



Степанова Людмила Николаевна родилась в 1946 г. В 1969 г. после окончания обучения по кафедре «Информационно-измерительная техника» Челябинского политехнического института направлена на работу в Новосибирск в ФГУП «СибНИИ им. С.А. Чаплыгина», где проработала до мая 2006 г. В 1980 г. защитила кандидатскую диссертацию в Московском авиационном институте (МАИ), а в 1989 г. — докторскую диссертацию в Центре микроэлектроники (г. Зеленоград, Москва).

С 1993 г. по 2006 г. работала на кафедре «Электротехника, диагностика, сертификация» совместителем. С 2006 г. и по настоящее время — завкафедрой «Электротехника, диагностика, сертификация». С 1998 г. — профессор кафедры. В 2004 г. сертифицирована на III уровень по «Акустической эмиссии».

УДК 620.179.17

Л.Н. СТЕПАНОВА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрены основные особенности использования метода акустической эмиссии при неразрушающем контроле объектов железнодорожного транспорта (боковые рамы и надрессорные балки тележки грузового вагона, котлы цистерн, колесные пары). Контроль различных объектов железнодорожного транспорта с использованием метода акустической эмиссии позволил определить общий подход при оценке степени опасности дефектов и их остаточного срока службы.

Основным видом дефекта при ресурсных испытаниях металлических конструкций является усталостная трещина. Надежность ее обнаружения служит основным критерием применимости того или иного метода неразрушающего контроля (НК).

Важнейшие задачи НК и технической диагностики — распознавание дефектов, определение их координат, формы, размеров, степени опасности. Различные методы НК ориентированы на применение в разных условиях и взаимно дополняют друг друга, что позволяет получать дополнительную информацию об исследуемом объекте контроля (ОК). Эффективность применения традиционных методов НК (рентгеновского, ультразвукового, вихретокового, магнитного) в значительной степени зависит от дефектоскописта [1].

Согласно статистическим данным, представленным американскими специалистами, усталостные повреждения материалов вызывают 80 % отказов техники, работающей в жестких условиях эксплуатации. Накопление усталостных повреждений происходит на микроуровне, не доступном для традиционных методов НК. Для решения этого вопроса необходимо увеличить чувствительность ультразвукового дефектоскопа примерно на два порядка по сравнению с его предельными возможностями. Таким образом, информация, получаемая традиционными методами НК, недостаточна для оценки состояния ОК с дефектами и определения остаточного ресурса [2].

В настоящее время ведется поиск новых физических явлений, позволяющих упростить процесс диагностирования и повысить чувствительность методов НК. Для оценки прочностных характеристик машиностроительных конструкций все

большее распространение получает метод акустической эмиссии (АЭ), который относится к пассивному акустическому методу [3–10].

Акустическая эмиссия — это явление генерации нестационарных упругих волн вследствие быстрого выделения энергии при деформации, вызванной структурным изменением в твердом материале. При этом к ОК прикладывается нагрузка $P \leq P_{\text{эксп}}$, где $P_{\text{эксп}}$ — эксплуатационная нагрузка. Поэтому для практического использования метода АЭ создаются специальные стенды, осуществляющие необходимое нагружение конструкции. На стадии разработки стенда важно иметь представление о напряженном состоянии ОК в эксплуатации (одноосное, двухосное, объемное), а также о величине напряжений.

Физическая сущность метода АЭ состоит в регистрации установленными на поверхности конструкции преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) дискретных волн разгрузки, вызванных структурной перестройкой материала при его деформировании и локальном разрушении (пластическая деформация, скачкообразное развитие трещины). Источник АЭ вызывает изменение динамического поля сил (или напряжений). На распространение акустической волны в конструкции влияет взаимодействие с микроструктурой материала, неоднородностями и условием нагружения ОК. Такие структурные изменения происходят в результате образовавшихся внутри либо приложенных извне механических или температурных напряжений. Неразвивающиеся дефекты сигналов АЭ не излучают, поэтому материал конструкции должен быть нагружен до напряжений, достаточных для продвижения трещины.

Метод АЭ, обладая интегральными свойствами, не требует выполнения большого объема трудоемких работ по зачистке поверхности ОК. В процессе выполнения технического диагностирования возникает необходимость определения предразрушающего состояния, которое характеризуется экспоненциальным ростом параметров сигналов АЭ при увеличении нагрузки [2].

При использовании метода АЭ решение о дефектности ОК принимает компьютер. При этом минимизируются объемы исследований традиционными методами НК. Основные достоинства метода АЭ состоят в возможности накапливать информацию о динамике возникновения и развития повреждений, в дистанционном интегральном контроле состояния крупногабаритных ОК, выявлении развивающихся, а следовательно, наиболее опасных дефектов, диагностировании объектов без полной разборки, применении комплексного контроля совместно с другими методами НК. Поскольку параметры сигналов АЭ связаны с кинетикой разрушения материалов, то применение данного метода дает наиболее объективную информацию о динамическом состоянии дефектов и соответственно о прочности и надежности конструкций [1–6].

Электрические сигналы, полученные с i -го ПАЭ и усиленные соответствующим предварительным усилителем с коэффициентом усиления $K = 100$, поступают в i -й измерительный канал диагностической АЭ-системы, которая «прослушивает» ту часть конструкции, которая находится внутри пьезоантенны. В измерительном канале производится фильтрация, дальнейшее усиление и преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую для последующего ввода в компьютер.

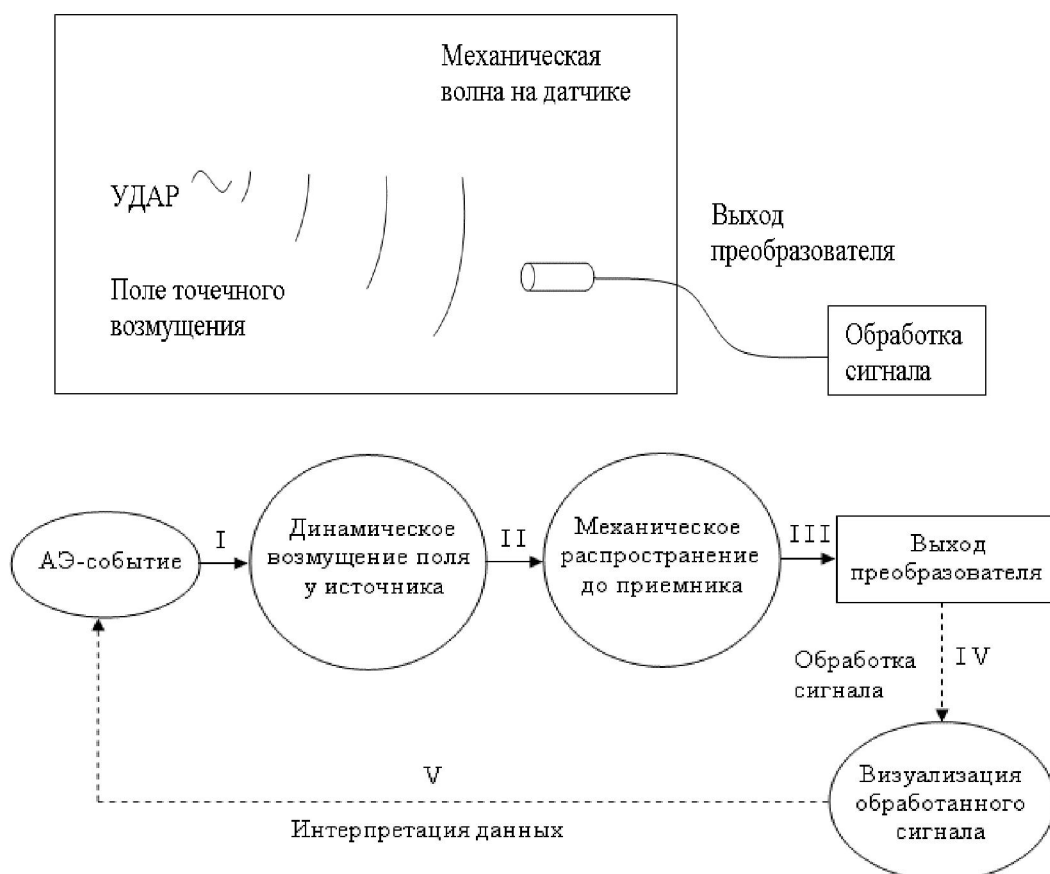


Рис. 1. Цепь анализа сигналов АЭ

Основными информативными параметрами сигнала АЭ является энергия, число импульсов, суммарный счет, активность, мощность, крутизна переднего фронта и т.д. На рис. 1 показана цепь анализа сигналов АЭ.

Метод АЭ является перспективным методом технической диагностики. Зародившаяся волна напряжений распространяется в материале конструкции, поступает на вход ПАЭ, где преобразуется в электрический сигнал. Сигнал проходит на вход регистрирующей аппаратуры, усиливается и преобразуется из аналогового в цифровой, затем вводится в компьютер.

В настоящее время известны принципы построения сосредоточенных и распределенных АЭ-систем [1, 6, 11]. В сосредоточенных системах каналы внутри модуля регистрации и предварительной обработки информации являются функционально независимыми и не могут быть разнесены на большие расстояния для контроля протяженных объектов.

Прочностные испытания протяженных объектов потребовали создания распределенных систем, в которых каналы представляют собой функциональные узлы, последовательно соединенные между собой и работающие на одну линию связи. Методы преобразования и передачи информации в них отличаются от тех, что используются при создании сосредоточенных АЭ-систем [11]. В распределенных системах вместо формы сигналов сохраняется и передается ряд параметров, характеризующих сигнал АЭ, что увеличивает пропускную способность канала и повышает точность его локализации.

Современные АЭ-системы измеряют как отдельные параметры сигнала (амплитуду, длительность, энергию, осцилляции, время прихода, время нарастания и т.д.), так и форму оцифрованного сигнала. Анализ совокупности параметров АЭ-сигналов позволяет определять координаты источника, его тип и степень опасности. Расчет координат дефектов по разности времен прихода (РВП) сигналов АЭ на датчики пьезоантенны приводит к большому разбросу точек локализации и погрешностям до 5–10 %. Это связано с тем, что при АЭ-контроле более 90 % зарегистрированных сигналов относится к акустическим шумам и помехам, которые приводят к появлению ложных сигналов, не связанных с измерением структуры материала ОК. Причем форма, спектр, основные информативные параметры сигналов АЭ и помех часто совпадают и их сложно разделить. Поэтому данный метод требует тщательной методической проработки. Большую сложность представляет выделение сигналов АЭ, относящихся к конкретным механизмам разрушения, и определение связи их основных параметров с размерами и типом разрушения [2].

Успехи в области микроэлектроники и компьютерной технологии позволили разработать более совершенные микропроцессорные диагностические АЭ-системы. В них наряду с записью формы сигналов и их анализом в режиме реального времени уменьшена погрешность локализации развивающихся дефектов до 5 %, поскольку по цифровой реализации более точно находится начало сигнала АЭ. Разработанные методы кластеризации повысили точность локализации дефектов в металлических конструкциях до 2–3 % [7–9].

На рис. 2, а показан внешний вид АЭ-системы СЦАД-16.03 с параллельно-последовательным принципом построения [16], которая используется при диагностике боковых рам и надрессорных балок грузового вагона, контроля котлов цистерн, мостовых конструкций и т.д. (Сертификат RU.C.28.007.A № 19913/2, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 18892-05). В основе применяемой в АЭ-системе СЦАД-16.03 методики лежат результаты статистической обработки значительного банка данных, полученных системой при АЭ-контроле ряда объектов. На рис. 2, б показана распределенная АЭ-система СЦАД-16.09Р (Сертификат RU.C.27.007.A № 21988, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 30141-05), предназначенная для контроля протяженных объектов [13–17].

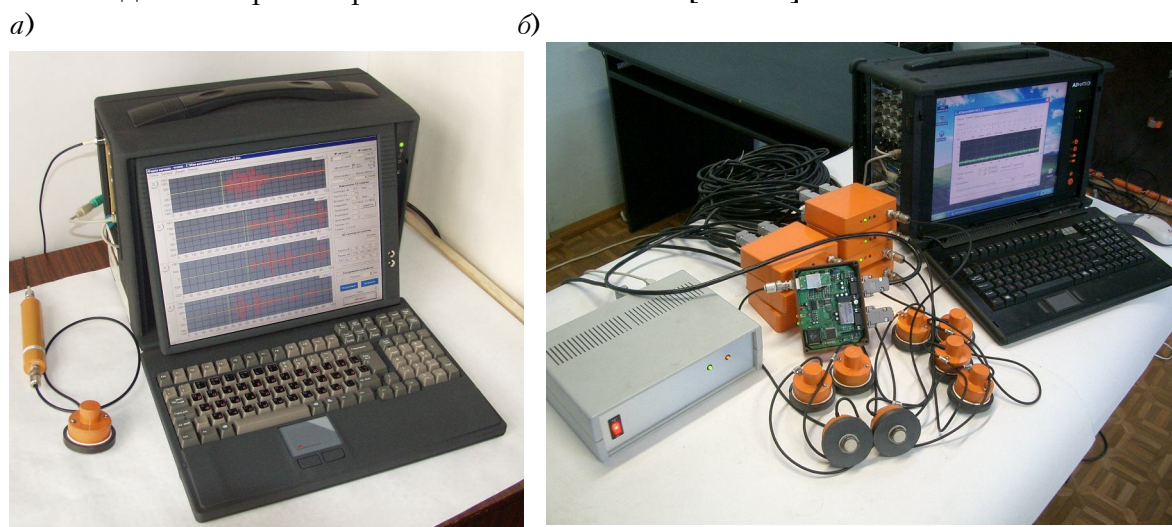


Рис. 2. Внешний вид АЭ-систем: а — СЦАД-16.03; б — СЦАД-16.09Р

Акустико-эмиссионный контроль литых деталей тележки грузового вагона

Основной особенностью НК литых деталей железнодорожного транспорта является сильное затухание звуковой волны, что объясняется повышенной пористостью и крупнозернистостью структуры материала [1].

Применительно к железнодорожному транспорту метод АЭ впервые был применен при контроле боковых рам и надрессорных балок. Надрессорные балки и боковые рамы, изготавливаемые в основном из стали 20 ФЛ литьем, представляют коробчатые конструкции переменной толщины с множеством ребер жесткости и технологических отверстий неправильной формы, изменяющиеся от детали к детали. При разработке методики АЭ-контроля боковых рам и надрессорных балок решалась сложная задача, связанная с выделением полезных сигналов на фоне значительного уровня шумов, появляющихся в местах приложения нагрузки, а также реакции опоры. Причиной этих шумов являются микроразрушения, происходящие под действием внешней силы на поверхности ОК.

В обеспечении достоверности результатов АЭ-контроля важную роль играют методы нагружения ОК. При испытании боковых рам и надрессорных балок необходимо создавать нагрузки, соответствующие их реальным условиям эксплуатации. В контролируемых зонах обеспечивается определенный уровень деформаций растяжения, при котором появляются акустические сигналы определенной активности, характеризующие дефектные зоны.

На рис. 3 приведен внешний вид стендов для нагружения боковой рамы и надрессорной балки, установленных в депо.

При расчете диагноза система по результатам локализации выделяет группы сигналов, каждой из которых соответствует один источник акустической активности. Для таких источников рассчитывается интегральный коэффициент опасности R и его основные параметры (амплитуда A , частота F и время нарастания $t_{\text{нараст}}$).

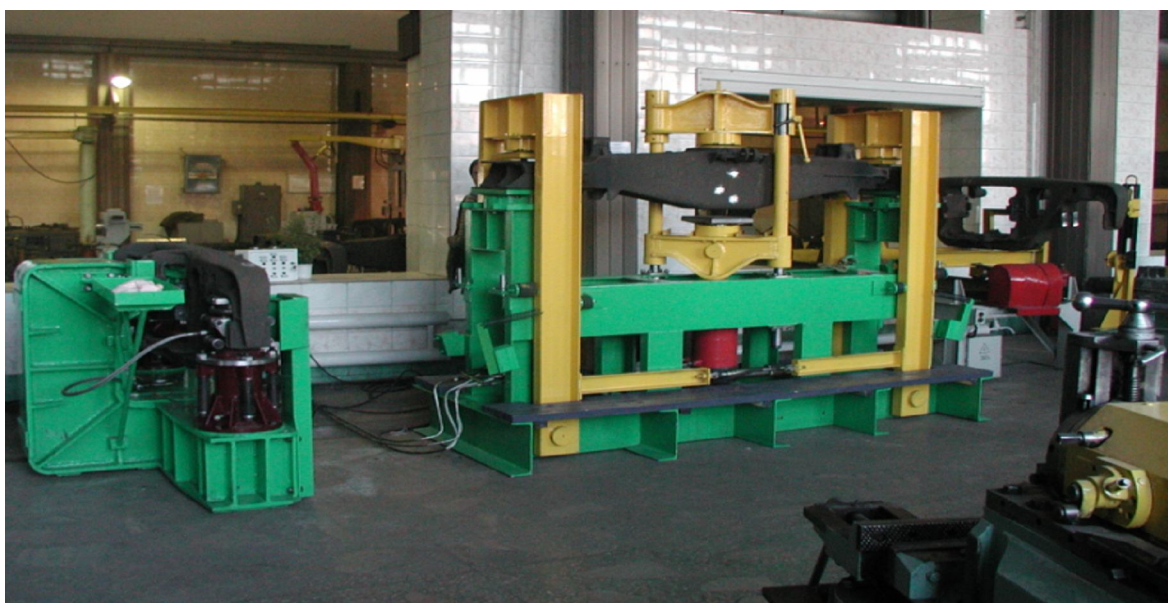


Рис. 3. Внешний вид участка для АЭ-контроля боковых рам и надрессорных балок в железнодорожном депо

Коэффициент опасности одного сигнала находится из соотношения

$$R_i = (1 + R_A(A_i) + R_f(F_i) + R_{t_{\text{нараст}}}(t_{\text{нараст}})).$$

Он принимается равным максимальному из R_i для отдельных групп (т.е. наиболее развитому источнику). Зависимости $R_A(A_i)$, $R_f(F_i)$ и $R_{t_{\text{нараст}}}(t_{\text{нараст}})$ определяются для простоты как кусочно-линейные функции и имеют различный вид для каждого ОК. Вид функций подбирается по результатам корреляционного анализа набора сигналов из банка данных с априорно заданным коэффициентом опасности.

Обработка полученных результатов показала, что даже опасные дефекты в деталях, подвергаемых АЭ-диагностике, могут быть по разным причинам, относительно слабыми источниками упругих волн, которые регистрируются приемниками. Это связано с протяженными зонами контроля, грубой структурой литого металла, невысокими нагрузками, расположением и видом источника АЭ в ОК [1–7]. Браковке или дополнительному освидетельствованию подлежат детали, при диагностике которых зарегистрировано 3...5 сигналов из локализованного участка.

Испытания боковых рам и надрессорных балок, проведенные в депо, показали, что использование метода АЭ позволяет не только определять координаты, но и тип дефекта, степень его опасности, а также производить оценку остаточного ресурса по алгоритму с использованием АЭ-информации. В процессе испытаний разработаны методики и программное обеспечение, позволяющие выставлять значение амплитуды, меньше которой сигналы АЭ не принимаются системой к рассмотрению, предложена методика отбраковки сигналов по спектральным характеристикам. На рис. 4 приведен пример такой браковки для боковой рамы.

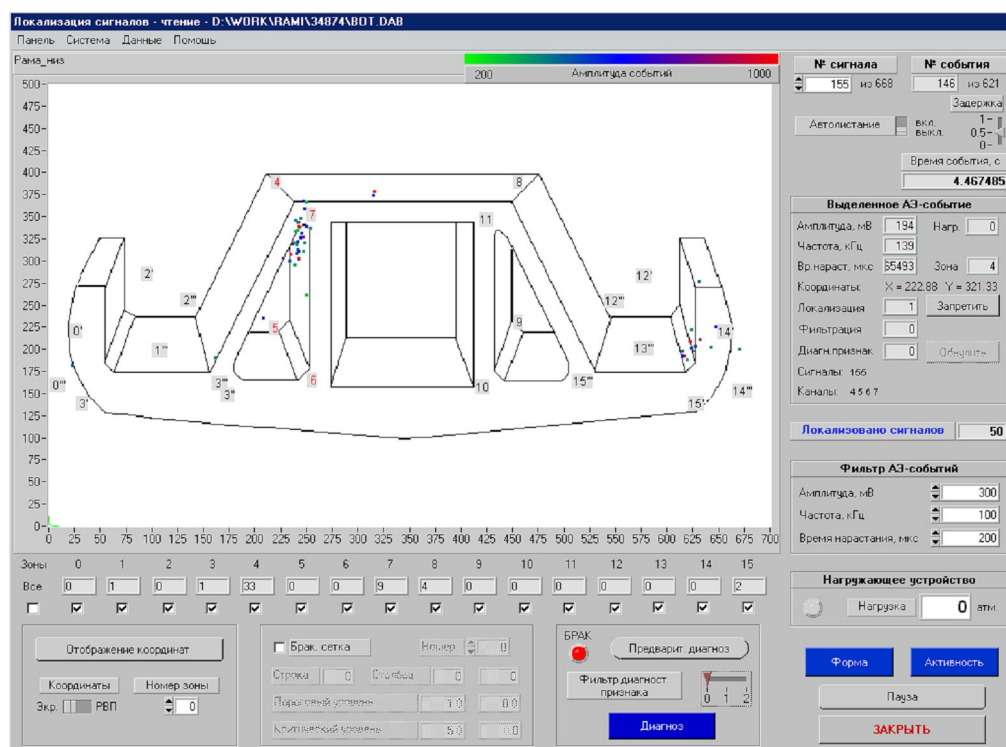


Рис. 4. Боковая рама № 3487, проконтролирована 08.01.2003, диагноз — «Брак технологического окна»

Для определения степени опасности дефекта и остаточного срока службы ОК используются зависимости параметров сигналов АЭ от степени развития дефекта усталостного типа, найденные в результате статистической обработки значительного числа экспериментальных данных. Определение степени опасности производится в режиме реального времени. При наличии критически опасных источников сигналов АЭ ОК бракуется [9, 10].

Акустико-эмиссионный контроль нефтеналивных и газовых цистерн

Железнодорожные цистерны являются главными средствами при транспортировке жидкостей и газов. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию ударных нагрузок при остановке, трогании, выполнении маневренных работ, в результате чего в их материале происходит образование различного рода дефектов. Самым распространенным типом дефекта является коррозия, как внутренняя, так и внешняя. Внутренняя коррозия может быть представлена несколькими формами: уменьшением толщины, питтинговой коррозией, образованием раковин, коррозионным растрескиванием под напряжением и т.д. Котел цистерны подвергается и внешней коррозии, которая часто находится под слоем изоляции. Она может появляться вокруг горловины, в местах, где при заливке продукт попадает на котел.

Образование трещин в котлах цистерн — часто встречающийся дефект, поскольку нагрузки создают большие напряжения, приводящие к появлению трещин в сварных швах, в районе подушек и т.д. Трещины часто начинаются от небольших дефектов в конструкции, таких как подрез сварного шва, неполное сплавление шва, непровар, шлаковое включение. В процессе эксплуатации вследствие усталости или повторного перенапряжения трещины начинают расти, что может вызвать разрушение конструкции.

При контроле котлов цистерн особую значимость приобретает решение задачи по выявлению растущих несквозных и неразвивающихся сквозных дефектов. Их обнаружение традиционными методами течеискания и дефектоскопии требует длительного времени. При использовании ультразвукового метода необходима тщательная зачистка всех сварных швов и сканирование датчиком всей поверхности котла.

В процессе проведения прочностных испытаний производится нагружение котла за счет создания избыточного давления. Перед проведением гидроиспытаний измеряется затухание акустических сигналов на границах контролируемой зоны. При этом на поверхность котла устанавливаются 16 ПАЭ и определяются калибровочные характеристики (коэффициенты затухания, скорости распространения сигналов АЭ по различным направлениям). Использование метода АЭ в процессе гидроиспытаний позволяет контролировать целостность котла и выявлять имеющиеся дефекты. При этом обнаруживаются практически все виды дефектов на ранней стадии их зарождения и развития и при этом не требуется вывода ОК из эксплуатационного режима. До начала испытаний решаются задачи методического характера и устанавливаются критерии, определяющие наступление критической ситуации в зоне контроля.

При расчете коэффициентов затухания учитываются коэффициент передачи соответствующего канала, чувствительность ПАЭ, качество обработки поверхности ОК под датчиком. Коэффициент затухания M определяется исходя из предпо-

ложения о том, что амплитуда сигнала АЭ затухает по экспоненциальному закону

$$A_i = Ae^{-Mx_i},$$

где A_i — амплитуда сигнала АЭ, зарегистрированная в месте установки i -го датчика; A — амплитуда сигнала АЭ в месте излома грифеля калибровочного карандаша; M — коэффициент затухания; x_i — расстояние между местом излома грифеля калибровочного карандаша и i -м ПАЭ.

Анализ коэффициентов затухания, полученных при исследовании конструкции котла, заполненного водой, показывает, что вдоль прокатки листа он составляет $M_v = 0,9$, а в перпендикулярном направлении изменяется в диапазоне от $M_{п1} = 1,75$ (на верхнем листе) до $M_{п2} = 3,0$ (на боковых стенках). Экспериментальные результаты подтверждают, что в котле, заполненном водой, сигнал АЭ быстро затухает, так как происходит его демпфирование водой. Поэтому время прихода сигналов АЭ на ПАЭ определяется сложно, что приводит к большим погрешностям при расчете координат дефектов.

Для оценки степени опасности дефектов на испытываемый котел наносится координатная сетка (рис. 5). Размер шага координатной сетки выбирается исходя из геометрических размеров ОК. Рекомендуемый размер шага для объектов, имеющих размер 1×1 м, составляет 20–30 мм. Из анализа результатов локализации устанавливаются браковочные уровни. Уровень значимости для каждого квадрата сетки — это число сигналов АЭ, участвующих в определении их суммарного счета. Так, например, при уровне значимости 3 в рассмотрении будут участвовать только те квадраты, в которые попало 3 и более локализованных сигналов АЭ. Второй уровень заключается в установлении общего числа локализованных сигналов в смежных клетках. Как правило, браковочные уровни устанавливаются исходя из статистических данных, полученных при испытании конкретного ОК. Использование данного критерия позволяет автоматизировать анализ полученных данных и выдавать суждение о пригодности изделия к дальнейшей эксплуатации (рис. 6) [18].

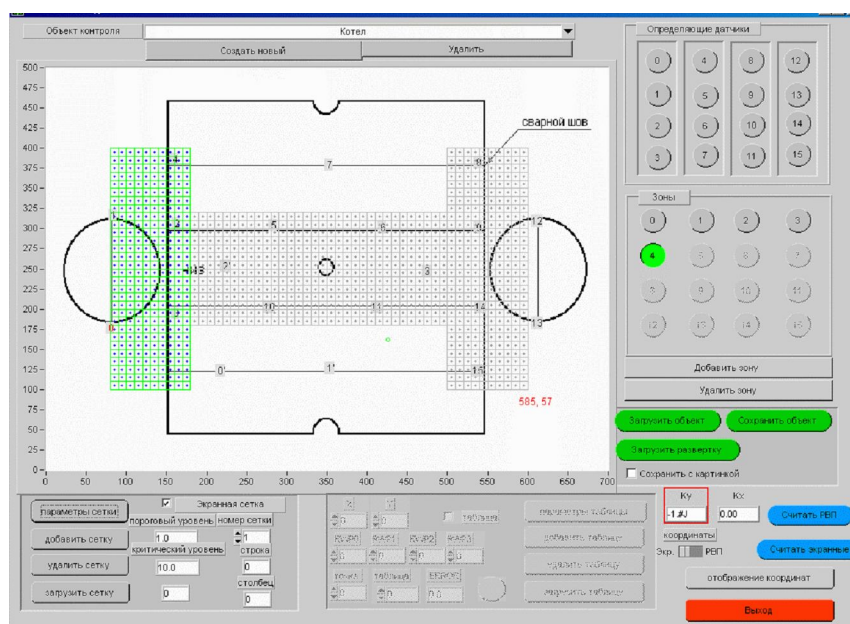


Рис. 5. Нанесение координатной сетки на развертку котла цистерны

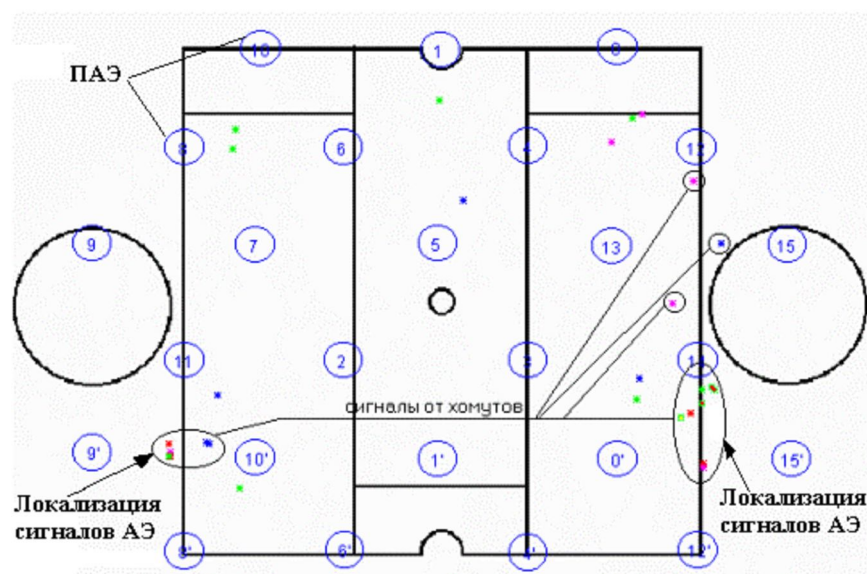


Рис. 6. Локализация сигналов АЭ на развертке котла цистерны

Акустико-эмиссионный контроль колесных пар грузовых вагонов

Колесная пара является одним из основных элементов вагона и ее прочность во многом определяет безопасность движения [2–4]. В процессе эксплуатации оси колесных пар кроме вертикальных нагрузок на шейки воспринимают дополнительно разнообразные внешние усилия (боковые удары на гребни колес, тормозное нажатие на колеса, воздействие неисправности пути, рессорного подвешивания и дефектов колес по кругу катания и т.д.). Долговечность осей во многом зависит от величины напряжений и количества циклов их изменения. Эффективность АЭ-контроля во многом определяется характером напряженного состояния и уровнем напряжений, создаваемых в ОК. К основным факторам, влияющим на долговечность колесных пар, относятся наличие термических трещин и других концентраторов напряжений в осях, дефекты колес по кругу катания (раковины, ползуны). Данные факторы могут привести к перенапряжениям в различных сечениях осей, что связано с зарождением и развитием усталостных трещин на ранней стадии эксплуатации осей. Это ведет к преждевременному выходу последних из строя.

В [3] предложен способ АЭ-контроля колесных пар грузового вагона, при котором ПАЭ устанавливаются на диски колес и ось колесной пары. После последовательного приложения вертикальной нагрузки к оси, горизонтальной нагрузки к дискам колес и совместных нагрузок осуществляется локализация сигналов АЭ, после чего колесную пару поворачивают на угол $\varphi = \frac{360^\circ}{n}$, где n — число поворотов, определяемых из условия, что деформации ε в контролируемой зоне колесной пары должны быть не менее $0,87\varepsilon_{\max}$, где $\varepsilon_{\max}$ — максимальная деформация в наиболее нагруженном сечении колесной пары. Причем местоположение дефекта при повороте колесной пары на угол φ будет также смещаться на этот угол, а местоположение сигналов от прикладываемой нагрузки будет оставаться неизменным. Кроме того, если при повороте центр

кластера в зоне, где колесо опирается на рельс, смещается на угол поворота, то в этой зоне также находится дефект.

Тензометрирование колесной пары, проводимое для поиска оптимального соотношения между временем контроля и его качеством, позволило определить оптимальный угол поворота, который составил 60° . При таком угле любой случайно расположенный относительно первоначального положения дефект гарантированно попадает в зону наибольших деформаций растяжения.

На рис. 7 приведен пример локализации дефекта при автоматическом контроле колесной пары.

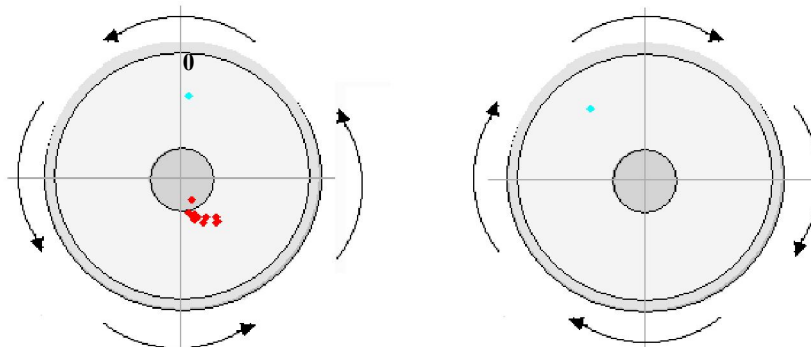


Рис. 7. Локализация сигналов АЭ в протоколе испытаний при автоматическом контроле колесной пары

АЭ-контроль колесных пар показал, что точность локализации сигналов АЭ невысокая в связи с их малой амплитудой и размытым передним фронтом. При автоматической установке ПАЭ на колеса захватывается большая зона контроля. Поскольку напряжения в колесе при нагружении небольшие, то АЭ-сигнал от дефекта имеет низкую амплитуду и большой путь прохождения до ПАЭ, в результате чего он затухает и имеет размытый передний фронт. Поэтому при контроле колес локализация осуществляется со значительной погрешностью. Попытка повысить точность локализации, увеличив коэффициент усиления канала АЭ-системы СЦАД-16.03 до максимального ($K = 250$), привела к росту уровня шумов и потока паразитных сигналов. Успешное решение задачи локализации дефектов в колесах при автоматической установке датчиков возможно благодаря использованию более чувствительных ПАЭ.

Литература

1. *Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии* / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др. М.: Машиностроение, 2004. 367 с.
2. *Антипенко Е.И., Висловский Н.Г., Кельрих М.Б.* Оценка эффективности метода акустической эмиссии при техническом диагностировании объектов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2004. № 4. С. 11–14.
3. *Патент РФ № 2296320, МПК G 01 N 29/04.* Акустико-эмиссионный способ диагностирования колесных пар железнодорожного подвижного состава и устройство для его осуществления / Л.Н. Степанова, В.В. Ивлиев, В.В. Муравьев и др. Оpubл. 27.03.2007. Бюл. № 9.
4. *Степанова Л.Н., Кареев А.Е., Кабанов С.И. и др.* Особенности преобразования и передачи информации в распределенных акустико-эмиссионных системах // *Контроль. Диагностика*. 2006. № 5. С. 31–42.
5. *Степанова Л.Н., Ивлиев В.В., Лебедев Е.Ю. и др.* Методика акустико-эмиссионного контроля колесных пар грузового вагона // *Дефектоскопия*. 2007. № 4. С. 67–75.

6. *Ивлиев В.В., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. и др.* Акустико-эмиссионный контроль колесных пар грузовых вагонов // Контроль. Диагностика. 2007. № 1. С. 15–20.
7. *Степанова Л.Н., Тимофеев Д.И., Кареев А.Е. и др.* Многоканальная акустико-эмиссионная система с автоматическим контролем качества установки датчиков // Контроль. Диагностика. 2005. № 6. С. 6–15.
8. *Степанова Л.Н., Кареев А.Е.* Анализ погрешностей определения координат источников сигналов акустической эмиссии для повышения точности их локализации // Контроль. Диагностика. 2003. № 8. С. 13–18.
9. *Степанова Л.Н., Кареев А.Е.* Разработка метода динамической кластеризации сигналов акустической эмиссии для повышения точности их локализации // Контроль. Диагностика. 2003. № 6. С. 15–21.
10. *Степанова Л.Н., Кареев А.Е.* Использование кластерного анализа для определения связи сигнала акустической эмиссии с характером разрушения в металлических образцах // Контроль. Диагностика. 2005. № 9. С. 18–23.
11. *Муравьев В.В., Степанова Л.Н., Кареев А.Е.* Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 63–68.
12. *Патент РФ № 2299429, МПК G 01N 29/14.* Способ контроля качества установки акустических преобразователей на металлической конструкции и устройство для его осуществления / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др. Оpubл. 2007. Бюл. № 14.
13. *Патент РФ № 2240551, МКИ G 01N 29/04.* Способ диагностирования мостовых металлических конструкций и устройство для его осуществления / Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев, В.М. Круглов и др. Оpubл. 2004. Бюл. № 18.
14. *Патент РФ № 2300761, МПК G 01N 29/04.* Многоканальное акустико-эмиссионное устройство для контроля изделий / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др. Оpubл. 2007. Бюл. № 16.
15. *Патент № 2217741, МКИ G 01N 29/04.* Многоканальная акустико-эмиссионная система диагностики конструкций / Л.Н. Степанова, А.Н. Серьезнов, В.М. Круглов и др. Оpubл. 2003. Бюл. № 33.
16. *Муравьев В.В., Степанова Л.Н., Бобров А.Л. и др.* Акустико-эмиссионный контроль котлов железнодорожных цистерн // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 4 (26). С. 69–71.