



Лекция

Акустическая эмиссия

**профессор Коробов А.И., ст. науч. сотр. Одина Н.И.,
науч. сотр. Ширгина Н.В.**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра акустики*

2016 г.

Физические основы акустико-эмиссионного контроля

История вопроса:



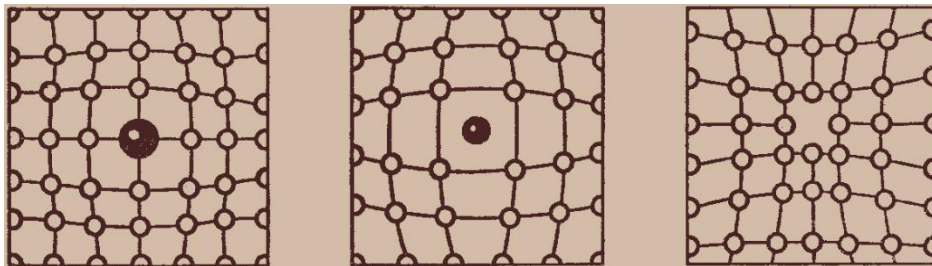
Нач. XX века: «крик олова» - треск, возникающий при деформировании оловянных стерженьков и слышимый ухом

Сер. XX века: выяснилось, что разрушению нагруженных конструкций предшествует излучение упругих волн широкого частотного диапазона

Сер. 70-х годов: была разработана высокочувствительная аппаратура и собран экспериментальный материал, достаточный для решения практических задач.

Определение:

Акустическая эмиссия (АЭ) - излучение материалом механических упругих волн, вызванное динамической локальной перестройкой его внутренней структуры (ГОСТ 27655–88)



Акустическая эмиссия (АЭ) заключается в генерации упругих волн напряжения в твердых телах в результате локальной динамической перестройки их структуры.

Акустико-эмиссионный метод – один из пассивных методов акустического контроля. Метод основан на анализе параметров генерируемых упругих волн.

Главные источники АЭ – процессы пластической деформации, связанные с появлением, движением и исчезновением дефектов кристаллической решетки, возникновением и развитием микро- и макротрещин; трение (в том числе «берегов» трещины друг о друга): фазовые (например, аллотропические) превращения в твердом теле.

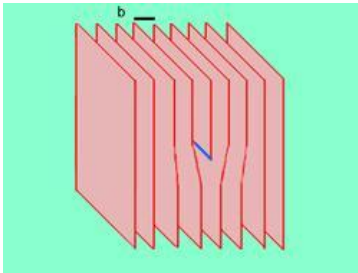
Связь акустической эмиссии с дефектами кристаллической решетки

Энергия белого шума идеальной решетки: $E/\Delta f = 4 \cdot 10^{-21}$ Дж/Гц

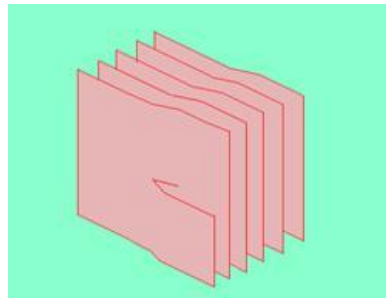
Точечные дефекты кристаллической решетки – атомы внедрения и вакансии.
Аннигиляция такого дефекта 10^{-19} Дж

Линейные дефекты кристаллической решетки – дислокации

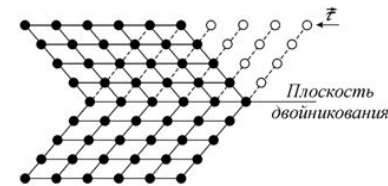
Краевая дислокация
 10^{-16} Дж



Винтовая дислокация



Двойникование (10^{-3} Дж)



Основные источники акустической эмиссии в металлах

1. Механизмы, ответственные за пластическое деформирование:

- процессы, связанные с движением дислокаций — консервативное скольжение и аннигиляция дислокаций, размножение дислокаций;
- 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.

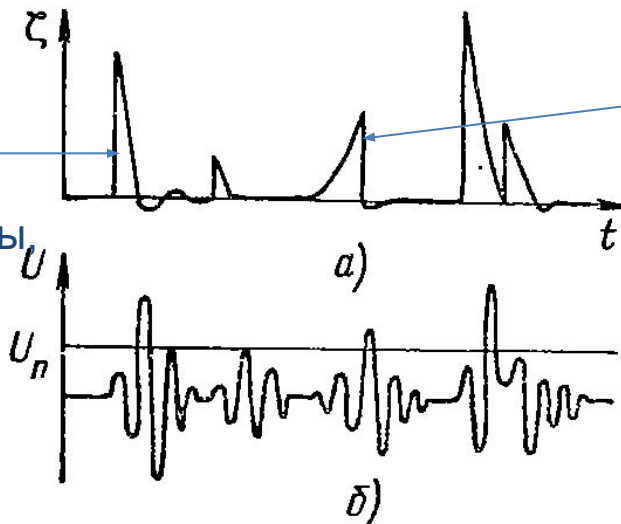
3. Механизмы, связанные с разрушением:

- 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

Форма импульсов АЭ

Рис. 1. Форма первичных импульсов АЭ (а) и соответствующих импульсов в приемном тракте (б).

Процесс снятия
локальных напряжений
путем разрушения
(релаксационные импульсы,
возникновение трещин)



Процесс акселерационного
типа
(Дислокации противоположного
знака сближаются и
аннигилируют или дислокация
выходит на поверхность
кристалла и исчезает)

Процессы сближения или выхода на поверхность дислокаций происходят с ускорением. Энергия процесса аннигиляции дислокаций порядка 10^{-18} - 10^{-16} Дж, длительность импульса – 10-11 с, ширина спектра – сотни мегагерц. Точечный удаленный от поверхности источник АЭ излучает сферические продольную и поперечную волны. При падении на поверхности волны отражаются и трансформируются. В результате появляются поверхностные волны, амплитуда которых уменьшается значительно медленнее, чем сферических волн, поэтому **поверхностные волны** преимущественно регистрируются приемником.

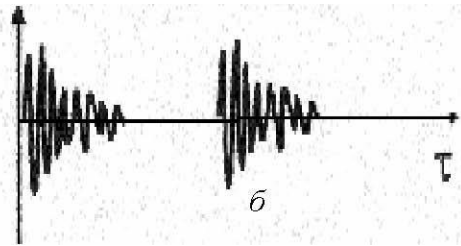
Виды акустической эмиссии

Дискретная –

длительность регистрируемых импульсов меньше интервала между ними.

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.

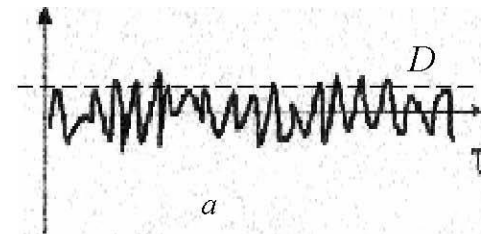
Дискретную акустическую эмиссию используют при контроле процессов, в ходе которых возможно образование трещин (сварки, закалки, диффузионного насыщения), а также для исследований и контроля коррозионного растрескивания, термопрочности, усталостного разрушения материалов



Непрерывная -

количество элементарных событий, приводящих к излучению упругих волн, велико, а энергия, высвобождаемая при каждом событии, мала, отдельные АЭ-сигналы, накладываясь друг на друга, воспринимаются как слабый непрерывный шум.

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.



Основные параметры АЭ

Число импульсов за время наблюдения N_{Σ}

Активность $N_{\Sigma}' = dN_{\Sigma}/dt$, (количество импульсов за некоторый интервал времени наблюдения, обычно 0,1 или 1 с)

$U_{п}$ – порог акустической эмиссии, при этом параметры АЭ - суммарный счет **N** и скорость счета **N'**

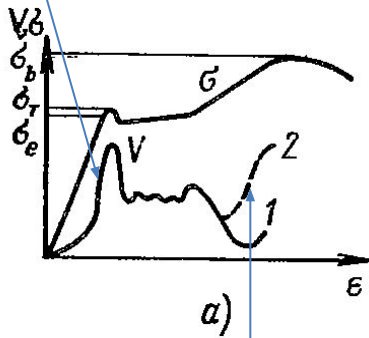
Эффективное значение АЭ: $V \sim N' * A$ (в вольтах)

АЭ при деформации материалов

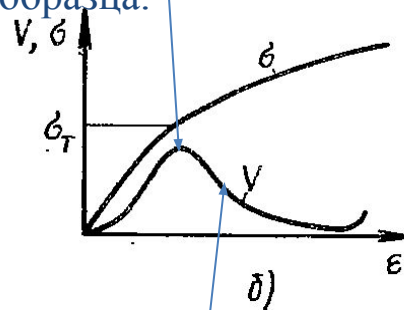
массовое образование и перемещение дефектов кристаллической решетки

предел текучести σ_T
пластическая деформация составляет 0,2% от длины образца.

двойникование



разрушение цементитовых пластинок в стали



движение вновь образующихся дислокаций ограничивается уже существующими

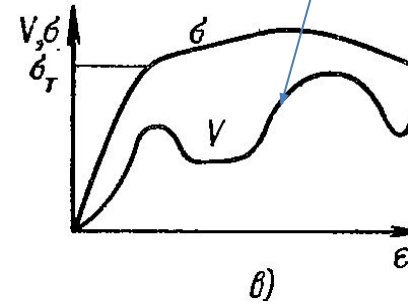


Рис. 2. Типичные кривые изменения эффективности АЭ в сопоставлении с диаграммами напряжение-деформация для железа (а, 1) стали (а, 2), металлов с гранецентрированной кубической решеткой (б), стареющих алюминиевых и титановых сплавов (в).

Металлы с решеткой типа гранецентрированный куб (алюминий) имеют среднюю энергию импульса меньше 10^{-10} Дж, характерна деформация скольжением. Металлы с решеткой типа объемно центрированный куб имеют несколько большее среднее значение энергии импульсов. Деформация металлов с гексагональной плотно упакованной решеткой (цинк, титан) вызывает импульсы АЭ с амплитудой в тысячи раз больше (порядка 10^{-6} Дж), так как они деформируются двойникованием.

Образцы с дефектами

факторы, повышающие амплитуду сигналов АЭ:

высокая прочность, анизотропия, неоднородность, крупнозернистость (литая структура), большая общая толщина материала, большая скорость деформации, низкая температура, наличие надрезов.

В образцах с дефектами, как искусственными (надрезами), так и с естественными трещинами, происходит концентрация напряжений вблизи острого края дефекта. В этом месте образуется локальная зона пластической деформации, объем которой пропорционален **коэффициенту интенсивности напряжений K** – величине, характеризующей сложное напряженное состояние. Например, для тонкой пластины с трещиной длиной $2l$

$$K = \sigma(\pi l)^{1/2}$$

число импульсов N АЭ должно расти с ростом K :

$$N = aK^m$$

Где a и m зависят от материала и условий испытаний, m может меняться от 1 до 20

Эффект Кайзера

АЭ при многократном нагружении. При повторном нагружении АЭ резко уменьшается и вновь начинает регистрироваться после достижения максимальной нагрузки первого цикла

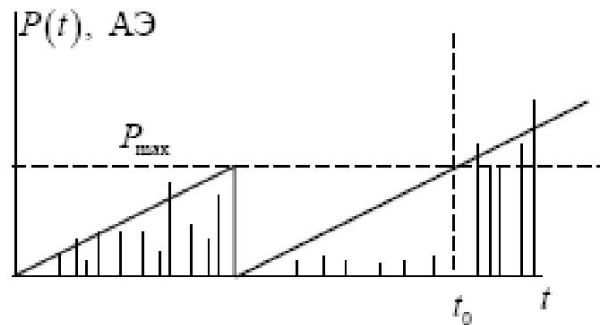


Рис. 2. Пояснение эффекта Кайзера: $P(t)$ — изменение нагрузки во времени;
 P_{\max} — максимальное значение нагрузки в первом цикле нагружения;
 t_0 — момент времени достижения во втором цикле нагружения максимального значения нагрузки первого цикла

Эффект Кайзера не наблюдается при появлении трещин. При повторном нагружении деформация вблизи вершин трещин может превысить ранее достигнутую, что приводит к появлению акустической эмиссии. Эффект Кайзера частично или полностью устраняется термообработкой (отжигом) после первого нагружения.

Использование АЭ в неразрушающем контроле

Преимущества метода

- 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.

Недостатки метода

- 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.

Использование АЭ в неразрушающем контроле

Испытания и эксплуатация конструкций

Задачи АЭ в этой области состоят в оценке разрушающей нагрузки для объекта при воздействии на него более низкой (испытательной) нагрузки или в диагностике работы объекта при воздействии рабочей нагрузки. Объектами испытаний могут быть сосуды, работающие под давлением (сосуды давления), трубные системы, детали самолетов и ракет, мосты и другие строительные сооружения (в том числе железобетонные).

Частоту или диапазон частот, в котором регистрируют сигналы АЭ, выбирают с учетом уровня шумов. Для этого проводят анализ шумов до нагружения и при малом уровне нагружений.

Количество преобразователей выбирают в зависимости от задач контроля. Например, когда используют АЭ при механических испытаниях образцов в форме стержня, можно иметь один ПЭП , расположенный на торце или другой ненагруженной части образца.

Задание критериев опасного состояния объекта

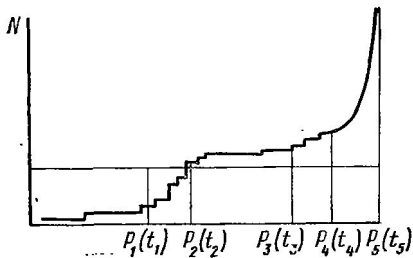


Таблица 1. Основные источники и область применения АЭ

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

Литература по теме

1. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля (под редакцией проф. В.В. Сухорукова). – М.: Высшая школа, 1991.
2. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. - М.: Изд-во стандартов, 1976.