

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНОЙ И
ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

*Методические указания к самостоятельным работам
для студентов магистратуры направления подготовки 12.04.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

Министерство науки и высшего образования и Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра метрологии, приборостроения
и управления качеством

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*Методические указания к самостоятельной работе
для студентов направления подготовки: 12.04.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 681.2: 621.791 (073)

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: Методические указания к самостоятельной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *В.В. Носов* СПб, 2021, 72 с.

В методических указаниях к самостоятельной работе студентов даны указания по выполнению практических работ по общим вопросам применения систем и приборов в решении проблемы обеспечения горной и промышленной безопасности, приборы, системы и методы обеспечения безопасности сварных металлоконструкций, газонефтепроводов, резервуаров и емкостей, грузоподъемных и горных машин, глубоководных аппаратов, сосудов высокого давления, подшипниковых опор, объектов металлургии и подземных горных работ. Основное внимание уделено приборам, системам и методам контроля прочности опасных объектов, приборам и методам обеспечения безопасности работы грузоподъемных машин, удароопасности горного участка.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 12.04.01 «Приборостроение», а также для специалистов Госгортехнадзора и других надзорных органов.

Научный редактор д.т.н. проф. *А.И. Потанов*

Рецензент к.т.н. *Д.Е. Бортяков* (АО «РАТТЕ»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2021

Введение

Самостоятельная работа обучающихся направлена на углубление и закрепление знаний, полученных на лекциях и практических занятиях, выработку навыков самостоятельного активного приобретения новых, дополнительных знаний, подготовку к предстоящим учебным занятиям и промежуточному контролю. Представлены общие рекомендации по применению систем и приборов в решении проблемы обеспечения горной и промышленной безопасности посредством ультразвукового и акустико-эмиссионного контроля и диагностики состояния наиболее ответственных элементов металлоконструкций, сосудов, работающих под давлением, криогенных газификаторов, прочных корпусов глубоководных аппаратов, подшипниковых узлов, сложно нагруженных сварных конструкций подъёмно-транспортных машин, объектов металлургии, оценке удароопасности массива горных пород.

1. Общие вопросы применения систем и приборов в решении проблемы обеспечения горной и промышленной безопасности

Промышленная безопасность – это система обеспечения безаварийной эксплуатации ОПО, которая включает комплекс правовых, организационных, технических, экономических и др. мероприятий.

Опасными производственными объектами являются предприятия или их цехи, участки, площадки, а также др. производственные объекты. Установлено пять категорий ОПО. Это объекты, на которых:

1 – получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются или уничтожаются опасные вещества (воспламеняющиеся, окисляющиеся, горючие, взрывчатые, токсичные, а также вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды);

2 – используется оборудование, работающее под давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115 °С;

3 – используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскалаторы, канатные дороги, фуникулеры;

4 – получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих металлов;

5 – ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях.

Обеспечение безопасности перечисленных объектов ведётся на основе оценки их состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

1.1. Остаточный ресурс технического объекта и принципы его прогнозирования

Под *ресурсом* понимают суммарную продолжительность непрерывной работы объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние (состояние, при котором дальнейшее применение по назначению объекта недопустимо или нецелесообразно), а под *остаточным ресурсом* – тоже, но от момента контроля его технического состояния. Оценка ресурса конструкций сводится к прогнозированию времени до наступления отказа и основана на анализе условий эксплуатации, результатов технического диагностирования и экстраполяции временных зависимостей значений параметров технического состояния объекта (характеристик приводящих к отказу процессов) до их критической величины. При множественности используемых диагностических параметров критерием состояния является характеристика процесса, определяющего минимальный ресурс.

Для прогнозирования остаточного ресурса необходимо знать закономерности изменения параметра технического состояния, которые более точно могут быть определены либо по данным длительных наблюдений за изменением состояния, либо по данным оперативного экспресс-контроля. В большинстве случаев при диагностировании данных наблюдений бывает недостаточно. В таких случаях необходимо использовать априорную информацию о физических закономерностях приводящих к отказу процессов в виде временных зависимостей параметров состояния и возможные погрешности при контроле значений параметров состояния. Для прогнозирования ос-

таточного ресурса используются линейные, степенные, логарифмические, экспоненциальные и другие виды временных зависимостей параметра состояния Q .

Определение остаточного ресурса по изменению параметра состояния графически изображено на рисунке 1 и осуществляется с учётом функции плотности распределения ресурса $f(t)$ при фиксированном значении параметра $Q_{пр}$, соответствующего предельному состоянию объекта, и находим границы распределения ресурса, и принимаем реализацию процесса изменения параметра $Q(t)$ выровненными без перемешивания. На основании уравнения при известном значении показателя степени β , принятом по данным ГОСНИТИ, находим соответствующие значения коэффициента, характеризующего скорость изменения параметра:

$$\begin{aligned} Q_{пр} &= Q_0 \pm \gamma_n t_{рн}^\beta \rightarrow \gamma_n; \\ Q_{пр} &= Q_0 \pm \gamma_{ср} t_p^\beta \rightarrow \gamma_{ср}; \\ Q_{пр} &= Q_0 \pm \gamma_v t_{рв}^\beta \rightarrow \gamma_v. \end{aligned}$$

По найденным значениям γ строим графики реализаций изменения параметра $Q(t)_н$, $m_Q(t)$, $Q(t)_в$.

При заданной наработке t_g на момент диагностирования определяем параметр Q_g , характеризующий техническое состояние, и наносим уровень параметра Q_g на график (рис.1). Из допущения о нормальном распределении наработки в сечении определяем отклонение реализации t_1 , соответствующее наработке сборочной единицы на момент диагностирования t_g от математического ожидания t_i , в границах трехсигмовой зоны либо зоны гамма-процентного ресурса. Остаточный ресурс рассматриваемой реализации эксплуатации объекта определяем по формуле

$$t_{ост} = t_{рi} - t_{pg},$$

где t_{pg} – наработка на отказ сборочной единицы на момент выполнения диагностирования; $t_{рi}$ – наработка сборочной единицы до предельного состояния рассматриваемой реализации изменения параметра технического состояния.

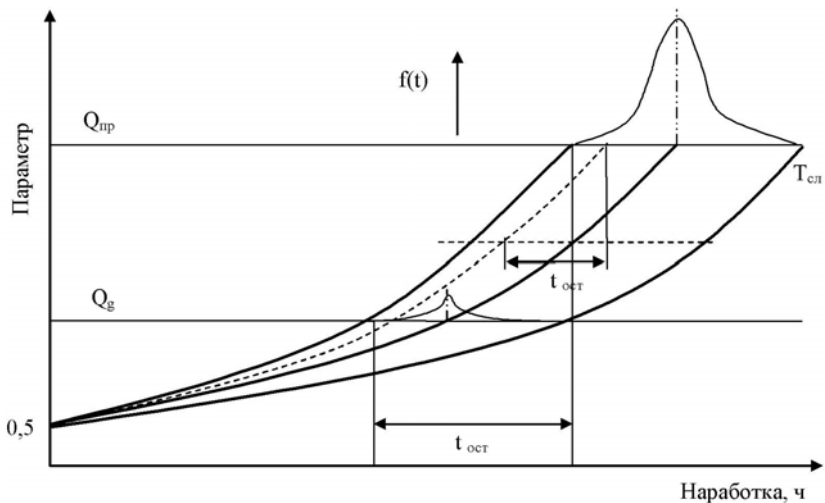


Рис. 1.1. Графическое определение остаточного ресурса

При использовании линейной модели для прогнозирования остаточного ресурса необходимо знать критическое значение параметра состояния и скорость приближения объекта к нему. Например, остаточный ресурс аппарата, подверженного действию коррозии (эрозии), определяется по формуле

$$\tau_{\text{ост}} = (S_{\text{ф}} - S_{\text{р}}) / a,$$

где $S_{\text{ф}}$ — фактическая минимальная толщина стенки элемента, $S_{\text{р}}$ — расчётная допустимая толщина стенки элемента, a — скорость равномерной коррозии (эрозионного износа). Остаточный ресурс объекта, работающего в условиях установившейся ползучести материала, определяется (при 1% пределе ползучести) по следующей зависимости

$$\tau_{\text{ост}} = 1/a_{\text{п}} - \tau_{\text{пр}},$$

где $a_{\text{п}}$ — скорость установившейся ползучести, % в ед. времени, $\tau_{\text{пр}}$ — продолжительность эксплуатации от начала до последнего обследования.

При прочностных расчётах и оценке усталостной долговечности используются различные кривые усталости и гипотезы суммирования повреждений. Примерами таких расчётов являются опре-

деление эквивалентного числа циклов нагружения зубчатых передач, долговечности подшипников качения, ремённых передач.

Для повышения точности прогнозирования ресурса эксплуатируемых деталей используют физические закономерности накопления повреждений на основе наблюдения за ними с позиций деформационных, энергетических или силовых критериев разрушения. Энергетические критерии разрушения характеризуют связанное с разрушением изменение потенциальной энергии материала, измеряемое, в частности, методом акустической эмиссии. Примером использования деформационных критериев является суждение о повреждении по величине деформации, когда оценка расчётного числа N_p циклов нагружения или времени τ до разрушения ведётся на основе выражений

$$C_N = \int_0^{N_p} \frac{dN}{N_C(\epsilon_{ar})} = C_C \quad \text{или} \quad C_\tau = \int_0^{\tau} \frac{F \dot{\epsilon}_t}{\epsilon_C} dt = C_C, \quad (1)$$

где C_N , C_τ - меры усталостного и статического повреждений соответственно, N_C -разрушающее число циклов, ϵ_{ar} , ϵ_C - деформации соответственно при циклическом и длительном статическом нагружениях, ϵ_C - разрушающая деформация, C_C - критическое повреждение. Используемая для решения уравнения (2) кривая усталости связывает разрушающее число циклов N_C с амплитудой пластической ϵ_{ap} и упругой ϵ_{ae} деформаций степенной зависимостью Мэнсона-Коффина-Лангрена

$$\{\epsilon_{arp}, \epsilon_{arf}\} N_C^{(m_p, m_e)} = \{C_p, C_e\},$$

где m_p , m_e , C_p , C_e - характеристики материала. Для конструкционных сталей $m_p \approx 0,5 \div 0,6$, $m_e \approx 0,1 \div 0,12$.

Для обеспечения безопасности конструкций вместо критических повреждений, соответствующих достижению предельных состояний, в расчёт по (1) вводятся допустимые повреждения $[C]$ с использованием коэффициентов запаса по напряжениям и долговечности. C_C и $[C]$ разделяют области безопасной, ограниченной безопасности и опасной эксплуатации. При экспертизе безопасности объекта в момент времени t_k проводят инструментальную оценку повреждаемости, по значению которой и предыстории нагружения строят расчётную модель $C_M(t)$ накопления повреждений. Далее экстраполируют функцию $C_M(t)$ до момента достижения допустимых

повреждений [С]. Остаточный ресурс по этой схеме, в соответствие с ГОСТ 27.002-89, представляет собой разность моментов t_k и t_p (время достижения расчётной долговечности). Моменты t_p и t_c (время достижения критической повреждённости) можно оценить только вероятностно ввиду неопределённости будущих ситуаций и погрешности модели $C_M(t)$.

Вытекающая из представлений кинетической концепции прочности методология долгосрочного прогнозирования механического разрушения состоит в определении времени $t^*_{ост}$, оставшегося до момента накопления критической концентрации микротрещин C^* путём оценки параметров и решения следующей системы уравнений

$$\left\{ \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \psi(\theta) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t dt' / \theta(t') \right] \right\} d\theta \approx 0,01, \right.$$

$$t^*_{ост} = t - t_{пр},$$

где $t_{пр}$ - предварительно потерянный ресурс

Параметры уравнений повреждаемости и, в частности, параметры функции $\psi(\theta)$ плотности распределения времён до разрушения θ , их временной зависимости $\theta(t)$ уравнения $C(t)$ роста концентрации микротрещин определяют экспериментально - после чего рассчитывается t^* .

Для решения приведённой системы уравнений необходимо знать величину предварительно потерянного ресурса $t_{пр}$, объекта с уже предварительно накопленной концентрацией микротрещин $C_{пр}$. Трещинообразование в повторно нагруженном образце описывается уравнением

$$dC/dt = (C_0 - C_{пр} - C) / \theta_n,$$

где $C_{пр} = C_0 t_{пр} / \theta_n$, $t_{пр}$ - время предварительно отработанного периода, θ_n - среднее время ожидания разрушения одного структурного элемента за этот период, θ_n - то же за период последующей работы.

Время же $t^*_{\text{ост}}$, оставшееся до разрушения, определяется из условия

$$C(t^*_{\text{ост}}) = C^* - C_{\text{пр}} ,$$

откуда остаточный ресурс объекта, работающего, например, в режиме постоянного нагружения

$$t^*_{\text{ост}} = t^* - t_{\text{пр}} = C^* \theta_{\text{п}} / C_0 - t_{\text{пр}} \theta_{\text{п}} / \theta_{\text{пр}}$$

Таким образом, для прогнозирования остаточного ресурса, кроме оценки параметров состояния диагностируемой конструкции, необходимо знать параметры предварительного нагружения. В распространённом случае идентичности режимов предварительной и последующей эксплуатации имеем

$$t^*_{\text{ост}} = C^* \theta_{\text{п}} / C_0 - t_{\text{пр}}$$

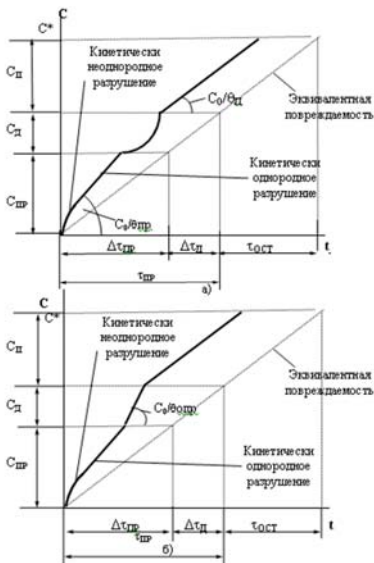
На случай диагностического нагружения (опрессовка сосудов давления) в течение времени $t_{\text{опр}}$ общая потеря ресурса (рис.1.2 а, б)

$$\tau_{\text{пр}} = t_{\text{пр}} + t_{\text{опр}} \theta_{\text{п}} / \theta_{\text{опр}} ,$$

Определение параметров приводящего к отказу процесса проводят на основе методов неразрушающего контроля (НК). Наиболее распространены и отвечают современным требованиям акустические методы НК-ультразвуковой и акустико-эмиссионный, приборам, системам и алгоритмам которых в данном курсе уделено основное внимание.

1.2. Диагностика состояния сварных соединений металлоконструкций и стандартные методы оценки их ресурса.

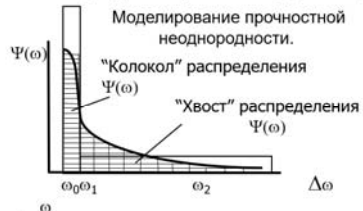
Сварные соединения - наиболее распространённый в машиностроении вид неразъёмных соединений. Высокая технологичность, низкая стоимость, малая трудоёмкость изготовления и возможность снижения массы металлоконструкции позволяют эффективно использовать



$$C(t) = C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \Psi(\omega) \left(1 - \exp\left[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\Theta(\omega(t))}\right]\right) d\omega$$

где μ - нижняя граница изменения аргумента $\Delta\omega$ - доверительный интервал разброса значений ω по структурным элементам.

Прочностной ресурс материала $t^* (t^* = C^* \approx 0,01C_0)$



Время до разрушения структурного элемента описывается формулой Журкова

$$\theta(\omega(t)) = \tau_0 \exp[U_0 / (KT) - \omega(t)]$$

$\omega = \gamma\sigma(t) / KT$ - параметр прочностного состояния структурного элемента, γ - структурно-чувствительный коэффициент,

Рис. 1.2. Уравнение, диаграммы роста повреждаемости объекта и графическая интерпретация расчёта остаточного ресурса $\tau_{ост}$. $\Delta t_{пр}$, $\Delta t_{д}$ - составляющие потерянного ресурса из-за предварительной работы объекта и из-за опрессовки

соединения 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.

Обладая высоким пределом прочности, сварные соединения теряют работоспособность из-за много- и малоциклового усталостного разрушения. Наиболее вероятным эксплуатационным повреждением сварных соединений большинства деталей машин и элементов конструкций (подкрановые балки, несущие узлы транспортных установок и т. д.) является многоциклового усталостное разрушение. Малоцикловая усталость является основной причиной образования трещин в сварных соединениях оборудования тепловых и атомных станций, элементов конструкций летательных и химических аппаратов, судо-

вых конструкций, технологических установок, элементов автомобильного транспорта, работающих в коррозионной и радиоактивной среде в условиях концентрации напряжений.

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 расчёта и прогнозирования работоспособности, неразрушающего контроля и диагностирования состояния.

Работоспособность сварных соединений обуславливается технологическими, конструкционными и эксплуатационными факторами и, как правило, определяет работоспособность содержащей её конструкции. Особенно остро проблема с обеспечением надёжности сварных соединений возникла в последние годы в связи с нарастающим старением промышленного оборудования, средний срок службы основной части которого приближается к 30 годам. В некоторых областях промышленности до 95 % его уже исчерпало свой расчётный ресурс.

Основным критерием работоспособности сварных соединений является прочность, которая зависит от качества основного металла и его способности к свариванию, совершенства технологического процесса сварки, конструкции соединения, способа сварки, характера действующих нагрузок, условий эксплуатации. Значительно снижают прочность технологические дефекты сварных швов, которые, согласно допускам Международного института сварки, классифицируются на трещины, раковины, поры, твёрдые и газовые включения, окисные плены, несплавления и непровары, подрезы, искажения внешней формы сварного соединения (смещение свариваемых кромок, изменение толщины сварной детали, скопление металла в месте пересече-

чения швов). Так наличие подреза может снизить циклическую прочность сварного соединения до 20 раз. Не менее опасно влияние дефектов эксплуатационных, вызванных коррозионными процессами, образованием и ростом микротрещин. Факторами, усложняющими условия работы сварных соединений, являются коррозия и эрозия от потоков газов и жидкостей, радиационные повреждения, водородная хрупкость, окисление.

Одним из наиболее слабых мест металлоконструкций энергоблоков АЭС является сварной шов. Типовыми местами повреждений оборудования АЭС являются зоны сварки патрубков, композитные сварные стыки, зоны конструкций, подверженные пульсациям температур (граница раздела вода-пар, дренажи, впрыски, воздушники, места смешения теплоносителей с различными температурами и т.п.). В 40 % деаэраторов тепловых и атомных электростанций, обследованных в последнее время в нашей стране и за рубежом, были обнаружены трещины. Типичные места обнаружения трещин – это зона приварки колонки к баку, сварные стыки, стыки приварки разделительных перегородок и рёбер жёсткости и т. п. Причиной образования трещин явилась малоцикловая усталость в коррозионной среде в условиях концентрации напряжений.

Проблемы прочности сварных соединений являются предметом интенсивного исследования специалистами в области материаловедения, механики материалов и физики прочности. Обеспечение и оценку прочности производят различными методиками в зависимости от этапа обеспечения надёжности. На этапе проектирования принимают упрощающие решение задачи допущения сплошности, однородности, упругости, изотропности материала и др. Проектный расчёт сварных швов производят из условия не превышения расчётными напряжениями допускаемой величины, связанной с характеристиками прочности сварных швов - пределами прочности (временным сопротивлением), текучести, выносливости. Проверочный прочностной расчёт или расчёт введённых в эксплуатацию сварных соединений сводится к оценке коэффициента запаса прочности или времени до их разрушения (ресурса).

Стандартные методы оценки прочности сварных соединений предусматривают их разрушающие испытания на статическое растя-

жение или циклическое нагружение в разных направлениях или трещиностойкость. При статическом испытании стандартных образцов (рисунок 1.3) определяют прочность наиболее слабого участка стыкового или нахлесточного соединения или прочность металла шва в стыковом соединении. Определяют временное сопротивление

$$\sigma_B = k_{II} \frac{F}{A},$$

где k_{II} - поправочный коэффициент (для углеродистой стали равен 0,9), F - разрушающая нагрузка, A - площадь поперечного сечения образца.

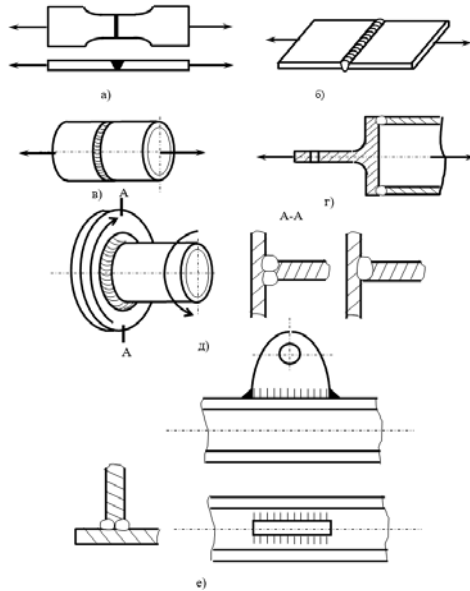


Рис. 1.3. Виды образцов, используемых для определения механических характеристик сварных соединений

Расчёты и обоснование циклической прочности машин и конструкций (рисунки 4,5) проводят в настоящее время с использованием двух основных предельных состояний: по образованию макротрещины и по её развитию. Разрушение рассматривается в виде процесса, состоящего, как минимум, из двух стадий: стадии рассеянных повреждений и стадии роста трещины. Первая стадия более длительна и занимает 50-90 % от общего времени до разрушения. Для её описания ис-

пользуются феноменологические (полуэмпирические) или структурные модели, изображающие процесс накопления повреждения в материале в виде временных функций, ограниченных моментом накопления предельной повреждаемости. Для описания второй стадии разрушения или расчёта конструкций с трещиноподобными дефектами используются уравнения и критерии линейной и нелинейной механики разрушения. Под моментом образования трещины малоциклового усталости деталей, выполненных из традиционно применяемых конструкционных материалов, обычно понимается появление так называемой “инженерной” трещины длиной 0,8 мм, глубиной 0,4 мм. Размеры трещины были выбраны исходя из возможностей применяемых методов неразрушающего контроля и соображений её безопасности.

Циклическая прочность и долговечность сварных соединений до момента образования трещины оценивается различными методиками по уравнениям различных кривых усталости. Определение ресурса τ 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.

Установлено, что в области малого числа N_C циклов до разрушения сварного соединения ($N_C < 10^3$) общая деформация определяется, главным образом, пластическим изменением формы и размеров образца. Разрушение происходит с большими пластическими деформациями, прочность соединения определяет основной металл и зона термического влияния. В области более высокого числа циклов (при $N_C > 10^4$) материал деформируется упруго, основное значение для прочности соединения имеют усталостные повреждения в сварном шве, так как прочность основного металла превосходит прочность других зон, его пластичность Ψ при этом минимальна и приближается к пластичности других зон (рисунок 1.6.а). При снижении значений напряжений происходит увеличение числа циклов до разрушения. Как видно из рис.6, при

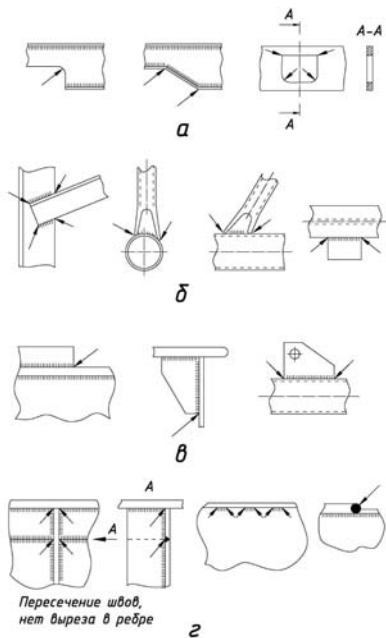


Рис. 1.4. Концентраторы напряжений металлоконструкций крана

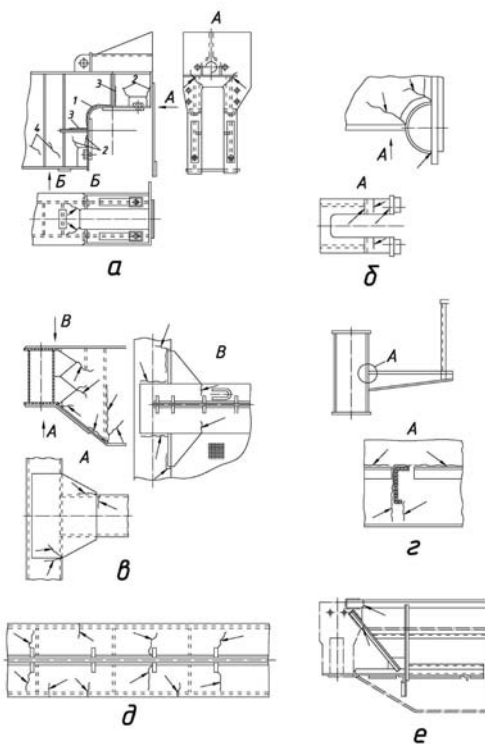
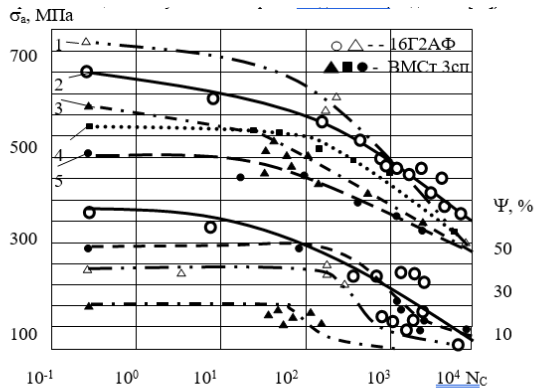
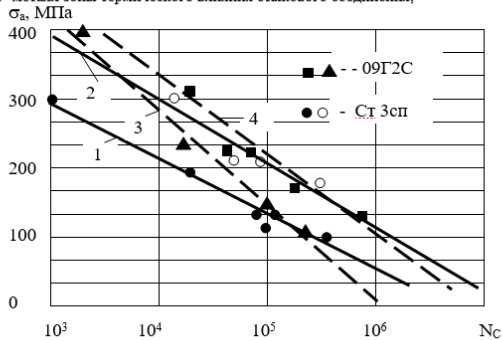


Рис.1.5. Характерные разрушения балочных конструкций мостовых кранов



а) Кривые малоциклового усталости и изменения пластичности Ψ различных зон сварных соединений сталей 16Г2АФ (1,2) и ВМСт3сп (3,4,5) 1,3-металл углового шва; 2,5- основной металл; 4- металл зоны термического влияния стыкового соединения;



б) Кривые малоциклового усталости лобовых (2,4) и фланговых (1,3) сварных соединений

Рис. 1.6. Кривые малоциклового усталости сварных соединений

$N_C > 10^4$ зависимость $\lg N_{Ц} - \sigma$ близка к прямолинейной, что допускает экспоненциальную связь номинальных напряжений в образце и числа циклов до образования трещины.

Используемая в стандартных расчётах кривая малоциклового усталости сварных соединений описывается уравнением

$$\sigma N_C^{m_N} = const$$

где m_N - показатель степени кривой малоциклового усталости. Допускаемые напряжения при малоциклового нагружении сварных соединений рассчитываются по формуле :

$$[\sigma] = \varphi \sigma_R (N_B / N_T)^{m_N} / [S], \quad (2)$$

где φ - коэффициент понижения расчётного сопротивления основного металла, определяемый с учётом асимметрии цикла, вида соединения и влияния дефектов; σ_R - расчётное сопротивление (предел выносливости) основного металла; N_B , N_T - базовая ($5 \cdot 10^5$ циклов) и требуемая долговечности элемента конструкции; $[S]$ - нормативный коэффициент запаса прочности. Влияние технологических дефектов на прочность сварных соединений проявляется при переменных циклических нагрузках в большей степени, чем при нагрузках статических. Главным фактором, определяющим снижение усталостной прочности, является уровень концентрации напряжений в районе дефекта. Кроме коэффициента φ формулы (1) влияние различных дефектов на прочностные свойства сварных соединений в инженерных расчётах учитывается значением эффективного коэффициента концентрации напряжений, имеющим смысл отношения

$$K_\sigma = \sigma_{-1d} / \sigma_{-1D}, \quad (3)$$

где σ_{-1d} - предел выносливости образца без концентрации напряжений, площадь поперечного сечения которого совпадает с площадью поперечного сечения сварной детали; σ_{-1D} - предел выносливости сварной детали натуральных размеров с концентратором напряжений.

При расчёте остаточного ресурса потенциально опасных объектов исследуются условия и характер нагружения, характеристики механических свойств, особенности напряжённо-деформированного состояния, технологическую дефектность и эксплуатационную повреждаемость сварных соединений. Расчётное число циклов нагружения N_p , которое определяет долговечность до образования трещины и входит как верхний предел первого интеграла (1), выражается соотношением

$$N_p = \frac{1}{S_N} \left[\frac{0,25 E e_c}{\sigma_a - \sigma_{-1} / (1 + r \sigma_{-1})} \right]^2, \quad (4)$$

где S_N - коэффициент запаса прочности по числу циклов нагружения; E - модуль упругости; $\epsilon_c = \ln[1/(1-\Psi)]$; Ψ - относительное сужение (пластичность) материала; амплитудные напряжения

$$\sigma_a = \frac{1}{\varphi} \{0,5K_\sigma \sigma_n + 0,28\sigma_{0,2}\} \quad (5)$$

где σ_n - номинальные напряжения; $\overline{\sigma_{-1}} = \sigma_{-1} / \sigma_B$; $\bar{r} = (1+r)/(1-r)$; r - коэффициент асимметрии цикла нагружения; σ_{-1} , $\sigma_{0,2}$, σ_B - соответственно предел выносливости, предел текучести и временное сопротивление.

Многоцикловая усталость сварных соединений (при числе циклов нагружения более 10^6) оценивается с помощью кривой усталости, описываемой уравнением

$$\sigma^m N_c = \text{const.} \quad (6)$$

Описываясь функционально, явления накопления повреждений и развития трещин, в то же время, рассматриваются как статистические, имеющие ярко выраженную вероятностную природу. К причинам, влияющим на разброс параметров повреждаемости, времени до разрушения и ресурса конструкции относят вероятностную природу элементарного акта разрушения, технологические, структурные и эксплуатационные факторы. Для отделения статистической и детерминированной составляющей процесса разрушения используют методы статистического моделирования, элементы теории вероятностей и математическую статистику. Прогнозирование усталостной долговечности сварных швов при многоцикловом нагружении проводится путём расчёта числа циклов N_c до наступления предельного состояния

$$N_c = \frac{\left(\frac{\sigma_{-1D}}{[\sigma_y]}\right)^m}{\sum_{i=1}^k \sigma_{ai}^m P_i} N_0 \quad (7)$$

где σ_{-1D} - величина предела выносливости натурной детали, рассчитанного для симметричного цикла при базовом числе циклов N_B по формуле

$$\sigma_{-1D} = \sigma_{-1} / K_{пр.с} , \quad (8)$$

где $K_{пр.в}$ - коэффициент снижения предела выносливости, отражающий влияние различных факторов на сопротивление усталости сварного соединения детали, $[S_y]$ - допускаемое значение коэффициента запаса сопротивления усталости, m - показатель степени в уравнении кривой усталости, σ_{ai} - уровень амплитуды напряжений, P_1 -вероятность появления амплитуд с уровнем σ_{ai}

Как видно из формул (5)-(9), для расчёта ресурса, кроме характеристик статической и циклической прочности стандартных образцов, необходимо знание коэффициентов концентрации или снижения предела выносливости. В настоящее время эти коэффициенты определяются расчётным путём в зависимости от вида и способа нагружения, характеристик цикла и температуры, технологии изготовления, вида концентратора, иногда с привлечением расчётных методов теории упругости и линейной механики разрушения. Расчёт коэффициентов концентрации производится с учётом вида дефекта или концентратора. Значения коэффициента концентрации напряжений связывается с визуально определяемыми радиусом r перехода шва к основному металлу, толщиной s свариваемых элементов, угловатостью c , смещением кромок δ . В наиболее ответственных случаях они определяются по результатам разрушающих экспериментальных исследований на натуральных узлах и соединениях конструкций. Таким образом, геометрические параметры шва, определяемые визуально, являются основными показателями его качества, а в случае недоступности дефектов к осмотру расчет становится невозможным.

В уравнение (7) входит также статистическая характеристика условий работы сварных соединений - вероятность появления амплитуд напряжений с уровнем σ_{ai} . Вероятностные методы расчёта используют при проектировании и контроле наиболее ответственных конструкций. Они позволяют обосновать значение коэффициента запаса прочности при заданной вероятности разрушения в зависимости от рассеяния основных механических характеристик сварных соединений и степени непредсказуемости изменения эксплуатационных нагрузок. К

существенным факторам, влияющим на рассеяние ресурса стадии зарождения усталостной трещины, относится разброс радиусов кривизны зон сопряжения элементов, размеров вырезов, галтелей, технологических дефектов. На стадии роста трещины, помимо рассеяния характеристик трещиностойкости, доминирующее влияние на статистическое распределение ресурса оказывает рассеяние размеров исходных макротрещин, их формы и ориентации, нерегулярность силовых, температурных и коррозионных воздействий.

Для описания статистических распределений значений долговечности, длины трещины, параметров уравнения Периса, коэффициента интенсивности напряжений используют нормальное, логнормальное, экспоненциальное и Вейбулла распределения. Статистические характеристики сопротивления усталости сварных соединений определяют по вероятности отказа и включают среднее значение предела выносливости $\overline{\sigma}_R$, среднеквадратичное его отклонение и параметры уравнения медианной (соответствующей 50% вероятности отказа) кривой усталости вида

$$\sigma = \overline{\sigma}_R e^{\frac{A_R}{N_C + B_R}}$$

где N_C – число циклов до разрушения, A_R, B_R – эмпирические коэффициенты.

Кривая усталости по параметру вероятности отказа выражается уравнением

$$\sigma(P, N) = \overline{\sigma}_R(P) e^{\frac{A_R}{N(P) + B_R}}, \quad (9)$$

в котором параметры A_R и B_R от вероятности P не зависят. Однако, при всей своей информативности, статистические методы расчёта не дают индивидуальной оценки прочности и не позволяют экономить материал при проектировании конструкций с заданной вероятностью отказа.

Методы оценки прочности (трещиностойкости, “живучести”) конструкций, находящихся на второй стадии разрушения и имеющих трещины, основаны на анализе процесса их развития. Долговечность, необходимая для развития трещины от исходного размера a_0 до любой конечной величины a_k , вычисляется с позиций линейной механики

разрушения, в частности, путём интегрирования уравнения Пэриса-Эрдогана ($da/dN=C(\Delta K_I)^n$) или Махутова Н.А. ($da/dN=C_\sigma(\Delta K_I)^n$) для скорости распространения трещины

$$N_a = \frac{1}{C_\sigma} \int_{a_0}^{a_k} \Delta K_I^n da, \quad (10)$$

где C_σ , n , -характеристики сопротивления развития усталостной трещины в материале, ΔK_I - размах коэффициента интенсивности напряжений. Коэффициенты размаха интенсивности напряжений рассчитываются с учётом вида дефекта или концентратора по формулам и таблицам справочников или результатам численного анализа напряжённо-деформированного состояния на основе подробных данных о геометрии дефекта. Как уже отмечалось, визуальное выявление дефектов не всегда возможно. Кроме того, из-за большого радиуса кривизны поверхности ($>0,01$ мм), малого размера дефектов сварных соединений, специфики условий деформации и разрушения в ближайшей к трещине области материала с трещиной, размер которой в $5 \div 10$ раз превышает размер структурного элемента, подходы к оценке прочности с позиций линейной механики разрушения не всегда себя оправдывают.

Для прогнозирования остаточного ресурса сварных машиностроительных конструкций (подъёмно-транспортных машин) используются следующие положения:

1. Устанавливается перечень “горячих” (наиболее опасных) точек с повышенными напряжениями и концентраторами напряжений
2. Состояние конструкции оценивается с позиции двухстадийной модели процесса разрушения: 1-ая стадия-до возникновения трещины размером 5-10 мм; 2-я стадия-рост этой трещины до критических размеров. Методика прогнозирования зависит от степени полноты информации об истории нагружения и температуре.
3. При наличии информации о нагрузке остаточный ресурс $N_{ост}$ оценивается по формуле

$$N_{ост} = k_1 N_1 - k_2 N_\phi,$$

где k_1, k_2 -коэффициенты надёжности и фактической наработки, N_1, N_Φ - длительность первой стадии процесса разрушения и фактическая наработка.

Длительность первой стадии определяются из принципа линейного суммирования повреждений, накапливаемых в зависимости от максимальных напряжений цикла, предела выносливости, показателя степени кривой усталости m (6) (может принимать значения $2 \div 20$), базового числа циклов и коэффициента влияния коррозии.

4. При отсутствии информации о предварительной нагрузке остаточный ресурс оценивается по формуле

$$N_{OCT} = k_3 N_a,$$

где k_3 - коэффициент надёжности, N_a -наработка, требуемая для подрастания возможной наибольшей пропущенной при обследовании (визуальном осмотре) трещины до критических размеров.

При визуальном осмотре сварных соединений металлоконструкций подъёмно-транспортных машин могут быть пропущены трещины длиной 100-400 мм. Для повышения надёжности оценок используют условия ограничения скорости развития усталостной трещины или абсолютного её размера.

Анализ подходов к оценке прочности материала с трещиной показал, что наиболее универсальными здесь являются кинетические модели зарождения и роста усталостной трещины, базирующиеся на учёте микромеханических аспектов разрушения возле дефекта или вершины усталостной трещины, когда скорость роста трещины описывается выражением

$$\frac{da}{dN_{ц}} = \frac{A_M}{\omega_u} \exp\left(-\frac{U_M - V_M \ln \Delta K_I}{RT}\right) = I_\Delta C', \quad (11)$$

где A_M, u_M, V_M - константы материала, R - универсальная газовая постоянная, T -температура, ω_N - частота нагружения, I_Δ - увеличение длины трещины после каждого инкубационного периода (не зависит от числа циклов), C' - скорость образования микротрещин вблизи вершины (описывается уравнением типа закона Аррениуса). Такие модели связывают кинетические теории с подходом механики сплошной среды через коэффициент интенсивности напряжений.

Кроме всего прочего, сложность оценки остаточного ресурса сварных конструкций, связана с противоречиями в нормативных документах, неопределённостью в выборе механизма и критерия разрушения, неоднозначностью в интерпретации методических рекомендаций экспертами, отсутствием материальных средств для проведения трудоёмких дорогостоящих натуральных исследований. Задача оценки остаточного ресурса ещё ждёт своего решения.

Одним из путей повышения надёжности сварных соединений является разработка средств неразрушающего контроля и технической диагностики, используемых для обнаружения трещин или концентратора напряжений, оценки степени их опасности на работающих объектах. Основная задача диагностики, как известно, состоит в распознавании состояния диагностируемого объекта по результатам регистрации диагностических сигналов. При выборе диагностических параметров в первую очередь рассматривают возможность их измерения. Для неразрушающего контроля прочности сварных соединений используют в основном диагностическую информацию о структуре соединений, полученную рентгеновским, радиографическим, токовихревым, капиллярным и ультразвуковым методами. Перечисленные методы контролируют признаки, не всегда обладающие большой диагностической ценностью по отношению к прочности. В частности, радиографический метод, предназначенный для обнаружения трещин и непроваров в сварном шве, не гарантирует выявления дефектов, расположение которых не совпадает с направлением измерений. Капиллярный метод, обладая значительной чувствительностью к поверхностным дефектам типа трещин, не обеспечивает выявления внутренних дефектов. Ультразвуковой метод, обеспечивающий выявление дефектов типа трещин, предъявляет значительные требования к чистоте обработки поверхности околошовной зоны в месте установки приемного датчика. Все перечисленные методы используются, как правило, на завершающей стадии изготовления изделий, не дают информации о кинетике повреждений и связанной с ней степени опасности дефектов, что, в свою очередь, затрудняет принятие заключения о состоянии объекта. Особое место среди методов неразрушающего контроля сварных соединений занимает метод акустической эмиссии (АЭ), привлекаемый к контролю сварных соединений металлоконструкций всё более широко. Одна из

обширных областей применения метода АЭ связана с наблюдением за процессом сварки, что способствует совершенствованию технологии сварки и может существенно повысить надежность сварных соединений. Метод АЭ позволяет несколькими стационарно расположенными датчиками проконтролировать за одно обследование весь объект. Данный метод выявляет наиболее опасные развивающиеся дефекты, позволяет быстро и эффективно оценивать состояние оборудования в условиях большого уровня радиационного фона, не позволяющего в полном объеме применять традиционные методы контроля. Эксперименты, выполненные при АЭ-диагностике оборудования, недоступного для контроля традиционными методами, показали чрезвычайную перспективность данного метода для переназначения проектного срока службы.

2. ДИАГНОСТИКА СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

2.1. Неразрушающий контроль сосудов давления

Из всего многообразия элементов сложных технических объектов наиболее вероятно и экологически неблагоприятно разрушение сосудов, выполняющих роль резервуаров, корпусов, трубопроводов объектов атомной энергетики, химической, нефте- и газодобывающей, судостроительной промышленности, авиационной и космической техники. 14 % отказов оборудования атомных электростанций (АЭС) происходит из-за разрушения трубопроводов. Наиболее типичными дефектами тонкостенных сварных сосудов являются дефекты сварки (62 % от общего числа дефектов и повреждений сосудов), локальные коррозионные повреждения (13%), вмятины монтажного происхождения (11%), задиры металла (6%), смещения кромок (4%), коррозионно-усталостные и усталостные трещины (1%), прижоги. Число дефектов и повреждений возрастает с увеличением срока эксплуатации сосудов. Особенность перечисленных дефектов - в их скрытости как по расположению, так и по степени опасности, которая не устраняется стандартными расчётными методами. Остаточный ресурс резервуаров, работающих в условиях статического нагружения и активных коррозионно-эрозионных процессов определяют по скорости коррозии, а резервуаров, используемых

в условиях малоциклового нагружения, когда основной повреждающий фактор - малоцикловая усталость, устанавливают по ГОСТ 25859-83.

Диагностика сосудов производится в соответствии с “Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением”, “Методическим указаниям по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России”. Техническое диагностирование сосудов следует проводить после истечения назначенного (расчётного) срока эксплуатации, после аварии или восстановительного ремонта. Назначенный (расчётный) срок эксплуатации сосуда устанавливается предприятием-изготовителем и должен быть указан в паспорте сосуда. При отсутствии в паспорте расчётного (назначенного) ресурса сроки технического диагностирования назначаются в соответствии с инструкциями по данному виду сосуда (первичный срок диагностирования, например, для баллонов 14-25 лет, вторичное диагностирование – через 3-5 лет)

Техническое диагностирование включает:

- наружный и внутренний визуальные осмотры;
- контроль геометрических размеров (внутреннего или наружного диаметра, толщины стенки, смещение кромок стыкуемых элементов и т.п.);
- измерение выявленных дефектов (коррозионных язв или эрозийных повреждений, трещин, деформаций и других);
- контроль сплошности сварных соединений и зон основного металла неразрушающими методами дефектоскопии;
- контроль толщины стенки неразрушающими методами;
- измерение твёрдости с помощью переносных приборов;
- лабораторные исследования (при необходимости) химического состава, свойств и структуры материала основных элементов;
- гидравлические или пневматические испытания;
- прогнозирование на основании результатов технического диагностирования и расчётов на прочность возможности допустимых рабочих параметров, условий и сроков дальнейшей эксплуатации сосуда.

Оценка технического состояния сосуда должна осуществляться по параметрам, обеспечивающим его надёжную и безопасную эксплуатацию согласно нормативной или конструкторской документации. Прогнозирование остаточного ресурса осуществляется согласно закономерностям изменения определяющих параметров, полученных при анализе повреждений или в результате измерения функциональных показателей, изменение которых может привести сосуд в неработоспособное или предельное состояние.

В зависимости от критериев предельного состояния (критериев работоспособности) и условий эксплуатации сосудов параметрами его технического состояния могут служить:

- характеристики материалов (предел текучести, временное сопротивление, трещиностойкость, предел выносливости, структура, химический состав и др.);

- коэффициенты запасов прочности (по пределу текучести, временному сопротивлению, циклической прочности и др.);

- технологические параметры (температура, давление, параметры циклической нагрузки, вибрации);

- данные гидравлических или пневматических испытаний.

Организация работ по техническому диагностированию возлагается на предприятие-владельца сосуда, а работы по техническому диагностированию проводятся организациями, имеющими разрешение (лицензию) органов Госгортехнадзора России на выполнение работ. Диагностирование проводится по типовой программе, включающей различные виды контроля и расчёта сосуда. Результаты всех проводимых исследований должны оформляться в виде заключений, в которых даются рекомендации по допустимым параметрам, срокам дальнейшей эксплуатации, замене или ремонту сосуда. Срок дальнейшей эксплуатации не должен превышать нормативной (например, для баллонов 8 лет).

Первым после подготовки сосудов к диагностированию проводится **визуальный и измерительный контроль**, целью которых является обнаружение и определение размеров дефектов (поверхностных трещин, коррозионных повреждений, эрозионного износа, выходящих на поверхность расслоений, механических повреждений, вмятин, выпучин и других изменений геометрии), образовавшихся в

процессе эксплуатации, при ремонте, изготовлении или монтаже сосуда. Особое внимание при этом уделяется трещинам, образующихся чаще всего в местах геометрической, температурной и структурной неоднородности, коррозионным и коррозионно-усталостным повреждениям металла, наиболее часто встречающимся на внутренней поверхности в нижней части сосуда, дефектам сварки в виде трещин, пористости, свищей, подрезов, прожогов, незаплавленных швов, смещению или уводу кромок, непрямолинейностям соединяемых элементов. При выполнении визуального осмотра используют лупы до 20-кратного увеличения, эндоскопы, перископы или простейшие приспособления в виде штанги с закреплёнными на ней зеркалом и источником света.

Целью *неразрушающего контроля* является выявление наружных и внутренних дефектов в основном металле, сварном соединении, контроль толщины стенки (толщинометрия). Контроль неразрушающими методами при этом должен проводиться специалистами, аттестованными в соответствии с “Правилами аттестации специалистов по неразрушающему контролю” Госгортехнадзора России и имеющими квалификационный уровень не ниже второго.

Основными видами неразрушающего контроля сосудов при проведении технического диагностирования являются: ультразвуковой (ГОСТ 20415, ГОСТ 14782, ГОСТ 12503, ГОСТ 26266, ГОСТ 28702), радиографический, магнитопорошковый (ГОСТ 21105, ОСТ 26.01-84-78), электромагнитный (ГОСТ 24289), капиллярный (ГОСТ 18442), металлография, акустической эмиссии (РД 03-131-97)

Контроль механических свойств, химсостава, структуры основного металла и сварных соединений сосудов производят на образцах, вырезаемых их отобранного сосуда в окружном и продольном направлениях. Производятся испытания на растяжение, ударный изгиб и трещиностойкость, металлографические исследования структуры и контроль химического состава материала сосуда.

Целью *гидравлических или пневматических испытаний* является проверка герметичности и прочности сосуда под давлением на завершающей стадии технического диагностирования. Сосуд считается выдержавшим гидравлическое испытание, если в процессе его проведения не обнаружено падения давления по манометру, течи

в основном металле, резьбовом или сварном соединениях, трещин или признаков разрыва, остаточных деформаций тела сосуда. При проведении пневматических испытаний, необходимость в которых устанавливается разработчиком программы, обязательно применение метода акустической эмиссии.

На основании результатов контроля проводят анализ повреждений, параметров технического состояния и (при не удовлетворении требованиям нормативной документации) поверочный расчёт сосуда на статическую (ГОСТ 14249), циклическую (ГОСТ 25859) прочность и трещиностойкость (ГОСТ 25.506-85, ПНАЭ Г-7-002-86, как правило, по коэффициенту интенсивности напряжений). При этом следует устанавливать механизмы образования и роста обнаруженных дефектов и повреждений, вероятности отказов вследствие развития разрушения. Для уточнения расчётов должны быть применены экспериментальные методы (тензометрия, акустическая эмиссия).

Основной характеристикой способности материала сопротивляться хрупкому разрушению является критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , критическая температура хрупкости и предел текучести. Сопротивление хрупкому разрушению считают обеспеченным при

$$K_I \leq [K_I],$$

где $[K_I] = K_{IC}/n = 20 \div 230 \text{ МПа м}^{1/2}$, n -коэффициент запаса прочности по трещиностойкости ($n=1,5 \div 2$). Критический коэффициент интенсивности напряжений может быть определён по результатам испытаний материала на хрупкое разрушение по формуле

$$K_{IC} = P_Q Y_1 / t b^{1/2},$$

где P_Q – нагрузка на стандартный образец, при которой наблюдается существенное (более 5%) отклонение от её линейной связи со смещением в области устья трещины, t , b -толщина и ширина образца (типа 1),

$$Y_1 = 0,380[1 + 2,308(2l/b) + 2,439(2l/b)^2],$$

где l – длина исходной усталостной трещины.

Для цилиндрических, сферических, конических, эллиптических, плоских элементов, нагруженных внутренним давлением и подверженных температурным воздействиям, для расчёта коэффици-

циента интенсивности напряжений допускается формула (см. [ПНАЭ Г-7-002-86])

$$K_I = \eta(\sigma_p M_p + \sigma_d M_d)(\pi a / 10^3)^{1/2} / Q,$$

где η - коэффициент концентрации напряжений, σ_p - растягивающие напряжения, МПа, σ_d - составляющая изгибных напряжений, МПа,

$$M_p = 1 + 0,12(1 - a/c); M_d = 1 - 0,64a/n$$

где a - глубина трещины, мм, c -полудлина трещины, мм, n - длина зоны, в пределах которой составляющая изгибных напряжений сохраняет положительное значение, мм,

$$Q = [1 + 4,6(a/2c)^{1,65}]^{1/2}$$

Формула справедлива для $a < 0,25S$ и $a/c \leq 2/3$, где S - толщина стенки изделия.

Используя уравнение Пэриса-Эрдогана скорости роста трещины ($da/dN = C(\Delta K_I)^n$) можно определить число циклов нагружения, при котором трещина разовьётся на всю толщину оболочки

$$N = (S - a) / (C(\Delta K_I)^n),$$

где $n = 3,3$, $C = 6,9 \cdot 10^{-9}$.

2.2. Акустико-эмиссионная-диагностика сосудов давления

Задача АЭ-диагностики состояния сосудов давления, также, как и других объектов, решается различными исследователями с позиций либо индуктивного, либо дедуктивного подхода. В рамках первого наибольшее распространение имеют методы, основанные на взаимосвязи скорости счёта, суммарного числа импульсов или активности АЭ и коэффициента интенсивности напряжений. Регистрируя суммарное число импульсов АЭ в процессе диагностического нагружения, оценивают степень опасности трещины и запас долговечности сосуда. При этом описываемый уравнением Данегана этап излучения импульсов АЭ, регистрируемый во время равномерного нагружения сосуда внутренним давлением, рассматривается как заключительный, соответствующий росту магистральной трещины, что используется в качестве прогностического признака приближающегося разрушения.

Различной степенью физической обоснованности обладают и рекомендуемые ПБ 03-593-03 критерии оценки состояния объектов и системы классификации источников АЭ.

Для определения класса опасности выявленного в контролируемом объекте источника импульсов АЭ определяют значения эталонного параметра Y_R по и формуле:

$$Y_R = \frac{M_{AE}}{\sigma_B}$$

где σ_B – предел прочности (временное сопротивление) материала контролируемого изделия /справочное/; M_{AE} – константа материала конструкции и условий ее нагружения, определяется по результатам разрушающих АЭ-испытаний эталонных (бездефектных) образцов и следующей формуле:

$$M_{AE} = \frac{\sum_{n_u} Y_{AEi} \sigma_{ai}}{n_u}$$

где n_u – количество испытаний, Y_{AEi} , σ_{Bi} – значения диагностического параметра и предела прочности образца соответственно.

Если $Y_{AE} \leq 0$, то источник импульсов АЭ классифицируется как неактивный, дефект признается не опасным, состояние изделия работоспособным. При $0 < Y_{AE} < Y_R$ источник импульсов АЭ классифицируется как активный, дефект признается не опасным, состояние изделия работоспособным. При $Y_{AE} \geq Y_R$ источник импульсов АЭ классифицируется как критически активный, дефект признается опасным, работоспособность изделия – ограниченной, нагрузки на диагностируемый объект должны быть снижены не менее, чем в Y_{AE}/Y_R раз. При $Y_{AE} > [S]Y_R$ ($[S]$ - нормативный коэффициент запаса прочности) источник импульсов АЭ классифицируется как катастрофически активный, дефект и состояние изделия признаются опасными, изделие неработоспособно.

3. ОЦЕНКА РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПОДЪЁМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

3.1. Общие сведения

Металлоконструкции в процессе эксплуатации подвергаются воздействию большого количества трудно учитываемых факторов, что в совокупности с их конструктивной сложностью и наличием разнообразных концентраторов напряжений затрудняет контроль состояния. Одним из самых опасных элементов конструкций являются

угловые сварные швы, искривляющие деформационно-силовые потоки и имеющие множество зон концентрации. Установлено, что трещины в поясах ферм и крайних раскосах развиваются почти как при статически определимом нагружении, нагружение же соединений главной балки мостового крана с концевой характеризуется существенным влиянием статической неопределимости. Развитие в этой зоне трещины, которая в основном растёт из-за перекосных нагрузок, после некоторого периода будет замедляться и при достижении некоторого размера прекратится. Сложный характер нагружения, статическая неопределимость состояния элементов сложных сварных металлоконструкций, неоднородность напряжённо-деформированного, структурного и прочностного состояния сварных швов, низкий уровень номинальных эксплуатационных напряжений вызывают неопределённость их состояния. Прочностные расчёты, основанные на упрощённых подходах механики сплошной среды или механики разрушения, приводят в этих условиях к большим погрешностям. Становится очевидным, что оценка остаточного ресурса требует выявления более общих закономерностей роста повреждаемости, параметры которых могут быть определены непосредственно из экспресс-испытаний диагностируемой конструкции. Применение изложенных в гл. 3 разработок рассматривается при этом наиболее перспективным.

АЭ контроль промышленных металлоконструкций осуществляется в соответствии с требованиями действующих правил безопасности. Целью проведения АЭ контроля является выявление развивающихся и склонных к развитию дефектов, проявляющихся в процессе изменения нагрузки, определение их местоположения и степени опасности или оценка степени опасности дефектов, выявленных визуально. Общая схема контроля, например, грузоподъёмных машин заключается в поднятии краном груза весом 1,15 от рабочей нагрузки и фиксации при этом сигналов АЭ из интересующего участка металлоконструкции крана. Классификация дефектов диагностируемой конструкции производят по наличию либо отсутствию сигналов АЭ в процессе нагружения до рабочей (меньшей диагностической) нагрузки крана или после её превышения, амплитудному либо локально-динамическому критериям.

Регистрация сигналов АЭ при значениях нагрузки меньших, чем рабочая, свидетельствует о катастрофически опасном состоянии конструкции, необходимости немедленного устранения дефекта вследствие роста трещины до опасной величины, либо проведения уточняющих испытаний по проверке степени его опасности. Регистрация сигналов АЭ после превышения рабочей нагрузки означает, что усталостные трещины не критические, однако развились за период эксплуатации со времени предыдущего контроля и состояние конструкции стало более опасным. Такая оценка весьма приближительна и не всегда верна.

Метод АЭ позволил выявить недопустимые при эксплуатации грузоподъемных механизмов дефекты (непровар, трещина), которые при диагностике другими методами НК не были выявлены. Ещё более точную оценку прочностного состояния давали значения локально-динамического критерия m формулы Данегана .

3.2 Анализ результатов стендовых испытания модели мостового крана

Рассмотрим результаты АЭ-испытаний модели металлоконструкции главной балки мостового крана, выполненной в виде сварной стальной балки коробчатого сечения с размерами 5800x300x200 мм, толщиной стенки 5 мм с заваренной сложным сварным швом трещиной в корпусе. Балку нагружали до полного разрушения ступенчато с выдержкой после каждой ступени нагружения, в процессе чего фиксировали сигналы АЭ. Анализировались временные зависимости активности АЭ балки (рисунок 3.1), представленные на мониторе компьютера, результаты анализа приведены в табл.3.1.

Оценка состояния данной металлоконструкции с концентратором в виде заваренной трещины велась с помощью значения концентрационно-кинетического АЭ-показателя прочности $Y_{AE} = d \ln \xi / d \sigma$ и параметра W_{AE} (таблица 1), определяемых на основе информации о параметрах АЭ ξ , внешней нагрузки и номинальных напряжениях σ в опасном сечении объекта, рассчитанных без учёта дефектов и сложной геометрии сварного шва.

В качестве ξ принималась усреднённая на различных временных интервалах (последние 110 с, 172 с и 240 с регистрации) во время выдержки нагрузки активность АЭ N'_Σ , описываемая уравнением

$$\xi = N'_\Sigma = k_{AE} C_0 \exp \omega / \{ \tau_0 \exp [U_0 / (KT)] \},$$

где $\omega = \gamma \sigma / KT$, при этом $Y_{AE} = d \ln \xi / d \sigma \approx \gamma / KT$.

Из таблицы 3.1 видно, что при низких нагрузках (до 30 кН) значения параметра Y_{AE} отрицательны, активность АЭ при росте величины нагрузки во время выдержки падает, что соответствует этапу неоднородного разрушения, следовательно дефект не опасен, трещина не развивается, состояние металлоконструкции удовлетворительное. После скачка трещины при нагрузках выше 30 кН разрушение перешло на этап однородного, при нагрузке более 60 кН средние значения Y_{AE} больше $Y_R = 0,01 \text{ МПа}^{-1}$, $W_{AE} = Y_{AE} \cdot \sigma > 1$ источник АЭ становится активным, состояние конструкции опасным. Увеличение длительности временного интервала регистрации сигналов повышает чувствительность параметров Y_{AE} и W_{AE} на первых ступенях нагружения (до роста трещины), однако понижает её на стадии роста трещины.

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

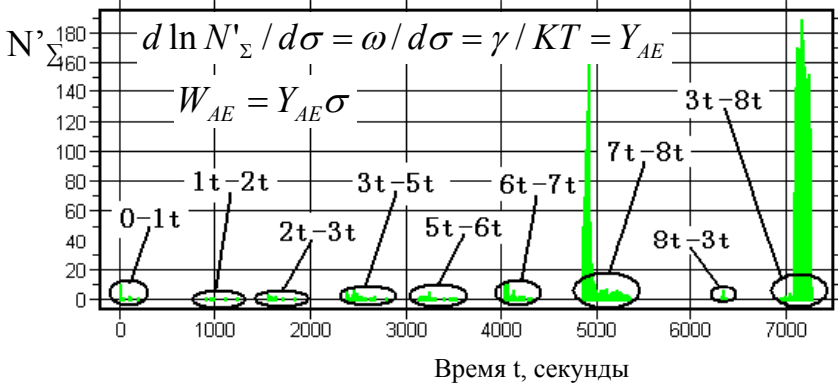


Рис. 3.1. Результаты регистрации временных зависимостей активности АЭ во время ступенчатого нагружения балки.

Таблица 3.1

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

Нагрузка выдержки Q , кН	Номинальные напряжения в сечении с трещиной, МПа	Параметры трещины	Число импульсов АЭ при выдержке за последние секунды			$Y_{AE\text{ ср}}$, МПа ⁻¹	$W_{AE\text{ ср}}$
			110	170	240		
10	23	начальная 130 мм	5	7	9	-	-
20	47		2	4	5	-0,03	-1,38
30	70		2	4	8	0,007	0,47
50	117	рост на 20 мм	2	6	11	0,005	0,60
60	140	рост на 30 мм	6	8	11	0,02	2,77
70	163		10	15	32	0,032	5,15
80	187		24	40	58	0,035	6,54

Рассмотрим пример оценки остаточного ресурса сварного соединения металлоконструкции мостового крана грузоподъемностью 1400 кг с выявленным непроваром, отработавшего 2 года и отсутствии данных о режиме работы.

Металлоконструкцию нагрузили два раза, повышая нагрузки при соблюдении условия $Q_i \geq Q_{\max}$, где $Q_{\max}=1400\text{кГс}$ -номинальная допускаемая нагрузка металлоконструкции, после каждого нагружения с помощью механизма подъема поднимали испытательный груз на 200 мм от земли и удерживали его 10мин и 12 мин. Нагружение проводилось грузовой тележкой механизма подъема груза, расположенного по середине пролёта главной балки. Использовали грузы весом 1400 кГс и 1750 кГс . Материал металлоконструкции Ст 3, для данного материала допускаемые напряжения $[\sigma]=\sigma_T/[S]$, предел те-

кучести $\sigma_r=160\div 240$ МПа, предел прочности $\sigma_b= 450$ МПа, предел выносливости $\sigma_{-1} = 115$ МПа, нормативный коэффициент запаса прочности $[S]=1,6$.

Максимальная рабочая нагрузка $Q_{\max}=14000$ Н, нагрузка при первом нагружении $Q_i=14000$ Н, при втором $Q_j=17500$ Н,

$$K_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} = \frac{14000}{14000} = 1$$

$$K_j = \frac{Q_j}{Q_{\max}} = \frac{17500}{14000} = 1.25$$

$$\Delta K_H = K_j - K_i = 1.25 - 1 = 0,25$$

Количество зарегистрированных АЭ импульсов при первом нагружении $\xi_i=2$, при втором $\xi_j=5$, средние значения амплитуды соответственно $U_{cpi}=50$ дБ, $U_{cpj}=55$ дБ. При равновероятностном распределении амплитуд импульсов АЭ из (4.2):

$$\frac{k_{AEj}}{k_{AEi}} = \frac{u_{cpi}}{u_{cpj}} = \frac{50}{55}$$

$$W_{AE} = \frac{\ln \frac{\xi_j}{\xi_i} + \ln \frac{k_{AEi}}{k_{AEj}}}{\Delta K_H} = \frac{\ln \frac{5}{2} + \ln \frac{50}{55}}{0,25} = 0,821 / 0,25 = 3.3$$

Для данного материала $Y_R = 0,015$ МПа⁻¹ (рис. 5.3 а), $[\sigma]=\sigma_T/[S]=240/1,6=$

$$= 150 \text{ МПа}, [W_{AE}] = Y_R \cdot [\sigma] = 2,25$$

Т.к. $W_{AE} > [W_{AE}]$, то металлоконструкция находится в состоянии ограниченной работоспособности.

Исходный ресурс металлоконструкции с выявленным концентратором

$$N_C = N_B / \exp W_{AE} = \frac{11.225 \cdot 10^6}{\exp 3,3} = 4.14 \cdot 10^5$$

где N_B - параметр материала, вида, температуры и частоты нагружения сварного соединения

$$N_B = \exp (\ln N_G + \sigma_R \cdot Y_R) = \exp (\ln 2 \cdot 10^6 + 115 \cdot 0,015) = 11,225 \cdot 10^6,$$

где $N_G = 2 \cdot 10^6$.

Фактическое число циклов предварительного нагружения

$$N_{\text{ПР}} = C \cdot n_{\text{рц}},$$

где C – число рабочих циклов. При отсутствии сведений о работе крана согласно [87] за 2 года эксплуатации число рабочих циклов принимают равным

$$C = k \times n \times T = 300 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 2 = 12000,$$

где $n=10$ - число циклов, выполняемых в смену; T - общее число смен, выработанных краном от начала эксплуатации; $T = 300 \times H$, где H - число лет эксплуатации крана, $k=2$ - коэффициент запаса.

Величина

$$N_{\text{ПР}} = C \cdot n_{\text{рц}} = 216000 \div 756000.$$

Остаточный ресурс металлоконструкции в лучшем случае

$$N_{\text{ост}} = N_C - N_{\text{ПР}} = 4,14 \cdot 10^5 - 2,16 \cdot 10^5 = 1,98 \cdot 10^5,$$

что при минимальной длительности рабочего цикла крана и минимальной частоте случайных нагрузок соответствует остаточной продолжительности эксплуатации

$$\tau_{\text{ост}}^* = N_{\text{ост}} / (10 \cdot 2 \cdot 300 \cdot n_{\text{рц}}) = 1,83 \text{ года}$$

Это меньше межремонтного периода, металлоконструкцию следует заменить, отремонтировать или эксплуатировать в облегченном режиме. При отсутствии данных о наработке крана, условий его работы, данных о материале и его механических характеристиках коэффициент нагрузки облегченного режима можно рассчитать $K_{\text{НОБЛ}} = Q_{\text{ОБЛ}} / Q_{\text{РАБ}} = [W_{\text{АЕ}}] \Delta K / (\ln \xi_2 / \xi_1 + \ln u_1 / u_2) = 2,25 \cdot 0,25 / 0,821 = 0,685$, то есть эксплуатация крана возможна при максимально допустимой нагрузке, составляющей 68 % от нормативной.

4. ОЦЕНКА РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

4.1. Общие сведения

Подшипником принято называть часть опоры вращающихся или качающихся деталей, непосредственно взаимодействующей с цапфой вала или оси. Кинематическая функция предопределяет конструкцию подшипников качения (рис. 4.1), имеющую элементы качения (шарики или ролики), установленные между наружным и

внутренним кольцами, удерживаемые на определенном расстоянии друг от друга обоймой, называемой сепаратором.

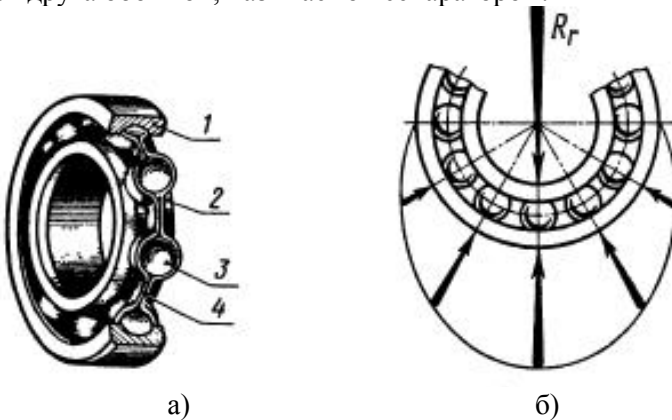


Рис. 4.1 Шариковый радиальный подшипник (а) и схема распределения нагрузки между телами качения в подшипнике (б)
1,2- наружное и внутреннее кольца, 3- тела качения, 4- сепаратор

В процессе работы тела качения катятся по дорожкам качения колец, одно из которых в большинстве случаев неподвижно. Подшипники качения стандартизованы, изготавливаются в массовом производстве на ряде крупных специализированных заводов в виде готового узла.

Являясь кинематической парой V-ого класса, подшипники допускают лишь их относительное вращательное движение вокруг оси и ограничивают пять из шести возможных независимых составляющих перемещений соединяемых звеньев, фиксируя положения соединяемых частей в пространстве. Таким образом, помимо кинематической, подшипники качения выполняют также функцию опоры, воспринимая и уравнивая действующую на них внешнюю нагрузку. Фиксирующая способность подшипников, сопровождаемая восприятием и передачей нагрузки между соединяемыми частями конструкции, рассматривается как опорная функция. Для тяжело и сложно нагруженных в условиях коррозии объектов, (например, буксовых узлов ходовых частей грузовых вагонов, шахтных стационарных установок, горно-обогатительного и металлургического обо-

рудования и пр.) она является основной. Нагружение подшипников сложное. В процессе работы кольца подшипников могут испытывать местное, циркуляционное или колебательное нагружение, элементы подшипника находятся под воздействием высоких знакопеременных напряжений. Нагрузка может прикладываться в разных направлениях, её распределение между несущими телами качения неравномерно (рис. 4.1.б).

Достоинствами подшипников качения являются компактность в осевом направлении, взаимозаменяемость, энергетическая экономичность в работе, низкая стоимость вследствие налаженного серийного производства. К недостаткам можно отнести значительные радиальные размеры, низкую надёжность и прогнозируемость поведения. Часто они лимитируют ресурс включающего их технического устройства, выходя из строя по причине неожиданного разрушения элементов, а зачастую работают значительно дольше всего механизма в целом. Устранение недостатков сводится к анализу видов повреждений и причин их интенсивного увеличения.

Классификация повреждений деталей подшипников качения позволяет выделить среди различных видов в качестве основных усталостное разрушение (выкрашивание) рабочих поверхностей тел качения и беговых дорожек колец, (рисунок 4.2 а), раскалывание колец и тел качения из-за наличия внутренних дефектов, перекосов при монтаже, высокой степени коррозии или при больших динамических нагрузках (рисунок 4.2.б), происходящие под действием циклического контактного нагружения, а также пластические деформации на дорожках качения, наблюдаемые у тяжело нагруженных тихоходных подшипников, абразивное изнашивание подшипников автомобилей, тракторов, строительных машин и т.п. , разрушение сепараторов быстроходных подшипников.

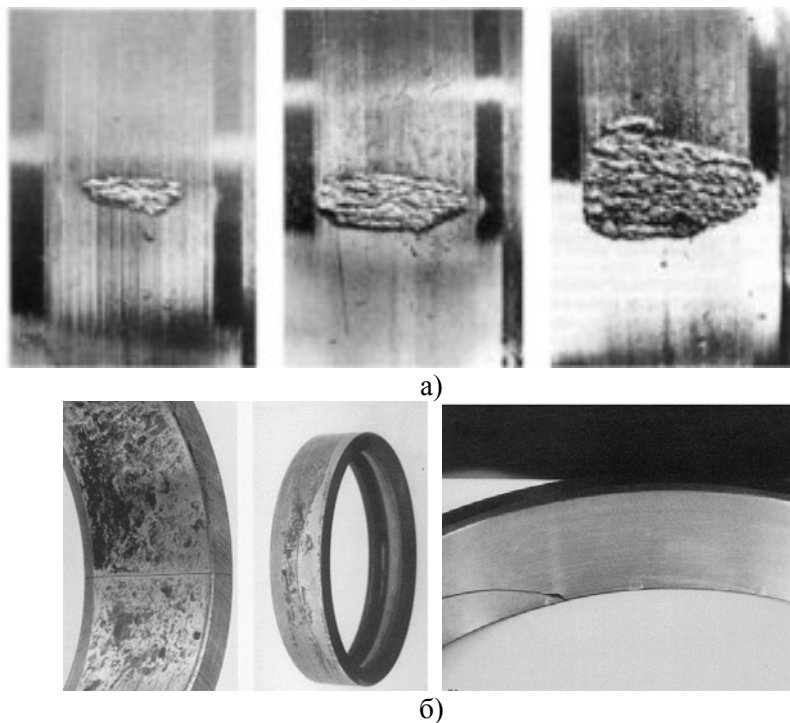


Рис. 4.2 Виды повреждения колец подшипников качения. а)-поверхностные стадии развития усталостной раковины; б)- трещины в кольцах, обусловленные прорастанием поверхностных или внутренних повреждений, контактной коррозией и неправильной сборкой

Таким образом, ресурс подшипников качения главным образом определяется усталостными процессами, связанными с восприятием элементами подшипника внешних нагрузок. Если усталостное разрушение выводит повреждения на поверхность деталей подшипников, то он сопровождается увеличением шума, вибраций и температуры подшипников, однако до полной потери работоспособности подшипником может оставаться ещё много времени. При благоприятных условиях работы, когда сопряженные поверхности подшипника гарантировано разделены слоем смазочного материала, мало-нагруженные подшипники достигают долговечности значительно большей, чем это прогнозируется. Только небольшая часть всех ус-

тановленных подшипников выходит из строя; большинство подшипников "переживают" машину.

Причины неожиданного разрушения элементов подшипников можно разделить на технологические и эксплуатационные. Технологические причины проявляются в виде отклонения от проектных зазоров, форм и размеров поверхностей колец и тел качения, идеальной структура и определённых физико-механических свойств материала, изменений характера сопряжений между элементами подшипникового узла, появления непредсказуемых нагрузок на них. Эксплуатационные дефекты связаны с перегрузкой и недостаточным поступлением смазки в процессе работы подшипника. Технологические причины можно устранить совершенствованием технологий или сортировкой подшипников после их изготовления по результатам неразрушающего контроля, и, таким образом, примерно на одну треть уменьшить количество случаев их неожиданного выхода из строя. Неудовлетворительные режимы эксплуатации также можно избегать при своевременном контроле состояния подшипников и соответствующем обслуживании (смазывание, правильное обращение, монтаж и демонтаж).

Способность длительно выполнять функции характеризуется ресурсом- числом оборотов (или числом рабочих часов при постоянной частоте вращения), которое совершит подшипник до появления, согласно ГОСТ 18855-2013 (ISO 281:2007), первых признаков усталостного разрушения. Такое определение ресурса согласуется с общими документами по надёжности, например ГОСТ 27.003–2016, при условии соответствия признаков переходу подшипника в предельное состояние, угрожающего выполнению функций. Как в лабораторных, так и в производственных условиях наблюдается существенное (на 3 порядка) различие в выполнении подшипником опорной функции при полностью совпадающих условиях работы. Для усреднённой характеристики подшипников используется представление о динамической грузоподъёмности подшипников и, соответственно, о «номинальной долговечности». Используются также понятия «достижимая долговечность», «модифицированный ресурс», для расчёта которого реализуется системный подход, учитывающий

изменения и взаимодействие взаимозависимых факторов, влияющих на ресурс системы.

Поскольку усталостное разрушение является определяющим ресурс процессом, оно заложено в основу проектных расчётов. Согласно стандартизированным методикам номинальная долговечность L_{10} подшипника в миллионах оборотов рассчитывается из уравнения:

$$L_{10}=(C_{\text{дин}}/F_{\text{э}})^m \quad (4.1)$$

где $C_{\text{дин}}$ – динамическая грузоподъёмность, $F_{\text{э}}$ -эквивалентная нагрузка, m -показатель степени, принимаемый равным 3 для шариковых и 10/3 для роликовых подшипника. Ресурс подшипника в часах L_h :

$$L_h=(10^6 L_{10})/60n \quad (4.2)$$

где n – частота вращения подшипника, мин^{-1} .

С 2007 года составной частью международных стандартов ISO 281 является метод расчёта достижимой долговечности, основой которого является гипотеза линейного суммирования повреждений Лундберга и Палмгрена (Lundberg and Palmgren) и модель усталости в контакте качения, которая более точно описывает процесс накопления повреждений современных подшипников. Установлено, что связанная с ресурсом подшипника кривая усталости материала его деталей может быть аппроксимирована степенной зависимостью Веллера:

$$\sigma_H^m N_C = \text{const} \quad (4.3)$$

где σ_H – максимальное значение контактного напряжения, N_C – число циклов повторного нагружения, m -показатель степени кривой усталости, $m=9$ для шариков и $m=20/3$ для роликов. При расчете по этому методу учитываются величина нагрузки на подшипник, предел усталости материала, степень разделения поверхностей смазочным материалом, чистота и наличие в составе смазочного вещества присадок, внутреннее распределение нагрузки и трение в подшипнике, зависящие от условий монтажа и технического обслуживания.

Основными параметрами контроля подшипников согласно ГОСТ Р 52859-2007 являются размеры, твёрдость, шероховатость поверхностей деталей подшипников, остаточная намагниченность, момент трения, признаки коррозии, внутренние зазоры и биения, параметры вибрации и герметичности подшипников. При входном контроле производят внешний осмотр, проверяют маркировку подшипника, анализируют лёгкость вращения и характер шума, контролируют габаритные размеры и радиальные зазоры, на специальных диагностических стендах измеряют вибрационные параметры.

Важным фактором, влияющим на обеспечение работоспособности подшипника качения, является материал его элементов. Основным материалом колец и тел качения подшипников, является высокоуглеродная хромистая сталь, наиболее распространённой в России является сталь ШХ15, а её аналогами в Германии являются стали 100Cr6, в Швеции SKF-3, в США сталь 52100, в Японии сталь JIS SUJ2. В зависимости от толщины и термообработки колец подшипников применяют либо сталь ШХ15СГ (для толщин менее 30 мм и роликов диаметром более 22 мм), либо сталь ШХ20СГ, содержащую несколько больше кремния и марганца (для колец толщиной более 30 мм), либо сталь ШХ4 (для колец железнодорожных подшипников, подвергающихся индукционной закалке). Используют также цементируемые стали, для изготовления колец роликовых подшипников используют стали 20Х2Н4А, а штампованных колец роликовых игольчатых подшипников - стали 15Г1, 15Х, 08, 10, сепараторы штампуют из мягкой листовой стали, бронзы, латуни, легких сплавов или пластмасс. Твёрдость закаленных тел качения и колец достигает 61...66 HRC. Свойства шарикоподшипниковой стали характеризуются высокой упругостью, высокой прочностью и износостойкостью. Подшипниковая сталь по своим свойствам примыкает к группе инструментальных марок, однако по применению она является сталью конструкционной специального назначения. Свойства стали существенно зависят от термообработки и наличия в составе примесей и газов, многие из которых уменьшают сопротивляемость подшипниковой стали выкрашиванию (кислород, водород, азот, цветные металлы - олово, свинец, мышьяк). Поэтому к макроструктуре подшипниковой стали предъявляют очень жесткие требо-

вания, предполагая обязательность отсутствия шлаковых и газовых включений и пр. Микроструктура шарикоподшипниковых сталей в исходном состоянии должна представлять собой перлит со средним размером зерна 14 мкм.

Однако неизбежно в процессе выплавки в сталь попадают неметаллические включения, вблизи которых в процессе работы подшипников возникают повышенные напряжения и зарождаются усталостные микротрещины, которые, сливаясь, проводят к выкрашиванию частиц металла. Из-за этого средняя долговечность партии подшипников может колебаться ориентировочно до 5 раз, а отдельных подшипников - до нескольких порядков. Размер неметаллических включений в стали может составлять от менее 0,1 мкм до нескольких миллиметров. Увеличение размеров включений уменьшает усталостную прочность, также это свойство зависит от термообработки и состава материала элементов подшипника, которые существенно влияют на размеры включений. Микропоры и включения являются местами концентрации напряжений в металле и очагами возникновения усталостных трещин в готовых подшипниках при их эксплуатации, что предполагает необходимость контроля.

Совершенствование технологий производства сталей послужило толчком для создания уникальных приборов и более чувствительных методов контроля подшипниковых материалов, таких, как количественная полуавтоматическая и автоматическая микроскопия, растровая (сканирующая), высоковольтная просвечивающая и эмиссионная электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ, ультразвуковой контроль прокатанной или прокованной заготовки по всей ее длине. Методы позволяют обнаруживать как крупные дефекты, так и размером менее 1 мм.

Основным и универсальным методом микроисследования и контроля геометрических параметров неметаллических включений остается микроскопический метод. Для оценки макровключений размером более 1 мм применяются исследование изломов закаленных образцов, травление, снятие серного отпечатка, механическая ступенчатая обточка, магнитная дефектоскопия и ультразвуковой контроль.

Кроме структурных, важными являются результаты исследований прочностных свойств подшипниковых материалов, особенно в условиях их длительной работы. Непосредственно вопросов безопасности эксплуатации подшипников качения касается явление гигацикловой усталости, обнаруженное в последнее время и связанное с разрушением материалов при напряжениях меньших предела выносливости и при более чем 10^8 циклах нагружения. Установлено, что в условиях гигацикловой усталости для оценки остаточного ресурса и принятия решения о продлении срока службы ответственных деталей необходимо проведение исследований по определению прочностных свойств применяемых сталей в области высоких циклов нагружения. Повышенный интерес к гигацикловой усталости связан с увеличением вероятности разрушения ответственных деталей и конструкций, имеющих большой срок службы. Основной особенностью гигациклового разрушения является смена расположения очага трещины, которая возникает более чем в 99 % случаев внутри материала на границе основного металла и неметаллического включения. Развитие трещины может быть разнообразным. Она может выйти на поверхность или уйти вглубь материала, что по-разному сказывается на работоспособности подшипников качения. В связи с этим разработка отвечающего современным требованиям метода контроля и прогнозирования гигациклового разрушения является актуальной задачей.

Наиболее интенсивно посвящённые этой проблеме работы в настоящее время ведутся учеными ИМАШ РАН и ИМЕТ РАН и зарубежными исследователями. В частности, показано, что при испытаниях на многоцикловую усталость (на стандартной базе 10^7 - 10^8 циклов) чаще всего наблюдается два типа кривых усталости: с горизонтальным участком при выходе на предел выносливости и без него. При долговечностях в интервале 10^8 - 10^{10} циклов после горизонтального участка кривых усталости первого типа появляется вторичная ветвь гигацикловой усталости, при чём зарождение усталостных трещин, как правило, происходит под поверхностным слоем металла у металлических включений. На рисунке 4.3 показаны эти особенности на примере высокопрочной подшипниковой стали JIS SUJ2 с пределом прочности 2316 МПа в условиях изгиба с вращени-

ем с частотой 52,5 Гц. Из рисунка видно, что при амплитуде напряжения выше 1200 МПа имеются две ветви кривых ограниченной долговечности, на одной из ветвей, соответствующей меньшей долговечности с меньшим числом циклов до разрушения, зарождение усталостных трещин происходит на поверхности образцов, а на другой, соответствующей образцам с большей долговечностью, – у неметаллических включений в подповерхностном слое внутри материала. Это обстоятельство подтверждает справедливости предположения о необходимости контроля внутренней структуры материала, обоснованию возможности чего посвящена данная работы.

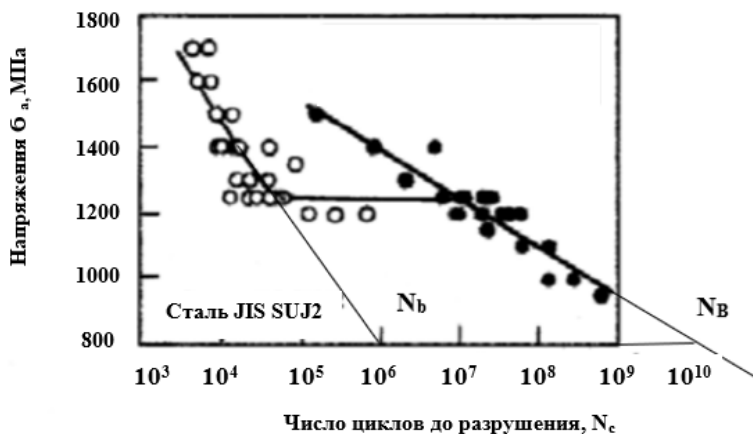


Рис. 4.3 Кривые усталости высокоуглеродистой хромистой подшипниковой стали JIS SUJ2; \circ -зарождение трещин на поверхности; \bullet -зарождение трещины в подповерхностном слое

4.2. Методы неразрушающего контроля состояния подшипников качения

Из-за ограниченности доступа к подшипниковым узлам актуальными являются безразборные неразрушающие методы их контроля, которые весьма разнообразны и основаны, главным образом, на регистрации сигналов, возникающих в процессе взаимодействия элементов подшипника при их перемещении (рисунок 4.4 а). Тело качения при этом совершает планетарное

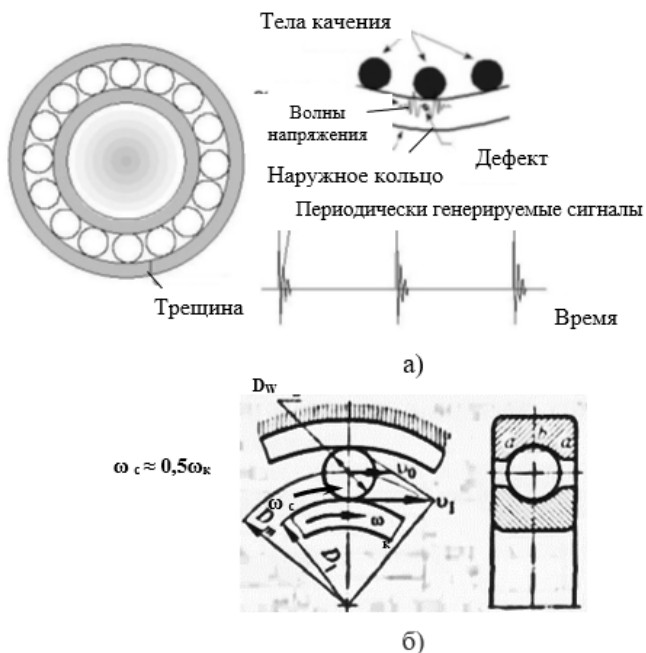


Рис. 4.4 Высокочастотные волны, возникающие из-за дефекта в наружном кольце (а) и кинематика подшипника качения (б)

движение с угловой скоростью ω_c вокруг оси подшипника, составляющей примерно половину от угловой скорости ω_k движения внутреннего кольца относительно неподвижного наружного (рисунок 4.4.б). Наиболее распространены акустические, температурные и электрические методы, основанные на контроле за сигналами, вызванными процессами трения, соударения, генерации упругих колебаний от них, тепловыделения, контактного электрического взаимодействия и пр. (рисунок 4.5). Указанные процессы хорошо контролируются, что объясняет широкое распространение основанных на них методов контроля. Наиболее информативными, позволяющим выявить зарождающиеся дефекты, является акустические сигналы высокой частоты. Диагностическими признаками предельного состояния подшипниковых узлов являются повышение амплитуды

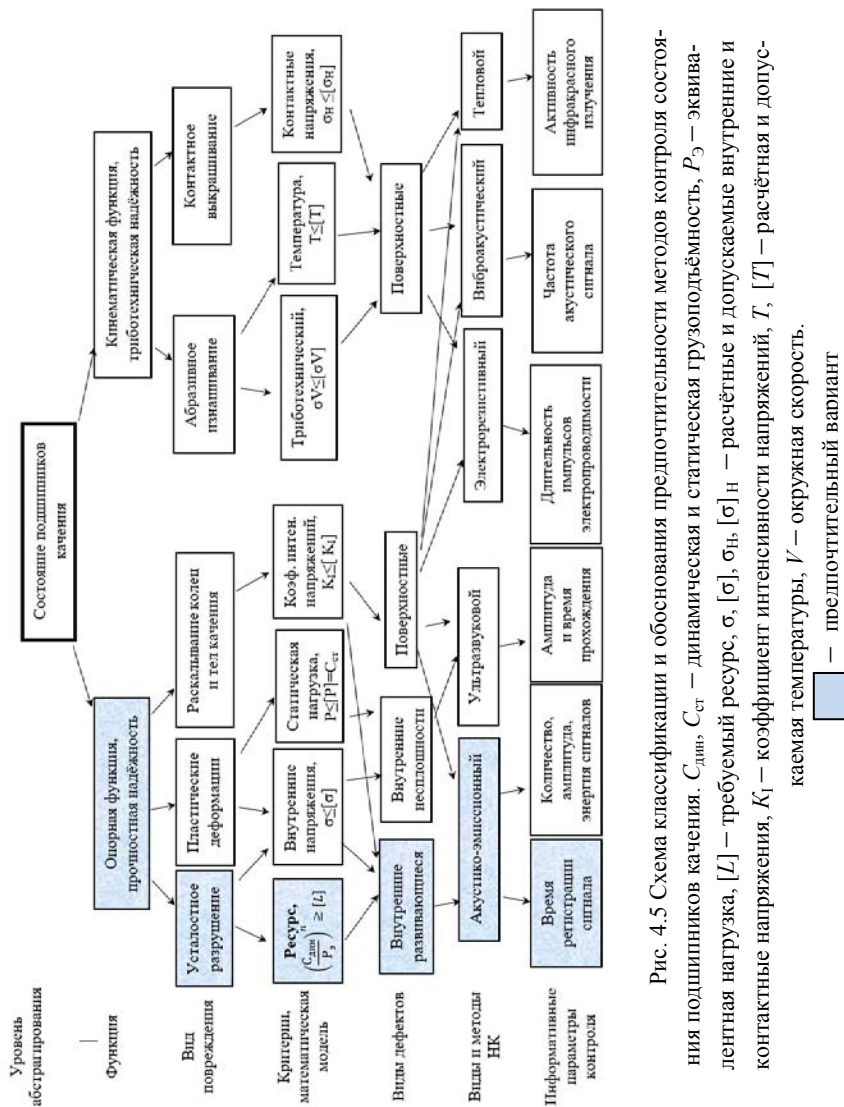


Рис. 4.5 Схема классификации и обоснования предпочтительности методов контроля состояния подшипников качения. $C_{дин}$, $C_{ст}$ – динамическая и статическая грузоподъёмность, P_2 – эквивалентная нагрузка, $[L]$ – требуемый ресурс, σ , $[\sigma]$, σ_n , $[\sigma_n]$ – расчётные и допускаемые внутренние и контактные напряжения, K_1 – коэффициент интенсивности напряжений, T , $[T]$ – расчётная и допускаемая температура, V – окружная скорость.

□ – предпочтительный вариант

звуковых колебаний и виброускорений на характерных составляющих частотного спектра вибрационной характеристики, а также общего уровня подшипниковой вибрации. Для контроля применяют также электрические методы, при реализации которых о состоянии подшипника судят по значениям его электрических параметров. понижение до нуля электрических сопротивлений смазочных слоёв между телами и дорожками качения, повышение температуры подшипников на 30...40 %, изменение времени выбега ротора в 2... 3 раза относительно исходного значения.

Неразрушающий акустико-эмиссионный контроль наружного кольца подшипника качения следует производить в процессе его статического подобного рабочему равномерного экспресс-нагружения до величины нагрузки, не превышающей его динамической грузоподъёмности на основе оценки вытекающего из модели потока импульсов АЭ диагностического параметра.

Для этого создавалась установка по диагностическому статическому нагружению подшипника с искусственно созданными на наружном кольце дефектами в местах, удалённых от непосредственного контакта элементов подшипника с целью имитации начальных условий усталостного разрушения со скрытыми дефектами материала. Форма и размеры дефектов выбирались из соображений подобия создаваемого при нагрузке напряжённого состояния кольца состоянию с реальными внутренними дефектами, а также технологических возможностей.

Установка (рисунки 4.6,4.7) состояла из гидравлического пресса с максимальным усилием 120 кН, датчика сжатия рудничного (ДСР), опорного вала диаметром 80 мм, подшипника SKF 6216, персонального компьютера с интерфейсом RS-485, опорных полиуретановых упоров с металлическими накладками, пуансона с пластиковым звукоизолятором, системы диагностической акустико-эмиссионной СДАЭ 16(2), манометра.

Проведение эксперимента сводилось к регистрации временных зависимостей сигналов АЭ во время статического нагружения подшипника качения с дефектами нагрузкой, выше статической и не превышающей динамической грузоподъёмности.

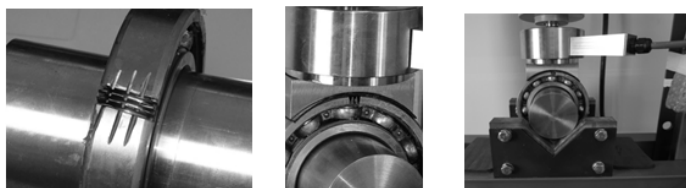
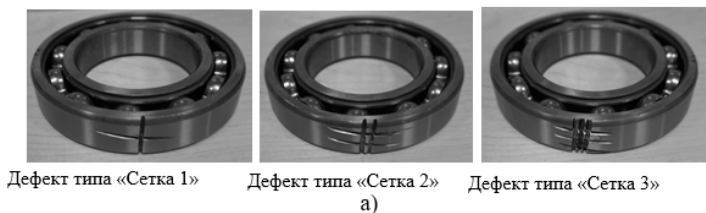


Рис. 4.6 Подшипник с искусственно созданными дефектами на наружном кольце (а), его расположение на нагружающем устройстве (б) и внешний вид экспериментальной установки (в)

Подшипник № 6216 с динамической грузоподъемностью 77 кН и дефектами в виде перекрестий на внешней поверхности наружного кольца подшипника (рисунок 4.6 а) устанавливался на вал с двумя опорами. Нагрузка прикладывалась радиально гидравлическим прессом с равномерным возрастанием и изменялась от нуля до 70 кН. Для измерения нагрузки создавалось тензометрическое устройство, принцип работы которого основан на преобразовании уси-

ля в изменение электрического сопротивления. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 4.7.

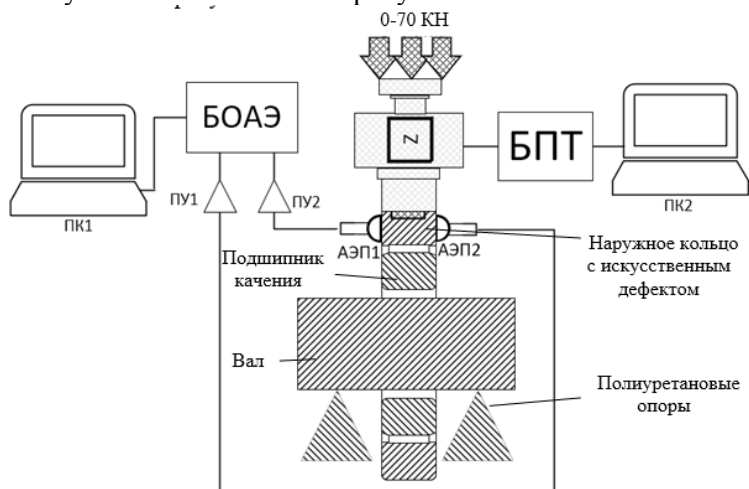


Рис. 4.7 Схема экспериментальной установки. N – тензометрический мост. БПТ – блок преобразования тензометрический АЭП, 1,2 – акустико-эмиссионные преобразователи керамического типа с полосой пропускания 20-200кГц; БОАЭ-блок обработки сигналов АЭ двухканальный; ПУ – предварительный усилитель; ПК1,2- персональные компьютеры акустико-эмиссионной и тензометрической системы измерения усилия с интерфейсом RS-485

По данным АЭ контроля производилась постобработка с применением элементов имитационного компьютерного моделирования процесса разрушения, позволяющего (рисунок 4.8) посредством временной фильтрации выделить этап прогностического однородного разрушения и рассчитать значение диагностического параметра $W_{АЭ}$.

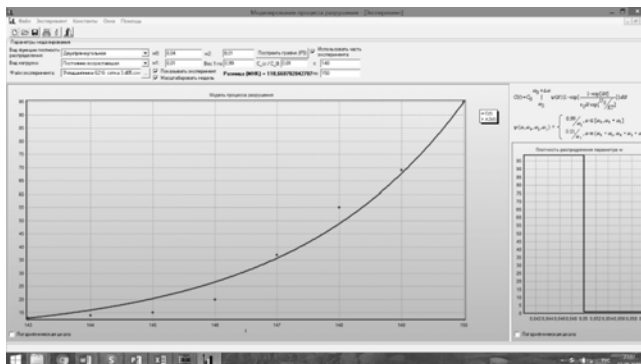


Рис. 4.8 Результаты регистрации и имитационного моделирования временной зависимости числа импульсов АЭ в период однородного разрушения зоны вокруг дефекта типа «Сетка 3» со 140 до 150-ой секунды проведения эксперимента

Для оценки информативности параметра W_{AE} , а также для проверки приближенного соответствия максимальных напряжений, вызванных искусственными и естественными дефектами, проводилось сопоставление их значений со значениями максимальных механических напряжений возле дефектов. С этой целью произведён анализ напряжённого состояния и выполнены расчеты максимальных напряжений возле дефектов методом конечных элементов с использованием модуля Static Structural программного комплекса ANSYS (рисунок 4.9).

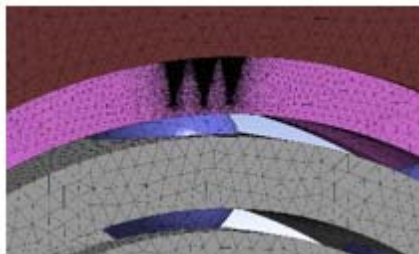


Рис. 4.9 Разбиение на расчётные элементы наружного кольца шарикового радиального однорядного подшипника качения 6216 с дефектом в виде тройного перекрестного пропила

В результате анализа напряженно-деформированного состояния наружного кольца шарикового радиального однорядного подшипника качения 6216 были получены значения максимальных эквивалентных напряжений возле обоих видов дефектов. Корреляция значений АЭ показателя прочности W_{AE} и максимальных напряжений σ_{max} возле искусственно созданных дефектов показана в таблице 4.1. Из таблицы видна удовлетворительная корреляционная связь с величиной напряжений диагностических параметров W_{AE} и традиционно применяемых для этих целей энергетического параметра MARSE и активности $N'_{\Sigma cp}$ АЭ, однако преимуществом первого является его связь с ресурсом. В отличие от неё, связь параметров MARSE и $N'_{\Sigma cp}$ с ресурсом не имеет строгих физических обоснований и может быть установлена только статистически на основе регрессионного анализа, не дающего универсальных диагностических выражений в силу зависимости от дестабилизирующей функции. Метрологический анализ результатов показал эффективность неразрушающего контроля опорной функции подшипника качения на основе параметра W_{AE} . Относительная погрешность в оценке параметра W_{AE} составляла 16%, параметров MARSE и $N'_{\Sigma cp}$ – 50-60 %, что в совокупности со значением коэффициента корреляции также показывает информационное преимущество параметра W_{AE} . Для бездефектного образца значения W_{AE} были меньше 1, что являлось информативным и соответствовало данным диагностирования ранее исследованным работоспособных сварных конструкций. В отличие от этого, критических значений параметров MARSE и $N'_{\Sigma cp}$, используемых при статистическом подходе к диагностированию, известно не было, для их определения необходимо проведение обучающего эксперимента. Зная величину параметра W_{AE} , можно сделать вывод о степени опасности дефекта, сравнив его с критическим значением $[W_{AE}]$. В случае отсутствия данных, значение $[W_{AE}]$ принимается равным единице.

Корреляция со значениями максимальных напряжений σ_{max} , возникающих возле дефектов нагруженного силой 1000 Н наружного кольца подшипника, со значениями показателя W_{AE} , энергии MARSE и средней активности $N'_{\Sigma cp}$ АЭ за выделенный период наблюдения (Таблица 4.1)

Таблица 4.1

Тип искусственного дефекта	W_{AE}	MARSE, мВ ² ·мс	$N'_{\Sigma ср.}$ имп/с	σ_{max} , МПа
Бездефектный	0,38	1	0,06	8,15
Сетка 1#1	1,84	11118	0,21	40,74
Сетка 2#2	2,15	1158	0,07	43,24
Сетка 3#3	9,52	22880	6	58,01
Кэф. корр. с σ_{max}	0,78	0,761	0,66	

Таким образом, показана эффективность информационно-кинетического подхода для разработки методов АЭ диагностирования колец подшипника качения, основанного на включающей накопление повреждений многоуровневой модели временных зависимостей параметров АЭ и обосновывающей связь АЭ с параметрами кривых усталости объекта диагностирования. Предложен способ оценки ресурса подшипника качения, заключающийся в определении интенсивности упругого излучения при нагружении подшипника, отличающийся тем, что с целью повышения достоверности оценки нагружение производят статически до нагрузки, выше статической но не превышающей динамической грузоподъёмности подшипника, определяют параметры многоуровневой модели фиксируемой временной зависимости количества сигналов акустической эмиссии, по параметрам которой и динамической грузоподъёмности подшипника производят оценку его ресурса. При этом:

1. Нагружение подшипника производят приложением нагрузки в месте выявленного дефекта геометрически подобно рабочему, статически (равномерно и при неподвижных кольцах подшипника), расчёт ресурса производят по формуле (2), из которой определяется количество оборотов колец подшипника друг относительно друга при работе до его перехода в предельное состояние.

2. При отсутствии выявленных дефектов описанное выше нагружение производят многократно с поворотом наружного кольца относительно направления действия нагрузки на 90 градусов и расчёт ресурса производят аналогично п.1 для наибольшего значения параметра W_{AE} .

Метод неразрушающего контроля наружного кольца подшипника качения осуществляется следующим образом:

1. Установка подшипника на нагружающее устройство. Необходимое для иницирования сигналов АЭ устройство обеспечивает создание подобного рабочему напряжённому состоянию в материале наружного кольца подшипника качения путем прикладывания подобной рабочей нагрузки, например радиальной к сектору наружного кольца. Нагрузка уравнивается частью тел качения, которые передают её закреплённому неподвижно внутреннему кольцу.

2. Установка преобразователей АЭ на торцевую часть наружного кольца подшипника, проверка работоспособности аппаратуры АЭ.

3. Нагружение подшипника производится равномерно возрастающей со скоростью 400-600 Н/с нагрузкой. Приложение нагрузки осуществляется в месте выявленного дефекта при неподвижных кольцах подшипника. При отсутствии выявленных дефектов нагружение производят многократно с изменением места приложения нагрузки, например, поворотом наружного кольца относительно направления действия нагрузки на 90 градусов.

4. В процессе нагружения с помощью диагностической акустико-эмиссионной системы автоматизировано фиксируются время регистрации, число импульсов АЭ, амплитуда сигналов, величина нагрузки, длительность импульсов, непрерывно контролируется изменение нагрузки с помощью тензоизмерительной системы.

5. По полученным данным строятся графики изменения нагрузки и логарифма числа импульсов АЭ от времени, определяется её участок, соответствующий однородному разрушению.

6. По выделенному на основе анализа временной зависимости параметров АЭ участку кинетически однородного упругого разрушения и графика изменения нагрузки определяется значение диагностического параметра W_{AE} по формуле:

$$W_{AE} = d \ln \xi / d K_H$$

где ξ - информативный параметр АЭ, в качестве которого используют число N_{Σ} импульсов, число выбросов или суммарную относи-

тельную амплитуду сигналов АЭ, накопленных на этапе однородного разрушения;

$K_H = F/F_{\text{раб}}$ -- коэффициент нагрузки, равный отношению диагностической нагрузки F , при которой производится определение ξ , к рабочей $F_{\text{раб}}$, при которой производится эксплуатация подшипника.

7. Из кривой гигацикловой усталости $B - \ln N_C$ материала кольца подшипника качения, посредством экстраполяции на ось $\ln N_C$ определяется величина N_B .

8. По результатам сканирования отбирается самый опасный участок, на котором параметр W_{AE} имеет наибольшую величину, с помощью которого производится расчёт ресурса подшипника качения. В случае местного или колебательного нагружения наружного кольца это делают по формуле (2), в случае циркуляционного нагружения наружного кольца - по формуле:

$$L_{10} = 2N_C / (10^6 n_{\text{ш}}) = 2N_B / (10^6 n_{\text{ш}} \exp W_{AE}),$$

где $n_{\text{ш}}$ – количество тел качения в подшипнике.

Рассмотрен пример реализации метода. Показано что, зная величину параметра W_{AE} , можно сделать вывод о степени опасности дефекта и состоянии подшипника, сравнив его с критическим значением $[W_{AE}]$. Значения $[W_{AE}]$ принимают в пределах $1 \div 2$, при отсутствии данных о требуемом ресурсе подшипника принимаем $[W_{AE}] = 1$. Оценка состояния подшипника производится на основании классификации по таблице 4.3. Если $W_{AE} \leq 0$, то принимается, что состояние подшипника работоспособно. При $0 < W_{AE} \leq [W_{AE}]$ принимается, что значения коэффициента запаса прочности s попадают в диапазон $[s] < s$, где $[s] = 2 \div 4$ – требуемый (нормативный) коэффициент запаса по средним нагрузкам, состояние подшипника работоспособно. При $W_{AE} > [W_{AE}]$ работоспособность подшипника принимается ограниченной, величина допускаемой нагрузки должна быть снижена 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 подшипника - неработоспособным

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

Класс опасности источника АЭ	Диагностический признак	Состояние источника АЭ и контролируемого объекта
I	$W_{AE} \leq 0$	Пассивный, эксплуатация допускается.
II	$0 < W_{AE} < [W_{AE}]$	Активный, эксплуатация допускается.
III	$W_{AE} \geq [W_{AE}]$	Критически активный источник АЭ, может эксплуатироваться с ограничениями.
IV	$W_{AE} \geq [s]/[W_{AE}]$	Катастрофически активный, эксплуатация не допускается. Подшипник подлежит снятию с эксплуатации.

где $[s]$ – нормативный коэффициент запаса по средним нагрузкам.

5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УДАРООПАСНОСТИ УЧАСТКОВ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

5.1. Общие сведения

Развитие геофизических методов локального прогноза удароопасности массива горных пород (МГП) идет по направлениям совершенствования как регистрирующей аппаратуры, так и методических разработок по обработке данных регистрации, однако сдерживается отсутствием информативных прогностических моделей, описывающих состояние МГП, процесс его разрушения и явлений, способных обосновать выбор критериев и диагностических параметров состояния МГП, дать оценку времени, оставшемуся до динамического проявления горного давления. В частности, при прогнозе удароопасности горного массива сейсмоакустическим методом, несмотря на аппаратные достижения, как и ранее, базируются на измерении акустической активности или энергоёмкости упругого излучения после технологического взрыва и сталкиваются с зависимостью результатов прогноза от дестабилизирующих факторов. Для решения проблемы применён информационно-кинетический подход к прогнозированию, рассмотрены принципы отбора устойчивых к дестабилизирующим факторам диагностических параметров, микро-механическая модель накопления повреждений в массиве и отражающей его временной зависимости параметров акустической эмис-

сии (АЭ), позволяющие отделить влияние различных факторов на результаты прогноза и провести фильтрацию сигналов, предложены критерии и методика оценки категории удароопасности МГП. Результаты апробированы при анализе сейсмоакустической активности массива рудников «Таймырский» и «Октябрьский» Норильского промышленного района, вызванной технологическим взрывом, приведены примеры определения предложенных критериев, проведено сопоставление эффективности их применения с традиционными оценками удароопасности и напряжённого состояния МГП по информативности, устойчивости и представительности посредством статистической обработки экспериментальных данных.

Добыча руды на глубоких удароопасных горизонтах сопряжена с необходимостью повышения безопасности труда рабочих, требующей совершенствования методов контроля и состояния горного массива. Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ), утверждённый приказом Ростехнадзора в качестве одного из геофизических методов прогнозирования удароопасности массива горных пород (МГП). Метод АЭ развивается в аппаратурном и методическом направлениях, однако разработки не достаточно эффективны ввиду отсутствия надёжной методической основы поиска корреляций между измеряемыми параметрами АЭ и параметрами состояния МГП. В частности, несмотря на аппаратурные достижения, как и ранее, базируются на измерении акустической активности, суммарного числа импульсов или энергоёмкости упругого излучения после технологического взрыва, и, как следствие, сталкиваются с зависимостью её результатов от влияния дестабилизирующих факторов. Решать проблему представляется возможным на основе информационно-кинетического подхода к прогнозированию разрушения, построения кинетических моделей процессов и явлений, предшествующих горному удару, направляющих поиск информативных критериев и диагностических параметров. Цель работы - обоснование эффективных АЭ критериев и методики прогнозирования удароопасности, слабо чувствительных к помехам и наиболее тесно связанных со временем, оставшимся до динамического появления горного давления.

5.2. Модель разрушения МГП и параметров АЭ гетерогенного материала

Прогнозирование удароопасности МГП с позиции применяемого подхода основано на моделировании процесса разрушения и непосредственном наблюдении за связанным с ним явлением упругого излучения, которые наиболее интенсивно происходят в начальный период перераспределения перенапряжений в связи с созданием в массиве новых полостей после технологического взрыва. Основой моделирования является связь первичных информативных параметров АЭ ξ с параметрами повреждаемости материала или горной породы – концентрацией C трещин, образующихся в результате разрушения структурных элементов, описываемая уравнением

$$\xi(t) = k_{AE}C(t), \quad (5.1)$$

где t – текущее время, k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК), имеет смысл коэффициента подобия процессов разрушения и упругого излучения или акустически активного объема материала, описываемого выражением

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t, \quad (5.2)$$

где V – контролируемый объем материала; $\Phi(\Delta t, f, u)$ – функция плотности распределения сигналов АЭ по длительности пауз Δt , частоте f и амплитуде u . Информативность модели (5.1) обеспечивается стабилизацией АЭК и связью скорости накопления концентрации C со временем до разрушения.

Временная зависимость концентрации трещин описывается выражением

$$C(t) = C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t dt' / \Theta(U_0, \omega(t')) \right] \right\} d\omega, \quad (5.3)$$

где C_0 – начальная концентрация структурных элементов; ω – параметр прочностного состояния структурного элемента материала объекта контроля, зависящий от изменяющихся во времени растягивающих напряжений $\sigma(t)$ на структурном элементе, $\omega(t)$ – временная зависимость параметра прочностного состояния

$$\omega(t) = \gamma\sigma(t)/(KT), \quad (5.4)$$

где $\gamma, K, T, \Psi(\omega), \tau_0, U_0, \omega_0$ и $\Delta\omega$ – параметры модели.

Используемое для диагностики конструкционных материалов на микромасштабном уровне уравнение (5.1) распространяется и на масштаб стадии рассеянного вокруг образуемой взрывом полости разрушения и, таким образом, представляет собой универсальную многоуровневую модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии, регистрируемой на стадии рассеянного разрушения любого масштабного уровня в условиях прочностной неоднородности материала контролируемого объекта, позволяющую, при известной критической концентрации трещин $S^* \approx 0,01C_0$, оценить время до разрушения. Аналогом концентрации S являются различные первичные параметры ξ АЭ – число N_{Σ} регистрируемых импульсов дискретной АЭ, суммарный счет N АЭ, относительная суммарная амплитуда или любая безразмерная комбинация этих параметров. Существенная зависимость активности и амплитуды сигналов АЭ от условий регистрации сигнала и распространения упругой волны, индивидуальных для каждого канала регистрации (рис. 5.1) и влияющих на АЭК (5.2), дестабилизирует связь первичных параметров или энергии АЭ с состоянием массива, снижает достоверность АЭ прогноза и эффективность основанных на нём мер по обеспечению безопасности.

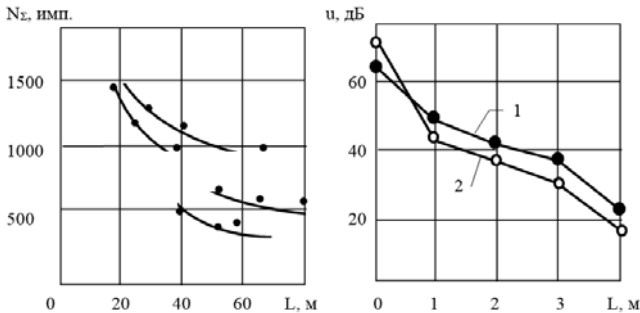


Рис. 5.1. Связь параметров АЭ с расстоянием L от преобразователя АЭ до её источника а)-зависимости суммарного количества N_{Σ} импульсов АЭ, зарегистрированные различными датчиками за время релаксации напряжений, от расстояния L между преобразователем АЭ и участком взрывной отбойки рудника «Таймырский» Норильского горно-металлургического комбината «Норильский никель»

; б)-зависимости значений амплитуды и сигналов АЭ от расстояния L до преобразователей АЭ с резонансными частотами 320 кГц (1) и 180 кГц (2).

Анализ уравнения (5.3) позволяет выделить прогностический этап однородного разрушения, а включающая её (5.1) позволяет сформулировать условия корректности АЭ контроля и предложить ряд информативных диагностических АЭ-показателей прочностного состояния горной породы (таблица 5.1), связанных с интенсивностью разрушения на этапе однородного разрушения, моментом накопления критической концентрации и степенью опасности состояния, устойчивых к влиянию дестабилизирующих факторов. В качестве АЭ-показателя напряженного состояния участка массива горных пород принимаем величину коэффициента относительной нагруженности F_{AE} , характеристики структуры и спада активности-коэффициента структуры X_{AE} , а в качестве связанного со временем до разрушения призабойной зоны критерия её удароопасности - коэффициент долговечности W_{AE} (таблица 5.1)

Таблица 5.1

Многомодельные многоуровневые концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочности, устойчивые к влиянию помех и дестабилизирующих факторов АЭ контроля

АЭ-показатель	Микромодель	Нано-модель	Свойство
F_{AE}	$\ln \xi_1 / \ln \xi_2$	σ_1 / σ_2	Уровень давления
X_{AE}	$d \ln \xi / dt$	$\alpha = \gamma \dot{\sigma} / (KT)$	Структура и спад активности
W_{AE}	$d \ln \xi / dK_n$	$\omega = \gamma \sigma / (KT)$	Долговечность

5.3. Описание метода получения первичной информации и её анализа

Регистрации АЭ и измерение параметров её сигналов производилось после проведения в массиве технологического взрыва на рудниках «Таймырский» и «Октябрьский» Норильского промышленного района ГМК «Норильский никель», осуществляемого с целью обрушения добываемой горной породы. Аппаратура регистрации описана в.

В большинстве случаев регистрируемое за единицу времени t спада количество N'_Σ сигналов АЭ изменялось по экспоненциальному закону, описываемому микромеханической моделью (5.1) на случай однородного разрушения (рисунок 5.2):

$$N'_\Sigma(t) = k_{AE} C_0 \exp\{[\gamma (\sigma_0 - \dot{\sigma} t) - U_0]/(KT)\} / \tau_0 = N'_{0\Sigma} \exp(-\alpha t), \quad (5.5)$$

где σ_0 – напряжения после взрыва, $\dot{\sigma}$ – средняя скорость их спада, $N'_{0\Sigma}$ – сейсмоакустическая активность в начальный момент времени ее спада, $\alpha = \gamma \dot{\sigma} / (KT) = X_{AE} = d \ln N'_\Sigma(t) / dt$ – показатель скорости спада АЭ. Величина коэффициента корреляции между действительными и рассчитанными по уравнению (5.5) значениями N'_Σ для различных случаев регистрации попадали в диапазон 0,8-0,98, что подтверждало адекватность модели (5.5).

Установлено, что вызванная взрывом АЭ массива в первый момент времени (1-2 мин) достигала максимального значения $N'_{0\Sigma}$, а далее происходил ее спад до величины $N'_{p\Sigma}$. Эти значения описывались выражениями микромеханической модели

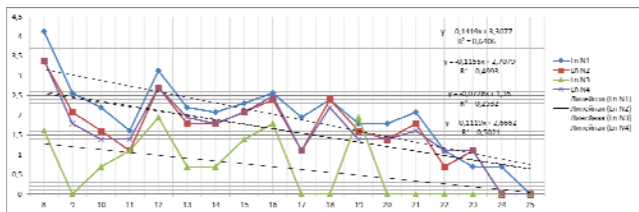
$$N'_{0\Sigma} = k_{AE} C_0 \exp[\sigma_0 \gamma / (KT)] / \{ \tau_0 \exp[U_0 / (KT)] \} = A_D \exp \omega_0 \quad (5.6)$$

$$N'_{p\Sigma} = k_{AE} C_0 \exp[\sigma_p \gamma / (KT)] / \{ \tau_0 \exp[U_0 / (KT)] \} = A_D \exp \omega_p,$$

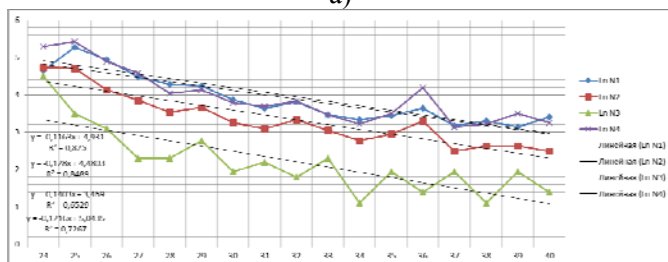
число импульсов АЭ накапливалось во времени t по закону

$$N_\Sigma(t) = A_D K T \exp[(\gamma \sigma_0) / (KT)] \{ 1 - \exp[-\gamma \dot{\sigma} t / (KT)] \} / (\gamma \dot{\sigma}) = A_D \exp \omega_0 \{ 1 - \exp(-\alpha t) \} / \alpha, \quad (5.7)$$

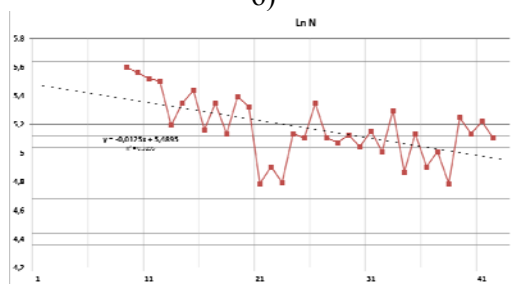
где $A_D = k_{AE} C_0 / \{ \tau_0 \exp[U_0 / (KT)] \}$ – коэффициент акустико-эмиссионной активности.



а)



б)



в)

Рисунок 5.2. Результаты регистрации временной зависимости вызванной технологическим взрывом АЭ месторождений Норильского промышленного района: а) различными каналами при прохождении участка защищённой зоны; б) различными каналами при прохождении участка повышенного опорного давления; в) удароопасного участка.

На рисунке 5.3 приведены экспериментально регистрируемые данные, иллюстрирующие изменения параметров $N'_{0\Sigma}$, α и $N_{\Sigma}(\tau_p)$ в зависимости от уровня напряжений в зоне проходки, определяемых соотношением напряжений $\sigma/[\sigma]_{cp}$ метода дискования керна. Как видно из рис.3, характер зависимости параметров АЭ от напряжений в массиве соответствует сформулированной выражениями

(5.5)-(5.7) связи. Для массива, находящегося в квазистатическом однородном напряженном состоянии, когда средние напряжения σ_p в нем постоянны, характеризующее удароопасность время τ^* до проявления горного давления определяется из условия достижения концентрации C трещин критической величины C^* по формуле:

$$\tau^* = 0,01 \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma \sigma_p)/(KT)] = A / \exp \omega_p. \quad (5.8)$$

Значения входящих в правую часть уравнения (8) величин τ_0 , U_0 , K , T , $A = 0,01 \tau_0 \exp(U_0/KT)$ относительно стабильны, как правило, известны или могут быть определены априорно перед испытаниями. Поэтому оценка степени удароопасности участка массива горных пород была сведена к апостериорному определению только величины ω_p уравнения (5.8), например, с помощью АЭ-показателя $W_{AE} = \gamma \sigma / (KT)$ (табл. 5.1):

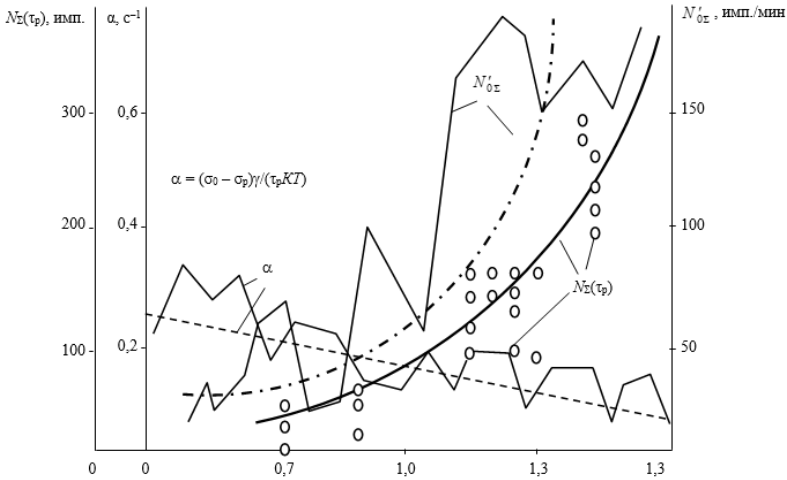


Рис. 5.3. Взаимосвязь напряженного состояния массива с величиной $N'_{0\Sigma}$ максимального всплеска активности, показателем α скорости ее спада и суммарной эмиссией $N_{\Sigma}(\tau_p)$

Значение параметра долговечности W_{AE} табл. 5.1 определяется по формулам:

-для состояния массива в момент взрыва

$$W_{0AE} = \gamma \sigma_0 / (KT) = [\ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma})] / \Delta K_0,$$

где $\Delta K_0 = \sigma_0 / [\sigma] - \sigma_p / [\sigma] \approx [1 - F_{AE}]$ – изменение коэффициента нагрузки для взрывного состояния за время релаксации напряжений

после взрыва, $F_{AE} = \ln N'_{p\Sigma} / \ln N'_{0\Sigma} \approx \sigma_p / \sigma_0$;

– в равновесном состоянии

$$W_{pAE} = \gamma \sigma_p / (KT) = [\ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma})] / \Delta K_p,$$

где $\Delta K_p = \sigma_0 / \sigma_p - \sigma_p / \sigma_p \approx 1 / F_{AE} - 1$ – изменение коэффициента нагрузки для равновесного состояния участка МГП.

Для формулировки диагностического признака, информативного относительно удароопасности, значения W_{AE} должны сопоставляться с критическими допустимыми величинами $[W_{AE}]$, которые определяются из условия разрушения горной породы за время $\theta_{взр}$ взрывного воздействия и не зависят от факторов, влияющих на результаты АЭ контроля:

$$[W_{0AE}] = \ln(\tau_0 / \theta_{взр}) + U_0 / (KT).$$

С учётом значений величин $\tau_0 = 10^{-13} \div 10^{-15}$ с, $\theta_{взр} \approx 1 \div 1000$ с, $U_0 / KT = 50 \div 60$, имеем $[W_{0AE}] \approx 10 \div 30$, $[W_{pAE}] \approx 1 \div 2$, которые принимаем за универсальную постоянную массива.

5.4. Пример оценки состояния участка МГП.

Рассмотрим результаты регистрации сейсмоакустической активности горного массива после взрывов в зонах с различным уровнем горного давления (рудник «Таймырский» Норильского ГМК). В защищённой зоне значения акустической активности по каналу 1 имеют величину (рисунок 5. 2 а):

-в начальный момент времени её спада $N'_{0\Sigma} = 62 \text{ мин}^{-1}$, $\ln N'_{0\Sigma} = 4,1$;

-в конечный момент времени её спада $N'_{p\Sigma} = N'_{\Sigma}(16) = 2 \text{ мин}^{-1}$, $\ln N'_{p\Sigma} = 0,69$;

Акустико-эмиссионный показатель напряженного состояния участка массива горных пород

$$F_{AE} = \frac{\ln N'_{p\Sigma}}{\ln N'_{0\Sigma}} = \frac{\ln(2)}{\ln(62)} = 0,168.$$

Значение параметра долговечности призабойной зоны

$$W_{pAE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_p = \ln(62/2) / (1/0,168 - 1) = 0,69 < [W_{pAE}]_p,$$

$$W_{0AE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_0 = \ln(62/2) / (1 - 0,168) = 4,127 < [W_{0AE}].$$

Поскольку $F_{AE} < 0,5$, $W_{pAE} < [W_{pAE}]$, $W_{0AE} < [W_{0AE}]$ то обстановка не является удароопасной. Участок относится к III-ей категории, не представляющий непосредственной опасности горных ударов.

Аналогично, в зоне повышенного опорного давления (рис. 5.2 б)

$$F_{AE} = \frac{\ln N'_{p\Sigma}}{\ln N'_{0\Sigma}} = \frac{\ln(23)}{\ln(195)} = 0,595.$$

Значение параметров долговечности призабойной зоны:

$$W_{pAE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_p = \ln(195/23) / (1/0,595 - 1) = 4,04 > [W_{pAE}],$$

$$W_{0AE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_0 = \ln(195/23) / (1 - 0,595) = 5,27 < [W_{0AE}],$$

С учётом изменения АЭК, вызванного понижением средней амплитуды сигналов АЭ со временем в процессе релаксации напряжений, откорректированные значения

$$F_{корAE} = 1,1 F_{AE} = 0,654$$

Значение параметров долговечности призабойной зоны:

$$W_{pAE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_{pкор} = \ln(195/23) / (1/0,654 - 1) = 4,04 > [W_{pAE}],$$

$$W_{0AE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_{0кор} = \ln(195/23) / (1 - 0,654) = 6,18 < [W_{0AE}],$$

Поскольку $F_{AE} > 0,5$, $W_{pAE} > [W_{pAE}]$, $W_{0AE} < [W_{0AE}]$, то участок относится к опасному по горным ударам II-ой категории, выработка должна быть приведена в неудароопасное состояние, горные работы ведут по обычной технологии.

Аналогично для удароопасного состояния (рис. 5.2 в) $F_{AE} = 0,94$, $W_{pAE} = 12,86$, $W_{0AE} = 13,67$, $F_{AE} > 0,5$, $W_{pAE} > [W_{pAE}]$, $W_{0AE} > [W_{0AE}]$, участок I-ой категории опасности с повышенной опасностью горных ударов.

В таблицах 5.2 и 5.3 проведено сопоставление различных диагностических параметров АЭ по их информативности (корреляции

со значениями $\sigma/[\sigma]_{cp}$ в зонах МГП), степени устойчивости (вариативности по каналам регистрации) и представительности оценки состояния МГП. Как видно из таблиц, наиболее ценными являются концентрационно-кинетические показатели (табл. 5.1), что обеспечено лежащими в основе информационно-кинетического подхода принципами оптимизации диагностирования. В табл. 5.4 приведён пример одного из вариантов прогнозирования удароопасности МГП.

Таким образом, показана эффективность применения информационно-кинетического подхода и микромеханической модели временной зависимости параметров акустической эмиссии, регистрируемой после технологического взрыва, для интерпретации результатов регистрации АЭ горного массива, обоснованного подбора информативных диагностических параметров, связанных со временем до момента динамического проявления горного давления, представительных диагностических признаков и критериев состояния МГП, характеризующих степень его удароопасности.

Корреляция относительных напряжений в зонах проходки и диагностических параметров АЭ, рассчитанных с учётом метрологической неоднородности контроля, связанной с понижением амплитуды сигналов АЭ в процессе релаксации напряжений (Таблица 5.2).

Таблица 5.2

Корреляция относительных напряжений в зонах проходки и диагностических параметров АЭ, рассчитанных с учётом метрологической неоднородности контроля, связанной с понижением амплитуды сигналов АЭ в процессе релаксации напряжений

№ взрыва	$N_{\Sigma}(\tau_p)_1$	$N_{\Sigma}^{*} \frac{\sigma_{\Sigma 1}}{I} \text{ мин}$	W_{pAE1}	W_{0AE1}	W_{cpAE1}	W_{cpAE}	F_{AE1}	$X_{AE1} \text{ мин}^{-1}$	Уровень горного давления, $\sigma/[\sigma]_{cp}$
114	3193	142	2,08	5,56	3,82	3,55	0,37	0,02	Повышенное опорного давления, 1,325
115	2175	173	3,24	5,76	4,5	4,42	0,56	0,04	
116	2415	198	3,33	5,91	4,62	4,71	0,56	0,02	
208	1046	182	1,24	5,35	3,29	3,03	0,23	0,12	
212	1031	195	4,04	6,18	5,11	4,35	0,65	0,12	
214	1607	256	3,09	6,07	4,58	3,69	0,51	0,07	
215	2092	241	1,58	5,68	3,63	3,27	0,28	0,08	
217	1413	204	3,42	5,97	4,7	3,94	0,57	0,1	
200	1519	186	1,39	5,23	3,31	3,06	0,27	0,12	Частично

205	672	135	1,1	4,91	3	2,91	0,22	0,06	защит, 1.
131	580	134	1,1	4,9	3	2,2	0,22	0,04	Защищённая зона, 0,7
138	332	122	1,79	4,8	3,3	2,41	0,37	0,19	
184	117	51	1,1	3,93	2,52	2,69	0,28	0,19	
186	97	46	0,69	3,83	2,26	2,47	0,18	0,29	
188	193	83	1,1	4,42	2,76	2,76	0,25	0,32	
194	64	35	1,1	3,56	2,33	2,35	0,31	0,29	
197	198	62	0,69	4,13	2,41	2	0,17	0,14	
Коэф. корр. $\rho_{с \sigma} / [\sigma]_{ср}$	0,83	0,85	0,75	0,9	0,85	0,86	0,66	-0,69	

W_{1AEp} , W_{0AE1} , $W_{срAE1}$, - значения параметра W_{AE} , рассчитанные по результатам регистрации сигналов первым каналом при равновесном состоянии, в начальный момент регистрации и усреднённое, $W_{срAE}$ – усреднённое по четырём каналам регистрации значение параметра W_{AE} .

Таблица 5.3

Значения коэффициента V вариации по каналам регистрации и коэффициента представительности $|\rho|/V$ диагностических параметров АЭ

Диагностический параметр	$N_{\Sigma}(\tau_p)_1$	$N'_{\sigma \Sigma 1}$	X_{AE}	F_{AE}	W_{pAE}	W_{0AE}	$W_{срAE}$
Диапазон разброса V	0,062±0,68	0,04±0,74	0,02±0,26	0,07±0,43	0,07±0,51	0,01±0,28	0,04±0,67
Средние значения $V_{ср}$	0,32	0,3	0,1	0,24	0,27	0,08	0,19
Коэф. представит. $ \rho /V_{ср}$	2,59	2,83	6,9	2,75	2,78	11,25	4,53

Таблица 5.4

Оценка удароопасности участка массива горных пород при локальном прогнозировании

Категория удароопасности	Критерий удароопасности	Характеристика удароопасности участка МГП
I	$W_{0AE} > 7$	С повышенной опасностью горных ударов. Выработки должны быть немедленно приведены в неудароопасное состояние, обязательны дополнительные меры предосторожности, обеспечивающие безопасность людей; горные работы ведутся по спе-

		циальной технологии.
II	$5 < W_{0AE} \leq 7$	Опасные по горным ударам. Выработки должны быть приведены в неудароопасное состояние, горные работы ведут по обычной технологии.
III	$W_{0AE} \leq 5$	Не представляющие непосредственной опасности горных ударов. Специальных мер не применяется, но текущий прогноз удароопасности осуществляется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ Ростехнадзора от 02.12.2013 N 576 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам" (Зарегистрировано в Минюсте России 04.04.2014 N 31822).

2. Носов В.В. Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии// Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 469-479

3. Носов В.В. Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности//Записки Горного Института. 2015 г, Том 216, с. 62-75.

4. Носов В.В. Оценка ресурса опасных технических объектов на основе акустико-эмиссионного диагностирования// Проблемы машиностроения и автоматизации, Издательство: ИМАШ РАН, №3 — 2020. С 133-143

5. Appraising the Service Life of Dangerous Engineering Equipment by Acoustic Emission Diagnosis// Journal of Machinery Manufac-

ture and Reliability, 2020, Vol. 49, No. 12, pp. 1072–1083. © Allerton Press, Inc., 2020. ISSN 1052-6188

6. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Об использовании акустико-эмиссионного эффекта памяти в композиционном материале для контроля критических напряжений в массиве горных пород// ФТПРПИ. 2013, № 4, с.32-39

7. Куксенко В. С., Махмудов Х. В., Мансуров В. А., Султанов У., Рустамова М. З. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // ФТПРПИ. – 2009. – № 4.

8. И. П. Щербаков, В. С. Куксенко, А. Е. Чмель. Температурная зависимость накопления микроповреждений при ударном разрушении гранита// ФТПРПИ.- 2013.-№6, с.90-97.

9. Г.Г. Кочарян, А.А. Остапчук. Акустическая эмиссия при различных режимах межблоковых перемещений// ФТПРПИ.- 2015.-№1, с.3-13.

10.Наговицын Ю.Н., Какошина Л.В. Региональный прогноз удароопасности на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»». Перспективы развития. //Международная научно-практическая конференция, посвящённая 110-летию горного факультета. Горное дело в XXI веке: технология, наука, образование. Национальный минерально-сырьевой ун-т «Горный», 28-29 октября 2015 г. С.32.

11.Кривошеев И.А. Статистический метод обработки сигналов акустической эмиссии в горном массиве / И.А.Кривошеев, Г.А.Иванов // Дефектоскопия. 2002. № 2. С.62-65.

12.Гиляров В. Л. Анализ статистических параметров данных геоакустического мониторинга на месторождении “Антей” /В. Л. Гиляров, Е. Е. Дамаскинская, А. Г. Кадомцев, И. Ю. Рассказов// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2014, N 3, с. 40-45.

13.Опарин В. Н. О кинетических особенностях развития сейсмоэмиссионных процессов при отработке угольных месторождений Кузбасса/ В. Н. Опарин, А. Ф. Еманов, В. И. Востриков, Л. В. Цибилов// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2013, N 4, с. 40-45.

14.Рассказов И.Ю., Курсакин Г.А. Особенности сейсмоакустического контроля геомеханического состояния массива горных по-

род в геодинамически активных районах // Известия ВУЗов. Горный журнал. 2006. № 6. С. 22-28.

15. Wang H.-J., Tang L., Ren X.-H., Yang A.-Y., Niu. Y. Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region and its memory fading, *Rock and Soil Mechanics*, 2014, Vol. 35, Issue 4. – P. 1007 – 1014.

16. Wang H.-J., Ren X.-H., Tao R.-R., Zhang J.-X. Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region based on frictional sliding, *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban), J. of Central South University (Science and Technology)*, 2012, Vol. 43, Issue 11. – P. 4464 – 4471.

17. Meng Q., Zhang M. E, Han L., Pu H., Chen Y. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018. – P. 1 – 20.

18. Archer J. W., Dobbs M. R., Aydin A., Reeves H. J., Prance R. J. Measurement and correlation of acoustic emissions and pressure stimulated voltages in rock using an electric potential sensor // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2016. Vol. 89. pp. 26–33.

19. Ефимов В.П. Влияние скорости нагружения на трещиностойкость горных пород с позиций кинетической термофлуктуационной концепции разрушения // *ФТПРПИ*, -2016, -№2, с. 57-63.

20. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // *Дефектоскопия*, № 7, 2016, с. 52-67.

21. Трапезников Ю.А., Манжиков Б.Ц., Богомолов Л.М. Амплитудные спектры акустической эмиссии при ступенчатом нагружении горных пород // *Вулканология и сейсмология*, 2000, №2, с. 75-78.

22. Nosov V. V., Burakov I. N.. Use of Amplitude Distribution Parameters of Acoustic Emission Signals for Assessing the Strength of Structural Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 40, No. 3, 2004, pp. 157–162.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Общие вопросы применения систем и приборов в решении проблемы обеспечения горной и промышленной безопасности.....	3
1.1. Остаточный ресурс технического объекта и принципы его прогнозирования.....	4
1.2. Диагностика состояния сварных соединений металлокон-струкций и стандартные методы оценки их ресурса.....	9
2. 2. Диагностика сосудов давления	25
2.1. Неразрушающий контроль сосудов давления.....	25
2.2. Акустико-эмиссионная-диагностика сосудов давления.....	30
3. Оценка ресурса металлоконструкций подъёмно-транспортных машин.....	31
3.1. Общие сведения.....	31
3.2. Анализ результатов стендовых испытания модели мостового крана	32
4. Оценка ресурса подшипников качения.....	37
4.1. Общие сведения.....	37
4.2. Методы неразрушающего контроля состояния подшипников качения.....	46
5. Прогнозирование удароопасности участков массива горных пород	57
5.1. Общие сведения.....	57
5.2. Модель разрушения МГП и параметров АЭ гетерогенного материала.....	59
5.3. Описание метода получения первичной информации и её анализа.....	61
5.4. Пример оценки состояния участка МГП	65
Литература.....	69

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*Методические указания к самостоятельной работе
для студентов магистратуры направления 12.04.01*

Сост. *В.В Носов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
метрологии, приборостроения и управления качеством

Ответственный за выпуск *В.В Носов*
Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 15.09.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 4,3. Усл.кр.-отт. 4,3. Уч.-изд.л. 4,0. Тираж 75 экз. Заказ 820.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2