

УДК 620.19

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Н.П. Лузина

Классификация источников акустической эмиссии (АЭ) при выполнении контроля производственного объекта является одним из наиболее важных и принципиальных этапов АЭ-метода. Рассмотрены основные критерии оценки источников акустической эмиссии. Результаты анализа полученных из эксперимента данных показывают выполнение оценочных критериев при повторном нагружении. Также приводятся результаты анализа интенсивности АЭ-импульсов при полном испытании.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, график нагружения, критерии акустической эмиссии, давление, преобразователи (датчики) акустической эмиссии.

Введение

Проблема обеспечения безопасной эксплуатации и эффективности работы сложных технических систем и оборудования опасных производственных объектов имеет в настоящее время особое значение. Существенный износ основного промышленного оборудования предполагает поиск новых подходов к решению задач, стоящих перед технической диагностикой.

Многообразие методов, применяемых в контроле качества материалов в промышленности, дает широкие возможности для всестороннего исследования объектов. Комплексное использование методов контроля позволяет гарантировать максимальную эффективность превентивных мер относительно различных дефектов. Обычно в диагностических исследованиях выделяют разрушающий и неразрушающий контроль. В нефтегазовой промышленности преимущественно используются разнообразные методы неразрушающего контроля (МНК). МНК базируются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры контролируемого объ-

екта и т.п. Все МНК являются косвенными методами. Метода, который бы мог обнаружить самые разнообразные по характеру дефекты, нет. Каждый отдельно взятый МНК решает ограниченный круг задач технического контроля.

По характеру взаимодействия упругих колебаний с контролируемым материалом акустические методы подразделяют на следующие основные методы: прошедшего излучения (теневого, зеркально-теневого); отраженного излучения (эхо-импульсный); резонансный; импедансный; свободных колебаний.

Акустическая эмиссия (АЭ) отличается от большинства МНК в двух ключевых аспектах. Во-первых, источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, т.е. метод является пассивным (а не активным, как большинство других методов контроля). Во-вторых, в отличие от других методов АЭ обнаруживает движение дефекта, а не статические неоднородности, связанные с наличием дефектов, т.е. АЭ обнаруживает развивающиеся, а потому наиболее опасные дефекты.

Немалое преимущество метода АЭ связано с возможностью проведения неразрушающего контроля всего объекта целиком за один цикл нагружения. Данный метод является дистанционным, он не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов. Необходимо просто правильным образом расположить нужное число датчиков и использовать их для осуществления локации источника волн напряжений. Возможности, связанные с дистанционным использованием метода, дают большие преимущества по сравнению с другими методами контроля, которые требуют, например, удаления изоляционных оболочек, освобождения контейнеров контроля от внутреннего содержания или сканирования больших поверхностей.

Акустико-эмиссионный МНК основан на регистрации и последующей обработке параметров акустических сигналов ультразвукового диапазона и реализуется в процессе активного нагружения контролируемого объекта. Для проведения АЭ-диагностики к объекту контроля должны быть приложены статические и/или динамические нагрузки за счет повышения давления при гидравлических или пневматических испытаниях. Основной задачей АЭ-контроля является оценка технического состояния объекта по параметрам сигналов, отображающих информацию об источниках АЭ.

Существует проблема классификации источников АЭ и критериев оценки технического состояния объекта. Это специфично для метода АЭ, поскольку он позволяет связать параметры АЭ с параметрами предельного состояния объекта, которое характеризуется потерей прочности и его разрушением. Таким образом, разработка критериев предельного состояния объекта по параметрам АЭ является принципиальным моментом. Сам тип предельного состояния определяется проектировщиком оборудования и наступает при определенных условиях воздействия на объект. Разработчик методики АЭ-контроля должен получить набор параметров АЭ, характеризующих заданное предельное состояние. Критерием предельного состояния, как правило, является неравенство, которое удовлетворяется при некотором сочетании параметров АЭ и нагрузки.

Целью предлагаемого исследования является анализ выявленных областей повышенной АЭ-активности и классификация их по критериям предельного состояния при проведении акустико-эмиссионного контроля.

Исследуемый объект и эксперимент

Аппарат для испытания представляет собой вертикальный сварной сосуд, состоящий из цилиндрической обечайки с приварными эллиптическими днищами длиной 5806 мм, диаметром 2000 мм, толщиной стенки 16 мм. Материал основных элементов – ВСт3. Рабочее давление равно 1,2 МПа. Тип и условия испытаний: гидравлическое; рабочее тело – вода; температура объекта +40°C, окружающей среды –1°C; марка нагружающего оборудования – поршневой насос; испытательное давление 1,52 МПа.

После выполнения подготовительных и настроечных работ производится нагружение объекта. В отличие от обычного гидро- или пневмоиспытания, нагружение при акустико-эмиссионном испытании производится по специальному графику, представленному на рис. 1. Как видно из графика, нагружение состоит из предварительного (на котором проверяется работоспособность всей аппаратуры, качество подготовки объекта к испытаниям, а также выявляются источники помех, связанные с трением опор) и рабочего (основного) испытания.

Предварительные испытания проводят при циклическом нагружении в начальной стадии нагружения в диапазоне $(0-0,25) P_{\text{раб}}$. По достижении давления $0,25 P_{\text{раб}}$ (в данном случае 0,3 МПа) делается окончательная проверка работоспособности всего аппаратурного комплекса, уточняются и корректируются основные параметры АЭ-контроля и в течение 10 мин проводится запись шумов.

Рабочие испытания проводят при нагружении от $0,25 P_{\text{раб}}$ до $P_{\text{исп}}$. Нагружение в этом диапазоне является наиболее ответственным и проводится при полном взаимодействии оператора – машиниста компрессора (насоса) и специалистов группы АЭ-контроля. На данном участке нагружения назначаются промежуточные выдержки.

При ступенчатом (со сбросом давления) нагружении сосуда видно, что АЭ при повторных нагружениях начинает регистрироваться по достижении максимальных нагрузок предыдущего нагружения (эффект Кайзера). Следовательно, можно сделать вывод, что при нагружении механические шумы не

Для приема и преобразования волн напряжений в электрические сигналы АЭ используются резонансные пьезоэлектрические преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) типа R15I-AST с резонансной частотой 150 кГц. Параметры преобразователей сохраняют стабильность в температурном диапазоне от – 45°С до + 85°С. Диаметр преобразователя составляет 29 мм. АЭ-преобразователи устанавливаются на поверхность контролируемого объекта через слой контактной среды и удерживаются с помощью магнитных держателей. При АЭ-контроле объектов из немагнитных материалов преобразователи крепятся при помощи клейкой ленты.

Преобразователи АЭ размещают на поверхности объекта, как правило, равномерно. Существует несколько схем размещения преобразователей АЭ: треугольная, прямоугольная, произвольная. В данном случае выбрана треугольная схема размещения датчиков, представленная на рис. 2.

После выполнения анализа качества данных и выбора оценочного диапазона нагружения данные АЭ контроля сравниваются с оценочными критериями, описанными ниже. Данные критерии определяют для каждого канала и отображают состояние контролируемой ПАЭ зоны. Если при оценке состояния объекта имеет место нарушение приведенных критериев, то должен быть выполнен дополнительный анализ данных для определения местоположения, активности и опасности источников АЭ.

Результаты анализа представлены в таблице, показывающей выполнение оценочных критериев при повторном нагружении. При построении таблицы приняты следующие допущения:

1. за допустимое количество импульсов на выдержках давления принято 7 импульсов на выдержку – оценка проводится с учетом допустимого уровня помех.
2. допустимое значение суммарной длительности АЭ-сигналов – 18542 мкс.
3. оценка скорости приращения суммарной энергии импульсов АЭ проводится для каналов, зарегистрировавших более 10 импульсов.

№ ПАЭ	Критерий 1					Критерий 2	Критерий 3	Критерий 4	Критерий 5	Выполнение критериев
	Количество импульсов (шт.) на выдержках давления, МПа									
	0,84	1,12	1,2	1,32	1,49					
1	-	-	-	-	1	1711	5	0	не учитывается	выполнены
2	-	-	-	1	5	11643	31	2	нарастает	не выполнены
3	-	-	1	1	3	71374	125	4	нарастает	не выполнены
4	-	-	-	-	4	33459	46	5	нарастает	не выполнены
5	-	-	-	1	10	29591	52	4	нарастает	не выполнены
6	1	-	-	-	1	13867	19	0	нарастает	не выполнены
7	-	2	-	1	7	34721	68	0	нарастает	не выполнены
8	-	1	-	1	14	51319	105	9	нарастает	не выполнены
9	-	1	1	-	8	23582	64	4	нарастает	не выполнены
10	-	-	-	-	-	6628	12	0	нарастает	не выполнены
11	-	-	1	3	6	13361	34	3	нарастает	не выполнены

Таблица. Выполнение критериев при повторном нагружении (невыполненные критерии выделены жирным шрифтом)

Анализ данных

Принципиальным моментом является разработка критериев предельного состояния объекта по параметрам АЭ. В основу классификации положены значения параметров, которые в максимальной степени отражают техническое состояние объекта.

На рис. 3 представлены графики зависимостей основных параметров АЭ-сигналов, показывающих взаимосвязи между основными информативными параметрами при АЭ-контроле – амплитуда, энергия, длительность АЭ-импульса, импульс АЭ, время регистрации, регистрируемый канал.

Проведем содержательный анализ данных в соответствии с критериями для повторного нагружения.

Критерий 1: количество импульсов, зарегистрированных на выдержках давления, не должно превышать 7 импульсов на выдержку (с учетом допустимого уровня помех – 5 импульсов) [1]. Критерий 1 не выполнен для ПАЭ № 9 (незначительное превышение критериальных значений) и ПАЭ № 5, 8 (значительное превышение критериальных значений).

Критерий 2: изменение суммарной длительности импульсов, зарегистрированных в процессе нагружения, не должно превышать 2500 мкс на канал при повышении нагрузки на 10% от рабочей. Допустимое значение суммарной длительности АЭ-сигналов, накопленной при повторном нагружении каждым каналом, рассчитывается по формуле

$$\sum D_{\text{доп}} = \left[\frac{(P_{\text{max}} - P_{\text{сб}})}{0,1 \times P_{\text{раб}}} \right] \times 2500, \quad (1)$$

где $\sum D_{\text{доп}}$ – допустимая суммарная длительность АЭ-сигналов, мкс; P_{max} – максимальное давление второго нагружения, МПа; $P_{\text{сб}}$ – минимальное давление второго нагружения (после сброса), МПа; $P_{\text{раб}}$ – рабочее давление, МПа.

$$\sum D_{\text{доп}} = \left[\frac{(1,49 - 0,6)}{0,12} \right] \times 2500 = 18542 \text{ мкс}.$$

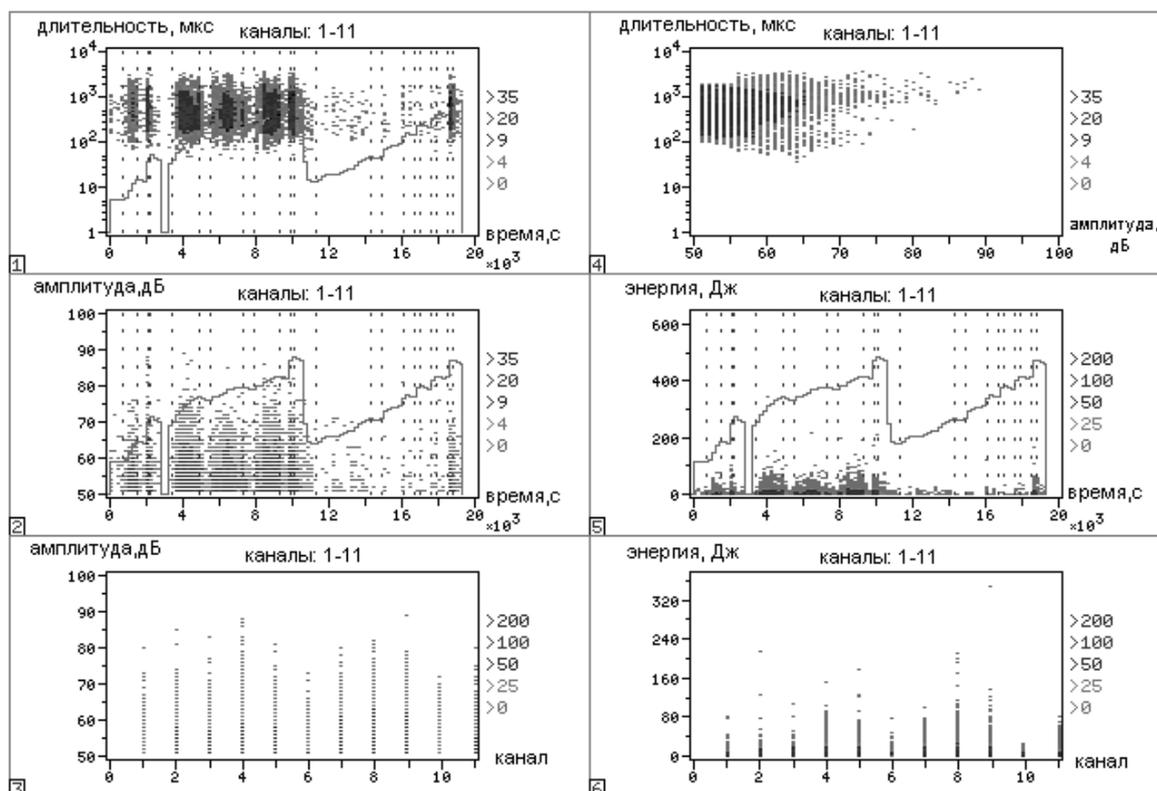


Рис. 3. Графики зависимостей основных параметров АЭ-сигналов аппарата: 1, 2, 4 – распределение длительности, амплитуды и энергии импульсов АЭ во времени; 5, 6 – распределение амплитуды и энергии АЭ-сигналов по каналам; 3 – корреляционная зависимость длительности импульсов от амплитуды (корреляция Капистрано)

Критерий 3: количество импульсов АЭ не должно превышать 60 импульсов на канал. Критерий 3 не выполнен для ПАЭ № 3, 7, 8, 9 [2, 3].

Критерий 4: амплитуда всех импульсов не должна превышать 65 дБ. Критерий 4 не выполнен для ПАЭ № 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11 [4].

Критерий 5: скорость приращения суммарной энергии импульсов не должна расти с ростом нагрузки [1]. Оценка скорости приращения суммарной энергии импульсов АЭ проводится для каналов, зарегистрировавших более 10 импульсов. Критерий 5 не выполнен для ПАЭ № 2–11.

Таким образом, при повторном нагружении аппарата критерии оценки не выполнены для ПАЭ № 2–11. Оценочные критерии, приведенные в таблице, являются «критериями гарантированной приемки» объекта, и если при оценке состояния имеет место их нарушение, то производится дополнительный анализ данных и анализ интенсивности.

При анализе АЭ-данных аппарата были выявлены источники повышенной активности в области ПАЭ № 3, 5, 8 (класс А и В на повторном нагружении) [4–5]. Соотнесение расположения этих источников с разверткой аппарата показало, что они находятся в области сварных швов № 1, 10 и пересечения сварных швов № 7, 8, 9 соответственно (рис. 2). По результатам предварительного анализа данных АЭ-контроля было рекомендовано провести следующий дополнительный контроль: капиллярную дефектоскопию сварного шва № 10 (изнутри); капиллярную дефектоскопию пересечения сварных швов № 7, 8, 9 (изнутри); ультразвуковую дефектоскопию пересечения сварных швов № 7, 8, 9.

До проведения АЭ-контроля была проведена капиллярная дефектоскопия сварного шва № 1 (изнутри). Дефектов не обнаружено. При проведении капиллярной дефектоскопии пересечения сварного

шва № 8 с № 7, 9 (изнутри) на сварном шве № 8 обнаружены дефекты длиной 30 мм. Дефекты были устранены, и произведена капиллярная дефектоскопия после ремонта сварного шва.

На сварном шве № 10 дефектов не обнаружено. При последующем гидроиспытании на прочность произошел пропуск в контрольное отверстие укрепляющего кольца тангенциального штуцера Ду 200. Был произведен ремонт сварного шва приварки тангенциального штуцера Ду 200 патрубка и укрепляющего кольца. Причина ремонта – сквозные дефекты в сварном шве приварки тангенциального штуцера Ду 200 к корпусу.

Выводы

Анализ данных АЭ-контроля аппарата показал, что обнаруженные методом ультразвукового контроля (УЗД) дефекты в сварном шве № 3 при гидроиспытании проявляют АЭ-активность, не характерную для развивающихся дефектов. Проведенный анализ интенсивности («не выше» класса А на повторном нагружении) [6, 7], анализ данных на выдержках, а также анализ локационной картины источников АЭ показал, что выявленные источники в зоне ПАЭ № 2, 4, 6, 7, 9–11 не являются развивающимися дефектами, имеют невысокую активность и должны быть отмечены для сравнения с результатами будущих испытаний. Полная обработка результатов АЭ-контроля и анализ данных аппарата подтвердила наличие источников повышенной АЭ-активности в зоне ПАЭ № 1, 2 (люк-лаза Ду 450). Последующий неразрушающий контроль подтвердил наличие дефектов в указанной зоне. Полученные результаты АЭ-контроля являются весьма весомыми для дальнейшей трактовки источников АЭ, для выполнения основных задач технического диагностирования в целом, а именно для контроля технического состояния объекта, поиска мест и определения причин отказа, прогнозирования технического состояния объекта.

На основании результатов описанных АЭ-испытаний также можно сделать более общие выводы.

- Сварные соединения обладают (по сравнению с основным металлом) большей неоднородностью, причем неоднородные участки более когерентны. Вследствие этого, несмотря на большую степень пластической деформации основного металла по сравнению со сварными швами, большую АЭ-активность показывают сварные соединения.
- Активность источников АЭ изменяется в процессе нагружения таким образом, что может поменяться показание наиболее опасного источника, при этом также изменяется класс источников и перераспределяется показание степени их опасности.

Приведенный пример иллюстрирует понятия полного сигнала АЭ и АЭ-образа объекта. В данном случае из АЭ-образа объекта выпали черты, связанные с пластической деформацией основного металла. Регистрировались только наиболее мощные импульсы от источников пластической деформации в сварных соединениях. Сигналы от пластической деформации основного металла могли также оказаться ниже порогового уровня. Таким образом, перед оператором, проводящим контроль, всегда стоит задача: по искаженному АЭ-образу объекта составить представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) этого объекта. Важным положением является то, что отсутствие АЭ-сигнала (но не пропуск сигнала) несет информацию о состоянии объекта и поэтому является элементом его образа.

Литература

1. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 09.06.03 г. – № 77.
2. Машиностроение: Энциклопедия. Т. III-7: Измерения, контроль, испытания и диагностика / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 460 с.
3. Юдин А.А., Иванов В.И. Связь сигнала акустической эмиссии с пластической деформацией металла // Проблемы прочности. – 1986. – № 6. – С. 103–105.
4. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах. – Т. 7. – Кн. 1. Метод акустической эмиссии / В.И. Иванов, И.Э. Власов. – М.: Машиностроение. – 2006. – 181 с.
5. Иванов В.И., Быков С.П. Классификация источников акустической эмиссии // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1985. – № 1. – С. 67–74.
6. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. – Введ. 01.01.1989. – М.: Госстандарт, 1989. – 14 с.
7. МР 38.18.015-94. Методические рекомендации по акустико-эмиссионному контролю сосудов, работающих под давлением, и трубопроводов нефтехимических производств. Согласованы с Госгортехнадзором РФ 06.06.94 г.

Лузина Наталья Петровна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, bagiran@mail.ru