

## Лекция 17

# АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

## Физические основы акустико-эмиссионного контроля

Явление *акустической эмиссии* (АЭ) известно с начала прошлого столетия как «крик олова» — треск, возникающий при деформировании оловянных стерженьков и слышимый ухом. Долгое время это явление не находило практического применения. И только с середины прошлого столетия, когда выяснилось, что разрушению нагруженных конструкций предшествует излучение упругих волн широкого частотного диапазона, по регистрации которых можно предсказать и, главное, предотвратить катастрофические последствия разрушения нагруженных конструкций, начались систематические исследования АЭ. Явление АЭ и причины, его порождающие, оказались значительно более сложными, чем предполагали на начальном этапе изучения. Лишь к середине 70-х годов была разработана высокочувствительная аппаратура и собран экспериментальный материал, достаточный для решения практических задач.

Нормативные документы — ГОСТ 27655–88, определяет акустическую эмиссию АЭ как излучение материалом механических упругих волн, вызванное динамической локальной перестройкой его внутренней структуры.

Со временем к АЭ стали относить высокочастотное акустическое излучение, источником которого является истечение жидкостей и газов через сквозные дефекты в сосудах и трубопроводах, а также акустические сигналы, сопровождающие трение твердых тел. В настоящее время полагают, что АЭ — явление, сопровождающее едва ли не все физические процессы в твердых телах и на их поверхности, а возможность ее регистрации определяется лишь порогом чувствительности используемой аппаратуры.

АЭ возникает как при протекании процессов на микроуровне в твердых телах, так и при макроявлениях, связанных, например, с деформированием материалов и разрушением конструкций. Поэтому регистрация АЭ и анализ ее параметров предоставляют широкие возможности для исследования свойств материалов, их взаимодействия с жидкими и газообразными средами, а также диагностики состояния энергонапряженных конструкций.

По сравнению с другими методами НК, например, методом ультразвуковой дефектоскопии, рентгеновским контролем и др., метод АЭ обладает рядом **преимуществ**. К ним в первую очередь относятся:

- обнаружение развивающихся в ходе эксплуатации и, следовательно, наиболее опасных дефектов в нагруженных компонентах реакторной установки;

- контроль в реальном масштабе времени возрастания поврежденности материала при испытаниях трубопроводов и сосудов давления, входящих в состав ЯЭУ;

- возможность проведения эксплуатационного контроля энергетической установки;

- возможность определения месторасположения дефектов — трещин, зон пластической деформации, утечек и др., находящихся достаточно далеко от приемных преобразователей;

- возможность для отдельных сценариев развития аварий ЯЭУ предсказывать и заблаговременно предупреждать разрушение металлоконструкций и оборудования;

- быстрое обнаружение разрыва или течи в труднодоступных сосудах давления и трубопроводах при развитии аварийной ситуации;

- совместимость АЭ-метода с другими методами НК, что позволяет за счет использования нескольких независимых методов повысить надежность результатов контроля;

- возможность проведения дистанционного автоматизированного контроля в радиационно опасных помещениях атомной станции.

Практика показывает, что применение метода АЭ на объектах атомной энергетики позволяет:

- повысить безопасность эксплуатации энергетической установки, выявив потенциальные очаги разрушения конструкций;

- сократить время на проведение инспекционных и диагностических обследований конструкций и оборудования;

- обосновать увеличение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) энергоблоков за счет контроля и диагностики энергонапряженного оборудования;

- повысить безопасность и улучшить условия труда оперативного и ремонтного персонала АЭС.

Разумеется, как и всякий метод неразрушающего контроля, АЭ-метод не лишен **недостатков** это, прежде всего:

- необходимость создавать дополнительные нагрузки на диагностируемый объект, кроме случаев, когда эти нагрузки предусмотрены регламентами эксплуатации или обслуживания;

– отсутствие общепринятых соотношений, связывающих параметры АЭ-сигналов с поврежденностью материала контролируемого объекта;

– трудности выделения АЭ-сигналов на фоне сильных шумовых помех, сопровождающих работу диагностируемого объекта.

Благодаря выше указанным достоинствам, возможности испытания больших и малых объектов при различных режимах нагружения, в том числе и термонагружении конструкций, метод АЭ нашел применение для контроля материалов и диагностики оборудования АЭС. Достаточно отметить следующий факт. Сварные соединения ответственных трубопроводов АЭС подвергаются сплошному рентгеновскому контролю. Однако, если достоверность выявления плоскостных дефектов этим методом составляет около 45 %, то при акустико-эмиссионном диагностировании достоверность существенно выше и достигает 85 %. Когда применение рентгеновского метода затруднено, акустико-эмиссионный контроль становится единственным для оценки трещинообразования в сварных соединениях элементов конструкций ЯЭУ.

## **Виды акустической эмиссии**

При акустико-эмиссионном контроле регистрируют колебания контролируемого объекта, источником которых являются разнообразные физические процессы в материале объекта. С помощью электромеханических преобразователей упругие колебания преобразуют в электрические сигналы и анализируют их параметры. АЭ является случайным процессом, то есть процессом, параметры которого случайным образом изменяются во времени. Методы обработки сигналов и их информативные параметры зависят от типа регистрируемой АЭ. Разделение акустической эмиссии на два типа связано со следующими обстоятельствами.

В силу дискретной природы строения вещества дискретны и происходящие в них процессы. Непрерывность наблюдаемых процессов является следствием усреднения большого числа отдельных элементарных событий. Эти события приводят к микродеформированию твердого тела, как правило, столь незначительному, что оно не может быть зарегистрировано обычными измерительными средствами. Однако большое количество элементарных событий — поток событий — может привести к макроскопическим явлениям, заметно изменяющим энергетическое состояние тела. Например, пластическая деформация металлов в нормальных условиях в основном является результатом перемещения дислокаций — линейных дефектов кристаллической решетки. Признаки движения отдельной дислокации зарегистрировать не-

просто. Однако перемещение под действием напряжений большого числа дислокаций на макроуровне проявляется как остаточная или пластическая деформация металла.

При изменении энергетического состояния тела часть энергии высвобождается в виде излучения упругих волн. Эти волны и есть акустическая эмиссия. Если количество элементарных событий, приводящих к излучению упругих волн, велико, а энергия, высвобождаемая при каждом событии, мала, то отдельные АЭ-сигналы, накладываясь друг на друга, воспринимаются как слабый непрерывный шум, называемый *непрерывной АЭ*. В этом случае из-за малости энергии, высвобождаемой при единичном событии, энергетическое состояние тела меняется незначительно. Поэтому вероятность осуществления следующего такого события практически не зависит от предыдущего. Вследствие этого характеристики непрерывной АЭ меняются во времени сравнительно медленно, рис. 1а.

Если в результате отдельных событий энергетическое состояние твердого тела меняется существенным образом, то за малый промежуток времени излучаются упругие волны, энергия которых может на много порядков превосходить энергию волн при непрерывной эмиссии. Излучение упругих волн при этом носит взрывной или импульсный характер. Число отдельных энергетических скачков существенно меньше, чем в случае излучения непрерывной эмиссии. Влияние каждого предыдущего события на последующее становится существенным, и процесс возникновения упругих волн уже нельзя рассматривать как стационарный. Общее количество импульсов АЭ сравнительно невелико, но они имеют большую амплитуду. Такая эмиссия получила название *дискретной*, рис. 1б. Подобная эмиссия наблюдается, например, при докритическом подрастании трещин в металлах, обладающих малой пластичностью.

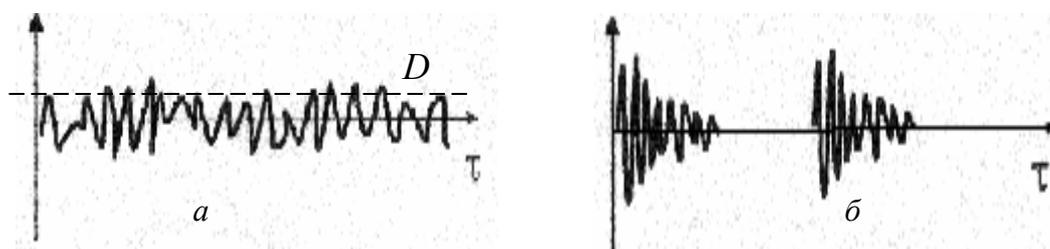


Рис.1. Типы акустической эмиссии: *а* — непрерывная; *б* — дискретная

Разделение АЭ на непрерывную и дискретную достаточно условно, поскольку возможность отдельной регистрации АЭ-импульсов зависит лишь от характеристик используемой аппаратуры — ее разрешающей способности. Кроме того, увеличивая уровень дискриминации сигналов непрерывной акустической эмиссии  $D$ , рис. 1а, можно регистрировать только высокоамплитудные выбросы акустического сигнала, то есть формально перейти

от регистрации непрерывной к регистрации дискретной АЭ, хотя очевидно, что сущность явления АЭ при этом не изменится.

На практике, как правило, приходится иметь дело с эмиссией обоих типов. Например, докритическое подрастание трещин в металлах под действием внешних и внутренних факторов происходит скачкообразно. Продолжительные периоды стабильного состояния трещины, при некотором возможном возрастании пластической деформации в ее вершине, чередуются с моментами времени, когда трещина меняет свою длину с околосвуковой скоростью, переходя в новое равновесное состояние. Такой переход связан с изменением напряженного состояния — разгрузкой материала в окрестности трещины — и сопровождается излучением упругих волн, регистрируемых преобразователем как сигнал дискретной АЭ. В промежутках между скачками, при протекании пластической деформации в вершине трещины, наблюдается характерная для пластического деформирования непрерывная АЭ. Кроме того, в течение этого времени в зоне пластической деформации происходит образование и развитие микротрещин. Этим процессам также сопутствует излучение импульсов дискретной АЭ. На докритической стадии развития трещины ее средняя скорость продвижения мала, и она еще не представляет серьезной опасности для конструкции. Возникающая акустическая эмиссия служит предвестником разрушения задолго до его опасной стадии — катастрофического роста трещины.

Для прогнозирования разрушения используют дискретную составляющую эмиссии из-за простоты регистрации сигналов большой амплитуды. Заметим, что сходная картина имеет место и в процессе развития усталостных трещин.

Дискретную акустическую эмиссию используют при контроле процессов, в ходе которых возможно образование трещин (сварки, закалки, диффузионного насыщения, например наводороживания), а также для исследований и контроля коррозионного растрескивания, термопрочности, усталостного разрушения материалов.

Излучение непрерывной АЭ связывают с процессами пластического деформирования металлов и другими физическими процессами в твердых телах. Так ползучесть материала на первой (нестационарной) и второй (стационарной) стадиях сопровождается непрерывной АЭ. На третьей стадии, помимо непрерывной наблюдается также и дискретная эмиссия, обусловленная образованием и развитием микротрещин. Аналогичная ситуация имеет место при коррозии под напряжением, конечная стадия которой — коррозионное растрескивание — сопровождается акустическими всплесками дискретной АЭ.

## Основные источники акустической эмиссии в металлах

Согласно существующим на настоящий момент представлениям можно выделить следующие **основные источники АЭ**, действующие на разных структурных уровнях в металлах:

### 1. Механизмы, ответственные за пластическое деформирование:

- процессы, связанные с движением дислокаций — консервативное скольжение и аннигиляция дислокаций, размножение дислокаций по механизму Франка-Рида;
- отрыв дислокационных петель от точек закрепления и др.;
- взаимодействие дислокаций с препятствиями — примесными атомами, другими дислокациями, границами зерен;
- зернограничное скольжение;
- двойникование.

### 2. Механизмы, связанные с фазовыми превращениями и фазовыми переходами первого и второго рода:

- превращения полиморфного типа, в том числе мартенситные;
- образование частиц второй фазы при распаде пересыщенных твердых растворов;
- фазовые переходы в магнетиках и сверхпроводниках;
- магнитомеханические эффекты из-за смещения границ и переориентации магнитных доменов при изменении внешнего намагничивающего поля.

### 3. Механизмы, связанные с разрушением:

- образование и накопление микроповреждений;
- образование и развитие трещин;
- разрушение фазовых включений;
- разрушение окисных пленок;
- разрушение шлаковых включений в сварных швах,
- коррозионное разрушение, в том числе коррозионное растрескивание.

Детальное обсуждение физических механизмов пластического деформирования и фазовых превращений в металлах, а также связанное с ними излучение упругих волн, представляет интерес, главным образом, для физики твердого тела и физического материаловедения.

В таблице приведены основные источники АЭ, а также области применения акустико-эмиссионного контроля.

Таблица 1. Основные источники и область применения АЭ

Физический процесс	Наличие АЭ		Применение
	непрерывная	дискретная	
<b>Пластическая деформация:</b> двойникование зернограничное скольжение движение дислокаций диффузия атомов	+	+	Исследования по физике твердого тела, прочности, материаловедения
	+	+	
	+	—	
	+	—	
<b>Образование и развитие трещин:</b> докритический и закритический рост трещин растрескивание окисных пленок и окалины разрушение шлаковых включений	+	+	Прогнозирование разрушения конструкций, контроль качества изделий, технологических процессов, оценка термолпрочности, трещиностойкости
	—	+	
	—	+	
<b>Коррозионные процессы:</b> коррозионное растрескивание; точечная коррозия; межкристаллитная коррозия	+	+	Прогнозирование разрушения конструкций, ускоренные испытания коррозионной стойкости материалов и конструкций
	+	+	
	+	+	
<b>Электрохимические процессы:</b> осаждение металлов; растворение металлов; нанесение покрытий	+	—	Контроль технологических процессов
	+	—	
	+	—	
<b>Фазовые превращения различного типа</b>	+	+	Физика твердого тела, материаловедения
	+	+	
<b>Трение твердых тел</b>	+	+	Контроль узлов трения
<b>Электрический пробой</b>	+	+	Контроль качества изделий

В поликристаллических металлических материалах появление непрерывной АЭ обычно связывают с пластической деформацией отдельных зерен поликристалла. В поликристаллической структуре из-за неравномерного распределения механических напряжений пластическая деформация отдельных кристаллов возникает при малой общей деформации, когда считается, что металл находится в области упругости. Поэтому по сигналам АЭ можно судить о появлении неоднородностей и микродефектов на начальной стадии деформирования и разрушения материалов.

## Эффект Кайзера

Для непрерывной акустической эмиссии характерно проявление *эффекта Кайзера*. Он заключается в отсутствии или существенном уменьшении эмиссии при повторном нагружении объекта вплоть до того момента времени, когда нагрузка при повторном нагружении не достигнет максимального значения, достигнутого в предыдущем цикле. Суть эффекта Кайзера поясняется на рис. 2, на котором сплошной линией показано изменение нагрузки в двух циклах нагружения материала; штриховой горизонтальной линией — максимальное значение нагрузки  $P_{\max}$  в первом цикле нагружения. Вертикальные линии — записанные с помощью самописца выбросы АЭ-сигнала. Видно, что при повторном нагружении эмиссия практически отсутствует вплоть до момента времени  $t_0$ , когда нагрузка при повторном нагружении достигнет максимального значения нагрузки первого цикла. При дальнейшем увеличении нагрузки эмиссия восстанавливается.

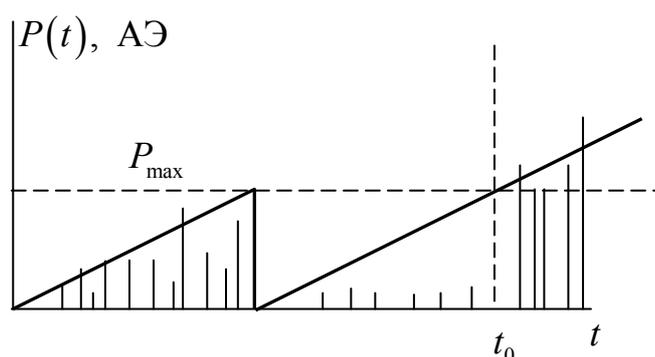


Рис. 2. Пояснение эффекта Кайзера:  $P(t)$  — изменение нагрузки во времени;  $P_{\max}$  — максимальное значение нагрузки в первом цикле нагружения;  $t_0$  — момент времени достижения во втором цикле нагружения максимального значения нагрузки первого цикла

В поликристаллических металлических материалах появление непрерывной АЭ обычно связывают с пластической деформацией отдельных зерен поликристалла.

Практически акустическая эмиссия при повторном нагружении начинает проявляться несколько раньше, чем достигается первоначальный максимальный уровень напряжений, а полностью восстанавливается несколько позже достижения этого уровня. Отжиг материала после первичного деформирования приводит к нарушению эффекта Кайзера, причем с возрастанием степени отжига увеличивается степень восстановления характеристик АЭ-сигналов. При полном отжиге материала акустическая эмиссия восстанавливается до первоначального уровня.

Эффект Кайзера не наблюдается при появлении трещин. Это обусловлено тем, что средняя по объему материала деформация не характеризует деформацию отдельных его областей из-за наличия концентраторов напряжений в вершине трещин. При повторном нагружении деформация вблизи вершин трещин может превысить ранее достигнутую, что приводит к появлению акустической эмиссии.