



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:*



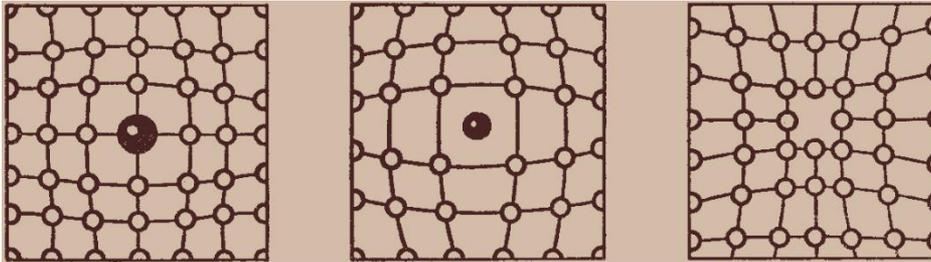
**Нач. XX века:** «крик олова» - треск, возникающий при деформировании оловянных стерженьков и слышимый ухом

**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.

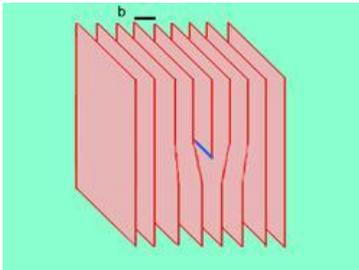
# Связь акустической эмиссии с дефектами кристаллической решетки

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

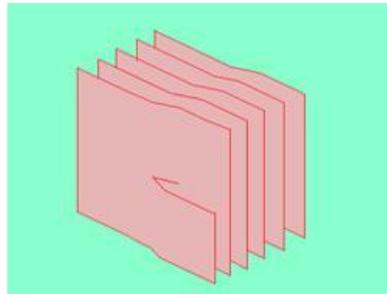
Точечные дефекты кристаллической решетки – атомы внедрения и вакансии.  
Аннигиляция такого дефекта  $10^{-19}$  Дж

Линейные дефекты кристаллической решетки – дислокации

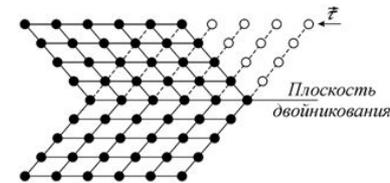
Краевая дислокация  
 $10^{-16}$  Дж



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.

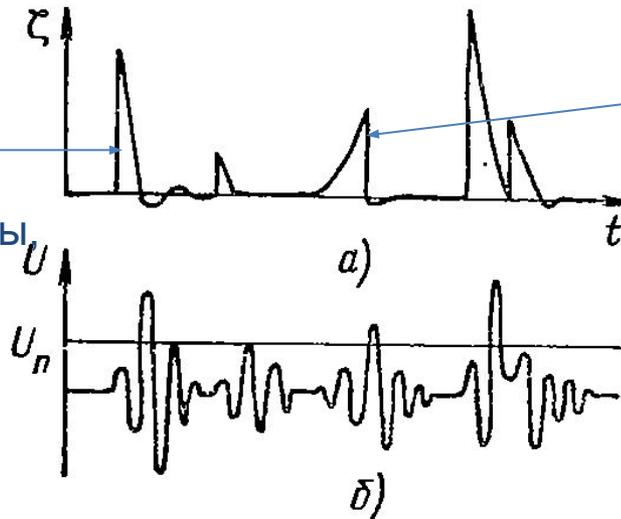
## **3. Механизмы, связанные с разрушением:**

- 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.

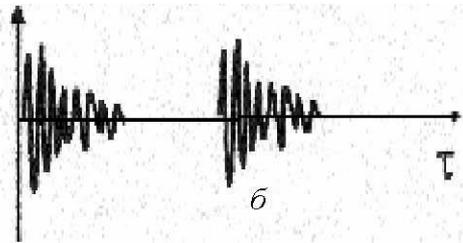
# Виды акустической эмиссии

## 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.

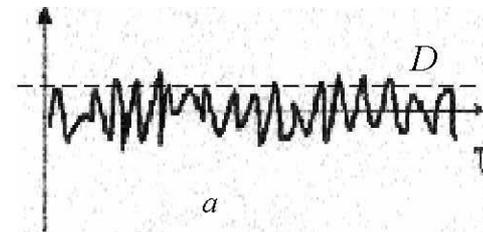
**Дискретную акустическую эмиссию используют** при контроле процессов, в ходе которых возможно образование трещин (сварки, закалки, диффузионного насыщения), а также для исследований и контроля коррозионного растрескивания, термопрочности, усталостного разрушения материалов



## 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  $N_{\Sigma}$**

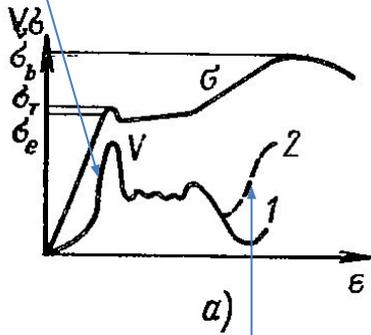
**Активность  $N_{\Sigma}' = dN_{\Sigma}/dt$** , (количество импульсов за некоторый интервал времени наблюдения, обычно 0,1 или 1 с)

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

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

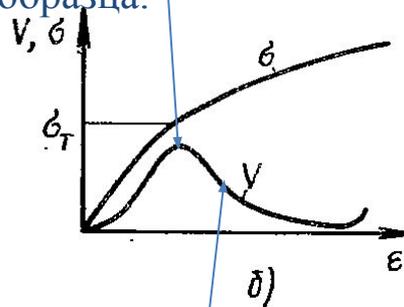
# АЭ при деформации материалов

массовое образование и перемещение дефектов кристаллической решетки



разрушение цементитовых пластинок в стали

предел текучести  $\sigma_T$   
пластическая деформация составляет 0,2% от длины образца.



движение вновь образующихся дислокаций ограничивается уже существующими

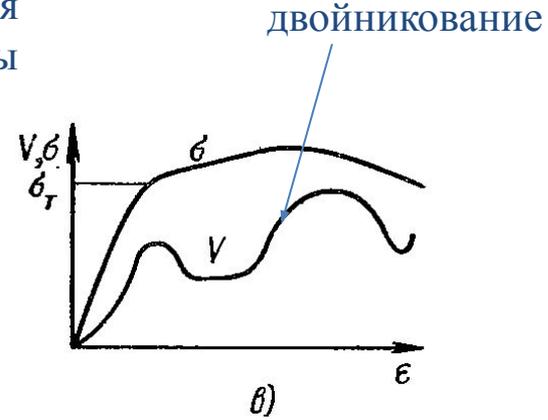


Рис. 2. Типичные кривые изменения эффективности АЭ в сопоставлении с диаграммами напряжение-деформация для железа (а, 1) стали (а, 2), металлов с гранецентрированной кубической решеткой (б), стареющих алюминиевых и титановых сплавов (в).

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 второго цикла

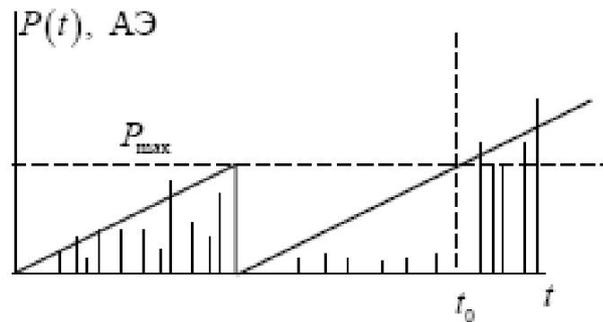


Рис. 2. Пояснение эффекта Кайзера:  $P(t)$  — изменение нагрузки во времени;  
 $P_{\text{max}}$  — максимальное значение нагрузки в первом цикле нагружения;  
 $t_0$  — момент времени достижения во втором цикле нагружения максимального значения нагрузки первого цикла

**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

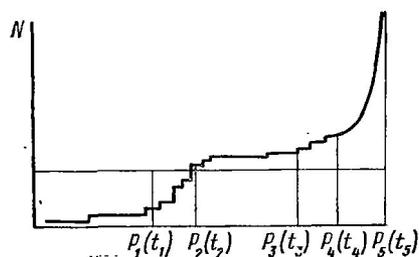


Таблица 1. Основные источники и область применения АЭ

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

# 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.