

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621.315.612

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МИКРО- И НАНОДЕФЕКТОВ

А. Г. Шайко-Шайковский, А. Т. Богорош,
С. А. Воронов, К. В. Марченко

Акустическая эмиссия (АЭ) представляет собой явление генерации волн напряжений, вызванных внезапной перестройкой в структуре материала. Классическими источниками АЭ является процесс деформирования, связанный с ростом дефектов, например, трещины или зоны пластической деформации. Процесс генерации и обнаружения АЭ приведен на рис. 1. Внезапное движение источника эмиссии вызывает возникновение волн напряжений, которые распространяются в структуре материала и достигают пьезоэлектрического преобразователя. По мере роста напряжений активизируются многие из имеющихся в материале объекта источников эмиссии. Электрические сигналы эмиссии, полученные в результате преобразования датчиком волн напряжений, усиливаются, регистрируются аппаратурой и подвергаются дальнейшей обработке и интерпретации.

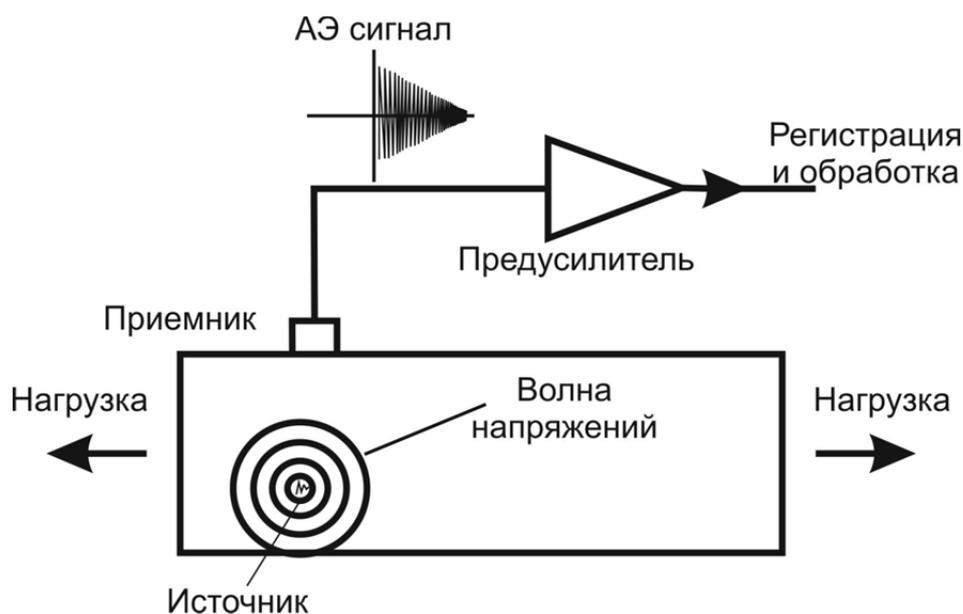


Рис. 1. Основные принципы акустической эмиссии

Итак, источником акустико-эмиссионной энергии служит поле упругих напряжений в материале. Без напряжений нет и эмиссии, поэтому АЭ контроль обычно проводится путем нагружения контролируемого объекта. Это может быть проверочный контроль перед запуском объекта, контроль изменений нагрузки во время работы объекта, испытания на усталость, ползучесть или комплексное нагружение. Очень часто конструкция нагружается произвольным способом. В этом случае использование АЭ контроля позволяет получать дополнительную ценную информацию о поведении конструкции под действием нагрузки. В других случаях эмиссия используется по причинам экономичности и безопасности. Для таких задач разрабатываются специальные процедуры нагружения и тестирования.

Акустическая эмиссия взаимосвязана с другими методами контроля. Так, акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля (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. Перечень основных отличий приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение характеристик АЭ метода контроля с другими методами НК

Акустическая эмиссия	Другие МНК
Обнаруживает движение дефектов	Обнаруживают геометрическую форму дефектов
Требует нагружения	Не требуют нагружения
Каждое нагружение уникально	Контроль воспроизводим
Чувствителен к структуре материала	Менее чувствительны к материалу
Менее чувствительны к геометрии	Более чувствительны к геометрии
Требует меньших усилий при проведении контроля продукции/процессов	Требуют больших усилий при проведении контроля продукции/процессов
Требует доступ только в местах установки датчиков	Требуют доступ ко всей поверхности объекта
Контролирует конструкцию за один цикл нагружения	Постепенное сканирование участков конструкции
Основные проблемы: сильное влияние шума	Основные проблемы: сильное влияние геометрии

Как известно, среди МНК не существует ни одного такого метода, который мог бы решить проблему оценки целостности объекта оптимально с учетом таких основных факторов, как получение наиболее низкой себестоимости работ и достижение технической адекватности результатов контроля. Лучшим решением проблемы является применение комбинации различных методов НК. Благодаря тому, что АЭ резко отличается по своим возможностям от традиционных методов контроля, на практике оказывается очень полезным совмещать АЭ с другими методами.

Основное 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.

Типичный пример использования АЭ заключается в определении местоположения дефектных участков, после чего для более точного определения природы дефектов используются другие МНК.

Явление акустической эмиссии наблюдается в широком диапазоне материалов, структур и процессов. Наиболее крупномасштабная АЭ связана с существованием сейсмической волн, в то время как наименьший масштабный уровень эмиссии вызывается дислокационным движением в нагруженных структурах материала. Между этими двумя видами АЭ существует широкий диапазон масштабов эмиссии, от лабораторных испытаний до промышленного контроля.

При лабораторных испытаниях использование АЭ контроля ставит своей целью изучение процессов деформации и разрушения материала. Метод позволяет в реальном времени по сигналам эмиссии наблюдать за поведением материала при нагружении. Поскольку АЭ отклик зависит от структуры материала и режима деформирования, разные материалы при различных способах

нагружения в сильной степени отличаются друг от друга по своему акустико-эмиссионному поведению. Существует два основных фактора, приводящих к высокой эмиссивности – это хрупкость и гетерогенность материала. Вязкие механизмы разрушения, например, слияние пор в мягких сталях, напротив, приводят к низкой эмиссивности (по энергии и числу сигналов).

При тестировании продукции метод АЭ используется для проверки и контроля сварных соединений, термически сжатых бандажей. Метод также используется во время операций, связанных с формообразованием, таких как уплотнение или при прессовании. В целом АЭ контроль может применяться во всех случаях, когда имеют место процессы нагружения, приводящие к постоянному деформированию материалов. В основном при тестировании конструкций АЭ используется для контроля сосудов давления [1], хранилищ труб и трубопроводов, авиационных и космических аппаратов [2], электрических заводов, мостов, железнодорожных цистерн и вагонов, грузовых транспортных средств, а также многих других типов объектов. АЭ контроль производится и на новом, и на бывшем в эксплуатации оборудовании. Он включает обнаружение трещин, сварных дефектов и др.

Процедуры, связанные с использованием АЭ метода, были опубликованы Американским обществом инженеров механиков (American Society Mechanical Engineering – ASME), Американским обществом контроля и материалов (American Society for Testing and Materials – ASTM) и другими организациями. Успешные результаты конструкционного тестирования можно наблюдать в тех случаях, когда возможности и достоинства метода АЭ правильно используются в контексте конкретных исследований и когда применяются корректные технические решения и специализированное оборудование АЭ [3].

Акустико-эмиссионная аппаратура является чрезвычайно чувствительной к любым видам структурных перемещений в широком частотном диапазоне работы (обычно от 20 до 1200 кГц). Оборудование способно регистрировать не только рост трещин или развитие пластической АЭ метода контроля:

- контроль процесса сварки, износа и соприкосновения оборудования при автоматической механической обработке, потерь смазки на объектах, связанных с вращением [4];
- контроль износа и потерь смазки на объектах, связанных с вращением и трением компонент [5];
- детектирование потерянных частей и частиц оборудования [6];
- обнаружение и контроль течей, кавитации и потоков жидкости в объектах [6, 7];
- контроль химических реакторов, включающий контроль коррозионных процессов, жидкотвердого перехода, фазовых превращений [8].

Когда процессы типа ударов, трения, течей и другие возникают на фоне контроля развития трещин и коррозии, они становятся источниками нежелательных шумов. Поэтому было предложено множество различных технических решений с целью снижения и избавления от этих шумовых помех. Следует заметить, что шумы являются основной преградой на пути широкого использования АЭ в качестве метода контроля. Важной задачей является их исследование и по возможности устранение с целью повышения чувствительности метода.

Рассмотрим физическую суть распространения волны от АЭ. Простейший тип волны от АЭ источника представлен на рис. 2.

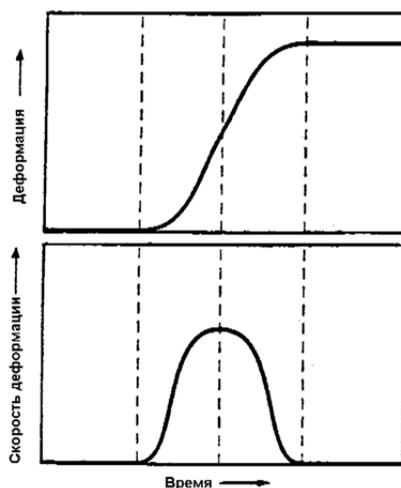


Рис. 2. Простейшая волна АЭ, возникающая в источнике. По существу, это – импульс напряжения, соответствующий смещению поверхности материала

Волновое смещение представляет собой функцию близкую к ступенчатой. Напряжение, соответствующее смещению, имеет форму импульса, ширина и высота которого зависят от динамики процесса излучения. Импульсы таких источников, как просок микротрещины или разрушение осажденных фракций, имеют малую длительность (порядка микросекунд или долей микросекунд). Амплитуда и энергия первоначального импульса АЭ может меняться в широком диапазоне в зависимости от типа источника акустической эмиссии. Зародившаяся волна (импульс) распространяется от источника во всех направлениях, при этом распространение в соответствии с природой источника может носить ярко выраженный анизотропный характер, как показано на рис. 3 (т.е. зависимость скорости распространения от направления).

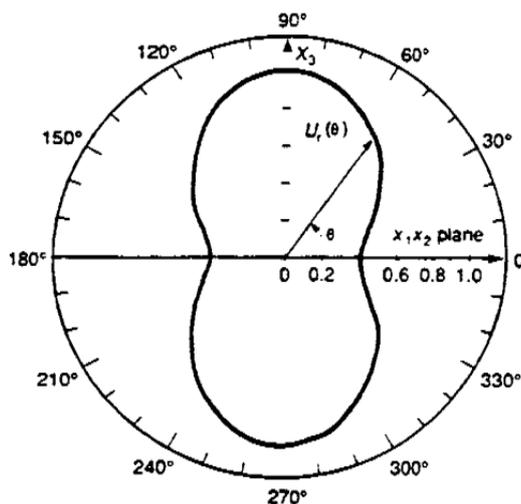


Рис. 3. Угловая зависимость АЭ от растущей в источнике трещины. Основная энергия АЭ распределена внутри материала

Форма первоначальной волны претерпевает существенные изменения при распространении в среде материала и при преобразовании датчиком, поэтому сигнал, пришедший с датчика, весьма отдаленно напоминает исходный сигнал от источника. Такое изменение формы АЭ сигнала является важной проблемой, с которой приходится сталкиваться как при исследованиях функции источника, так и при решении практических задач неразрушающего контроля. Те исследователи, которые стремятся определить первоначальную форму сигнала, используют широкополосные датчики и производят подробный анализ начальной части зарегистрированного сигнала.

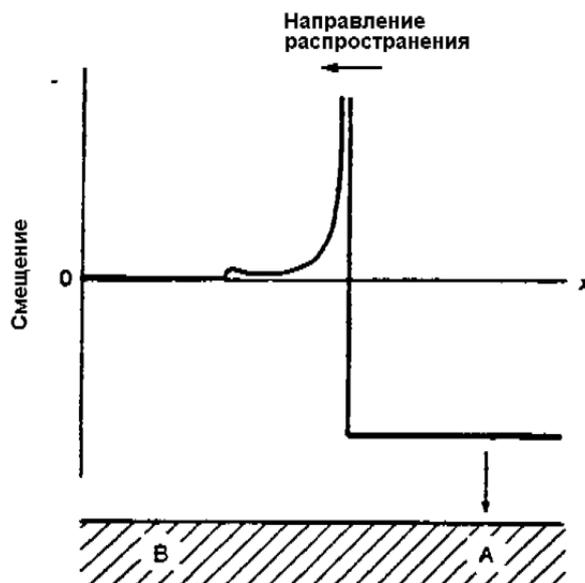


Рис. 4. Смещение волны, возникшее в результате удара в точке А

Это важный, но вместе с тем очень непростой способ исследования, так как обработка одного сигнала может занимать длительное время. В связи с этим многие исследователи в области испытания материалов и НК в большей степени заинтересованы в получении статистических оценок параметров АЭ, чем в подробном изучении характеристик отдельных источников эмиссии. Они используют узкополосную аппаратуру, позволяющую измерять лишь некоторые параметры формы сигналов, но одновременно с этим – регистрировать большие потоки сигналов (сотни сигналов в секунду).

Рассмотрим основные факторы, оказывающие влияние на распространение волн, которые в большой степени различаются для двух упомянутых подходов исследования АЭ сигналов. Взаимосвязь между функцией источника и результирующим смещением поверхности материала в точке контроля интенсивно исследовалась на протяжении последних 10–15 лет. Исследователи из различных групп: Британского Харуэльского Центра НК [9], Американского Национального Бюро Стандартов [7], Корнуэльского [10] и Токийского [7] университетов предприняли усилия для решения этой сложнейшей проблемы. Окончательной целью исследований ставилось решение задачи определения первоначальной формы сигнала по имеющейся информации на выходе датчика.

Сложность данной задачи проиллюстрирована на рис. 4, на котором показана вертикальная компонента движения поверхности полубесконечного тела в точке *B*, получающаяся в результате резкого приложения вертикальной силы в точке *A*.

Как следует из рисунка, даже при простой геометрии объекта и элементарного источника результирующая форма сигнала является достаточно сложной. Если же рассмотреть случай с пластиной, проблема существенно усложнится, поскольку вторая поверхность также будет влиять на упруго-динамический процесс распространения волны. В случае с пластинами движение поверхности в точке наблюдения сильно зависит от отношения расстояния до источника к толщине пластины.

Кроме всего прочего, функция источника не является постоянной, она скорее представляет собой не точечный источник, а диполь и/или двойной диполь с неизвестной в общем случае ориентацией, у которого должны учитываться и горизонтальная, и вертикальная компоненты. В связи с перечисленными трудностями попытки создания математической теории, численных и экспериментальных методик оценки функции источника АЭ заняли многие годы.

В последние годы ведущие лаборатории добились значительных успехов при решении проблем количественной оценки величины прироста трещины, ее ориентации и временных характеристик сигналов АЭ для случаев простейшей геометрии объектов [11]. Для этих целей используются высокочувствительные датчики и производится анализ лишь начальной части сигнала, которая записывается со всеми необходимыми подробностями с помощью высокоточной аппаратуры. Сегодня можно ожидать, что полученные научные результаты принесут свои плоды также и в прикладных областях использования метода АЭ.

Важно учитывать факторы, влияющие на точность локации при типичных измерениях АЭ. В то время как анализ функции источника в большинстве случаев основывается на исследовании только начальной части сигнала, технология АЭ позволяет регистрировать сигнал целиком. Часть сигнала, следующая за начальной, состоит из многих волновых компонент, которые распространялись до датчика по различным путям. Рис. 5 иллюстрирует это утверждение, однако на рисунке приведено только несколько возможных путей. Обычно максимум амплитуды сигнала формируется не первой дошедшей волновой компонентой, а в результате интерференции нескольких последующих компонент.

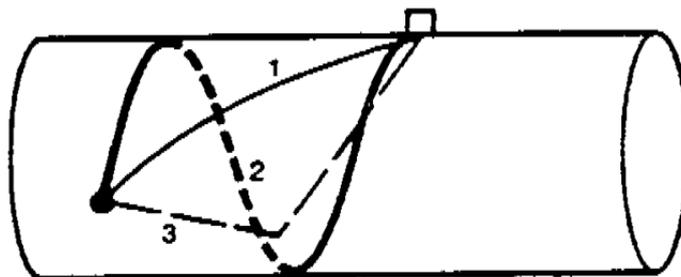


Рис. 5. Три возможных пути прохождения волны от источника до датчика в трубе, наполненной водой:
1 – прямой путь; 2 – отраженный; 3 – по воде

Прежде, чем АЭ волна затухнет в среде, она много раз возбуждает датчик. Процесс затухания волны может длиться порядка 100 мкс в сильно демпфированных неметаллических материалах или десятки секунд в слабо демпфированных металлических материалах, т.е. намного дольше, чем время, в течение которого возбуждается источник (равное обычно нескольким микросекундам или меньше).

Таким образом, необходимо понимать, что форма зарегистрированного сигнала является в значительной степени результатом волнового распространения. Другие важные аспекты распространения связаны с эффектом затухания, а также со скоростью распространения. Затухание определяется снижением амплитуды сигнала в результате геометрического расхождения волны и наличия диссипации энергии волны в материале [12]. Затухание влияет на возможность регистрации и потому является важным фактором, который необходимо учитывать при выборе расстояний между приемными датчиками. Обычно, прежде чем проводить АЭ исследования, на контролируемом объекте измеряют функцию затухания, по которой определяют оптимальное расстояние между датчиками.

Скорость распространения волны является еще одним фактором, который необходимо учитывать при локации источника методом АЭ. Локация источника, являющаяся важной частью метода АЭ, широко используется как при лабораторных исследованиях, так и в промышленных испытаниях. Особую роль локация играет при контроле крупногабаритных объектов, в тех случаях, когда метод АЭ используется для обнаружения активных участков и их последующего исследования альтернативными МНК. При таком сочетании АЭ метода и других методов контроля экономятся значительные средства и ускоряется процесс контроля.

Существует несколько основных принципов локации. Прежде всего, это зонная локация, при которой источники относят к сравнительно большим по площади зонам (окружающим определенные датчики). Второй способ – точечная локация, при которой координаты источника рассчитываются достаточно точно с помощью разностей времен прихода (РВП) сигналов на различные датчики, объединенные в антенну. При расчетах в формулу локации в качестве параметра вводится скорость распространения волны. Достигаемая в расчетах точность контролируется этим параметром, который в свою очередь зависит от геометрии и толщины объекта, а также свойств вещества, наполняющего объект контроля. Именно эти факторы способствуют неточности в оценке скорости распространения волн, что в свою очередь приводит к ошибкам определения координат источника. В благоприятных случаях погрешность локации может достигать 1 % от расстояния между датчиками, в неблагоприятных – 10 %. Эффекты распространения волн, вызывающие такое различие точности определения координат рассмотрены в работе [12].

Рассмотрим также акустико-эмиссионные датчики и предварительные усилители.

Основным элементом АЭ резонансного датчика является пьезоэлектрический кристалл, преобразующий механическое движение в электрический сигнал. Кристалл помещается в специальный корпус с доньшком в виде пластинки и разъемом (рис. 6).

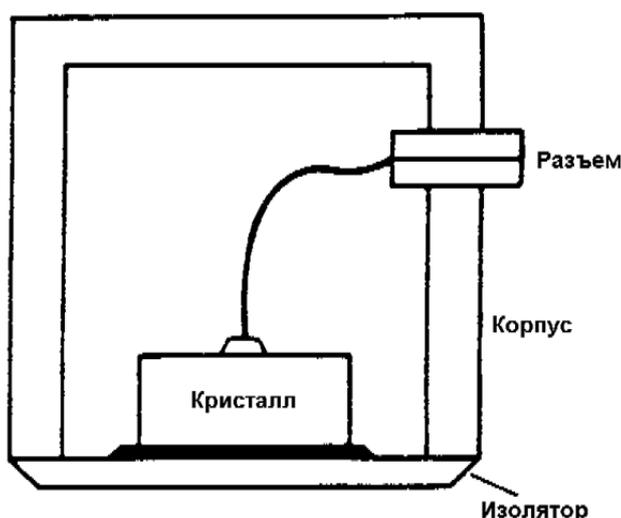


Рис. 6. Типичная конструкция резонансного АЭ датчика

Датчик возбуждается волнами напряжений, попадающими на его доньшко, и преобразует их в электрические сигналы. Эти сигналы поступают на расположенный поблизости предусилитель, усиливаются и на конечном этапе регистрации поступают на основную измерительную и обрабатывающую аппаратуру. В последнее время с целью достижения больших удобств при установке и одновременно снижения чувствительности к электромагнитным наводкам предусилители делают миниатюрными и размещают непосредственно в корпусе датчика, получая совмещенный датчик-предусилитель.

Теперь рассмотрим физическую суть отклика датчика. Одним из основных требований к датчику является его высокая чувствительность. И хотя в целом высококачественными датчиками считаются датчики, обладающие плоской частотной характеристикой, однако в большинстве практических случаев наиболее чувствительными, а потому предпочтительными, являются резонансные датчики, которые к тому же являются более дешевыми, чем широкополосные. Эти датчики имеют сравнительно узкую полосу частот, в которой происходит преимущественное колебание. Частотная полоса определяется в основном размером и формой кристалла. Частоты, характеризующие датчик, являются доминирующими при образовании формы и спектра АЭ сигнала.

В конце 70-х гг. существовала программа калибровки чувствительности датчиков, которая выполнялась в рамках исследовательских работ Национального Бюро Стандартов. С помощью этой программы были разработаны процедуры получения зависимости абсолютной чувствительности АЭ датчиков от частоты (в единицах вольт/скорость от частоты) [13, 14].

Изменение формы акустико-эмиссионного сигнала. В дополнение к уже перечисленным факторам существенное влияние на форму сигнала оказывает сам датчик. Когда широкополосный сигнал эмиссии воздействует на резонансный датчик, в результате получается эффект колокольчика, звящего на определенной частоте, независимо от способа своего возбуждения. Таким образом, на форму сигнала на выходе датчика одновременно влияют многие факторы: пути распространения волн, наличие различных мод, распространяющихся с разными скоростями, и эффект преобразования входного сигнала датчиком. Типичный сигнал эмиссии на выходе резонансного датчика приведен на рис. 7; нельзя не увидеть огромного различия между этим наблюдаемым сигналом и простейшим сигналом, сгенерированным источником АЭ (см. рис. 2).

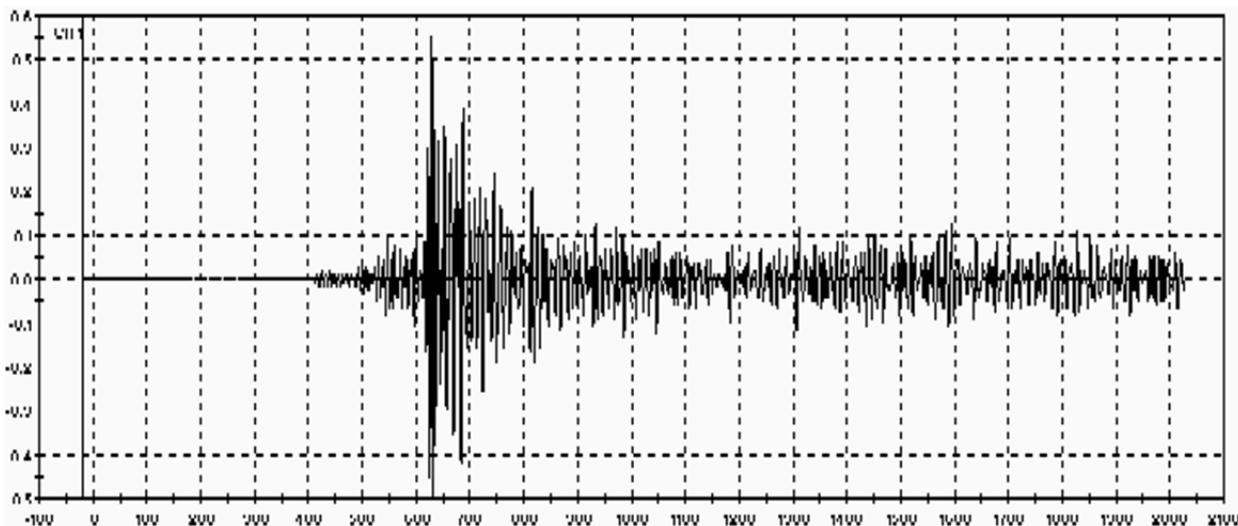


Рис. 7. Типичный импульсный сигнал АЭ

Частотный отклик. Путем выбора резонансного датчика, обладающего заданными частотными свойствами, можно контролировать рабочую полосу частот. Регулирование полосы частот является полезным инструментом, с помощью которого можно, с одной стороны, настраивать прибор на полезную частоту, а с другой — увеличивать отношение сигнал/шум. На практике большинство измерений проводится с помощью датчиков, имеющих резонанс на 150 кГц.

Отклик предусилителя. Сигнал с датчика поступает на предусилитель, предназначенный для усиления сигнала. Предусилитель расположен вблизи или даже внутри датчика с целью минимизации электромагнитных наводок. Предусилитель обладает широким динамическим диапа-

зоном и, усиливая сигнал, создает возможность передачи его по длинным кабелям таким образом, что приемная аппаратура может располагаться на расстоянии в сотни метров от места проведения контроля.

Обычно предусилитель имеет усиление в 100 раз (40 дБ) и включает ФНЧ или полосовой фильтр для снижения механических и акустических фоновых шумов, преобладающих на низких частотах. Наиболее часто используются полосовые фильтры от 100 до 300 кГц, пропускающие частоту самых распространенных резонансных датчиков, равную 150 кГц. Могут использоваться и другие частотные диапазоны, однако существуют определенные ограничения. На низких частотах появляются проблемы, связанные с ростом механических шумов, а высокие частоты сильнее затухают, что приводит к уменьшению расстояния между датчиками. Таким образом, выбор рабочей частоты ограничен сверху и снизу. Обычно низкие частоты используются при контроле трубопроводов, где критичным является выбор больших расстояний, а также при проведении геологических работ в связи с сильным затуханием волн в горных породах. Более высокие частоты используются в проводах электропередачи, где уровень фонового шума чрезвычайно высок.

Достижимая чувствительность. Предусилители, как известно, сами являются источниками электронного шума, и именно этот шум определяет нижнюю границу применимости метода АЭ. Минимальный сигнал, который можно зарегистрировать аппаратурой, имеет порядок 10 мкВ на выходе датчика, что соответствует смещению поверхности в 10^{-6} микродюймов (при использовании типичного высокочувствительного датчика), остаточной для большинства приложений области НК.

Композиционный материал с металлической матрицей. Следующий пример иллюстрирует одно из приложений АЭ для контроля композитов с металлической матрицей. Рассмотрим акустическую эмиссию при микрорастрескивании хрупких зон композитов с двойной металлической матрицей.

При испытании на растяжение композитов с двойной металлической матрицей задолго до того, как происходит окончательное разрушение вязкой матрицы, в результате микрорастрескивания хрупкой фазы между волокнами и матрицей в материале излучается значительная эмиссия. Это позволяет использовать АЭ для мониторинга такого типа структур, обеспечивая раннее обнаружение структурных изменений задолго до наступления полного разрушения материала.

Исследования проводились путем испытания композитов с титановой матрицей (Ti-6Al-4V), усиленной различными волокнами: карбида кремния большого диаметра (SiC, $\approx 0,142$ мм в диаметре) и карбида бора, покрытого бором (B(B₄C), $\approx 0,145$ мм); объем волокон составлял 0,205 и 0,224 соответственно. Для испытаний использовались стандартные плоские отшлифованные образцы, вырезанные в продольном и поперечном направлениях по отношению к расположению волокон. Разрушение образцов при постоянной скорости деформации осуществляли с помощью вибрационно-разрывной машины с гидросервером. При каждом испытании на середину образца ставился один АЭ датчик, измеряли скорость акустического счета как функцию продольного смещения (деформации). После каждого испытания поверхность разрушенного образца изучали с помощью оптического и электронного сканирующего микроскопов. Параметры разрушения материалов, полученных в результате горячего прессования и входящих в состав двух рассматриваемых композитов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства хрупкой фазы

Металло-матричный композит	Хрупкая фаза	Удлинение, %
B(B ₄ C)/Ti-6Al-4V	Диборид титана	0,25
	Карбид бора бор	0,57
		0,80
SiC/Ti-6Al-4V	Карбид титана	0,28
	Силикат титана	0,66
	Карбид кремния	0,91

Проведен сравнительный анализ их прочностных свойств с целью установления связи состава со скоростью АЭ счета. Как показано на рис. 8,а, при нагружении образцов, вырезанных в

продольном направлении и имеющих состав $(B_4C)/(Ti-6Al-4V)$, наблюдался значительный рост скорости АЭ счета вблизи нагрузки разрушения диборида титана и пик АЭ вблизи нагрузки разрушения карбида бора. В образцах, вырезанных в поперечном направлении, рис. 8, б, в, пик АЭ скорости счета наблюдался в районе нагрузки разрушения основного хрупкого компонента – диборида титана в композите $(B_4C)/(Ti-6Al-4V)$ и карбида титана в $SiC/(Ti-6Al-4V)$ соответственно.

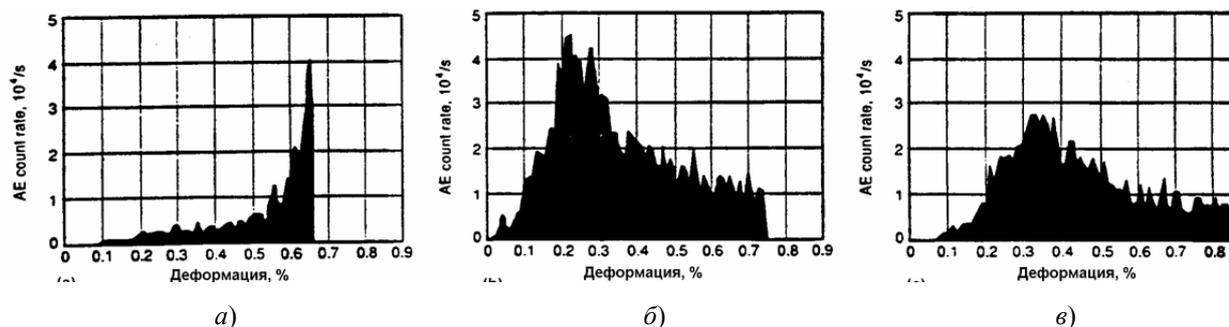


Рис. 8. Зависимость скорости счета от деформации:
 а – растяжение продольных образцов $B_4C/Ti-6Al-4V = M$;
 б – растяжение поперечных образцов $B_4C/Ti-6Al-4V = M$;
 в – растяжение поперечных образцов $SiC/Ti-6Al-4V = M$

В рамках наших исследований при вибрации радиоэлектронных плат на нано- и микрогетероструктурах типа оксида индия на аналогичных подложках М пластическая деформация также происходит в локальных областях, где выявлены АЭ (рис. 9) с квантовым выходом флуктуаций (а) и тока (б).

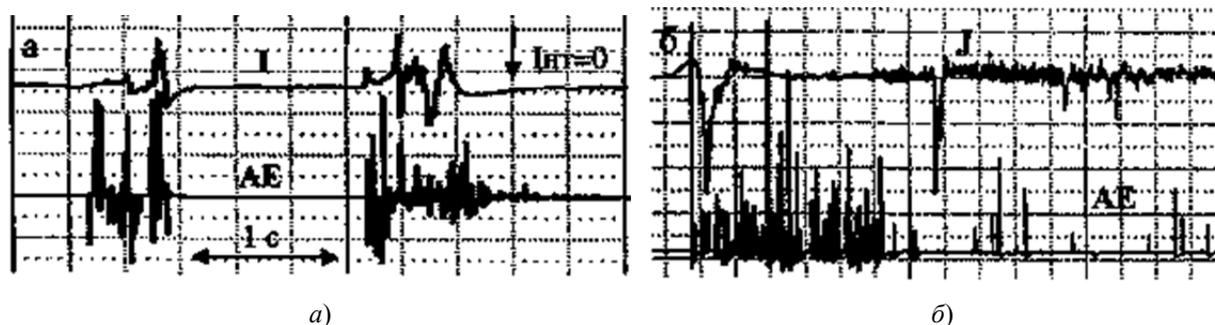


Рис. 9. Корреляция АЭ флуктуаций квантового выхода I (а) и тока I (б) в InO_2 М гетероструктуре при 100 A/cm^2 в момент резкой за 1 с деградации от вибрации

Кроме того, наблюдались также пики АЭ вблизи нагрузок разрушения, характерных для других хрупких компонентов и элементов радиоэлектроники из нано- и микрогетероструктур.

При этом показано, что больший размер хрупкой зоны, полученный в композите $(B_4C)/(Ti-6Al-4V)$, соответствует большей площади под кривой АЭ счета на графике зависимости скорости счета от деформации. Окончательное разрушение поперечных образцов в основном происходило от разрушения пластической матрицы и сопровождалось сравнительно малой скоростью АЭ счета.

Список литературы

1. Acoustic Emission Testing, 2nd ed., Nondestructive Testing Handbook / R. K. Miller and P. McIntire // American Society for Nondestructive Testing. – 1987. – Vol. 5. – P. 275–310.
2. Drouillard, T. F. Production Acoustic Emission Testing of Braze Joint / T. F. Drouillard and T. G. Glenn // J. Acoust. Emiss. – 1985. – № 2, vol. 1. – P. 81 – 85.
3. Vahaviolos, S. J. Real Time Detection of Microcracks in Brittle Materials Using Stress Wave Emission (SWE) / S. J. Vahaviolos // IEEE Trans. – 1974. – № 3, vol. PHP-10. – P. 152–159.

4. Pärtzel, K. H. Acoustic Emission for Crack Inspection During Fully Automatic and Manual Straightening of Transmission Shafts, in Proceedings of the Acoustic Emission Symposium (Bad Nauheim) / K. H. Pärtzel // Deutsche Gesellschaft für Metallkunde / ed. J. Eisenblätter. – 1988. – P. 157–164.
5. Acoustic Emission Testing, Vol 5, 2nd ed., Nondestructive Testing Handbook / R. K. Miller and P. McIntire // American Society for Nondestructive Testing. – 1987 – P. 167–186, 187–193.
6. Parry, D. L. Industrial Application of Acoustic Emission Analysis Technology / D. L. Parry // Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, STP 571 : American Society for Testing and Materials. – 1975. – P. 150–183.
7. Acoustic Emission Testing, 2nd ed., Nondestructive Testing Handbook / R. K. Miller and P. McIntire // American Society for Nondestructive Testing. – 1987. – Vol. 5. – P. 421–424, 434–443, 226–259, 333–339, 267–271, 278, 472–484, 213–219, 402–408, 194–202.
8. Fowler, T. J. Recent Developments in Acoustic Emission Testing of Chemical Process Equipment / T. J. Fowler // Progress in Acoustic Emission IV, Proceedings of the Ninth International Acoustic Emission Symposium, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection. – 1988. – P. 391–404.
9. Cole, P. C. Acoustic Emission / P. C. Cole // The Capabilities and Limitations of NDT, Part 7. The British Institute of Non-Destructive Testing. – 1988.
10. McBride, S. L. Acoustic Emission Measurements on Rubbing Surfaces / S. L. McBride // Proceedings of the World Meeting on Acoustic Emission (Charlotte, NC). – Acoustic Emission Group, 1989, March.
11. Pollock, A. A. Detection Using Acoustic Emission / A. A. Pollock and S.-Y. S. Hsu // J. Acoust. Emiss. – 1982. – № 4, vol. 1. – P. 237 – 243.
12. Pollock, A. A. Classical Wave Theory in Practical AE Testing / A. A. Pollock // Progress in Acoustic Emission III, Proceedings of the Eighth International Acoustic Emission Symposium, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection. – 1986. – P. 708–721.
13. Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors, E 1106-86, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
14. Yurkov, N. K. A comparative analysis of the accuracy and dynamic characteristics of two systems for converting the parameters of passive electrical quantities into an active quantity / N. K. Yurkov, E. N. Kuznetsov, N. E. Kuznetsov // Measurement Techniques. – 2007, February. – № 2, vol. 50. – P. 184–189.

Шайко-Шайковский Александр Григорьевич
 доктор технических наук, профессор,
 кафедра профессионального и технологического
 образования и общей физики,
 Черновицкий национальный университет
 им. Юрия Федьковича
 (58012, Украина, г. Черновцы, ул. Коцюбинского, 2)
 E-mail: shayko@bk.ru

Богорош Александр Терентьевич
 доктор технических наук, профессор,
 кафедра прикладной физики,
 Киевский политехнический институт,
 Национальный технический университет Украины
 (03056, Украина, г. Киев, пр-т Победы, 37)

Воронов Сергей Александрович
 доктор технических наук, профессор,
 заведующий кафедрой прикладной физики,
 Киевский политехнический институт,
 Национальный технический университет Украины
 (03056, Украина, г. Киев, пр-т Победы, 37)

Марченко Екатерина Валериевна
 аспирант,
 Киевский политехнический институт,
 Национальный технический университет Украины
 (03056, Украина, г. Киев, пр-т Победы, 37)

Shayko-Shaykovskiy Aleksandr Grigor'evich
 doctor of technical sciences, professor,
 sub-department of professional and technological
 education and general physics,
 Chernovitsky National University
 named after Yuriy Fed'kovich
 (58012, 2 Kotsyubinskogo street, Chernovtsy, Ukraine)

Bogorosh Aleksandr Terent'evich
 doctor of technical sciences, professor,
 sub-department of applied physics,
 Kiev Polytechnic Institute,
 National Technical University of Ukraine
 (03056, 37 Pobedy avenue, Kiev, Ukraine)

Voronov Sergey Aleksandrovich
 doctor of technical sciences, professor,
 head of sub-department of applied physics,
 Kiev Polytechnic Institute,
 National Technical University of Ukraine
 (03056, 37 Pobedy avenue, Kiev, Ukraine)

Marchenko Ekaterina Valerievna
 postgraduate student,
 Kiev Polytechnic Institute,
 National Technical University of Ukraine
 (03056, 37 Pobedy avenue, Kiev, Ukraine)

Аннотация. Акустическая эмиссия (АЭ) представляет собой явление генерации волн напряжений, вызванных внезапной перестройкой в структуре материала. Классическим источником АЭ является процесс деформирования, связанный с ростом дефектов, например, трещины или зоны пластической деформации. В работе рассмотрены процессы генерации и обнаружения АЭ, включая внезапное движение источника эмиссии, что вызывает возникновение волн напряжений, которые распространяются в структуре материала и достигают датчиков в виде пьезоэлектрических преобразователей. По мере роста напряжений активизируются многие из имеющихся в материале объектов источников эмиссии и электрические АЭ, полученные в результате преобразования волн напряжений, усиливаются, регистрируются аппаратурой и подвергаются дальнейшей обработке и интерпретации. Дан обзор видов АЭ для практического применения, включая сосуды под давлением, трубопроводы, авиационные конструктивные узлы, работающие под действием вибрации, переменными температурами случаев сварки металлов. Много внимания уделено композиционным и полупроводниковым материалам и гетероструктурам.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, выявление нано- и микродефектов в различных конструкциях.

Abstract. Acoustic emission (AE) is a phenomenon of generation of stress waves caused by a sudden rearrangement of the structure of the material. Classical sources AE deformation process is associated with an increase in defects such as cracks or plastic deformation zone. The paper discusses the generation and detection of acoustic emission, including a sudden movement of the source of emission, which causes the appearance of stress waves that propagate in the structure of the material and reach the sensor in the form of piezoelectric transducers As the stress activated many of the existing objects in the material emission sources and electrical AE obtained from the transformation of stress waves, amplify, recording equipment and are subjected to further processing and interpretation. Overview of AE considered for some cases in practice, including pressure vessels, pipelines, aircraft structural assemblies, operating under the influence of vibration, temperature changes, metal welding. Much attention is paid to the composition and semiconductor materials and heterostructures.

Key words: acoustic emission, detection of nano- and micro-defects in various designs.

УДК 621.315.612

Обзор применения акустической эмиссии для выявления микро- и нанодфектов / А. Г. Шайко-Шайковский, А. Т. Богорош, С. А. Воронов, К. В. Марченко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 47–57.