

На правах рукописи

ЛАХОВА ЕКАТЕРИНА НИКОЛАЕВНА

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
КРИТИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012

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: Потапов Анатолий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»»,
заведующий кафедрой «Приборостроение»;

Нефедьев Евгений Юрьевич,
кандидат физико-математических наук,
ОАО «МПО ЦКТИ», заведующий
лабораторией промышленных исследований и
неразрушающего контроля

Ведущая организация: ФГБУН «Институт проблем машиноведения
Российской академии наук»

Защита состоится 30 октября 2012 года в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главное здание, ауд. 130.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета



Евграфов Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Надежность объектов машиностроения зависит от точности оценки их ресурса, поскольку выведение из эксплуатации объектов, близких к исчерпанию своего ресурса, позволяет избежать отказов. Одной из основных причин нарушения работоспособности и сокращения ресурса конструкций и деталей машин является развитие в их материале процесса накопления повреждений. Значительное влияние на процесс накопления повреждений может оказывать пластическая деформация материала.

Нормальные условия работы объектов машиностроения, как правило, не предполагают пластического деформирования их элементов, однако, свести к нулю вероятность этого события оказывается невозможным. Пластическая деформация может появляться при перегрузках и малоциклового усталости в металлоконструкциях подъемных кранов, землеройных машин, автомобилей, деталях авиационных двигателей, в сосудах высокого давления. Она вызывает необратимое изменение формы и размеров конструкции, сопровождается перестройкой структуры материала. Тождественность влияния пластической деформации и процесса разрушения на несущую способность объектов машиностроения позволяет назвать их нагружение, вызывающее появление пластической деформации, критическим нагружением.

Влияние пластической деформации на прочность и ресурс объекта машиностроения может быть различным. При многократном нагружении значительная пластическая деформация приводит к появлению малоциклового усталости металла, уменьшению ресурса объекта. Однако при однократной перегрузке пластическая деформация может оказывать положительное воздействие. Она обеспечивает избирательное упрочнение наиболее напряженных участков, притупляет вершины трещин, задерживая их развитие. Данный случай чаще всего наблюдается при проведении первичных испытаний объектов машиностроения, когда испытательная нагрузка может значительно превышать рабочую (например, для сосудов давления в 1,25 - 1,5 раза).

Актуальной задачей является учет влияния возникающей при этом пластической деформации на прочность и ресурс объекта.

Цель работы состояла в создании методики прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения. Это включало в себя решение **следующих задач**:

1. Анализ условий работы, процессов, происходящих в материале и методов диагностики объектов машиностроения.

2. Построение модели процесса, определяющего состояние критически нагруженного объекта машиностроения. Определение параметров модели с привлечением методов регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) образцов сварных соединений.

3. Разработку методики структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала для случая неоднородного макронапряженного состояния объекта машиностроения.

4. Разработку методики прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения.

5. Апробацию разработанной методики в условиях промышленных испытаний сосудов, нагруженных внутренним давлением.

В диссертационной работе рассматривается случай однократного критического нагружения объекта машиностроения.

Объектами исследования являются:

- процесс накопления повреждений в критически нагруженных объектах машиностроения;

- метод акустической эмиссии как метод исследования процессов, влияющих на работоспособность объектов машиностроения.

Предметом исследования является методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения.

Методологической основой исследований является микромеханическая модель разрушения и акустической эмиссии гетерогенных материалов (Носов В. В.), основанная, в свою очередь, на положениях кинетической

концепции прочности и микромеханики разрушения (Журков С. Н., Регель В. Р., Слущер А. И., Томашевский Э. Е., Куксенко В. С., Петров В. А., Веттегрень В. И.). В то же время методология исследований базируется на результатах изучения пластической деформации металлов и излучения сигналов АЭ при протекании этого процесса (Одинг И. А., Иванова В. С., Гордиенко Л. К., Степанов В. А., Песчанская Н. Н., Шпейзман В. В., Дзугутов М. Я., Судзуки Т., Бетехтин В. И., Зуев Л. Б., Чечулин Б. Б., Андронов В. М., Бибик З. И., Семашко Н. А., Нацик В. Д., Чишко К. А., Бунина Н. А., Корчевский В. В., Башков О. В., Панин С. В.).

Достоверность результатов работы подтверждается сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, имитационного компьютерного моделирования, достигается корректностью постановки задач исследования, выбором в качестве материала для изготовления образцов наиболее распространенных промышленных марок сталей, использованием для проведения экспериментов компьютеризированной измерительной системы, отвечающей современным требованиям, позволяющей наблюдать за процессом накопления повреждений в реальном масштабе времени и автоматизировать обработку регистрируемой АЭ-информации.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Впервые построена модель накопления повреждений в материале и излучения сигналов акустической эмиссии в условиях пластической деформации, учитывающая неоднородность и изменение структуры материала, а также напряженного состояния;

2) Разработан новый способ определения предела прочности материала изделия по данным его акустико-эмиссионных испытаний. Способ позволяет повысить точность оценки предела прочности за счет учета неоднородности прочностного состояния материала;

3) Впервые разработана методика структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала, позволяющая оценить влияние

степени неоднородности напряженного состояния и неоднородности структуры материала на прочность детали;

4) Разработана новая методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения, которая в отличие от предыдущих позволяет оценить степень повреждения и остаточный ресурс объектов, подвергающихся перегрузкам.

На защиту выносятся

1. Разработанная модель накопления повреждений в материале и излучения сигналов акустической эмиссии в условиях пластической деформации.

2. Разработанная методика структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала.

3. Разработанная методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения.

Практическая ценность работы. Разработанная методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения позволит повысить надежность их работы. Также она может быть использована для совершенствования технологии обработки металлов давлением. Методика структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала может быть применена для оценки качества различных технологических процессов, в частности, процесса сварки.

Реализация работы. По результатам работы получен патент на способ определения прочности материала изделия (№ 2445615). Результаты работы использовались при проведении диагностики состояния сосудов давления, внедрены в учебный процесс подготовки магистров по направлению «Прикладная механика».

Апробация работы. Работа является победителем конкурса грантов 2010 года для студентов и аспирантов вузов и технических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, результаты работы докладывались на Всероссийской межвузовской научно-технической

конференции студентов и аспирантов «XXXVIII неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург 2009 г.), научно-методической конференции «Инновационные технологии, подходы и методики подготовки студентов-механиков по общепрофессиональным и специальным дисциплинам» (Санкт-Петербург 2010 г.), международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург 2010, 2011 гг.), международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» (Санкт-Петербург 2011, 2012 гг.).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 9 работ, из них 3 в печатных изданиях, рекомендованных ВАК, получен патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 149 наименований. Работа изложена на 165 листах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования.

Первая глава содержит анализ подходов к оценке состояния критически нагруженных объектов машиностроения различными методами неразрушающего контроля. Из них выделяется метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий посредством установки на поверхности объекта контроля нескольких неподвижных датчиков следить за кинетикой микротрещинообразования во всем объеме материала. Информация, полученная путем регистрации сигналов АЭ, в сочетании с моделью накопления повреждений и критерием разрушения дает возможность прогнозирования развития процесса разрушения материала и определения ресурса объекта контроля. Однако использование существующих моделей АЭ при пластической деформации затруднено либо вследствие того, что в них входит большое количество параметров, числовые значения которых

практически невозможно определить для реального тела вследствие невероятной сложности его структуры, либо тем, что они являются чисто статистическими, а, значит, имеют ограниченную область применения.

Вторая глава посвящена созданию физической и математической модели накопления повреждений в материале и излучения сигналов акустической эмиссии в условиях пластической деформации.

Процессы пластического деформирования и разрушения по-разному связаны с повреждаемостью и прочностью материала. Пластическое деформирование состоит в перестройке структуры, при которой происходит как разрыв, так и восстановление разорванных связей, разрушение связано только с их разрывом. Основным механизмом пластического деформирования материала при нормальной температуре является движение дислокаций. Движение и размножение дислокаций приводят к снижению их подвижности, что вызывает упрочнение металла. Другой особенностью пластической деформации металлов является неоднородность ее протекания, однако, степень этой неоднородности постепенно снижается с ростом деформации.

В настоящее время созданы различные модели накопления повреждений, как полуэмпирические, так и структурные, их обзор в частности приведен в работах Болотина В. В. Из существующих моделей, описывающих процесс накопления повреждений в условиях упругих деформаций, следует выделить микромеханическую модель разрушения, обладающую двумя важными преимуществами. Во-первых, понятие «повреждаемость» в данной модели имеет конкретный физический смысл – это концентрация микротрещин. Во-вторых, определение параметров модели возможно на основе регистрации сигналов АЭ. В микромеханической модели закон изменения количества микротрещин (разрушенных структурных элементов материала) имеет вид:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0 - C(t)}{\theta_{cp}(t)}, \quad (1)$$

где C_0 – начальная концентрация структурных элементов в материале, θ_{cp} – среднестатистическое время ожидания разрушения одного структурного элемента, задаваемое формулой Журкова (кинетическая концепция прочности):

$$\theta_{\text{ср}} = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (2)$$

где $\tau_0 = 10^{-12} \dots 10^{-14}$ с - величина, сопоставимая с периодом атомных колебаний, U_0 - энергия активации процесса разрушения (постоянная материала), γ - структурно-чувствительный параметр, R - универсальная газовая постоянная, σ - напряжение, T - абсолютная температура.

Значение $\theta_{\text{ср}}$ не одинаково для всех структурных элементов, что вызвано структурной неоднородностью материала, неоднородностью поля механических напряжений и температурного поля. Структурная неоднородность материала учитывается путем введения распределения параметра γ по структурным элементам $\Psi_\gamma(\gamma)$, в качестве которого может быть использовано ограниченное вейбулловское распределение.

Зависимость между концентрацией разрушенных структурных элементов $C(t)$ и числом сигналов АЭ $N(t)$ на стадии мелкодисперсного разрушения материала выражается в следующей форме (микромеханическая модель акустической эмиссии (ММАЭ)):

$$N(t) = k_{\text{АЭ}} C(t), \quad (3)$$

где $k_{\text{АЭ}}$ - акустико-эмиссионный коэффициент.

Наличие у ММАЭ надежной физически обоснованной базы в виде кинетической концепции прочности, позволило предположить, что некоторая модернизация модели позволит распространить ее действие на область пластических деформаций.

Пластическая деформация приводит к перестройке структуры материала, следовательно, она должна вызывать изменение распределения $\Psi_\gamma(\gamma)$. Основываясь на данных об изменениях, происходящих в материале при пластической деформации (упрочнение, снижение степени неоднородности) можно предложить следующую модель преобразования распределения $\Psi_\gamma(\gamma)$ (рис. 1): наименее прочные структурные элементы с максимальными значениями γ постепенно разрушаются и, восстанавливаясь, переходят в левую часть распределения. В случае описания функции $\Psi_\gamma(\gamma)$ ограниченным

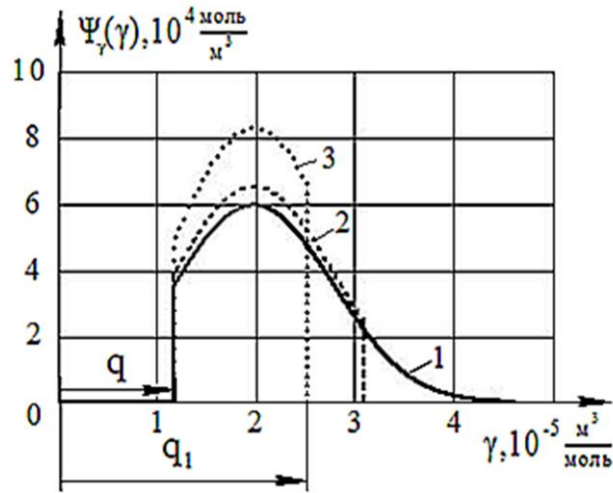


Рис. 1. Изменение распределения параметра γ при пластической деформации: 1 – распределение для недеформированного материала, 3 – перед разрушением, 2 – промежуточное состояние

вейбулловским распределением такой переход можно учесть, введя зависимость максимального значения γ (обозначено q_1) от деформации ε :

$$\Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon) = \begin{cases} 0, \gamma \in [0, q), \\ A(\varepsilon) \cdot \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^k\right), \gamma \in [q, q_1(\varepsilon)], \end{cases} \quad (4)$$

$$A(\varepsilon) = \frac{1}{\int_q^{q_1(\varepsilon)} \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\gamma}{\lambda}\right)^k\right) d\gamma}$$

где k , λ и q – параметры ограниченного вейбулловского распределения.

Математическая модель накопления повреждений на участке деформационного упрочнения имеет вид:

$$C(t) = C_0 \int_q^{q_1(\varepsilon(t))} \Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon(t)) \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(\bar{t})}{RT}\right)}\right)\right) d\gamma \quad (5)$$

Число сигналов АЭ:

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 \int_q^{q_1(\varepsilon(t))} \Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon(t)) \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma(\bar{t})}{RT}\right)}\right)\right) d\gamma \quad (6)$$

Третья глава посвящена проверке адекватности модернизированной микромеханической модели акустической эмиссии и определению ее

параметров. С этой целью были проведены испытания образцов стыковых сварных соединений из сталей Ст3пс и 09Г2С (рис. 2). Сварные соединения

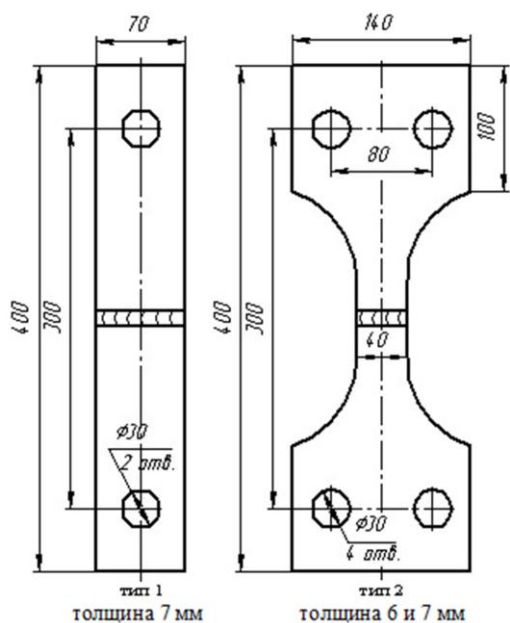


Рис. 2. Образцы сварных соединений

были выбраны для испытания, так как в реальных конструкциях пластическая деформация в основном возникает в местах расположения сварных швов, вследствие высокой неоднородности их структуры и наличия в них остаточных напряжений. Образцы испытывались на растяжение с постоянной скоростью роста деформации вплоть до разрушения, при этом регистрировались сигналы АЭ.

Для нахождения параметров начального распределения $\Psi_\gamma(\gamma)$ и величины произведения $k_{AE}C_0$ использовалась аппроксимация экспериментальной зависимости числа импульсов АЭ от времени на участке упругих деформаций теоретической кривой (3). Численные исследования проводились в среде Mathcad. В результате сравнения различных функций для описания распределения $\Psi_\gamma(\gamma)$ выбрано ограниченное weibullовское распределение. Для построения начального распределения $\Psi_\gamma(\gamma)$ по участку упругих деформаций написана программа, представляющая собой макрос Microsoft Excel.

На участке пластических деформаций теоретическая кривая $N_\Sigma(t)$ строилась с учетом изменения распределения $\Psi_\gamma(\gamma)$. Для всех образцов кривая зависимости параметра q_1 от времени имеет вид, показанный на рис. 3, и может быть описана функцией:

$$q_1(t) = \frac{a}{\ln[b(t-c)]'} \quad (7)$$

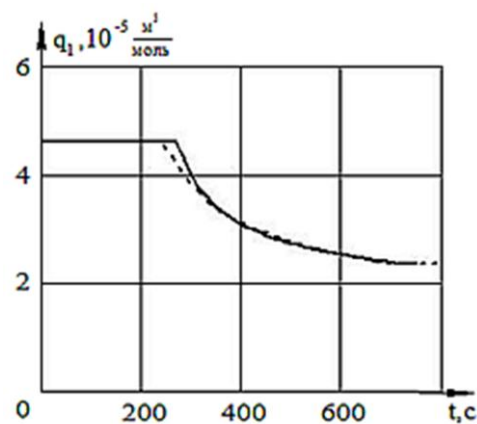


Рис. 3. Зависимость параметра q_1 от времени

где a , b и c – коэффициенты. Поскольку образцы нагружались с постоянной скоростью роста деформации, зависимость $q_1(\varepsilon)$ имеет тот же вид.

Таким образом, в общем случае зависимость концентрации микротрещин от времени для упруго-пластического тела можно описать так:

$$C(t) = C_0 \int_q^{q_1(t)} \Psi_\gamma(\gamma, t) \left(1 - \exp \left(- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma,$$

$$\Psi_\gamma(\gamma, t) = \begin{cases} 0, \gamma \in [0, q), \\ A(t) \cdot \left(\frac{k}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\gamma}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(\left(-\frac{\gamma}{\lambda} \right)^k \right), \gamma \in [q, q_1(t)], \end{cases}$$

$$A(t) = \frac{1}{\int_q^{q_1(t)} \left(\frac{k}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\gamma}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(\left(-\frac{\gamma}{\lambda} \right)^k \right) d\gamma},$$

$$q_1(t) = \begin{cases} q_{1н}, \varepsilon \in [0, \varepsilon_p), \\ \frac{a_\varepsilon}{\ln[b_\varepsilon(\varepsilon(t) - c_\varepsilon)]}, \varepsilon \in [\varepsilon_p, \varepsilon^*], \end{cases} \quad (8)$$

где $q_{1н}$ – значение q_1 в области упругих деформаций, $\varepsilon(t)$ – зависимость деформации от времени, ε_p соответствует началу пластического деформирования, ε^* – переходу к стадии макроскопического разрушения. Коэффициент a_ε связан с величиной максимального значения γ начального распределения $\Psi_\gamma(\gamma, 0)$, коэффициент c_ε – с величиной деформации, при которой начинается участок деформационного упрочнения, коэффициент b_ε может быть принят постоянным для конкретного материала.

Число импульсов АЭ:

$$N_\Sigma(t) = k_{АЭ}(t) \cdot C(t), \quad (9)$$

Выражение (9) учитывает изменение акустико-эмиссионного коэффициента $k_{АЭ}$ при переходе от упругой деформации к пластической, вызываемое перекрытием импульсов и увеличением объема материала, являющегося источником сигналов АЭ.

Учет изменения структуры материала при пластической деформации позволил достичь для всех образцов удовлетворительного совпадения

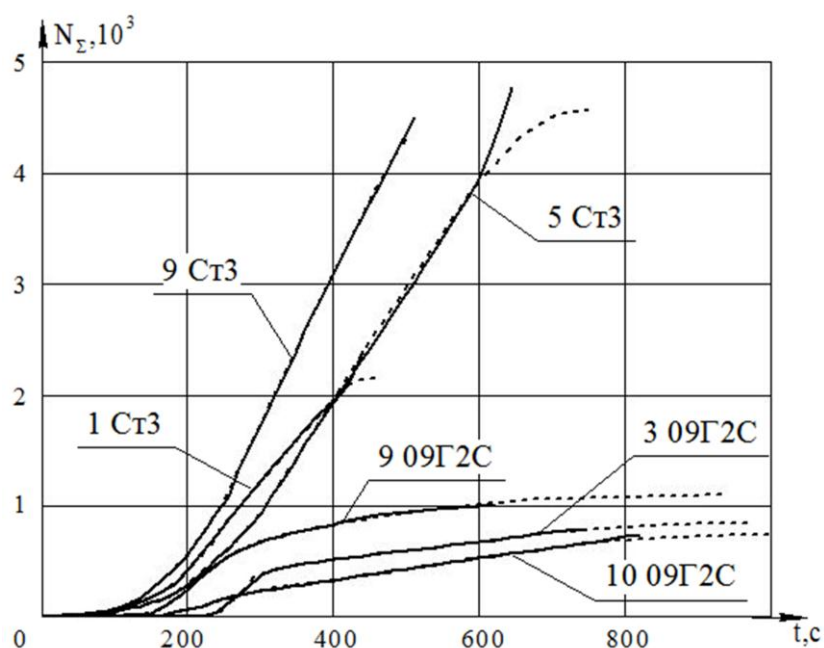


Рис. 4. Зависимость числа импульсов АЭ от времени для образцов сварных соединений № 1, 5, 9 из стали Ст3, № 3, 9, 10 из стали 09Г2С: пунктир - экспериментальная кривая, сплошная линия - график теоретической зависимости

теоретической зависимости числа импульсов АЭ от времени с результатами эксперимента вплоть до начала макроскопического разрушения (рис. 4).

Далее был рассмотрен случай неоднородного макронапряженного состояния, характерный для нахлесточных сварных соединений. Для описания процесса накопления повреждений в данном случае помимо учета изменения распределения структурно-чувствительного параметра γ необходимо было учесть изменение распределения напряжений. Для построения этих двух распределений при различной величине пластической деформации была разработана методика структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала, включающая две части: оценка степени неоднородности напряженного состояния и оценка степени неоднородности структуры материала.

Методика оценки степени неоднородности напряженного состояния детали включает создание конечно-элементной модели объекта, определение

эквивалентных напряжений в узлах сетки элементов, построение распределения эквивалентных напряжений по узлам.

Методика оценки степени неоднородности структуры материала включает запись сигналов акустической эмиссии при нагружении детали с постоянной скоростью роста напряжений, определение параметров функции $\Psi_{\omega}(\tilde{\omega})$ (где $\tilde{\omega} = \gamma\dot{\sigma}$, $\dot{\sigma}$ – скорость роста напряжений) путем аппроксимации экспериментальной зависимости числа импульсов от времени теоретической кривой (ММАЭ), построение функции плотности распределения напряжений по объему детали согласно методике, изложенной выше, построение функции плотности распределения скорости роста напряжений по объему детали $\Psi_{\sigma}(\dot{\sigma})$, получение распределения структурно-чувствительного параметра γ по структурным элементам $\Psi_{\gamma}(\gamma)$ по методу Монте-Карло.

Разработанная методика структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала позволяет оценить степень влияния неоднородности напряженного состояния и неоднородности структуры материала на прочность детали. Проведенные измерения и расчеты показали возможность оценки качества технологического процесса с применением методики структурно-силового анализа прочностной неоднородности конструкционных материалов.

Выбор лучшей технологии позволяет сравнение усредненных распределений параметра γ , полученных для изделий (образцов), изготовленных различным способом (рис. 5).

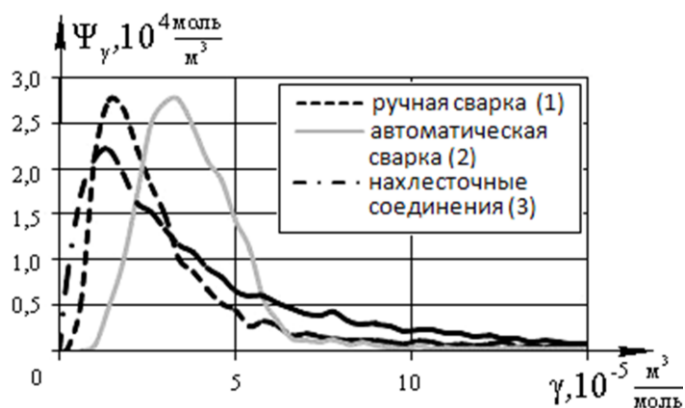


Рис. 5. Усредненные кривые распределения γ для образцов сварных соединений из стали Ст3: 1, 2 – стыковые соединения; 3 - нахлесточные

Разработанная методика структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала дала возможность построения для нахлесточных сварных соединений распределения напряжений при различных степенях пластической

деформации и начального распределения параметра γ . Учет изменения распределения напряжений и распределения γ позволяет моделировать процесс накопления повреждений и излучения сигналов АЭ для образцов нахлесточных сварных соединений на участке пластических деформаций. Однако сложность полученной модели делает ее мало пригодной к использованию на практике. Для ее упрощения в качестве функции $\sigma(t)$ была использована временная зависимость средней величины напряжения в шве. Для образцов нахлесточных сварных соединений получено удовлетворительное совпадение теоретической и экспериментальной кривых зависимости числа импульсов АЭ от времени как на участке упругих деформаций, так и на участке пластических деформаций.

Условием образования макроскопической трещины в материале является достижение концентрацией микротрещин предельной величины. Время до разрушения каждого образца τ^* определялось путем решения уравнения

$$C(\tau^*)/C_0 = 0,01. \quad (10)$$

Использование модели разрушения, учитывающей изменения, происходящие в металле при пластической деформации, позволило повысить точность расчета. Средняя ошибка определения времени до разрушения образцов из стали Ст3 уменьшилась с 21,5 до 6,5 %, для образцов из стали 09Г2С с 23,4 до 10,2 %.

Четвертая глава посвящена описанию разработанной методики прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения и ее применения в промышленных условиях для оценки остаточного ресурса сосудов давления.

Разработанная методика оценки работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения включает регистрацию сигналов акустической эмиссии при нагружении объекта контроля с постоянной скоростью (нагружение должно быть подобно рабочему), определение зависимости средней величины напряжения от времени $\sigma(t)$ для зон, являющихся источниками сигналов АЭ, определение параметров функции $\Psi_\gamma(\gamma)$ на участке упругих деформаций, построение распределения $\Psi_\gamma(\gamma, t)$ с учетом

изменения структуры материала на участке пластических деформаций и определение времени до начала макроскопического разрушения τ^* материала каждой зоны из уравнения:

$$\int_{\gamma_{min}}^{\gamma_{max}} \Psi_{\gamma}(\gamma) \left(1 - \exp \left(- \int_0^{\tau^*} \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma = \frac{C^*}{C_0}, \quad (11)$$

где $\Psi_{\gamma}(\gamma)$ – распределение $\Psi_{\gamma}(\gamma, t)$ в конце диагностического нагружения; γ_{min} и γ_{max} – соответствующие этому распределению минимальное и максимальное значения структурно-чувствительного параметра γ ; $\sigma(\bar{t})$ – изменение среднего напряжения в соответствующей зоне в процессе работы конструкции; $C^*/C_0 \approx 0,01$. Далее определяется остаточный ресурс объекта контроля как минимальное из вычисленных для различных зон время до разрушения.

Разработанная методика была использована для оценки работоспособности трех сосудов давления, для двух из них анализировались данные, полученные при первичном испытании, диагностика состояния третьего сосуда проводилась после длительного срока эксплуатации. Расчет ресурса сосудов показал, что только один из них может быть допущен к эксплуатации. Остальные два сосуда были забракованы.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проанализированы процессы, происходящие в материале объектов машиностроения, показано значительное и непрогнозируемое влияние пластической деформации на их прочность и ресурс.

2. Построена модель накопления повреждений в материале и излучения сигналов акустической эмиссии в условиях пластической деформации, основанная на микромеханической модели акустической эмиссии. Отмечено удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными результатов

моделирования временных зависимостей параметров акустической эмиссии и расчётных значений времени до разрушения образцов сварных соединений.

3. Для случая сложного макронапряженного состояния объекта машиностроения разработана методика структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала. Методика позволяет проанализировать состояние структуры материала, может быть использована для сравнения качества различных технологических процессов.

4. Разработана методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения.

5. Методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения апробирована в условиях промышленных испытаний сосудов, нагруженных внутренним давлением. Методика позволяет оценить степень повреждения материала и остаточный ресурс объектов, теряющих работоспособность при перегрузках в момент проведения диагностических испытаний.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лахова Е. Н., Носов В. В. Оценка степени неоднородности структурно-напряженного состояния материала нахлесточных сварных соединений методом акустической эмиссии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Материаловедение. Обработка металлов. – 2010. - № 2. - С. 124 – 130.

2. Лахова Е. Н., Носов В. В. Оценка остаточного ресурса пластически деформируемых сварных соединений на основе моделирования их акустической эмиссии // Дефектоскопия.— 2012.— № 2.— С. 3-14.

3. Лахова Е. Н., Носов В. В. Оценка качества технологического процесса на основе структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала изделия // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. - № 8. – С. 69 – 71.

4. Лахова Е. Н., Носов В. В. Оценка степени неоднородности структурно-напряженного состояния материала нахлесточных сварных соединений методом акустической эмиссии // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Ч. 4. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. - С. 45–46.

5. Носов В. В., Ельчанинов Г. С., Лахова Е. Н. Оценка прочности нахлесточных сварных соединений // 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. - С.41-45.

6. Лахова Е. Н., Носов В. В. Методика структурно-силового анализа прочностной неоднородности конструкционных материалов // XXXIX неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. IV. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. - С. 66–68.

7. Лахова Е. Н., Носов В. В. Моделирование процесса перестройки структуры при пластической деформации сварных соединений металлоконструкций // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции. 14-15 июня 2011 года, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - С. 301 – 309.

8. Лахова Е. Н., Носов В. В. Прогнозирование работоспособности конструкций, подвергшихся пластическому деформированию в процессе диагностического нагружения // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. IV. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. -С. 75 – 77.

9. Лахова Е. Н., Носов В. В. Оценка состояния критически нагруженных конструкций // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 445 – 453.