сегодняшний день методики не в полной мере удовлетворяют данным требованиям. Для разработки методики прогнозирования работоспособности сварных соединений была выбрана методология АЭ-диагностирования технического состояния сварных соединений на обеих стадиях их разрушения, которая состоит в прогнозировании времени  $\tau^*_{ост}$ , оставшегося до момента накопления критической концентрации микро-трещин  $C^*$  путём акустико-эмиссионной оценки параметров и решения следующей системы уравнений

$$\begin{cases} \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \psi(\omega) \left\{ 1 - \exp\left[-\int_0^{\tau^*} \frac{dt}{\Theta(\omega(t))}\right] \right\} d\omega = \frac{C^*}{C_0} \approx 0,01 \\ \tau^*_{ост} = \tau^* - \tau_{пр} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\psi(\omega)$ - функция плотности распределения значений величины параметра состояния  $\omega = \gamma\sigma/KT$  по структурным элементам;  $\mu$ -нижняя граница изменения его аргумента;  $\Delta\omega$ -доверительный интервал разброса значений  $\omega$  по структурным элементам. Вид функции  $\psi(\omega)$  определяется распределениями значений напряжений  $\sigma$  и коэффициента  $\gamma$  в материале;  $\theta(\omega(t) = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/(KT)]$ -время ожидания разрушения одного структурного элемента,  $\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-14}$  с -период атомных колебаний,  $U_0$  - энергия активации процесса разрушения,  $\gamma$ -структурно-чувствительный параметр,  $K$ - постоянная Больцмана,  $T$  -абсолютная температура,  $\tau_{пр}$ - предварительно потерянный объектом ресурс. Предпосылкой АЭ-прогнозирования выступает подобие временных зависимостей значений  $\xi(t)$  каких-либо информативных параметров АЭ и повреждаемости  $C$  материала, описываемое уравнением

$$\xi(t) = k_{AE} C(t) \quad (2)$$

где  $k_{AE}$  - акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК).

**Вторая глава** посвящена методу акустической эмиссии, как методу исследования и контроля процесса повреждаемости сварных соединений.

Акустическая эмиссия представляет собой суперпозицию испускаемых актами различных процессов упругих волн с соответствующими их источникам амплитудно-частотными и временными характеристиками. Приводится обзор моделей сигналов АЭ. Рассмотрена микромеханическая модель АЭ и физический смысл входящих в (2) параметров. Входящему в (2) АЭК  $k_{AE}$  присвоен смысл «звучащего» объёма, который связан с долей сигналов АЭ регистрируемых из общего потока импульсов, прошедших временную, частотную и амплитудную фильтрацию. Математическая модель АЭК

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) dudfd \Delta t \quad (3)$$

где  $V$ - контролируемый объём материала,  $\Phi(\Delta t, f, u)$ - плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам  $\Delta t$  (паузам) между ними, амплитуде  $u$

и частоте  $f$ . Учитывая стохастический характер упругого излучения, входящему в (3) интегралу можно придать смысл вероятности регистрации, то есть вероятности попадания параметров упругих волн, пришедших от источника АЭ, в диапазон регистрируемых измерительной аппаратурой частот, амплитуд сигналов АЭ и временных интервалов между ними. Анализируется вид и поведение определяющих функцию  $\Phi(\Delta t, f, u)$  распределений длительности пауз между сигналами, амплитудных и частотных распределений в зависимости от скорости нагружения, напряжений на структурных элементах в момент разрушения и порогов дискриминации аппаратуры, температуры регистрации, размера структурных элементов, вида контактной жидкости и коэффициента прохождения сигнала, расстояния от датчика до источника АЭ. Наиболее информативно во время АЭ измерений ведёт себя амплитудное распределение (рис.1).

Предложенная модель АЭ объединяет физический и статистический подходы к исследованию и использованию явления АЭ, так как описывает процесс случайной регистрации детерминировано накапливаемых повреждений в материале на первой стадии, изменение звучащего объёма, и связанной с напряжений возле трещины амплитуды сигнала АЭ на второй стадии. Определив параметры этой модели, можно определить состояние или различные показатели прочности исследуемого объекта. Рассмотрены метрологические аспекты такого определения, отмечена диагностическая ценность временных зависимостей параметров АЭ и их статистических распределений.

Суть моделирования процесса разрушения сварных соединений состояла в имитации на ЭВМ значений концентрации микротрещин или скорости её накопления и сравнении результатов имитации с числом импульсов или активностью АЭ при различных состояниях материала и условиях его диагностического нагружения. Моделирование производилось с помощью оригинальной программы Destruction Modeling, написанной в среде Delphi 7. При моделировании рассматривались различные структурные состояния и возможные варианты диагностического нагружения, используемого при АЭ-контроле, которые имитировались различными функциями уравнения системы (1). В качестве функций распределения параметра состояния  $\omega$  были выбраны равномерное, логарифмически-нормальное и двух-прямоугольное распределения. В качестве режимов диагностического нагружения сварных соединений рассматривались выдержка при постоянной нагрузке, равномерное нагружение и равномерное разгружение с постоянной скоростью изменения напряжений. Значения модели  $S(t)$  рассматривались на интервале от 0 до точки достижения критической концентрации  $S^*$ .

Для оценки адекватности рассматриваемой модели результаты моделирования были сопоставлены с данными лабораторных микроскопических и АЭ-испытаний сварных и адгезионных стальных и металлополимерных соединений, композиционных материалов, горных пород. Результаты исследований равномерно нагруженных образцов, средняя амплитуда сигналов АЭ от

Микромеханическая модель источника сигнала АЭ (а), амплитудное (б), частотное (в), распределения длительностей (г) сигналов АЭ и интерпретация значения акустико-эмиссионного коэффициента (д)

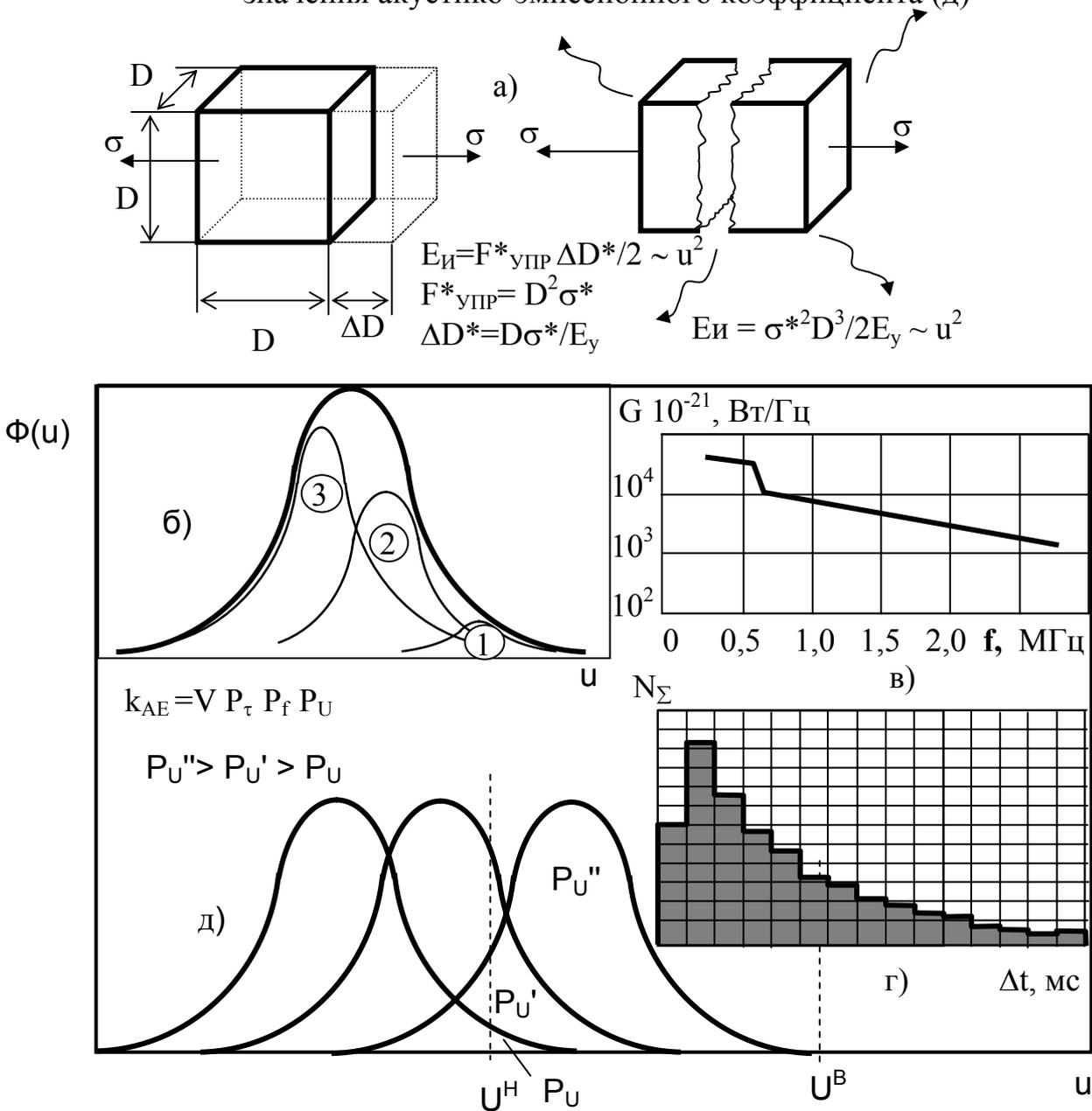


Рис.1. 1,2,3 -распределения от разрушения структурных элементов материала шва (1), околошовной зоны, зоны нормализации и основного металла (2), разупрочнённой зоны (3);  $P_U$ ,  $P_U'$ ,  $P_U''$  - вероятности попадания амплитуды сигнала АЭ в регистрируемый амплитудный диапазон  $[U^H; U^B]$  при равномерном, экспоненциальном (показательном) и с наличием максимума наблюдаемом амплитудном распределении сигналов АЭ соответственно;  $P_{\tau}$   $P_f$  - вероятности регистрации сигналов в заданном временном и частотном диапазоне соответственно.

которых на протяжении всей стадии делокализованного разрушения существенно не изменялась, вводились в виде двумерного массива данных, содержащем информацию о суммарном числе импульсов АЭ полученных на текущий момент времени. Последний элемент массива соответствует времени наступления разрушения, то есть моменту достижения критической концентрации  $C^*$ .

**В третьей** главе описаны методика и результаты исследования процесса разрушения сварных соединений имитационным компьютерным моделированием и методом акустической эмиссии.

Установлено, что наиболее «гибким» из рассмотренных распределений оказалось двух-прямоугольное. Сопоставление результатов моделирования с экспериментально наблюдаемыми параметрами повреждаемости, параметрами АЭ или неоднородностью состояния сварных соединений показало, что составляющая с весом 0,01-0,001 двух-прямоугольного распределения (второй прямоугольник) влияет на кинетику  $C(t)$  только начальные 5-15 % первой стадии разрушения. Дальнейшие 95-85 % этой стадии представляют этап однородного разрушения, а время до разрушения определяется параметрами первого прямоугольника с весом 0,99-0,999 и малым  $\omega_1 = \gamma\sigma/KT = Y\sigma$ .

Для случая стабильности значений акустико-эмиссионного коэффициента во время испытаний поставлена и решена задача оптимизации для нахождения параметров модели (1) по результатам регистрации АЭ:

$$\sum_{t=t_0}^{\tau^*} (N_t - k_{AE}C(t))^2 \rightarrow \min$$

Рассмотрена измерительная акустико-эмиссионная система, методика и результаты экспериментальных исследований (рис.2). На протяжении всего времени равномерного нагружения видимых трещин на поверхности образцов не наблюдалось. На рис.2 а видно, что временная зависимость логарифма числа  $N_{\Sigma}(t)$  импульсов АЭ имеет три характерных участка, сопоставление которых с диаграммой нагружения позволяет обозначить их, как участки кинетически неоднородного разрушения (a-b), кинетически однородного разрушения (b-c) и пластического разрушения (c-d), когда скорость нагружения начинает снижаться, увеличивается средняя длительность сигналов и коэффициент их перекрытия. Средняя амплитуда сигналов меняется несущественно. Испытания 20-ти образцов показали, что период неоднородного разрушения составляет 10 ÷ 20% от общего времени  $t_p$  до разрушения, отклонения от закона Гука наблюдалось при  $t \approx 40 \div 50\%$  от  $t_p$ . Таким образом, во временном диапазоне 20-40 % от  $t_p$  велось корректное АЭ-наблюдение за однородным разрушением в условиях упругого деформирования с линейным участком зависимости  $\ln N_{\Sigma}(t)$ .

Сравнение амплитудных распределений сигналов, зарегистрированных во временных интервалах выделенных участков, обнаруживает подобие этих распределений. Всё это говорит о неизменности значения АЭК.

Иное поведение амплитудного распределения наблюдается при «ступенчатом» нагружении (рис.2 б). При переходе от равномерного нагружения к постоянной нагрузке снижается средняя амплитуда сигнала и изменяется вид амплитудного распределения. Существенным также иногда являлось различие амплитудных распределений при разных уровнях постоянной нагрузки, что также говорит об изменении значения АЭК (3). В условиях дефицита сигналов АЭ, который наблюдается при низких скоростях нагружения, низких напряжениях или завышенных порогах дискриминации аппаратуры, величина АЭК становится также чувствительной к разбросу размеров структурных элементов.

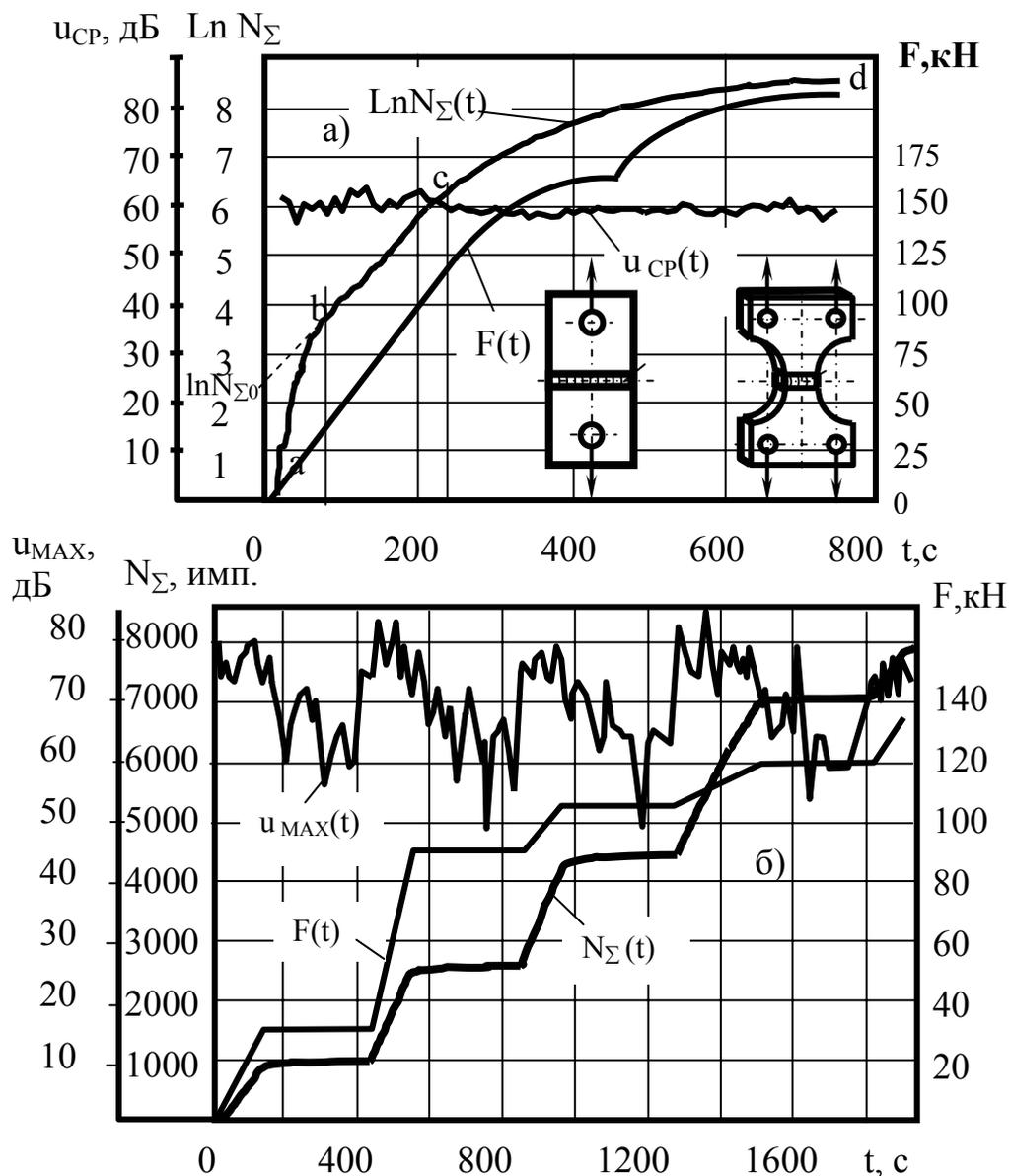


Рис. 2. Результаты испытаний при равномерном (а) и «ступенчатом» (б) нагружении образцов

Учёт изменения амплитуд сигналов и значений АЭК позволил понизить мультипликативную составляющую измерительных помех и улучшить корреляцию значений предложенного АЭ-показателя прочности  $Y_{AE} = d \ln \xi / d \sigma = \gamma / KT$  и значений разрушающей нагрузки, полезных площадей образцов сварных соединений с различными дефектами.

Прогнозируемая разрушающая нагрузка рассчитывалась по формуле

$$F_{PII} = \frac{M + \ln(F'_P k Y_{AE})}{k Y_{AE}} \quad (4)$$

где  $k = \sigma / F$  – коэффициент пропорциональности между нагрузкой и номинальными напряжениями в образце,  $F'_P$  – скорость роста нагрузки в разрушающем эксперименте, Па/с,  $M(U_0, \sigma_{BH}, T, \omega_N) = U(U_0, T, \sigma_{BH}, \omega_N) / (KT) - \ln C_0 / (C^* \tau_0)$  – константа вида сварного соединения, температуры и частоты  $\omega_N$  его нагружения (коэффициент вариации составлял 3 %). При неизменной в экспериментах скорости нагружения  $F'_P$  примерно постоянной оказалась величина  $(F_{PII} k Y_{AE}) = M + \ln(F'_P k Y_{AE}) \approx 5,5$  (коэффициент вариации составлял 10%). Таким образом, можно записать

$$F_{PII} \approx \frac{5,5}{k Y_{AE}} \quad (5)$$

Средняя относительная ошибка не превышала среднестатистического разброса (относительного отклонения), что свидетельствовало о пригодности использования предложенной методики для прогнозирования разрушающей нагрузки. Средняя ошибка прогнозирования не превышала 21%, что для соответствующего времени упреждения (60-70%) соответствовало погрешности известных методик прогнозирования предельного состояния металлоконструкций. При этом, в отличие от этих методик, не требовалось проведения обучающего эксперимента, прогнозирование осуществлялось для разнотипных образцов и при различных видах их нагружения. Приведены результаты сравнения различных диагностических параметров по представительности оценки разрушающей нагрузки.

Знание величин рабочей  $F_{раб}$  и разрушающей  $F_P$  нагрузок позволяет рассчитать коэффициент запаса статической прочности

$$[S]_{CT} = F_P / F_{раб} = \sigma_p / \sigma_{раб}$$

**В четвёртой главе** описана методика прогнозирования работоспособности сварных соединений и её проверка в промышленных условиях. Методика основана на оценке значения диагностического параметра  $Y_{AE} = Y_{RD}$  по формуле:

$$Y_{AE} = \frac{\ln \frac{\xi_j}{\xi_i} + \ln \frac{k_{AEi}}{k_{AEj}}}{\sigma_j - \sigma_i} \quad (6)$$

где  $\sigma_i, \sigma_j$  – номинальные напряжения, действующие в контролируемой зоне изделия в  $i$  и  $j$  моменты времени соответственно;  $\xi_i, \xi_j$  – значения информативного параметра при напряжениях  $\sigma_i$  и  $\sigma_j$  соответственно;  $k_{AEi}, k_{AEj}$  – акустико-эмиссионные коэффициенты при напряжениях  $\sigma_i$  и  $\sigma_j$  соответственно.

В качестве информативного параметра  $\xi$  может использоваться число  $N_\Sigma$  импульсов АЭ или суммарная амплитуда импульсов АЭ  $N_\Sigma U_{CP}$ , накопленных на этапе однородного разрушения до момента достижения напряжениями величин  $\sigma_i$  и  $\sigma_j$ , активность АЭ  $N_\Sigma'$ , скорости накопления суммарной амплитуды  $N_\Sigma' U_{CP}$  в момент достижения напряжениями величин  $\sigma_i$  и  $\sigma_j$ , и различные комбинации этих параметров. Отношение  $k_{AEi}/k_{AEj}$  определяется, в зависимости от выбранного закона распределения амплитуд импульсов АЭ.

Показано, что входящий в формулы стандартных методик коэффициент снижения предела выносливости

$$K_{ПП.В} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{RD}} = \frac{(A - \ln N_B) / Y_R}{(A - \ln N_B) / Y_{RD}} = \frac{Y_{RD}}{Y_R} \quad (7)$$

где  $\sigma_R, \sigma_{RD}$ - пределы выносливости эталонного и контролируемого образцов,  $Y_R, Y_{RD}$ - угловые коэффициенты прямых  $\ln N_\sigma$ - $\sigma$ , построенных по результатам усталостных испытаний эталонного и контролируемого образца. Значение  $Y_{RD}$  определяется по результатам неразрушающего АЭ-контроля данной детали или соединения ( $Y_{RD}=Y_{AE}$ ), а величина  $Y_R$  - из данных усталостных испытаний эталонных образцов конкретного сварного соединения (рис. 3.). При отсутствии сведений о долговечности и невозможности построения прямой  $\ln N_\sigma$ - $\sigma$  значения  $Y_R$  могут быть определены приближённо по известным данным показателей степеней кривых усталости сварных соединений или данным о пределе прочности  $\sigma_B$  и формуле  $Y_R = \frac{M_{AE}}{\sigma_B}$ , где  $M_{AE}$  – константа материала

конструкции и условий ее нагружения, определяется по результатам разрушающих АЭ-испытаний эталонных (бездефектных) образцов и следующей формуле:

$$M_{AE} = \frac{\sum Y_{AEi} \sigma_{vi}}{n_u}$$

где  $n_u$ - количество испытаний,  $Y_{AEi}, \sigma_{vi}$ - значения диагностического параметра и предела прочности образца соответственно.

Коэффициент запаса выносливости детали при простом циклическом нагружении

$$S = \frac{\sigma_{RD}}{\sigma_a} = \frac{\sigma_R}{K_{np.в} \sigma_a} ,$$

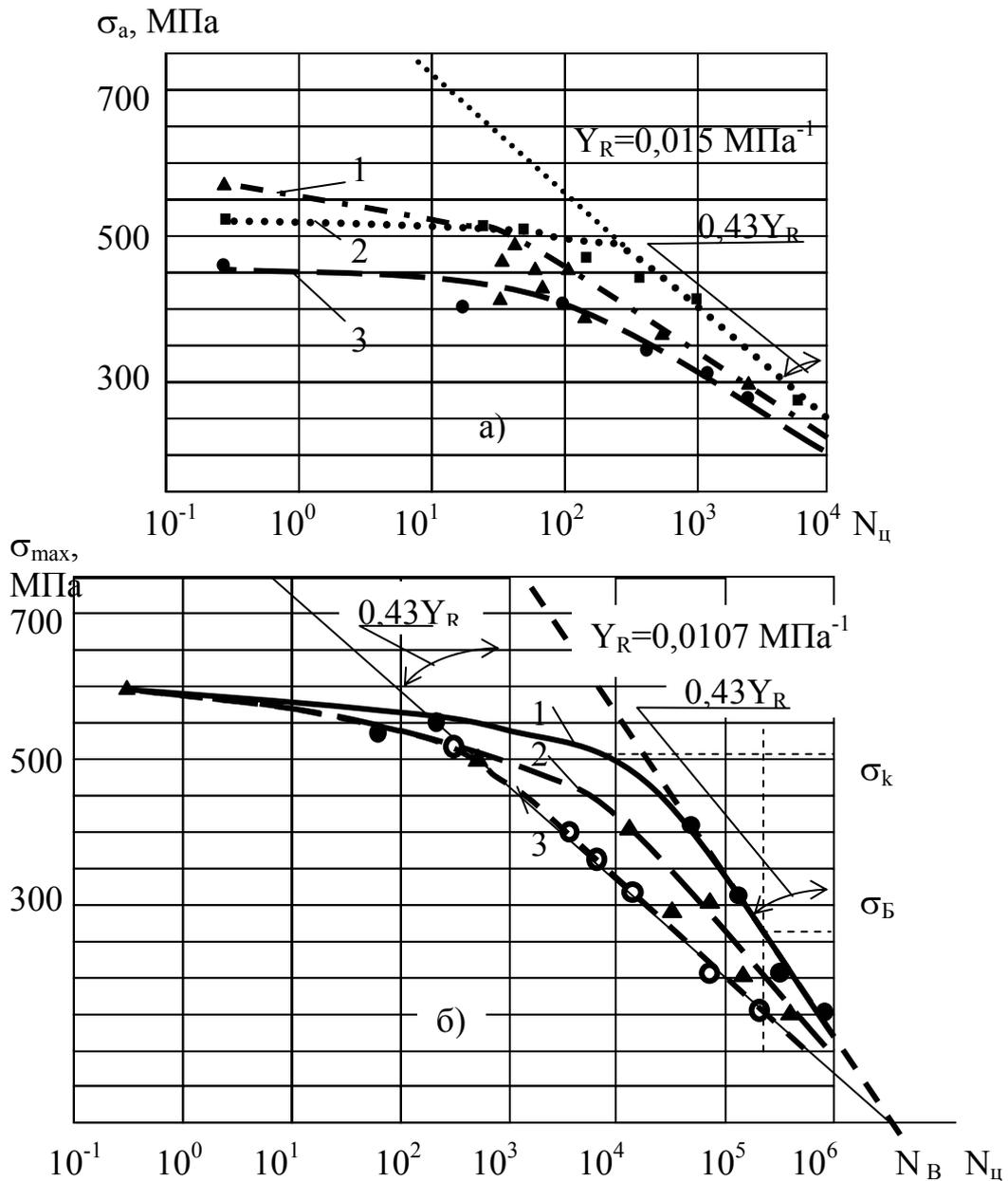


Рис.3. Кривые малоциклового усталости сварных соединений. а) Результаты малоциклового испытания различных зон бездефектных сварных соединений стали ВМСт3сп: 1-металл углового шва; 2-металл зоны термического влияния стыкового соединения; 3-основной металл; б) Результаты малоциклового испытания стыковых соединений стали 10XCHD толщиной 20 мм: 1-качественное соединение; 2-угловатость (8 мм на длине 1 м); 3- непровар 4 мм.

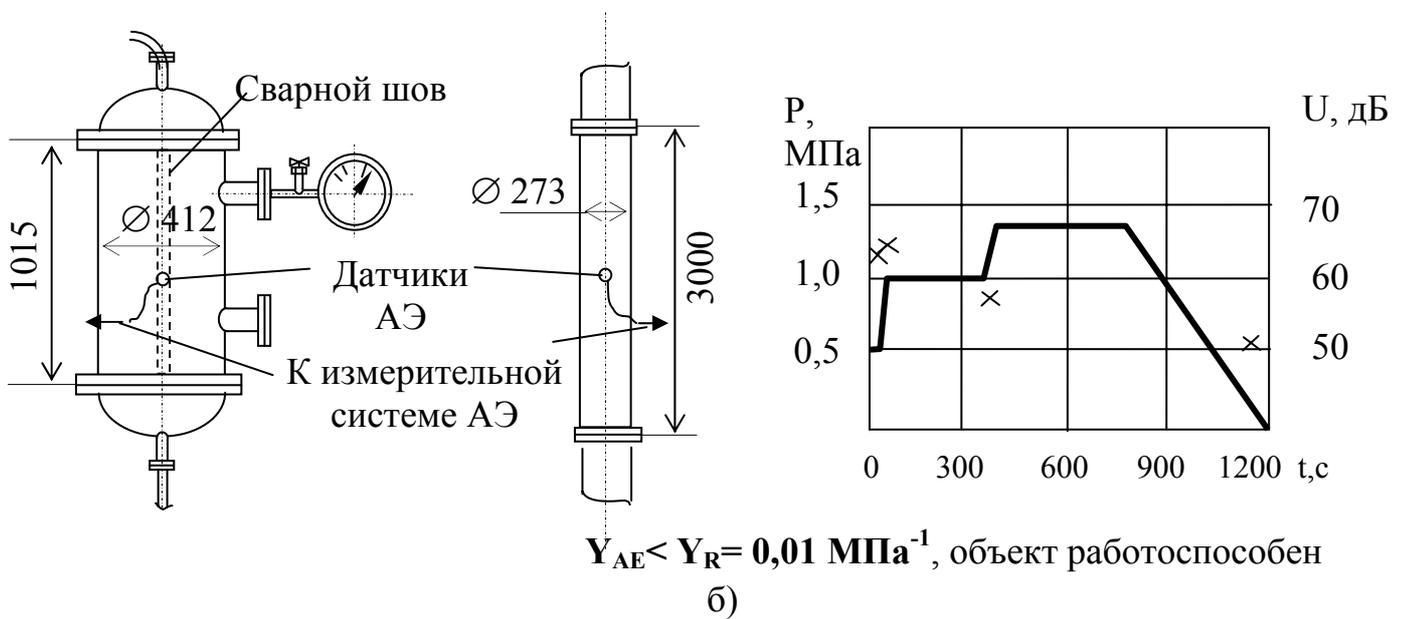
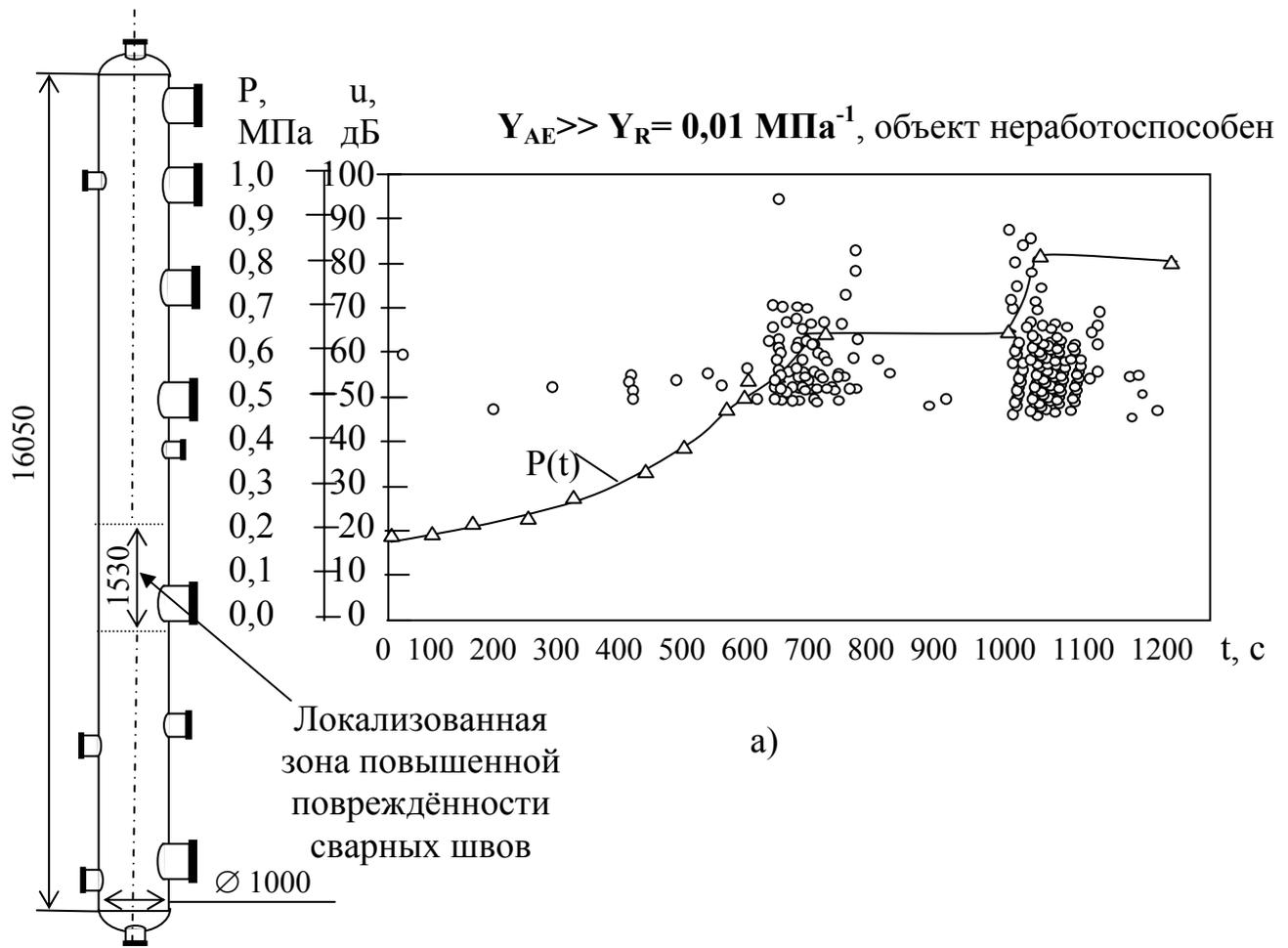


Рис. 4

где  $\sigma_a$ - номинальные амплитудные напряжения. Допускаемые напряжения

$$[\sigma] = \frac{\sigma_R}{[S]K_{IPB}} \approx \frac{\sigma_R}{[S]100Y_{RD}}$$

Исходный ресурс (до образования трещины) определяется по формуле

$$N_u = \omega_N C^* \tau_0 / C_0 \exp\left(\frac{U_0}{KT} - Y_{RD} \sigma\right) = N_B / \exp(Y_{RD} \sigma),$$

где  $\omega_N$ - частота нагружения,  $N_B = \omega_N C^* \tau_0 / C_0 \exp(U_0/KT)$ -константа материала и вида сварного соединения, температуры и частоты  $\omega_N$  его нагружения, определяется по результатам циклических испытаний образцов, построения кривой усталости и экстраполяции линейного участка зависимости  $\sigma$  ( $\lg N_u$ ) на ось  $\lg N_u$  (рис. 3). Остаточный ресурс металлоконструкции рассчитывается по формуле

$$N_{OCT} = N_B / \exp(Y_{RD} \sigma) - N_{IP},$$

где  $N_{IP} = \omega_N t_{IP}$ - фактическое число циклов нагружения,  $t_{IP}$  – фактически (предварительно) отработанный ресурс.

Для диагностики конструкции, находящейся на второй стадии разрушения создана методика относительной оценки состояния конструкции, также основанная на определении значения показателя  $Y_{AE}$  по результатам регистрации сигналов АЭ во время диагностического нагружения и предложенной системе классификации выявленных локальных источников сигналов АЭ.

Реализация методики рассмотрена на примере акустико-эмиссионного контроля абсорбера очистки углеводородного газа (рис. 4 а), сосудов блока очистки водорода водородной станции (рис. 4 б) .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основным критерием работоспособности сварных соединений является прочность, оперативная и неразрушающая оценка которой позволит повысить их надёжность и продлить ресурс. Разработка метода такой оценки связана с необходимостью учёта специфики структуры сварных соединений и находящихся в них дефектов на основе моделирования процесса накопления повреждений, определения параметров модели и прогнозирования момента разрушения.

2. Процесс накопления повреждений, определяющий характер разрушения и прочностные характеристики сварных соединений, представлен в виде совокупности протекающих в различных зонах соединения и конкурирующих между собой процессов разрушения и пластического деформирования. При высоких напряжениях и малой долговечности (числе циклов до разрушения  $N_u < 10^3$ ) разрушение сварных соединений квазистатическое с большими плас-

тическими деформациями. При  $N_{ц} > 10^4$  материал деформируется упруго и основное значение для прочности имеют усталостные разрушения. В диапазоне циклов  $10^3 \div 10^6$  зависимость  $\lg N_{ц}(\sigma)$  кривой усталости сварных соединений аппроксимируется экспонентой, параметры которой связаны с параметрами различных кривых усталости и уравнений повреждаемости.

3. Предложены уравнение повреждаемости и имитационная модель разрушения сварных соединений, адекватность которых проверена на основе сопоставления результатов моделирования экспериментом при различных видах нагружения в условиях неоднородности структуры и напряжённого состояния.

4. Для определения параметров уравнений повреждаемости и прогнозирования работоспособности сварных соединений привлечён метод акустической эмиссии (АЭ). Построена микромеханическая модель акустической эмиссии гетерогенных материалов, связывающая прочностные свойства сварных соединений и параметры АЭ при различных условиях нагружения и регистрации диагностических сигналов, позволяющая вести направленный поиск представительных диагностических показателей и методы их оценки, подготовлена и применена на практике автоматизированная измерительная акустико-эмиссионная система и программное обеспечение к ней.

5. Результаты имитационного моделирования процесса разрушения и экспериментальной регистрации временных зависимостей числа импульсов АЭ статически нагружаемых образцов сварных соединений позволяют выделить 3 этапа процесса повреждения: 2-х этапов разрушения в условиях упругого деформирования (кинетически неоднородного, составляющего 5-15 % от общего времени до разрушения, и однородного) и этапа пластического разрушения. Результаты регистрации временных зависимостей параметров АЭ позволяют определить АЭ-показатели прочности сварных соединений на этапах их упругого деформирования в условиях внешних помех регистрации сигналов АЭ и рассчитать значение стандартных характеристик прочности.

6. Предложены диагностические АЭ-показатели прочности конструкционных материалов, разработаны устойчивые к воздействию внешних помех алгоритмы определения представительных микромеханических АЭ-показателей состояния сварных соединений металлоконструкций.

7. Разработана методика прогнозирования работоспособности сварных соединений металлоконструкций, определяющая их основные прочностные характеристики неразрушающим путём независимо от вида нагружения, напряжённого состояния, структуры и дефектов сплошности материала. Сформулированы критерий степени опасности дефектов и система классификации выявленных источников АЭ. Методика апробирована на сварных металлоконструкциях и сосудах давления, не требует проведения обучающего эксперимента, помехоустойчива и адаптирована к промышленным условиям её реализации, совместима со стандартными методами оценки прочности и ресурса сварных металлоконструкций. По результатам работы 18.06.04 составлена заявка на способ оценки прочности изделий № 2004118473 .

Основные положения диссертации опубликованы в работах

1. Бураков И.Н. Неразрушающий контроль прочности при оценке удароопасности массива горных пород // Вестник ЛГТУ-ЛЭГИ № 1(7), Липецк, 2001г., с. 196-199
2. Носов В.В., Бураков И.Н. Измерительная акустико-эмиссионная система // Сборник научных трудов ЛГТУ «Современные проблемы диагностики и развития транспортно-дорожного комплекса», Липецк, 2002, 112 с., с. 82-91
3. Носов В.В., Бураков И.Н. Компьютерное моделирование процесса разрушения сварных соединений Труды междунар. научно-технической конф. «Компьютерное моделирование.- 2003», СПб, «Нестор», 2003 483 с., с.175
4. Михайлов Ю.К., Носов В.В., Бураков И.Н. Моделирование и экспериментальное исследование акустической эмиссии гетерогенных материалов // Труды V междунар. научно-технической конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения», СПб, изд-во СПбГПУ, 2003, с. 371-372
5. Михайлов Ю.К., Носов В.В., Бураков И.Н. Экспериментальное исследование акустической эмиссии сварных соединений // Труды V международной научно-технической конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения», СПб, изд-во СПбГПУ, 2003, с. 344-348
6. Носов В.В., Бураков И.Н. Оценка прочности сосудов давления методом акустической эмиссии // Научно-технич. ведомости СПбГТУ, №3 (33),2003, с. 210-218
7. Носов В.В., Бураков И.Н. Влияние амплитудной фильтрации сигналов АЭ на результаты неразрушающего контроля // Материалы научно-практической конференции «Формирование технической политики инновационных наукоёмких технологий», СПб, Изд-во СПбГПУ, 2003, с. 288-292
8. Носов В.В., Бураков И.Н. Микромеханическая модель акустической эмиссии гетерогенных материалов // Дефектоскопия, 2004, № 2, с. 53-61
9. Носов В.В., Бураков И.Н. Использование параметров амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии для оценки прочности конструкционных материалов // Дефектоскопия, 2004, №3, с.15-21
10. Михайлов Ю.К., Носов В.В., Бураков И.Н. Физико-математическая модель разрушения и упругого излучения гетерогенных материалов // Механика материалов и прочность конструкций. Труды СПбГПУ № 489, 2004, 236 с., с 101-108
11. Носов В.В., Бураков И.Н. Микромеханическая модель разрушения и упругого излучения гетерогенных материалов. // Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов: Материалы Международной научной конференции. СПб, Изд-во СПбГПУ, 2004, 76 с, с.13-15
12. Носов В.В., Бураков И.Н. Акустическая эмиссия при нагружении образцов сварных соединений металлоконструкций. // Моделирование

акустической эмиссии гетерогенных материалов: Материалы Международной научной конференции. СПб, Изд-во СПбГПУ, 2004, 76 с, с.16-18

13. Бураков И.Н. Оценка параметров процесса разрушения на основе компьютерного моделирования акустической эмиссии сварных соединений. // Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов: Материалы Международной научной конференции. СПб, Изд-во СПбГПУ, 2004, 76 с, с.38-39

14. Носов В.В, Бураков И.Н АЭ-диагностика состояния сосудов давления. // Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов: Материалы Международной научной конференции. СПб, Изд-во СПбГПУ, 2004, 76 с, с.58 - 61