

На правах рукописи

ЕЛЬЧАНИНОВ ГРИГОРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**Методика прогнозирования работоспособности сложно
нагруженных машиностроительных конструкций**

Специальность 05.02.02- Машиноведение, системы приводов и детали машин

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург- 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Носов Виктор Владимирович.

Официальные оппоненты:

зав. каф. «Транспортные и технологические системы»
СПбГПУ, д.т.н, профессор
Манжула Константин Павлович,

зав. лаб. промышленных
исследований и неразрушающего контроля
ОАО «НПО ЦКТИ», к.ф-м. н.
Нефедьев Евгений Юрьевич,

Ведущая организация:

Инженерно-экспертное предприятие ЗАО «РАТТЕ»

Защита состоится « 1 » ноября 2011г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при ФГБОУ 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 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « 28 » ноября 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Надёжность сложных крупногабаритных машин в основном определяется сроком службы их металлоконструкций, доля которых в общей массе, например, для подъёмно-транспортных машин (ПТМ), составляет порядка 80%. Наиболее распространёнными местами разрушения конструкций являются различные зоны вокруг сварных швов, лимитирующих ресурс включающих их элементов, повреждаясь под длительным действием силовых и коррозионных факторов. Статическая неопределимость сложных машиностроительных конструкций, неоднородность структуры и напряжённо-деформированного состояния соединений, нерегулярность характера действующих нагрузок и коррозионного воздействия, скрытость повреждений, полученных в результате длительной эксплуатации, приводят к неопределённости состояния и актуальности разработок по повышению точности оценки показателей их надёжности.

При всём многообразии подходов к оценке прочности и ресурса перспективным представляется подход, основанный на моделировании процесса накопления повреждений и возможности определения параметров модели на основе наблюдения за разрушением соединения непосредственно на металлоконструкции.

Цель работы состояла в разработке методики прогнозирования работоспособности сложно нагруженных машиностроительных конструкций в условиях неопределённости их структуры и напряжённого состояния на основе экспресс-наблюдения за процессом разрушения с помощью метода акустической эмиссии.

Задачи исследований

1. Анализ подходов к оценке прочности и ресурса машиностроительных конструкций в условиях неопределённости их структуры и напряжённо-деформированного состояния, обоснование методологии исследований;
2. Формулировка критерия прочностной неоднородности и определение его количественного показателя на основе моделирования процесса разрушения, оценка влияния степени неоднородности на прочность и прогнозируемость поведения сложно нагруженных машиностроительных конструкций;
3. Экспериментальные исследования процесса разрушения сварных соединений сложно нагруженных машиностроительных конструкций, оценка влияния прочностной неоднородности на характер разрушения и точность оценки прочности;
4. Формулировка и оценка прочностных показателей и представительных диагностических признаков прочностного состояния сложно нагруженных конструкций;
5. Разработка методики оценки работоспособности и остаточного ресурса сложно нагруженных металлоконструкций, их проверка в условиях стендовых и промышленных испытаний.

Проблемы прочности металлоконструкций являются предметом интенсивного исследования специалистами в области машиноведения и деталей машин, материаловедения, механики разрушения и композиционных материалов, физики прочности, неразрушающего контроля и диагностики. Большой вклад в решение проблемы внесён такими учёными, как Патон Б.Е., Махутов Н.А., Алёшин Н.П., Бигус Г.А, Решетов Д.Н., Иосилевич Г.Б., Ряховский О.А., Павлов П.А., Мельников Б.Е., Гецов Л.Б., Пустовой В.Н., Судаков А.В., Жуков В.А., Соколов С.А, Манжула К.П. и др., исследователями в области механики и микромеханики разрушения, кинетической концепции прочности (Журков С.Н., Регель В.Р., Слуцкер А.К.,

Томашевский Э.Е., Куксенко В.С., Петров В.А., Веттегрень В.И. и др.), неразрушающего контроля и диагностики, метода акустической эмиссии и методологии оценки прочности различного рода материалов и технических объектов (Иванов В.И., Грешников В.А., Дробот Ю.В., Башкарёв А.Я., Ключев В.В., Потапов А.И., Куксенко В.С., Савельев В.Н., Недосека А.Я., Нефедьев Е.Ю., Носов В.В., Трипалин А.С, Буйло С.И., Баранов В.М., Бырин В.Н. и др.).

Предметом исследования является методика прогнозирования работоспособности сложно нагруженных машиностроительных конструкций, узлов и механизмов различного назначения и отраслей промышленности. Методика разрабатывается с целью обеспечения безопасности, повышения точности оценки и продления ресурса машин, опирается на известную методологию оценки прочности, результаты экспериментальных исследований процесса разрушения сварных соединений методом акустической эмиссии, статических и усталостных прочностных испытаний, статистического, физического и имитационного компьютерного моделирования.

Особенность оценки остаточного ресурса сложно нагруженных машиностроительных конструкций связана с неопределённостью их напряжённого состояния и реального режима эксплуатации, ограниченностью информации об объекте контроля, неопределённостью в выборе моделей, критериев и методов регистрации разрушения, противоречиями в нормативных документах и неоднозначностью в интерпретации методических рекомендаций экспертами, отсутствием материальных средств для проведения мониторинга, трудоёмких и дорогостоящих натурных исследований. Указанные обстоятельства усложняют задачу распознавания состояния соединений и требует использования физически обоснованных путей к поиску её решения. Перспективными методами получения полезной информации об определяющих ресурс процессе представляются методы экспресс-испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ), широко используемый в настоящее время для контроля состояния металлоконструкций в развитых странах мира. Сложность состояния сварных соединений затрудняет возможность расширения сферы использования разработок на диагностирование широкого круга металлоконструкций общего назначения, подъёмно-транспортных, строительно-дорожных машин, строительных и мостовых сооружений, металлургического оборудования и пр., что объясняется несовершенством методических разработок.

Конструкционная сложность конструкций, неоднородность состояния сварных соединений, высокое затухание сигнала АЭ при прохождении угловых швов, создают предпосылки решения проблемы оценки работоспособности сложно нагруженных сварных соединений металлоконструкций на основе локализованной регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе диагностического нагружения и интерпретации результатов регистрации с использованием универсальных микромеханических закономерностей разрушения и упругого излучения. **Научную новизну работы составляют** предлагаемые для решения данной проблемы критерии, показатели, диагностические параметры и признаки прочностного состояния, а также основанная на них методика оценки работоспособности сложно нагруженных металлоконструкций.

Методологической основой исследований является микромеханическая модель разрушения и АЭ гетерогенных материалов, принципы прогнозирования механического разрушения и диагностики прочностного состояния на основе регистрации

упругого излучения. **Теоретические исследования** проведены на основе имитационного компьютерного моделирования процесса разрушения сварных соединений, **экспериментальные исследования** проведены на имеющих повышенную концентрацию напряжений, неравномерность распределения нагрузки вдоль шва, изменение направления «силового» потока симметричных и асимметричных лабораторных образцах нахлесточных сварных соединений, сварных балках, элементах металлоконструкций мостовых кранов и сосудов давления с использованием автоматизированной диагностической акустико-эмиссионной системы.

Научные положения, выносимые на защиту:

- модель прочностной неоднородности сварных соединений, её связь со структурой, напряжённым состоянием и прогнозируемостью поведения машиностроительных конструкций;
- показатели прочностной неоднородности и состояния сложно нагруженных конструкций, метод их оценки;
- новый диагностический параметр состояния сложно нагруженных сварных соединений, определяемый в условиях неопределенности характеристик структуры металлоконструкций и действующих в них напряжений;
- новые диагностические признаки этапов процесса разрушения и прочностного состояния сложно нагруженных машиностроительных конструкций;
- методика оценки работоспособности и остаточного ресурса сложно нагруженных металлоконструкций, основанная на использовании новых диагностических параметров.

Достоверность научных положений подтверждается сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, имитационного компьютерного моделирования, регистрации сигналов акустической эмиссии, результатами статистической обработки экспериментальных исследований.

Практическая ценность результатов обусловлена:

- повышением оперативности и точности, снижением трудоёмкость оценки состояния сложно нагруженных металлоконструкций в условиях неоднородных структуры и напряжённого состояния сварных соединений;
- апробацией разработанных методик на лабораторных образцах, в стендовых и промышленных испытаниях металлоконструкции сосудов давления и подъёмно-транспортных машин;
- продлением сроков эксплуатации деталей машин, элементов конструкций и оборудования со сложно нагруженными сварными соединениями.

Знание текущего технического состояния сварных металлоконструкций оборудования позволяет повысить безопасность их эксплуатации, продлить срок межремонтной эксплуатации, что чрезвычайно эффективно экономически.

Область применения результатов. Результаты исследований используются для оценки работоспособности, продления ресурса сварных соединений деталей машин и металлоконструкций различного назначения, обеспечения безопасной их эксплуатации, в учебном процессе студентов технических специальностей общемашиностроительного и специального значения.

Апробация и внедрение результатов;

Работа является победителем конкурса грантов 2011 года для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории

Санкт-Петербурга, связана с проектом «Разработка технологии неразрушающего контроля и диагностики состояния структурно-неоднородных технических объектов на основе микромеханической модели акустической эмиссии гетерогенных материалов», договор № 383/09 от 30.10.2009, выполненном при поддержке правительства Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности, результаты работы докладывались на межвузовских, всероссийских и международных конференциях, семинарах кафедр машиноведения и деталей машин СПбГПУ, Балт. гос. техн. ун-та. (г. Санкт-Петербург), заседаниях аттестационной комиссии научно-учебного центра «Качество» органа по сертификации персонала и методических документов в области неразрушающего контроля и диагностики «Спектр-качество» (г. Москва), использованы при диагностике состояния металлоконструкций мостовых кранов, трубопроводов, сосудов давления, внедрены в учебный процесс подготовки специалистов по специальности «Динамика и прочность машин» и магистров по направлению «Прикладная механика».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 155 стр., содержит 54 рисунка, 14 таблиц, 123 библиографических источников.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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.

Обладая высокой несущей способностью, сложные машиностроительные конструкции проявляют непрогнозируемое поведение, теряя работоспособность из-за много- или малоциклового усталостного разрушения сварных соединений. Опыт эксплуатации металлоконструкций показывает, что развитие усталостных трещин почти всегда начинается в области сварных соединений. Многоцикловое усталостное разрушение является наиболее вероятным эксплуатационным повреждением сварных соединений большинства деталей машин и элементов Машиностроительных конструкций (подкрановые балки, несущие узлы транспортных установок и т. д.). Малоцикловая усталость является основной причиной образования трещин в сварных соединениях оборудования тепловых и атомных станций, элементов конструкций летательных и химических аппаратов, судовых конструкций, технологических установок, элементов автомобильного транспорта, работающих в коррозионной и радиоактивной среде в условиях концентрации напряжений. Неожиданность разрушения соединений большинства металлоконструкций обусловлена конструкционной сложностью, неоднородностью структуры и напряжённого состояния в элементах конструкций, нерегулярностью действующих нагрузок, развитием скрытых дефектов, влиянием климатических условий, приводящим к неопределенности состояния и необходимости его постоянного контроля. Дается анализ повреждений и существующим методам оценки прочности и прогнозирования ресурса, из существующих подходов выделяется методология оценки работоспособности технических объектов, основанная на микромеханической модели акустической эмиссии (АЭ) гетерогенных материалов (рис.1), позволяющая выбирать полезные сигналы и прогнозировать разрушение. Описывается принцип долгосрочного прогнозирования остаточного ресурса, состоящий в неразрушающем

определении времени $t_{ост}$, оставшегося до момента накопления критической концентрации микротрещин C^* на стадии её мелкодисперсного роста по выражению

$$C(t) = C_0 \int_{\theta_{MIN}}^{\theta_{MAX}} \psi(\Theta') \left\{ 1 - \exp\left[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\Theta(\bar{t})}\right] \right\} d\Theta' \quad (1)$$

где C - концентрация микротрещин, t - текущее время, C_0 -начальная концентрация структурных микроэлементов, Θ_{min} , Θ_{max} - крайние значения долговечности элементов, $\psi(\Theta')$ - функция плотности распределения количества структурных элементов по долговечности Θ' , задаваемой формулой Журкова (рис. 1). $C(t^*)=C^*$, $t_{ост} = t^* - t_{пр}$, где $t_{пр}$ – потерянный ресурс. Информацию о процессе несут в себе сигналы АЭ, временные зависимости информативного параметра $\xi(t)$ которой регистрируются экспериментально.

$$\xi(t) = k_{AE} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp\left[-\int_0^t dt' / \Theta(U_0, \omega(t'))\right] \right\} d\omega ,$$

где ξ -информативный параметр АЭ (число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда сигналов АЭ);

k_{AE} -акустико-эмиссионный коэффициент (“звучащий” объём материала);

ω -параметр механического состояния структурного элемента материала объекта;

$\Psi(\omega)$ - функция плотности распределения параметра ω по структурным элементам контролируемого объёма V материала;

$\omega_0, \Delta\omega$ -нижняя граница и диапазон рассеяния значений параметра ω ;

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

$$\omega(t) = \gamma\sigma(t) / (KT)$$

$$\psi(\omega, \omega_0, \Delta\omega) = \frac{1}{\Delta\omega}, \omega \in [\omega_0, \omega_0 + \Delta\omega]$$

$$\Psi(\omega, \mu, \sigma_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3\omega} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_3^2}(\ln(\omega) - \mu)^2\right]$$

$$\Psi(\omega, \omega_0, \omega_1, \omega_2) = \begin{cases} 0.99/\omega_1, & \omega \in [\omega_0, \omega_0 + \omega_1] \\ 0.01/\omega_2, & \omega \in (\omega_0 + \omega_1, \omega_0 + \omega_1 + \omega_2] \end{cases}$$

$$\Theta(U_0, \omega(t)) = \tau_0 \exp\left[(U_0 - \gamma\sigma(t)) / (KT)\right] - \text{Долговечность структурного элемента (формула Журкова)}$$

$$\tau_0 = 10^{-13} \text{ с.}$$

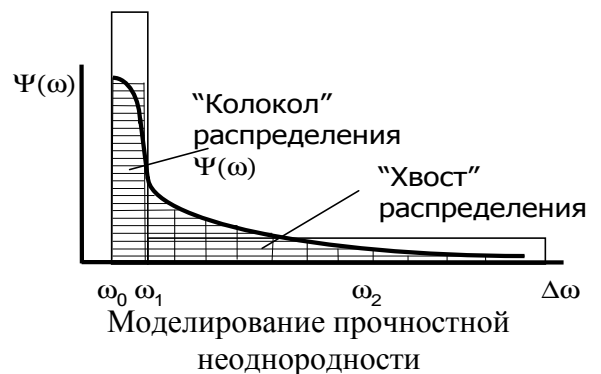


Рис.1. Микромеханическая модель параметров АЭ

Отмечается, что при всём многообразии охваченных методологией материалов и технических объектов сложно нагруженные сварные соединения с неопределённой структурой и напряжённым состоянием в рамках данного подхода не исследовались, что не давало возможности использования разработок при диагностировании широкого круга деталей машин и элементов общемашиностроительного назначения, и, в частности, металлоконструкций, подъёмно-транспортных, строительно-дорожных машин, мостов, строительных сооружений, металлургического оборудования и др.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию процесса разрушения сложно нагруженных сварных соединений в условиях неоднородности прочностного состояния и предпосылкам его прогнозирования. Проведена классификация видов неоднородности состояний, дано определение прочностной неоднородности материала, предложены её модель и критерий, показана связь структурного состояния материала с видами прочностной неоднородности, этапами разрушения, их диагностическими признаками и прогнозируемостью разрушения. Основным показателем прочности предложено принять время до разрушения, а под неоднородность состояния сварных соединений - различие значений долговечности θ их структурных элементов или образцов группы. Прочностная неоднородность материала отнесена к основной причине разброса ресурса конструкционных материалов и технических объектов, а неопределённость значений параметра ω - к основной причине снижения прогнозируемости разрушения. В качестве показателя прочностной неоднородности предложено соотношение параметров микромеханической модели АЭ, определяемого на основе сопоставления результатов имитационного моделирования (1) и регистрации числа импульсов N_{Σ} АЭ (рис. 2).

Показана зависимость прочностного состояния сварных соединений от жёсткости свариваемых пластин, пространственной неоднородности поля механических напряжений в швах и структурной неоднородности швов, установлено влияние технологических факторов на неоднородность структуры материала и длительности этапов разрушения.

Отмечается, что участки временных зависимостей числа N_{Σ} импульсов АЭ этапа однородного разрушения при равномерном нагружении с постоянной скоростью $\dot{\sigma}$ роста напряжении σ описывались выражением

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 K T \exp[(\gamma \dot{\sigma} t - U_0)/(KT)] / (\tau_0 \gamma \dot{\sigma}), \quad (2)$$

а при выдержке под постоянной нагрузкой, когда $\dot{\sigma} = 0$, $\sigma = \text{const}$

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 t \exp \omega / \{ \tau_0 \exp[U_0/(KT)] \} \quad (3)$$

Активность АЭ при этом

$$N'_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 \exp \omega / \{ \tau_0 \exp[U_0/(KT)] \} \quad (4)$$

В третьей главе описаны образцы, аппаратура, методика и результаты экспериментальных исследования процесса разрушения сложно нагруженных сварных соединений, проводится анализ результатов исследований. Испытанию подвергали изготовленные из стали Ст3пс5 сваренные внахлест «прямые» (симметричные) и «косые» (несимметричные) образцы с лобовыми, фланговыми и комбинированными угловыми швами (рис.3 а,б,в), в различных местах швов которых просверливались отверстия диаметром 6 мм, моделирующие коррозионные повреждения. Толщина пластин 6 мм, сварные швы Н1-катет 6 мм, по ГОСТ 14771-80, сварочная проволока СВ08Г2С ОМ Ø 1,2 мм, среда- углекислота по ГОСТ 8050-85. Наблюдение за процессом разрушения проводилось во время нагружения и выдержки нагрузки с помощью автоматизированной диагностической акустико-эмиссионной системы, выдающей информацию в реальном масштабе времени (рис. 3 г, д).

Анализировались временные зависимости нагрузки и параметров АЭ при различных видах нагружения образцов, образовании и развитии трещин.

Обнаружено, что для образцов стыковых сварных соединений, выполненных без искажений формы сечений или с ярко выраженным концентратором длительность кинетически неоднородного этапа не превышала 30% от общего времени ожидания образования трещины, а соотношения параметров функции $\Psi(\omega)$ таковы:

$$\Delta\omega/\omega_0 < 1; \omega_1/\omega_0 < 1, \omega_2/\omega_0 < 1; \omega_2/\omega_1 \approx 1; \sigma_3 < \mu,$$

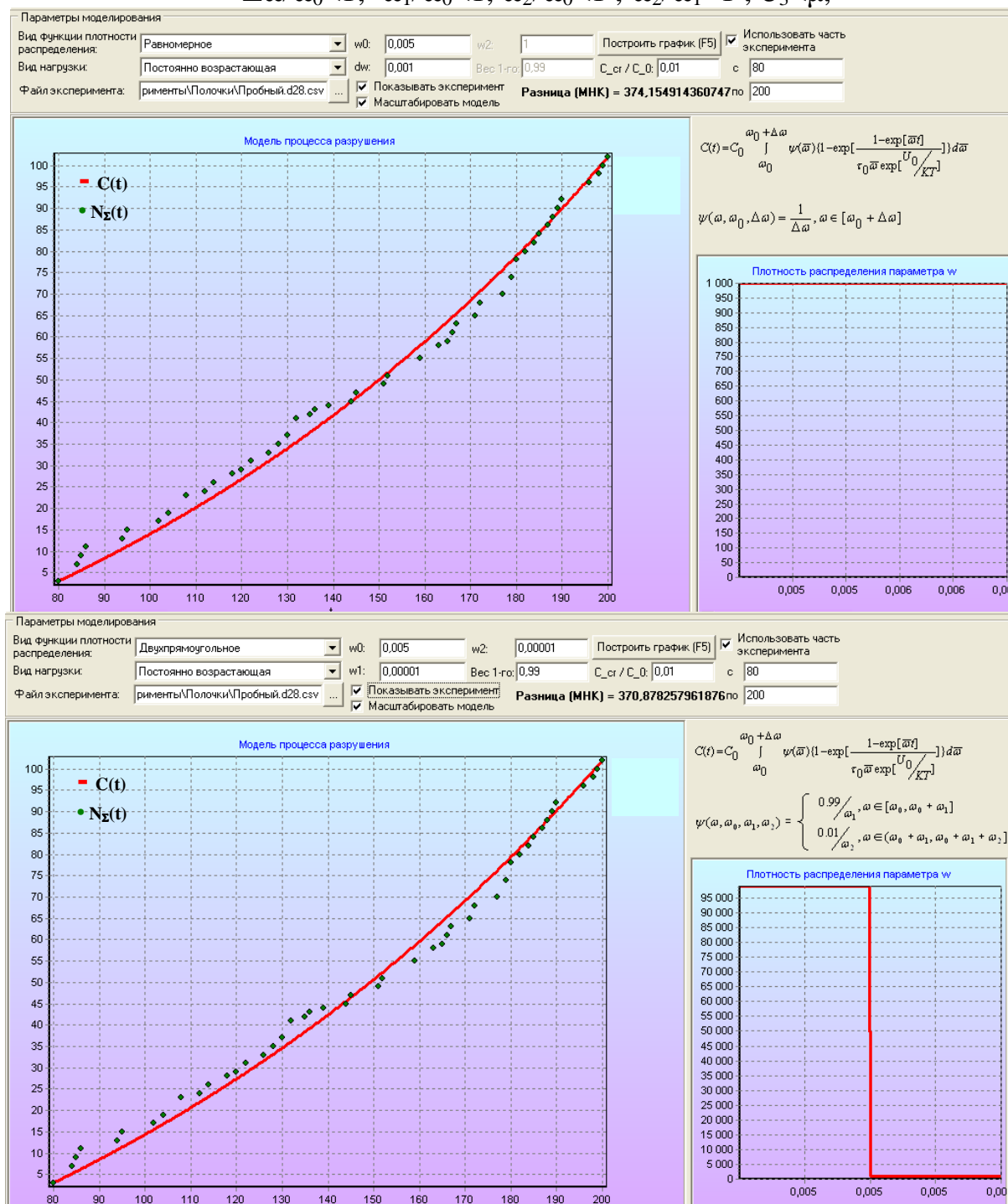
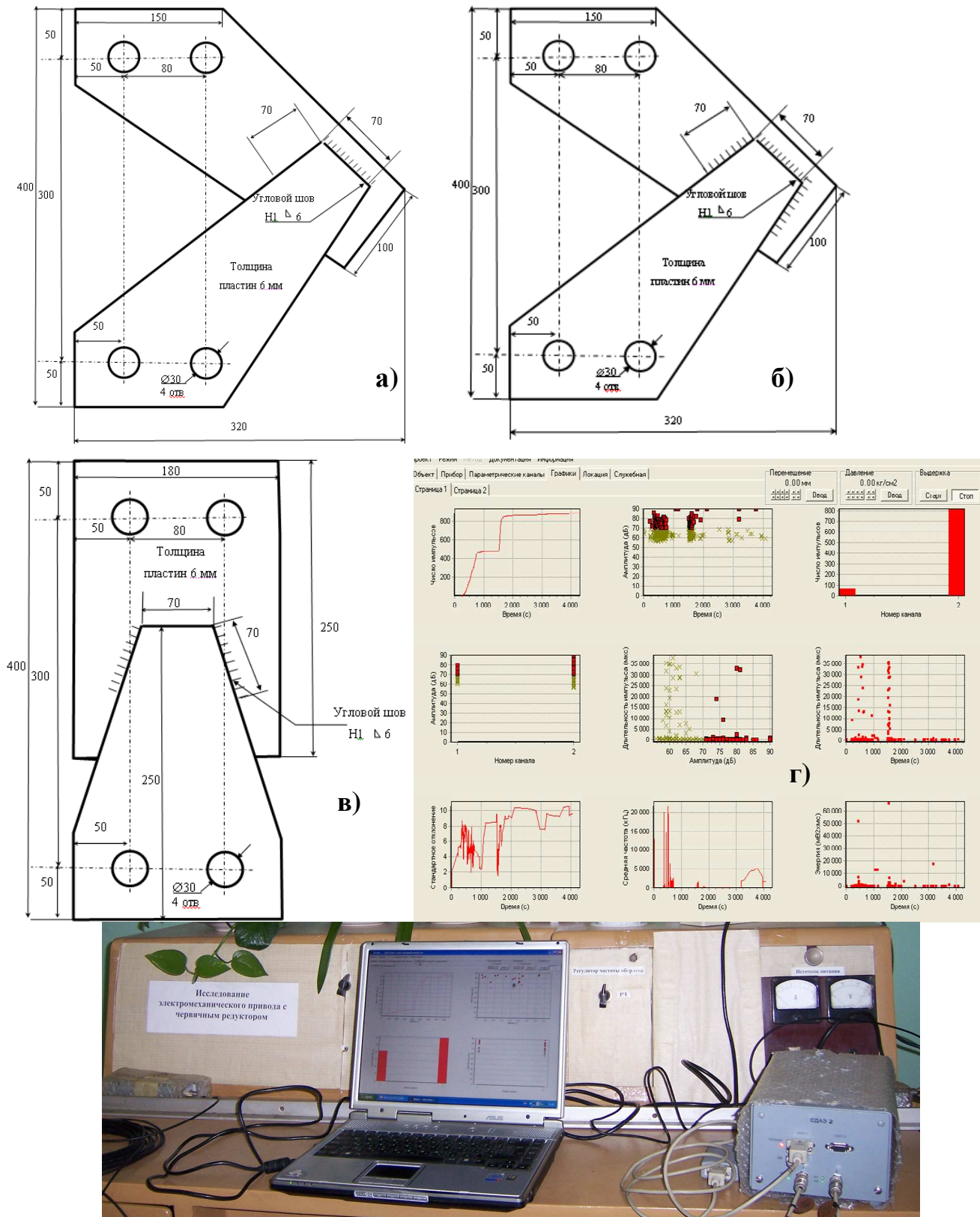


Рис.2. Результаты имитационного компьютерного моделирования разрушения и регистрации АЭ бездефектного однородно разрушаемого образца стыкового сварного соединения:

- а) Равномерное распределение $\Psi(\omega)$, $\Delta\omega/\omega_0 < 1$; б) Двух-прямоугольное распределение $\Psi(\omega)$, $\omega_1/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_1 = 1$.



д)

Рис. 3. Образцы нахлесточных соединений. 1-ого (а), 2-го (б) и 3-го (в) типов г) АЭ-информация в реальном масштабе времени, д) внешний вид АЭ-системы.

Для образцов нахлесточных сварных соединений соотношения приведённых параметров существенно варьировались. По мере роста величины соотношений ω_2/ω_1 и ω_2/ω_0 уменьшается вогнутость расчётной зависимости $C(t) \sim N_{\Sigma}(t)$ равномерно

нагружаемых образцов, при некотором значении $\omega_2/\omega_1 > 1$; $\omega_2/\omega_0 > 1$ и $\sigma_3 > \mu$ она приобретает характер, близкий к прямолинейному, а при дальнейшем увеличении - выпуклость. Такая ситуация имитирует связанное с увеличением прочностной неоднородности материала уменьшение темпов выхода из процесса разрушения наименее долговечных структурных элементов со значениями ω из области "хвоста" функции $\Psi(\omega)$. Длительность неоднородного этапа разрушения некоторых образцов превышала 40% от продолжительности первой стадии, что сокращало длительность этапа однородного разрушения по отношению к таковой у образцов стыковых соединений, однако оставалась достаточной для оценки из (2)-(4) диагностического параметра и прочностного АЭ-показателя

$$kY_{AE} = d \ln \xi / dF \approx \omega / F, \quad (5)$$

где $k = \sigma / F$, σ -номинальные напряжения, $\xi = N_{\Sigma}$ или N'_{Σ} , F - нагрузка на образец. Установлено, что наилучшую корреляцию с расчётными значениями эквивалентных напряжений из наиболее применяемых при диагностировании АЭ-критериев (общее число сигналов АЭ $N_{упр}$, средняя амплитуда U_{cp} и энергия E_{cp} импульсов АЭ, зарегистрированных на этапе упругого нагружения, значения локально-динамического m и концентрационно-кинетического kY_{AE} показателей) имеет показатель kY_{AE} . Большая величина разброса значений показателя kY_{AE} различных образцов (более, чем в 35 раз) показывает его высокую чувствительность к геометрическим и структурным факторам.

Кроме указанных акустико-эмиссионных, в качестве показателей прочности рассматривались используемые при визуальном, тензометрическом и ультразвуковом неразрушающем контроле геометрические характеристики образцов - значения полезной площади поперечных сечений для стыковых соединений и комплексных геометрических характеристик W_{KH} и W_{KM} (отношений растягивающей образцы единичной силы к максимальным касательным (номинальным) или Мизесса напряжениям, рассчитываемым по стандартным методикам или с использованием пакета ANSYS на случай действия растягивающего усилия в 1 Н) для нахлесточных соединений. Сравнение точности оценок прочности образцов этими показателями приведено в табл.2, показывающей информационное преимущество показателя $1/kY_{AE}$ в условиях внутригрупповой прочностной неоднородности при неразрушающей оценке прочности образцов 1-ого и 2-ого типов.

Значения разрушающей нагрузки рассчитывались с помощью параметра (5) по формуле

$$F_{PI} = (U_0 / (KT) + \ln(\tau_0 C^* / C_0 F_P' \cdot kY_{AE})) / (kY_{AE}),$$

где F_P' - скорость роста нагрузки при нагружении, $C^*/C_0 = 10^{-2}$. Корреляция расчётных и действительных значений нагрузок, соответствующих разрыву образца стыкового соединения или моменту появлению трещины нахлесточного соединения, приведена на рис.4 а, а значений диагностического показателя $1/kY_{AE}$ и времён появления трещин в образцах, отсчитываемых с момента их нагружения - на рис. 4 б.

Для оценки состояния объектов в условиях неопределённости фактических напряжений предложен безразмерный диагностический параметр прочностного состояния:

$$W_{AE} = Y_{AE} \cdot \sigma = kY_{AE} \cdot F_{раб} = d \ln \xi / dK_H \approx \omega,$$

где $K_H = F_i / F_{\text{раб}}$ - коэффициент нагрузки, F_i , $F_{\text{раб}}$ - диагностическая и рабочая нагрузки. При $F=1$ значения параметров $W_{\text{АЭ}}$ и $kY_{\text{АЭ}}$ совпадают по модулю, что распространяет найденные для $kY_{\text{АЭ}}$ корреляции с расчётными напряжениями и на параметр $W_{\text{АЭ}}$. Данный параметр инвариантен к изменчивости геометрических характеристик сечения и номинальных напряжений в нём. На основе параметра $W_{\text{АЭ}}$, соотношений ω_1/ω_0 , ω_2/ω_0 , ω_2/ω_1 , σ_3 и μ предложены новые диагностические признаки состояния сварного соединения и обобщённые формулы оценки ресурса.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции различных параметров с разрушающей нагрузкой образцов нахлёсточных соединений различного типа

Диагностический показатель Тип образцов	Концентрационно-кинетический АЭ-показатель $1/(kY_{\text{АЭ}})$	Комплексная геометрическая характеристика поперечного сечения $W_{\text{кн}}$	Комплексная геометрическая характеристика поперечного сечения $W_{\text{км}}$
Все образцы	0,81	0,93	0,92
Образцы типа 1	0,89	0,79	0,69
Образцы типа 2	0,66	0,25	-0,08
Образцы типа 3	0,74	0,92	0,52

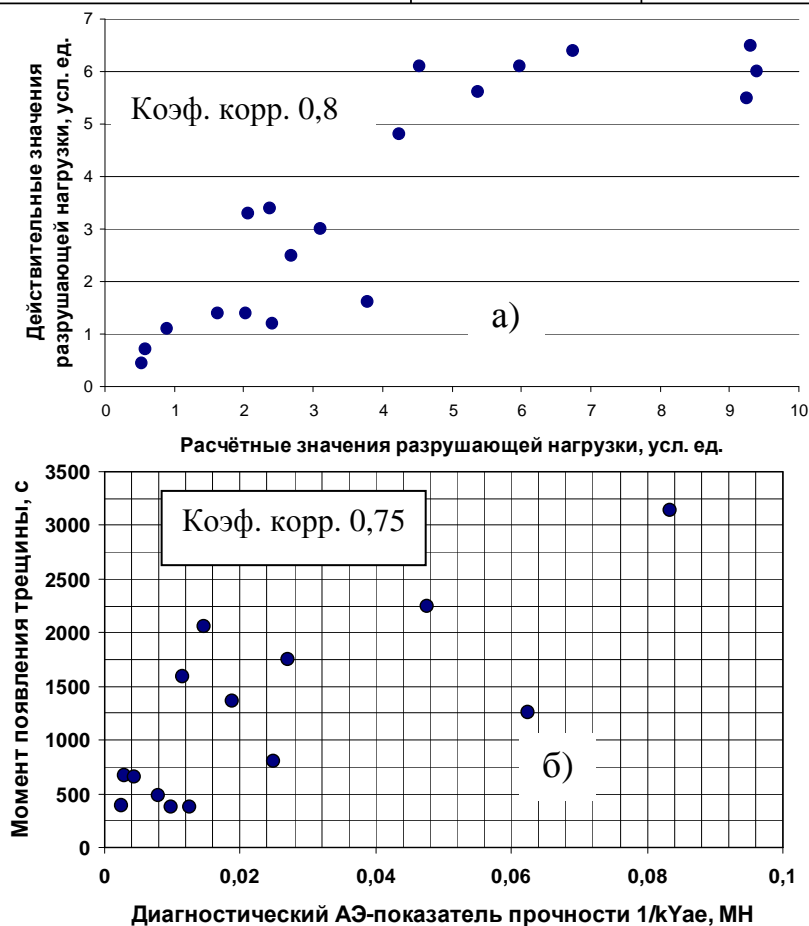


Рис. 4. Корреляции расчётных и действительных значений разрушающей нагрузки образцов стыковых и нахлёсточных сварных соединений (а) и диагностического показателя $1/kY_{\text{АЭ}}$ и момента появления трещины образцов нахлёсточных сварных соединений (б)

Отличительной особенностью признаков является использование для распознавания прочностного состояния объекта и оценки его ресурса временных зависимостей параметров АЭ и латентности АЭ, повышающих информативность диагностирования.

В четвёртой главе описаны результаты регистрации временных зависимостей активности АЭ во время стендовых испытаний модели металлоконструкции мостового крана - ступенчато нагружаемой сварной балки коробчатого сечения с размерами 5800x300x200 мм и толщиной стенки 5 мм из углеродистой стали с заваренной трещиной в корпусе (рис.5), на основе (4) произведена их обработка (результаты в табл. 3), описаны результаты натурных испытаний сварных соединений главной балки мостового крана Балтийского завода (г. Санкт-Петербург, рис.6).

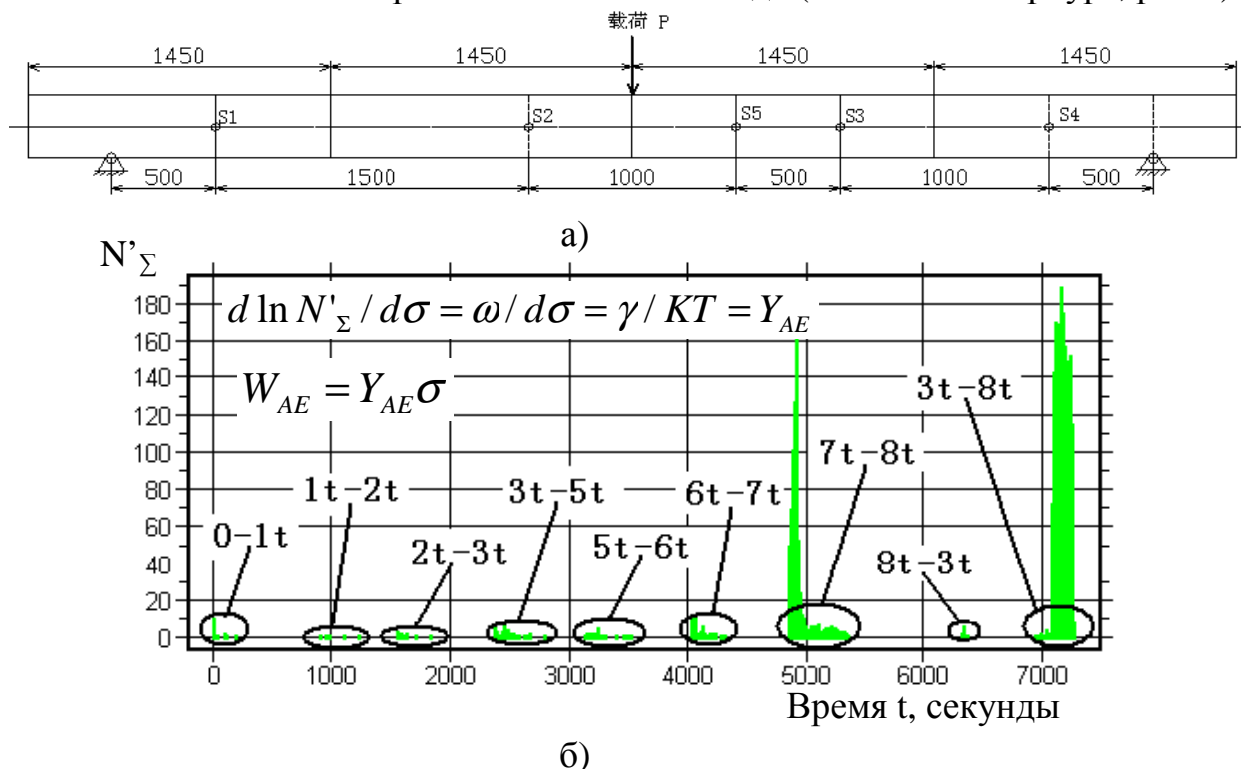


Рис.5. Схема нагружения а) и результаты регистрации АЭ б) балки коробчатого сечения со сварным швом.

Таблица 3

Связь значений нагрузки на балку, значений номинальных напряжений в сечении балки со сварным швом и трещиной, параметров трещины и диагностических АЭ параметров Y_{AE} и W_{AE}

Нагрузка выдержки Q, кН	Номинальные напряжения в опасном сечении, МПа	Параметры трещины	$Y_{AE\text{ ср}}$, МПа ⁻¹	W_{AE}
10	23	начальная трещина 130 мм	-	-
20	47		-0,02948	-1,3758
30	70		0,006714	0,470004
50	117	рост трещины на 20 мм	0,005171	0,603266
60	140		0,019804	2,772589
70	163	рост трещины на 30 мм	0,031532	5,150308
80	187		0,035014	6,536014

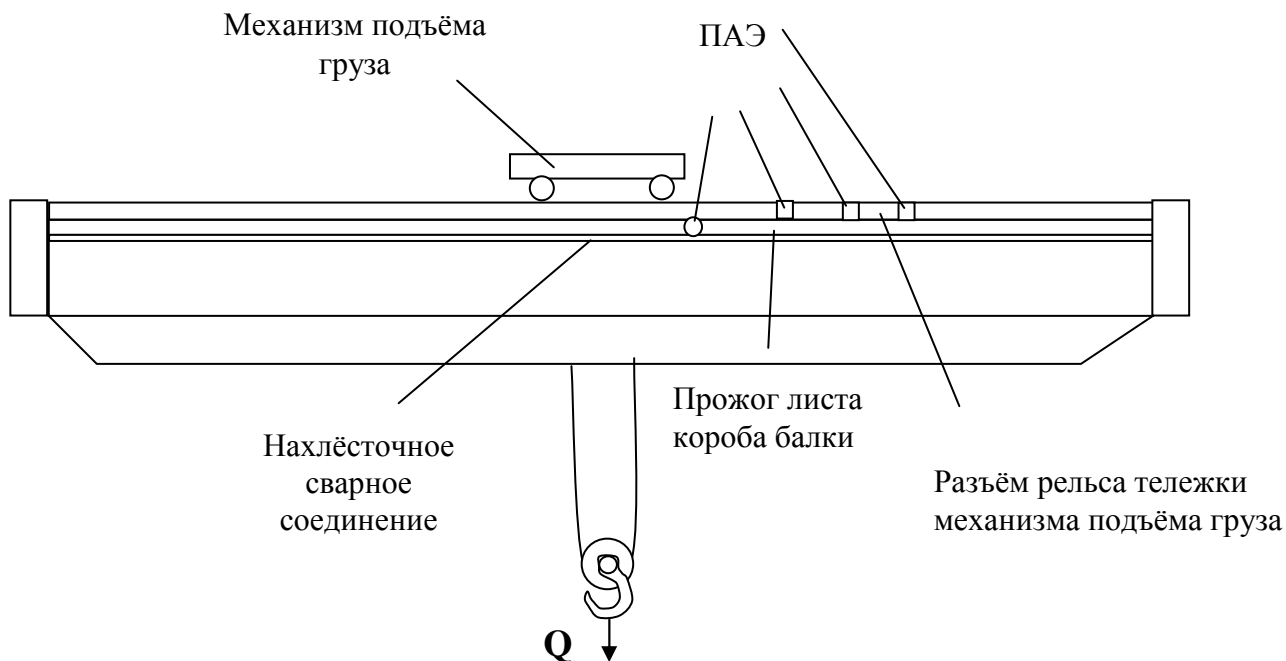


Рис. 6. Схема нагружения и проведения АЭ-испытаний мостового крана .

В пятой главе описана методика прогнозирования работоспособности сварных соединений сложно нагруженных конструкций и рассмотрены примеры её реализации на различных конструкциях.

Методика основана на определении значения диагностического параметра W_{AE} и в условиях неопределённости напряжённого состояния сварных соединений сложно нагруженных металлоконструкции реализуется по следующему алгоритму.

1. Объекты контроля должны контролироваться в их рабочем положении. АЭ-диагностика реализуется в процессе статических испытаний машин, проводимых по программе, соответствующей действующим инструкциям.

2. Установка преобразователей АЭ (ПАЭ) на объект. Количество и размещение ПАЭ определяется конфигурацией объекта и максимальным разнесением ПАЭ, связанным с затуханием сигнала, точностью определения координат дефектов. Учитываются критические места (“горячие точки”) объекта, сварные швы, зоны высоких напряжений, зоны, подвергнутые ремонту, и т.д.

3. Нагружение объекта производят посредством многократного, например, для подъёмно-транспортных машин, приподнимания испытательного груза на 100-200 мм. от земли и удерживанием в таком положении не менее 10 мин. Максимальное значение нагрузки должно составлять не менее $1,15 Q_{max}$, где Q_{max} -номинальная промежуточная грузоподъёмность крана на данном вылете .

4. В процессе нагружения металлоконструкции производится регистрация сигналов АЭ, определение значения диагностического параметра W_{AE} , оценка работоспособности (табл. 4) и остаточного ресурса.

Таблица 4.

Оценка работоспособности изделия и классификация источников АЭ по параметру W_{AE}

Класс источника АЭ	Диагностический признак	Характеристика работоспособности изделия и источника АЭ
I	Менее трёх сигналов АЭ или $W_{AE} \leq 0$	Работоспособное, пассивный,
II	$0 < W_{AE} < [W_{AE}]$	Работоспособное, активный
III	$W_{AE} \geq [W_{AE}]$	Ограниченная работоспособность, критически активный нагрузка должна быть снижена не менее чем на 25%
IV	$W_{AE} > [S] [W_{AE}]$	Неработоспособное, катастрофически активный. кран подлежит снятию с эксплуатации и списанию либо должна быть произведена замена дефектного узла.

Для реализации методики металлоконструкцию нагружают, как минимум, два раза, повышая нагрузки при соблюдении условия $Q_i \geq Q_{max}$, где Q_{max} -номинальная допускаемая нагрузка металлоконструкции. После каждого нагружения поднимают испытательный груз с помощью металлоконструкции на 100-200 мм от земли и удерживают его более 10 мин. для регистрации сигналов АЭ, информативных относительно состояния материала контролируемой металлоконструкции, в процессе чего регистрируют число импульсов акустической эмиссии и их амплитуды, определяют диагностический параметр материала W_{AE} в условиях «силовой» неопределённости состояния элементов сложных металлоконструкций по формуле:

$$W_{AE} = \frac{(\ln \frac{\xi_j}{\xi_i} + \ln \frac{k_{AEi}}{k_{AEj}})}{\Delta K_H}$$

где ξ_i, ξ_j – значения информативного АЭ-параметра при нагрузках Q_i и Q_j соответственно, k_{AEi}, k_{AEj} – акустико-эмиссионные коэффициенты при напряжениях возникающих при Q_i и Q_j соответственно. В качестве информативного параметра ξ_i используют число N_{Σ} импульсов АЭ или суммарную амплитуду сигналов АЭ, накопленных на этапе однородного разрушения во время выдержки под нагрузкой величиной Q_i . Отношение k_{AEi}/k_{AEj} определяется в зависимости от выбранного закона распределения амплитуд импульсов АЭ. $\Delta K_H = K_{HI} - K_{HI}$ - разница коэффициентов нагрузки, K_{HI}, K_{HI} - коэффициенты нагрузки (доли от рабочей нагрузки), $1,15 \geq K_{HI} = Q_i/Q_{max} \geq 1$, $K_{HI} < K_{HI} = Q_j/Q_{max} \leq 1,25$, Q_{max} – максимально допустимая рабочая нагрузка. Определяют величину параметра Y_R кривой усталости эталонных (бездефектных) образцов, проектные значения максимально допустимых напряжений $[\sigma]$ и значения $[W_{AE}] = Y_R[\sigma]$. При отсутствии данных усталостных испытаний принимают $[W_{AE}] = 1$. Затем величину W_{AE} сравнивают с величиной $[W_{AE}]$ для диагностики прочностного состояния конструкции.

Если $W_{AE} \leq 0$, то состояние конструкции работоспособно, коэффициент запаса статической прочности S более некоторого повышенного значения $S_{пов} = 1,6 \div 5$ (эти значения обратны долям неоднородного разрушения в общей длительности первой стадии, см. гл. 3 и зависят от объекта контроля), превышающего значения

требуемого $[S]$. При $0 < W_{AE} \leq [W_{AE}]$ значения коэффициента запаса прочности попадают в диапазон $[S] < S < S_{пов}$ ($[S]=1,4 \div 4$ в зависимости от объекта контроля и срока его эксплуатации), при $W_{AE} > [W_{AE}]$ работоспособность металлоконструкции принимается ограниченной, нагрузки на диагностируемый объект должны быть снижены не менее, чем в $W_{AE}/[W_{AE}]$ раз. При $W_{AE} > [S] \cdot [W_{AE}]$ источник импульсов АЭ классифицируется как катастрофически активный, дефект признаётся опасным и состояние металлоконструкции - неработоспособным

При $W_{AE} > 0$ определяют остаточный ресурс (время до образования или очередного скачка выявленной трещины)

$$N_{ост} = N_B / \exp W_{AE} - N_{пр},$$

где N_B - константа материала и вида сварного соединения, температуры и частоты σ_N его нагружения. Величину N_B определяют из кривой усталости по формуле

$$N_B = \exp(\ln N_G + \sigma_R Y_R),$$

где N_G – базовое число циклов, соответствующих перегибу кривой усталости, σ_R - предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии цикла рабочих напряжений. При отсутствии данных о режиме работы принимаем $N_G = 2 \cdot 10^6$. Значение N_G может быть определено более точно на основе гипотезы линейного суммирования повреждений и экспериментальных данных, в частности для ПТМ - данных о группе режима работы диагностируемого крана и значения нормативного характеристического числа по ИСО 4301-96

$$N_G = N_N n_{рц} / (Q_{ср} / Q_{max})^3,$$

где $n_{рц}$ - количество колебаний напряжений в одном цикле, $Q_{ср}$, Q_{max} – средняя и максимальная (грузоподъёмность) нагрузки крана. Частотный диапазон случайных нагрузок $0,8-1,7$ Гц, длительность рабочего цикла крана, зависящая от технологических схем переработки груза, изменяется от 30 до 50 с. Таким образом, значения величины $n_{рц}$ находятся в пределах $18 \div 63$, при разбросе значений нормативного характеристического числа N_N в пределах $8000 \div 64000$ и максимальной загруженности крана ($Q_{ср} = Q_{max}$, напряжения приближаются к пределу выносливости) фактические значения числа N_G находятся в пределах $1,5 \cdot 10^5 \div 4 \cdot 10^6$.

$N_{пр}$ - фактическое число циклов нагружения конструкции на момент её диагностирования. После этого делают окончательный вывод о дальнейшем использовании металлоконструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Основным условием повышения безопасности эксплуатации, надёжности и продления ресурса сложно нагруженных машиностроительных конструкций является оперативная и неразрушающая оценка прочностного состояния их сварных соединений. Повышение эффективности такой оценки связано с необходимостью физического моделирования стадии мелкодисперсного разрушения в условиях силовой и структурной неоднородности соединений, обеспечением возможности получения информации о процессе разрушения непосредственно на объекте контроля с помощью метода акустической эмиссии.
2. Основным показателем прочностного состояния технического объекта является время до его разрушения. Разрушение на определяющей ресурс стадии форми-

рования или ожидания очередного скачка трещины протекает в виде накопления во времени концентрации микротрещин и имеет этапы неоднородного и однородного накопления повреждений. Возможность прогнозирования разрушения определяется степенью неоднородности прочностного состояния объекта, характеризуемой разбросом значений времён разрушения его структурных элементов или соотношениями параметров микромеханической модели разрушения.

3. Предложены модель, критерий и метод оценки степени неоднородности прочностного состояния сложно нагруженных машиностроительных конструкций на основе сопоставления результатов имитационного компьютерного моделирования процесса разрушения и регистрации сигналов акустической эмиссии сварных соединений.

4. Рассмотрены факторы, влияющие на неоднородность и прогнозируемость прочностного состояния сложно нагруженных сварных соединений. Повышение прочностной неоднородности увеличивает длительности этапа неоднородного разрушения и стадии развития трещины. Наличие концентраторов напряжений снижает степень неоднородности процесса разрушения, а микроконцентраторов и структурной неоднородности – степень корреляции геометрических и прочностных характеристик сварных соединений. Прочностное состояние сложно нагруженных сварных соединений машиностроительных конструкций характеризуется ограниченной неоднородностью и возможностью контролирования этапа однородного разрушения

5. Предложены новые диагностические параметры и признаки прочностного состояния сложно нагруженных машиностроительных конструкций, апробированные в условиях лабораторных, стендовых и производственных испытаний конструкций различного назначения, вида нагружения и напряжённого состояния. Следствием прочностной неоднородности является латентность акустической эмиссии при повторном нагружении конструкции, свидетельствующая об её удовлетворительном прочностном состоянии.

6. На основе предложенных параметров разработана методика прогнозирования работоспособности сложно нагруженных сварных соединений, позволяющая определить классы опасности дефектов, выявленных в ходе контроля, остаточный ресурс и возможность дальнейшей эксплуатации сложно нагруженных металлоконструкции.

Подана заявка № 2010150121/28(072360) от 06.12.2010 на изобретение способа неразрушающего контроля прочности металлоконструкций (получено уведомление о положительном результате формальной экспертизы)

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Акустико-эмиссионная диагностика сварных соединений металлоконструкций. – Сборник трудов II Международного экологического конгресса (IV Международной научно-технической конференции) «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов», г.Тольятти, 24-27 сентября 2009г. Том 4. с. 120-124.

2. Исследование разрушения образцов сварных соединений с неоднородным прочностным состоянием. – XXXVIII Неделя науки СПбГПУ. Материалы

международной научно-технической конференции 30 ноября – 5 декабря 2009 года – СПб.: Издательство политехнического университета, 2009. с. 48-50.

3. Оценка прочности нахлесточных сварных соединений (статья) Инновационные технологии, подходы и методики подготовки студентов-механиков по общепрофессиональным и специальным дисциплинам : сборник материалов научно-методической конференции.-СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.-92 с. – С.41-45

4. Исследование разрушения образцов сварных соединений методом акустической эмиссии./ Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники: Труды Международ. науч.-техн. конф., 27-28 апреля 2010 г./ Балт.гос. техн.ун-т.-СПб,2010. -277 с.-С. 114-116.

5. Особенности состояния нахлесточных сварных соединений и неразрушающий контроль их прочности//Научно-технические ведомости СПбГПУ 2-2' 2010.-С.136-145

6. Исследование влияния неоднородности прочностного состояния на представительность неразрушающих показателей прочности/ XXXIX неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV.-СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.-292 с., С. 77-79

7. Использование латентности акустической эмиссии повторно нагружаемых объектов для диагностики их прочностного состояния/ XXXIX неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV.-СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.-292 с., С. 79-80.

8. Методика оценки ресурса сложно нагруженных сварных соединений /Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции. 14-15 июня 2011 года, Санкт-Петербург. – СПб.:Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 410 с. С. 212-218.

Статья **«Влияние неоднородности прочностного состояния на акустическую эмиссию конструкционных материалов»** принята в печать редакцией ж. «Дефектоскопия» РАН.