

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО РФ ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
“МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ”

На правах рукописи

МАРКОВ ЕВГЕНИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ СТРУКТУРЫ СИГНАЛОВ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОТ ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОТРЕЩИН В
ТОНКОСТЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва, 2007

**Работа выполнена на кафедре металловедения и физики прочности
Государственного технологического университета
“Московский институт стали и сплавов”**

Научный руководитель:

Профессор, д.т.н. Кудря А.В.

Официальные оппоненты:

Профессор, д.ф.-м.н. Бовенко В.Н.

Д.ф.-м.н. Коновалов И.И.

Ведущая организация:

Институт Металлургии и Материаловедения им. А.А. Байкова
Российской Академии Наук

Защита состоится 31.05.2007 г. в 15⁴⁰ на заседании Диссертационного
совета Д 212.132.08

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Государственного технологического университета
“Московский институт стали и сплавов”

Автореферат разослан 27 апреля 2007 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета

Профессор, доктор физ.-мат. наук



С.И. Мухин

Актуальность работы:

Для обеспечения безопасной эксплуатации промышленного оборудования и конструкций необходим мониторинг кинетики накопления и развития дефектов в реальном времени. Эта задача решается с применением метода акустической эмиссии (АЭ). Выбор информативных параметров эмиссии и определение их связи с процессом разрушения обычно основываются на многолетнем опыте эксплуатации объектов контроля. Существующие модели излучения и распространения объемных упругих волн, как правило, описывают волны в неограниченном пространстве или полупространстве. Но большинство объектов контроля – сосуды давления, резервуары, трубопроводы – тонкостенные. В них явление сложнее вследствие многократных отражений. По этой причине актуально развитие методов анализа сигналов эмиссии в листовых элементах конструкций на основе представлений об излучении и распространении нормальных волн.

Цель работы:

Сравнение информативности спектральных и частотно-временных параметров акустической эмиссии от вскрытия трещины на основе модели излучения волн Лэмба.

Научная новизна:

Установлена зависимость формы сигнала и спектра АЭ, отношения парциальных энергий и медианной частоты от глубины расположения и ориентировки хрупких микротрещин в листе. Оценено соответствие между структурным коэффициентом, равным отношению амплитуд антисимметричных и симметричных мод Лэмба нулевого порядка, и спектральными параметрами.

Предложена классификация поверхностных механических воздействий и трещиноподобных источников эмиссии. Действие поверхностной силы под разными углами и 16 вариантов образования микротрещин разделены на четыре группы в зависимости от степени симметрии генерируемого волнового поля относительно средней плоскости упругого слоя.

Оценено влияние кинетической функции акта эмиссии на структуру упругих импульсов. Показана возможность использования одинаковых критериев классификации для двух принципиально разных вариантов развития процесса в источнике, описываемых

дельта-импульсом и ступенчатой функцией. Установлены ограничения в применении частотно-временного анализа сигналов, обусловленные длительностью процесса излучения, акустическими свойствами пластины и характеристикой измерительного тракта.

Выявлены зависимости структурного коэффициента эмиссии от угла наблюдения в плоскости листа и расстояния от источника. Предложен метод определения пространственных характеристик источника, основанный на проведении частотно-временного анализа структуры сигналов.

Практическая значимость:

Полученные результаты служат основанием для объективной интерпретации измерений акустической эмиссии при разрушении листовых элементов конструкций. Предложенная классификация источников делает возможным определение природы АЭ по результатам измерения отношений амплитуд симметричных и антисимметричных колебаний. Это в свою очередь повышает надежность прогноза риска аварийного разрушения промышленных объектов и конструкций.

Параллельная частотно-временная обработка сигналов в многоканальных схемах регистрации может быть использована для определения механизма АЭ.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы представлены на следующих научных конференциях:

1. The 6th international conference of slovenian society for non-destructive testing “Previous experience and current innovations in non-destructive testing”. – Portoroz, Slovenia, 2001.
2. Международная конференция «Годишник на Технически Университет във Варна», Варна, Болгария, 2001.
- 3-5. 1-я, 2-я, 3-я Евразийские научно-практические конференции “Прочность неоднородных структур”, Москва, 2002, 2004, 2006.
6. XV Международная конференция “Физика прочности и пластичности материалов”, Тольятти, 2003.
7. Международная научная конференция “Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов”, Санкт-Петербург, 2004.

8. Международная школа “Физическое материаловедение”, XVIII Уральская школа металловедов-термистов “Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов”, Тольятти. - 2006.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, аналитического обзора литературы, четырех глав с описанием методики и результатов исследований, выводов и списка использованных источников из 200 наименований. Работа изложена на 247 страницах, содержит 63 рисунков и 5 таблиц.

Краткое содержание диссертации:

1. Методы возбуждения, измерения и обработки акустических сигналов в стальных листах

Распространение акустических сигналов исследовалось в листах из конструкционных сталей 20пс и 08кп толщиной 9 (№ 1) и 1,25 мм (№ 2) и размерами 1000x1000 и 495x545 мм, соответственно. Упругие волны генерировали несколькими источниками (имитаторами трещины): шариковым калибратором, резонансным пьезопреобразователем (с рабочей частотой 2,5 МГц), разрушением графитовых стержней диаметром 0,5 мм (источник Су-Нильсена) и хрупким разрушением пластин из углеродистой инструментальной стали.

В шариковом калибраторе дробь или стальные шарики диаметром $1\div 2$ мм укладываются на натянутые параллельно листу капроновые лески на расстоянии 40 мм от поверхности листа (без демпфирующей подставки – 25 мм). Ударный импульс шарiku передается от консольно закрепленной стальной пружины - пластины толщиной 0,5 мм, шириной 8 мм и рабочей длиной консоли 40 мм. Фиксатором регулируется отклонение пружины от нейтрального положения (до 20 мм).

Сигнал эмиссии хрупкого разрушения получен при изгибе стальных пластин с размерами 312x12x0,5 мм и надрезом глубиной $5\pm 0,2$ мм, консольно закрепленных на краю стального листа толщиной 9 мм (плечо нагружения 113 мм). Надрез располагался в месте крепления - в сечении с наибольшим изгибающим моментом ($0,34\div 0,56$ Н·м при

разрушении). Площадь излома - $7 \times 0,5 \text{ мм}^2$. Приемный преобразователь устанавливался на поверхности листа на расстоянии 424 мм от места крепления.

Цифровая регистрация сигналов осуществлялась платой сбора данных с частотой дискретизации 36 МГц и платой-осциллографом BORDO 211 с полосой пропускания входного тракта $0 \div 120$ МГц и 10-разрядным АЦП с регулируемой частотой записи до 100 МГц. Сигналы измерялись на расстояниях $80 \div 567$ мм от искусственных источников на обеих поверхностях стальных листов. С целью снижения уровня шума применялась низкочастотная Фурье-фильтрация с частотой среза $1 \div 5$ МГц. Кратковременные импульсные помехи распознавались по скорости нарастания переднего фронта.

Локализация во времени колебаний в выбранных диапазонах частот и определение их амплитуд проводилась методами вейвлет-детализации и построения огибающей сигнала после обработки каузальным нерекурсивным фильтром или оконной Фурье-фильтрации.

Вейвлет-преобразование вычислялось специализированной функцией пакета Wavelet Toolbox системы MatLab. Для построения спектрограмм были выбраны комплексные вейвлеты Морле, позволяющие сравнительно просто задавать частотное и временное разрешение детализации через параметры функции прототипа. Применение комплексных вейвлетов в отличие от вещественных делает возможным в наиболее явной форме отдельно наблюдать элементарные неоднородные колебательные процессы, входящие в структуру сигнала, без применения дополнительной обработки. Высота хребтов на спектрограммах несет информацию об амплитуде, а их координаты о времени и частоте колебаний. Каждый хребет соответствует приходу одного типа нормальных волн.

Количественный анализ временной структуры сигналов проводился в ограниченных частотных полосах. Для заданного значения параметра масштаба определялись величина и расположение максимумов детализации в соответствии с условием $dW(a,b)/db = 0$ (где $W(a,b)$ – вейвлет-преобразование; a и b – параметры масштаба и смещения). Это позволило оценивать время регистрации и максимальные амплитуды колебаний. Каузальные КИХ-фильтры проектировались в пакете Signal

Processing Toolbox в графической среде Filter Design & Analysis Tool (FDATool). Амплитудные огибающие сигналов строились методом преобразования Гильберта.

Проведено сравнение методов вейвлет-детализации и построения огибающей сигналов после полосовой фильтрации. Ширина полосы фильтров была сопоставима с шириной вейвлетной-функции в выбранном масштабе детализации. Значения амплитуд антисимметричных волн, рассчитанные разными методами, связаны линейными соотношениями с коэффициентом корреляции, отличающимся от единицы в третьем знаке после запятой.

При проведении спектрального анализа сигнал считался квазидетерминированным - с частично известным характером изменения во времени. Амплитудные спектры вычислялись для отдельных фрагментов сигналов после взвешивания трапециидальной весовой функцией. Эффективность применения трапециидального временного окна оценивалась по результатам обработки тестовых сигналов.

Сравнение формы сигналов выполнялось по значениям коэффициента корреляции между выделенными сегментами на интервалах длительностью 20 мкс. В качестве меры различий в формах спектров рассчитывалось евклидово расстояние.

Для описания прохождения импульсов через электроакустический тракт (включая объект) как линейный фильтр, его частотную характеристику измеряли экспериментально. По результатам дискретных преобразований Фурье рассчитывался комплексный коэффициент передачи электроакустического тракта $K(\omega) = S_2(\omega) / S_1(\omega)$ (где $S_1(\omega)$, $S_2(\omega)$ - комплексные спектры импульса возбуждения пьезоисточника и выходного сигнала).

Амплитудно-частотная характеристика совокупного тракта “пьезоисточник-приемник” определялось импульсным методом при прямом акустическом контакте преобразователей в диапазоне частот до 0,8 МГц по прохождению импульсов общей длительностью (на уровне 0,1) $\Delta t_{0,1} = 0,95$ мкс с временем нарастания переднего фронта (от 0,1 до 0,9 амплитуды) $\Delta t_{0,1/0,9} = 0,16$ мкс. Время задержки сигнала оценивалось в результате численного моделирования прохождения через измерительный тракт радиоимпульсов ($\Delta f / f < 1$) с огибающей в форме кривой Гаусса.

2. Частотно-временная структура акустической эмиссии от импульсных источников в пластинах

Вследствие расхождения волнового фронта объемные волны быстро затухают с расстоянием r – как $\sim 1/r$ (если не учитывать рассеяние и поглощение в материале). Поэтому основная энергия АЭ в протяженных листах переносится нормальными и поверхностными волнами, которые затухают намного медленнее ($\sim 1/\sqrt{r}$). Трещина поперечником $10\div 100$ мкм излучает, повидимому, на частотах до $\sim 10\div 100$ МГц, но из-за ограничений дальности приема сигналов на высоких частотах на практике измерения проводят в полосе до $1\div 2$ МГц.

Применяемые для измерений АЭ пьезопреобразователи, как правило, поляризованы перпендикулярно контролируемой поверхности и чувствительны преимущественно к нормальным смещениям. В таком случае электрический сигнал представляет собой реакцию на колебания в волнах Лэмба.

В данной работе основное внимание уделено изучению информативности АЭ точечных источников в низкочастотном диапазоне ($f \cdot H \leq 2$ МГц·мм; H – толщина листа), в котором распространяется только два типа волн Лэмба: симметричные (S_0) и антисимметричные (A_0) волны нулевого порядка. В стальных листах толщиной $H = 1\div 10$ мм точечной является трещина размером $d_{тр} < 0,1\div 1$ мм.

Вследствие многомодового распространения упругих волн АЭ в пластине представляет собой сумму неоднородных колебательных процессов с изменяющимися с течением времени значениями амплитуды и частоты. Для дельта-импульса в сосредоточенном источнике сигнал совпадает с импульсной характеристикой объекта. В таком случае, существует строгое соответствие между частотно-временной структурой эмиссии и формой дисперсионных кривых.

В результате свертки с импульсной характеристикой измерительного тракта мгновенные значения частоты отклика делокализуются вдоль временной оси – всплеск колебаний на данной частоте затухает в тракте в течение некоторого времени Δt . Если Δt_U – длительность процесса в источнике, а Δt_G , Δt_H , Δt_F – импульсные характеристики объекта, измерительного тракта и фильтра детализации, условие применимости частотно-временного анализа для дифференцированной оценки амплитуд низших мод Лэмба

записывается в виде: $\Delta t_{A0/S0}(f_j, r) > (\Delta t_U + \Delta t_G + \Delta t_H + \Delta t_F)$ (где $\Delta t_{A0/S0}$ – запаздывание А0-волн по отношению к S0 волнам).

Выбор информативных параметров сигналов АЭ в первую очередь зависит от характерных особенностей их формы. При наличии осцилляций наглядно описание в спектральной области. Если наблюдается ярко выраженный первый импульс, полезная информация может содержаться в значениях амплитуды, крутизны (скорости нарастания) и длительности переднего фронта. Излучающий пьезопреобразователь возбуждался импульсами длительностью $\Delta t_{0,1} \approx 1$ мкс с временем нарастания переднего фронта $\Delta t_{0,1/0,9} = 0,16 \pm 0,02$ мкс. Изучено два варианта расположения источника и приемника на стальном листе № 1. В первом случае приемный преобразователь располагался непосредственно над источником с противоположной стороны листа.

В измеряемом сигнале наблюдался первый импульс максимальной амплитуды длительностью менее 0,5 мкс. После него следовали колебания, затухающие в течение ~ 150 мкс. Скорости объемных волн типичные для конструкционной стали: $C_L = 5960$ м/с; $C_T = 3260$ м/с. Время двукратного прохождения продольной волной толщины листа $2H/C_L \sim 3$ мкс. Следовательно, первый импульс соответствует приходу объемных волн.

Во втором случае источник находился в центре листа, а приемник на расстоянии 300 мм от него. После прохождения упругим импульсом этого расстояния (что требует времени > 50 мкс) передний фронт приобретает форму осцилляций с периодом 2-5 мкс, нарастающих в течение 40 мкс. Увеличение длительности электрического импульса возбуждения пьезоисточника от 1 до 1,9 мкс не привело к существенным изменениям основных несущих частот колебаний. Следовательно они обусловлены расположением излучателя и приемника на поверхности листа.

Информативность параметров формы зависит от масштаба времени, в котором проводится анализ. При времени развертки 30 мс у сигналов, измеренных на расстоянии от места возбуждения упругого импульса 200 мм, виден крутой передний фронт и последующее затухание до уровня шума. В среднем масштабе (развертка – 2 мс) форма сигнала зависит от расположения источника и приемника относительно границ листа. Наиболее детальный анализ (развертка 400 мкс) выявляет осциллирующий передний

фронт - начальный фрагмент длительностью ~ 40 мкс, в пределах которого постепенно нарастает амплитуда колебаний.

Измеряемые колебания разделяются по типам волн либо непосредственным наблюдением симметрии относительно средней плоскости, либо по закону дисперсии. На двух частотах - 115 и 167 кГц в пределах “двухмодовой” частотной области время до первого наблюдаемого всплеска колебаний существенно отличается и соответствует скорости распространения волн $(5,07 \pm 0,04) \cdot 10^3$ и $(4,87 \pm 0,03) \cdot 10^3$ м/с. В листе № 2 детализация сигналов проводилась на частотах 200 и 720 кГц. Скорость антисимметричных волн на уровне 720 кГц - $(3,02 \pm 0,02) \cdot 10^3$ м/с, а на уровне 200 кГц – $(2,41 \pm 0,02) \cdot 10^3$ м/с.

Детализация на одной выбранной частоте дает полезную информацию для выделения информативного фрагмента сигнала. Структура сигнала включает в себя колебания нормальных волн, отраженных от границ (боковых поверхностей) листа. Их суммарная амплитуда зависит от условий фокусировки. Это может привести к завышенной оценке величины образовавшейся трещины.

Данный эффект наблюдался при измерении затухания в листе № 1. Пьезодатчик был расположен в центре листа, а излучающий преобразователь перемещался по его диагонали с шагом $\approx 0,07$ м. Максимальная амплитуда измерялась в двух временных интервалах: $[t_0 - 10 \text{ мкс}; t_0 + 10 \text{ мкс}]$ и $[t_0 - 10 \text{ мкс}; t_0 + 600 \text{ мкс}]$ (t_0 – время от срабатывания источника до максимума детализации антисимметричных волн на частоте 145 кГц). На расстояниях $\leq 0,35$ м измеряемое значение амплитуды не зависело от выбора временного интервала. Но при $r \geq 0,42$ было получено два разных значения, отличающихся в $1,6 \div 2,0$ раза. Это объясняется приходом в пределах второго интервала времени отраженных волн, которые в сумме по амплитуде превышают первичный упругий импульс.

3. Зависимость формы сигналов от пространственных характеристик источников

Для решения задач селектирования акустических помех и сигналов эмиссии от образования трещин разной степени опасности необходимо знать влияние пространственных характеристик источника на форму сигналов. Так как в измеряемом

сигнале два типа волн складываются с некоторой задержкой во времени, их амплитуды в разных частотных диапазонах оценивались методами детализации. Амплитудные оценки, вычисляемые в результате применения данного метода и полосовой фильтрации с последующим расчетом огибающей, совпадают. Они связаны квадратичной зависимостью вида $D = W^{1/2}$ с парциальной энергией W соответствующих типов колебаний во временных окнах фиксированной (не зависящей от расстояния) ширины.

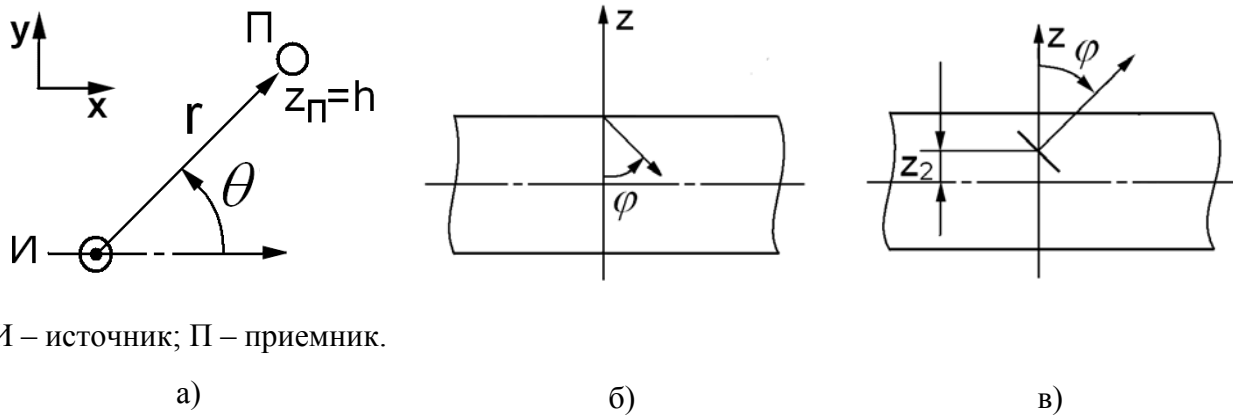
При описании сигналов определялся структурный коэффициент, равный отношению максимумов детализации: $P_D(f) = D_{A0}/D_{S0}$. Изменение формы сигнала наблюдалось экспериментально со сменой направления действия источника Су-Нильсена, расположенного на краю листа № 1. Когда импульс вводился перпендикулярно к поверхности отношение максимумов детализации антисимметричных и симметричных волн $D_{A0}/D_{S0} \geq 10$ ($f = 145$ кГц). При введении импульса вдоль листа на расстоянии 1 мм от поверхности в двух симметричных положениях относительно средней плоскости отношение первых двух максимумов детализации $D_{A0}/D_{S0} = 6,8 \pm 1,4$ и $6,7 \pm 1,2$. Идеальный симметричный источник (например, сила в средней плоскости листа), повидимому, должен возбуждать только симметричные волны.

В условиях возбуждения упругих волн пьезоисточником с рабочим диаметром 17 мм, действующим перпендикулярно поверхности листа, отношение максимумов детализации сигналов лежало в интервале $6,5 \div 8,5$. Различие с результатами, полученными при использовании источника Су-Нильсена, может быть связано с разным распределением нагрузки по поверхности.

Исследована акустическая эмиссия для 16 допустимых вариантов ориентировки возникающих микротрещин в пластине толщиной $H = 9$ мм. Моделями служили разрывы по площадкам с размерами на порядок меньшими длин волн (рис. 1, 2). Форму сигналов в заданной точке наблюдения рассчитывали в результате свертки тензора третьего ранга $G_{zp,q}(t) = \partial G_{zp}(t) / \partial q$ (где $G_{zp}(t)$ - тензор Грина) с тензором сейсмического момента $M_{pq}(t)$:

$$S_{a,s}(t) = \sum_p \sum_q M_{pq}(t) * G_{zp,q(a,s)}(t) = F^{-1} \left\{ \sum_p \sum_q \tilde{M}_{p,q}(\omega) \cdot \tilde{G}_{zp,q(a,s)}(\omega) \right\}$$

где $F^{-1}\{ \}$ - обратное преобразование Фурье.



И – источник; П – приемник.

а - координаты источника и приемника на плоскости; б – поверхностная сосредоточенная сила; в – трещина отрыва; $h = H/2$.

Рис. 1. Пространственные параметры источников АЭ и точки наблюдения

Для динамического тензора Грина упругого слоя приближенные аналитические выражения спектральных образов получены путем применения принципа взаимности к решению осесимметричной задачи /1/, в которой волны возбуждались ступенчатым приложением силы перпендикулярно к поверхности пластины:

$$\tilde{G}_{nm}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \omega) = -i\omega \cdot \tilde{U}_{mn}(\vec{r}_2, \vec{r}_1, \omega)$$

(“прямое преобразование Фурье” в работе /1/ задано со знаком “+” в показателе экспоненты).

Приемник расположен в точке $\vec{r}_1 = (0; 0; H/2)$, а источник – $\vec{r}_2 = (-r \cdot \cos(\theta), -r \cdot \sin(\theta), z_{ист})$ (r – расстояние от источника до точки наблюдения; θ - угол между осью x и вектором $\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$). Средняя плоскость пластины - $z=0$. В плоскости xOz лежит нормаль к площадке разрушения.

Акустические помехи от внешних сосредоточенных воздействий вычислялись суммированием откликов на действие взаимно перпендикулярных компонент вектора силы:

$$S_{a,s}(t) = \sum_j f_j(t) * G_{zj(a,s)}(t) = F^{-1} \left\{ \sum_j \tilde{f}_j(\omega) \cdot \tilde{G}_{zj(a,s)}(\omega) \right\}.$$

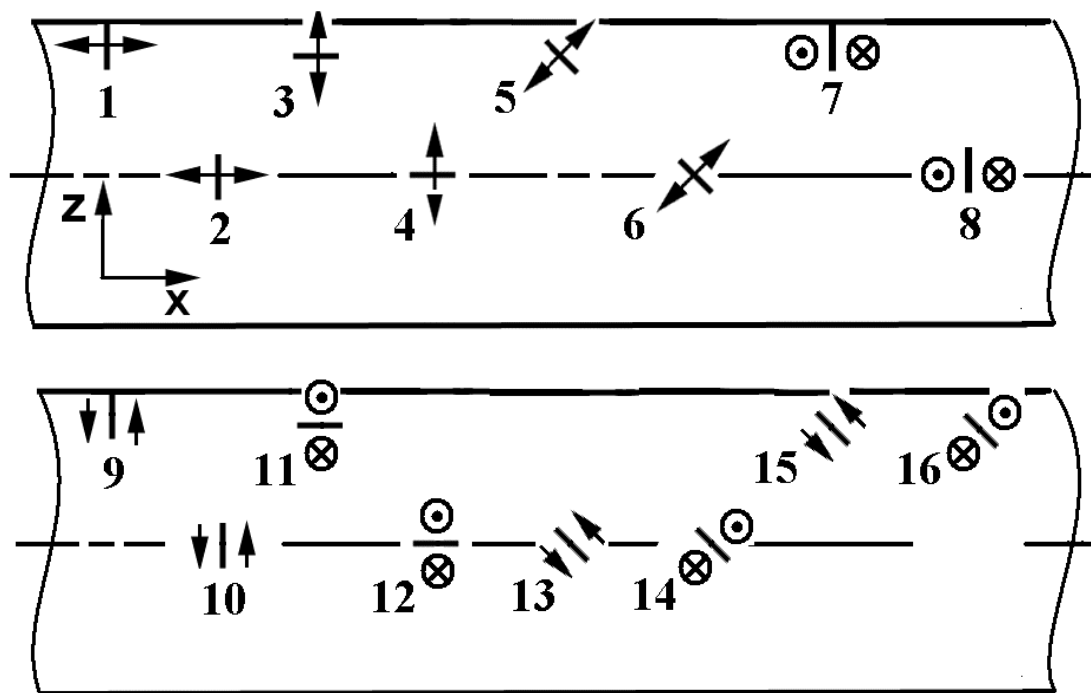


Рис. 2. Варианты образования трещин

Теоретическая модель АЭ позволяет рассчитать отдельно спектры симметричных и антисимметричных колебаний. С целью их сравнения вычислялся спектральный коэффициент: $P_S(f) = |S_{A0}(f)|/|S_{S0}(f)|$.

Выполнен анализ диаграмм направленности волн Лэмба нулевого порядка. По мере отклонения приложенного импульса силы от нормали к поверхности растет направленность излучения. В частности, когда угол между вектором силы и нормалью $\varphi=30^\circ$, максимальные и минимальные значения амплитуд спектра симметричных волн на частоте 120 кГц отличаются в 2,1 раза, а при $\varphi=45^\circ$ - в 3,4 раза. Рост направленности наблюдается и для антисимметричных волн. Углу $\varphi=30^\circ$ соответствует разница между максимальными и минимальными значениями амплитуд $\approx 7,1\%$, а при $\varphi=45^\circ \approx 18,9\%$. Для любого направления поверхностной силы амплитуды антисимметричных волн превышают амплитуды симметричных более чем в 5 раз. Исключение составляет скользящий удар, при котором в направлениях $\theta=\pm 90^\circ$ волны Лэмба не возбуждаются.

При образовании трещин на форму диаграмм направленности $A0$ и $S0$ волн и вид угловой зависимости спектрального коэффициента $P_S(\theta)$ влияют три фактора: наклон площадки разрушения относительно оси z ; глубина расположения и направление

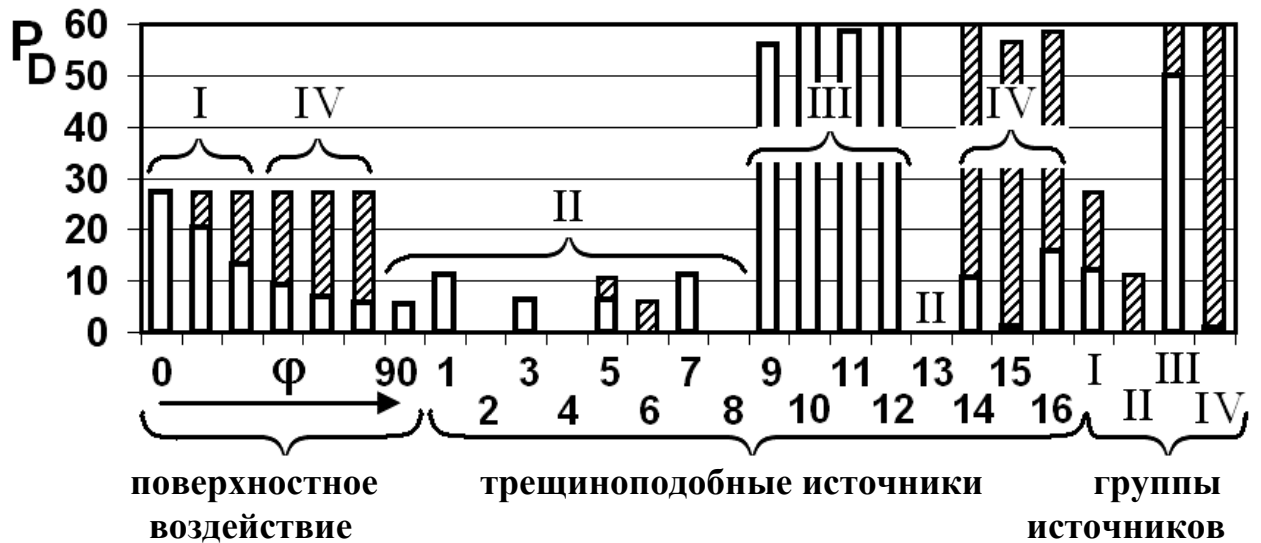
смещения берегов трещины. Предельный случай – отсутствие направленности излучения наблюдается при образовании трещин отрыва параллельных поверхностям пластины. Всем остальным вариантам источников соответствуют угловые зависимости спектральных амплитуд с двумя осями зеркальной симметрии.

Полностью симметричные относительно средней плоскости листа разрывы смещений (№ 2, 4, 8) возбуждают только симметричные колебания. От сдвигов № 10 или 12 колебания исключительно антисимметричные. При отклонениях от этих предельных положений и ориентаций источника формируются оба типа волн.

Спектральный коэффициент зависит от угла наблюдения θ для трещин сдвига - № 14 - 16 или отрыва - № 5 и 6, наклоненных под углом 45° . Для всех остальных вариантов образования трещин, когда возбуждаются обе низшие моды Лэмба, этот параметр эмиссии не зависит от расположения точки наблюдения. При этом акустические поля характеризуются либо полным отсутствием направленности, либо одинаковыми угловыми зависимостями спектральных амплитуд S_0 и A_0 волн.

Если пьезоантенна состоит из четырех преобразователей, амплитуда сигнала может быть измерена только под четырьмя углами. Этого недостаточно для восстановления всей угловой зависимости. Однако сам факт направленности излучения дает дополнительную информацию для определения типа источника.

По значению структурного коэффициента все рассматриваемые источники были разделены на четыре группы (рис. 3). Внешним механическим воздействиям в форме дельта-импульса (или ступени) с отклонением вектора силы от нормали на угол до 30° соответствует $P_D \in [12; 27]$. Скользящий удар ($\varphi=90^\circ$) и трещины № 1-8 и 13 со ступенчатым изменением раскрытия возбуждают упругие импульсы с коэффициентом $P_D \leq 11$. Образование трещин № 9 - 12 сопровождается генерацией импульсов с структурным коэффициентом ≥ 50 . Источники № 14 - 16 и поверхностное воздействие под углом $\varphi \geq 45^\circ$ образуют четвертую группу. Структурный коэффициент для № 14 в зависимости от угла наблюдения в плоскости листа может принимать любые значения больше 9, а для № 15 и 16 попадает в интервалы - $1 \div 55$ и $14 \div 58$, соответственно. Если по схеме нагружения листа и структуре материала существование источников четвертой группы исключается, возможно однозначное определение типа источника.



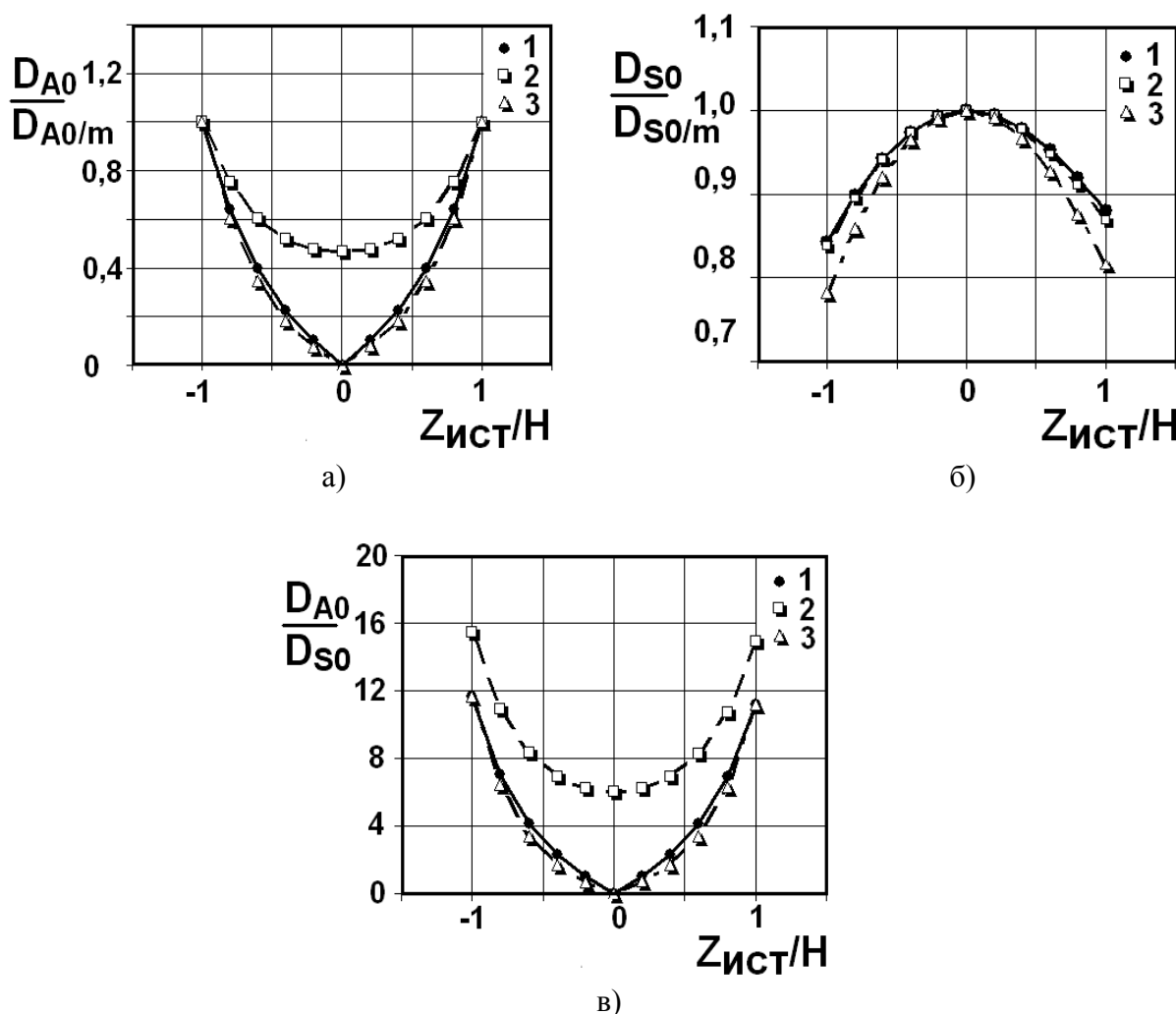
ϕ - угол по отношению к нормали к поверхности листа (изменяется с шагом 15° от 0 до 90°); $f = 120$ кГц; процесс в источнике в форме ступени.

Рис. 3. Диапазоны значений структурного коэффициента (P_D) в зависимости от типа и параметров источника

Существенно расположение источника по толщине листа (рис. 4.). Для трещин отрыва по середине толщины, ориентированных под углом $\phi = 0, 45$ и 90° , амплитуда симметричной составляющей в сигнале на 12 – 22% больше, чем при разрушении у поверхности. Структурный коэффициент эмиссии вертикальных и горизонтальных разрывов по мере их смещения к поверхности возрастает от нуля до $\approx 10 \div 12$. Если площадка разрушения наклонена под углом 45° , P_A изменяется в пределах $\approx 6 \div 15$.

Исследование аналитических выражений для компонент тензора Грина показало, что для всех рассмотренных вариантов источников амплитуды колебаний A_0 и S_0 волн в произвольной точке наблюдения зависят только от абсолютной величины смещения из средней плоскости. Таким образом, они совпадают, если трещины образуются на одинаковой глубине, но вблизи двух противоположных поверхностей листа. Однако, интерференция двух типов волн в структуре сигнала вызывает отклонение зависимостей $D_{A0}(z_{ист})$, $D_{A0}(z_{ист})$, $P_D(z_{ист})$ от полной симметрии относительно средней плоскости. Максимумы раздельной детализации симметричных волн при расположении вертикальной трещины отрыва на противоположных поверхностях листа совпадают с

погрешностью менее $10^{-3} \%$, а при детализации синтезированных сигналов (при $r = 0,4$ м) разница составляет 4,3 %.



1 - $\phi = 90^\circ$; 2 - $\phi = 45^\circ$; 3 - $\phi = 0^\circ$.

Рис. 4. Влияние глубины расположения микротрещины на структурный коэффициент акустических сигналов

Если период колебаний на анализируемом частотном уровне сопоставим или меньше длительности процесса в источнике, амплитудные параметры детализации будут чувствительны к внутренней кинетике акта АЭ. Данный эффект изучен для трещины отрыва на глубине $0,3H$ при развитии процесса в форме ступени с линейным нарастанием фронта за время $\Delta\tau$. Детализация вычислялась с применением комплексных вейвлетов Морле “0,5-1”, “1-1” и “2-1”.

На частотах 120 и 160 кГц, когда $\Delta\tau = 7 \div 8$ мкс максимумы детализации S0 и A0 волн раздваиваются, что усложняет интерпретацию формы сигналов. Пороговое значение $\Delta\tau$ сопоставимо с периодом колебаний на анализируемых частотах ($T_{(120\text{кГц})} \approx 8,3$ мкс; $T_{(160\text{кГц})} \approx 6,2$ мкс). С ростом $\Delta\tau$ от 0 до 6 мкс $P_{A(120\text{ кГц}^{0,5-1})}$ увеличивается на 68,8 %, $P_{A(120\text{ кГц}^{1-1})}$ – на 31,7 %, а $P_{A(120\text{ кГц}^{2-1})}$ – на 18,9 %. Таким образом, при выборе пробной функции с более узким спектром, структурный коэффициент в меньшей степени зависит от внутренней кинетики акта эмиссии. Повышение анализируемого частотного уровня от 80 до 160 кГц (что сопровождается расширением спектра вейвлетной функции) увеличивает чувствительность $D_{S0(“1-1”)}$, $D_{A0(“1-1”)}$ и $P_{A(“1-1”)}$ к изменению $\Delta\tau$. При $\Delta\tau_1 = 6$ мкс на частоте 80 кГц $D_{S0}(0)/D_{S0}(\Delta\tau_1) \approx 1,6$ и $D_{A0}(0)/D_{A0}(\Delta\tau_1) \approx 1,5$, а на частоте 160 кГц $D_{S0}(0)/D_{S0}(\Delta\tau_1) \approx 6,7$ и $D_{A0}(0)/D_{A0}(\Delta\tau_1) \approx 4,2$.

Таким образом, коэффициент P_D не зависит от внутренней кинетики акта разрушения, если $\Delta\tau > 1/f$. Микротрещины сопоставимые с масштабом структуры 10-100 мкм в листе толщиной ~ 10 мм могут быть классифицированы по пространственным характеристикам, если скорость их роста превышает $V_{кр} \sim 1 \div 10$ м/с (при $H = 1$ мм - $V_{кр} = 10-100$ м/с).

Дисперсия обуславливает изменение структурного коэффициента с расстоянием. Чем сильнее зависит групповая скорость нормальной моды от частоты, тем быстрее энергия колебаний “растекается” вдоль направления распространения волны и тем больше затухание амплитуды. Измерения сигналов проведены при расположении источника и приемного преобразователя на диагонали листа ($H = 9$ мм). Затухание удовлетворительно аппроксимируется степенными зависимостями вида $D_{A0/S0} \sim r^N$ (где $N = 0,5 \div 1$). Амплитуды A0 – волн на частоте 145 кГц (при использовании вейвлета Морле “1-1”) затухают в 1,3 раза слабее чем S0 волны. Это объясняется тем, что последние в окрестности рассматриваемой частоты сильнее диспергируют.

Разница экспериментально измеренных и расчетных значений показателя степени затухания составила порядка 10 %. Следовательно, изменения амплитуд колебаний с расстоянием от источника на исследованной частоте в основном обусловлено расхождением волнового фронта и дисперсией, а вклад затухания в материале, влияния шероховатости поверхности.

На частоте 145 кГц с увеличением r в интервале 0,3-1,5 м значения P_D , вычисленные с использованием комплексных вейвлетов Морле “1-1”, “2-1”, “4-1”, возрастают на 26, 20 и 6 %. Оптимизация частоты способствует большему снижению влияния дисперсии, чем сужение спектра функции-прототипа. На частоте 120 кГц, где дисперсия выражена слабее, коэффициент P_D , вычисленный с применением вейвлета “Морле 2-1”, с удалением от источника возрастает всего на 1,5 %, что в ≈ 13 раз меньше, чем на уровне 145 кГц.

Если перевести все определяющие параметры (за исключением углов наблюдения и ориентации источника) в безразмерную форму:

$$\frac{A}{h} = F\left(\frac{f \cdot h}{C_T}, \frac{C_L}{C_T}, \frac{r}{h}, \frac{z_2}{h}, \theta, \varphi, \psi\right),$$

то станет очевидным, что для сравнения результатов измерений АЭ в разных листовых объектах из одного материала достаточно выбирать анализируемые частоты обратно пропорциональные толщине листа.

Так как на данной частоте колебаний длина симметричных и антисимметричных волн разная, измеряемый структурный коэффициент зависит от диаметра преобразователя (апертурный эффект). В связи с этим сопоставлять результаты разных серий измерений можно, если диаметры всех приемных преобразователей одинаковы, или выполнена их калибровка раздельно двумя типами волн (что позволяет корректировать значения структурного коэффициента).

4. Сравнение актов акустической эмиссии методами спектрального анализа

Спектры от хрупких трещин могут достигать нескольких десятков мегагерц, что часто превышает ширину полосы пропускания аппаратуры. Однако, измеряя эмиссию на частотах до 1-2 МГц, остается возможность селективировать низкочастотные механические помехи и полезные сигналы при условии неизменной передаточной характеристики объекта и измерительной аппаратуры.

Чтобы рассматривать составной электроакустический тракт (объект контроля - измерительный канал) как линейный фильтр, линейность проверялась по выполнению

двух условий: независимости АЧХ от формы входного воздействия и выполнения принципа суперпозиции.

Наиболее наглядный способ оценки параметров акта эмиссии - полное восстановление формы первичного импульса методом простой инверсной фильтрации. В качестве “базовых” целесообразны источники с минимальной длительностью акта излучения. Из сравнения источника Су-Нильсена, шарикового калибратора и пьезопреобразователя по ширине спектра сигнала, в качестве калибратора выбран последний вариант с возбуждением электрическими импульсами длительностью $\Delta t_{0,1} = 0,95 \pm 0,02$ мкс (минимально возможной при используемой в экспериментах аппаратуре). Форму сигналов на входе пьезоисточников восстанавливали после сквозного прохождения упругого импульса по толщине листа № 1 и их измерения приемным преобразователем. На частотах минимумов АЧХ (≈ 390 и ≈ 590 кГц) восстановленный импульс искажен дополнительными колебаниями с амплитудой $4 \div 11$ % от амплитуды импульса (приведено максимальное значение за первые 20 мкс). На интервале > 100 мкс заметны колебания на низких частотах – 10-40 кГц, на которых АЧХ меньше 5 % от максимального значения (в диапазоне до 1 МГц).

Для применения фильтров, оптимизированных по Винеру, или нелинейной фильтрации с разложением в частотновременной области необходимо учесть еще специфику протяженных листовых объектов. Их передаточная характеристика имеет минимумы, положение которых вдоль частотной оси зависит от расстояния до источника.

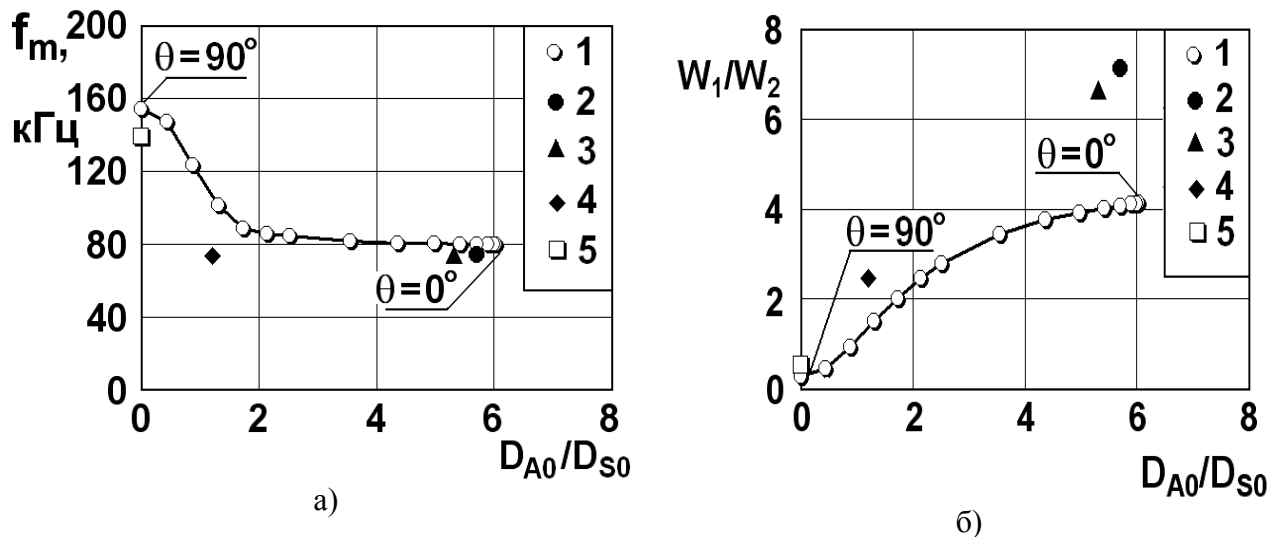
Если в спектрах двух сигналов расположение максимумов одинаковое, сравнить длительности импульсов в источнике можно путем вычисления спектральных отношений на соответствующих частотах (для которых максимально отношение сигнал/шум). На частоте локального максимума спектра f_0 равной 0,717 МГц нормированные спектральные отношения $(S(f_0)/S_{MAX})/(S_B(f_0)/S_{B,MAX})$ при возбуждении пьезоисточника импульсами длительностью $\Delta t_{0,1} = 1,12 \pm 0,02$; $1,23 \pm 0,02$ и $1,33 \pm 0,02$ мкс (треугольной формы) составили $0,90 \pm 0,04$, $0,52 \pm 0,04$ и $0,37 \pm 0,03$. Значительное изменение спектральных отношений при малом росте длительности импульса связано с близким расположением частоты f_0 к первому нулю спектра $\sim 1/\Delta t \sim 0,7 \div 0,9$ МГц. С ростом Δt (например,

механический удар) информация о длительности процесса в источнике определяется по расположению нулей $(S(f_0)/S_{MAX})/(S_B(f_0)/S_{B/MAX})$ на оси частот.

Осцилляции спектра, зависящие от расстояния до источника, сглаживаются скользящим средним. Другой путь – интегрирование энергии в широких частотных диапазонах. Тогда спектральным параметром служит отношение парциальных энергий $A(f) = W_1(f)/W_0(f)$ ($W(f)$ – парциальная энергия в диапазоне частот $f \pm \Delta f$). Сигналы пьезоисточника, возбуждаемого импульсами длительностью 1,0 и 1,9 мкс, измерялись на расстояниях 212 и 424 мм. Отношение парциальных энергий с ростом средней частоты f в пределах 62,5÷812,5 кГц при ширине диапазонов $2\Delta f = 125$ кГц одинаково монотонно убывает для обоих расстояний.

Возможность ранжирования актов эмиссии по длительности на основе вычисления медианной частоты подтверждена экспериментально для хрупкого разрушения стальных образцов, механических ударов, действия пьезоизлучателя и источника Су-Нильсена. Однако численное исследование прохождения прямоугольных и гауссовых импульсов через искажающий тракт с осциллирующей АЧХ, показало сильную неравномерность ранжирования.

В пределах двухмодовой области антисимметричные волны наиболее эффективно возбуждаются на низких частотах, а симметричные – на высоких. Поэтому спектральные параметры зависят от модового состава эмиссии. При образовании трещины отрыва под углом 45° к поверхности пластины на середине толщины, с ростом угла наблюдения θ от 0 до 90° коэффициент P_D снижается от 6 до 0 (рис. 5). Одновременно происходит увеличение медианной частоты f_M от 80 до 152 кГц, а отношение парциальных энергий P_W в частотных диапазонах 60÷120 и 120÷180 кГц уменьшается от 4,1 до 0,3 (спектры предварительно взвешивались окном с постоянным значением в интервале 60-180 кГц со сглаженными краями шириной 10 кГц). Сравнение характеристик эмиссии от трещин № 1-6 и приложения внешней сосредоточенной силы (под углом 90°) показало, что при одинаковом значении структурного коэффициента P_D акустические сигналы, в общем случае, могут отличаться по спектральным параметрам (при $P_D = 0$: $f_M = 140 \div 154$ кГц, $P_W = 0,3 \div 0,5$; при $P_D \approx 6$: $f_M = 74 \div 80$ кГц, $P_W = 4,1 \div 7,1$).



1 – трещина отрыва ($\varphi = 45^\circ$; $\theta = 0 \div 90^\circ$); 2 и 3 – поверхностная сила ($\varphi = 75$ и 90° ; $\theta = 0^\circ$); 4, 5 – трещины № 13 ($\theta = 0^\circ$) и 15 ($\theta = 55^\circ$); W_1 , W_2 – парциальные энергии в диапазонах 60-120 кГц и 120-180 кГц; f_m – медианная частота в полосе 50÷190 кГц; $r = 0,4$ м.

Рис. 5. Соотношение между структурным коэффициентом, медианной частотой f_m и парциальными энергиями сигнала W_1/W_2 .

Чтобы оценить степень влияния отражений от границ листа, источник устанавливался в двух позициях на одинаковом расстоянии от приемника (150 мм), но разном расстоянии от края листа (150 и 440 мм). Коэффициент корреляции сигналов в скользящем окне шириной 50 мкс в момент прихода отраженных волн снижался ниже $\sim 0,4$. Спектры рассчитывались с предварительным взвешиванием весовыми функциями шириной 100 мкс. Центр первого окна совпадал с максимумом антисимметричных волн на частоте 145 кГц, а второе было дополнительно смещено на 100 мкс. Евклидово расстояние между спектрами при разном расположении источника составило 21 % при применении первого окна, и 63 % после его сдвига на 100 мкс. Если расстояние источника от края листа достаточно велико, граничный эффект исключается в результате применения временных окон. Однако в перспективе целесообразно проведение исследований АЭ источников, расположенных непосредственно у границ листа или около отверстий.

В соответствии с результатами проведенных исследований структуры и спектров эмиссии при толщине листа 9 мм оптимальными для детализации сигналов являются частоты порядка 120 кГц (безразмерная частота $f \cdot H/C_T = 0,33$). Такой выбор обеспечивает

минимальное изменение P_D с расстоянием. По мере повышения анализируемой частоты до ~ 200 кГц перекрываются максимумы детализации, а вследствие ее снижения уменьшается отношение “сигнал/шум” для симметричных волн. В большинстве рассмотренных вариантов источников $D_{A0} > D_{S0}$, и поэтому возможность вычисления структурного коэффициента лимитировано условием $D_{S0}/D_N > 1$. Структурный анализ может быть проведен на расстояниях $r/H \geq \Delta t \cdot (V_{A0}^{-1} - V_{S0}^{-1})^{-1}/H \approx 12$ (где $\Delta t \approx 2/\Delta f$ - временное разрешение детализации; $\Delta f = 200$ кГц - ширина спектра вейвлетной функции с центральной частотой 120 кГц, ограниченного “сверху” пересечением хребтов $S0$, $A0$ и $A1$ волн).

Выводы:

1. Для определения типа источника по структуре АЭ оптимальной является безразмерная частота 0,33 (на которой длина продольной волны составляет 5,5 толщин листа). Такой выбор минимизирует влияние дисперсии и позволяет сопоставлять источники сигналов с амплитудой от 20 дБ над уровнем шума на расстояниях свыше 12 толщин листа.
2. По величине структурного коэффициента эмиссии, равного отношению максимумов детализации антисимметричных и симметричных колебаний, внешние механические удары под разными углами к плоскости листа и 16 возможных типов микроразрывов объединены в четыре группы. На расстоянии 4,4 толщины листа при использовании комплексного вейвлета “Морле 1-1” с оптимальной центральной частотой первым трем группам соответствуют значения $[12 \div 27]$, $[0 \div 11]$ и ≥ 50 . Для источников четвертой группы характерно попадание в разные интервалы в зависимости от угла наблюдения.
3. Применение многоканальных систем измерения делает возможным идентификацию четвертой группы источников. По отсутствию направленности структуры эмиссии отрывы и сдвиги по площадкам параллельным или перпендикулярным листу различимы на фоне механических ударов. Для наклонных трещин отношение амплитуд симметричных и антисимметричных волн Лэмба зависит от угла наблюдения.
4. Детализация сигналов в двухмодовой области позволяет классифицировать по пространственным характеристикам микротрещины поперечником 10-100 мкм в листе

толщиной ~ 10 мм при скорости их роста более $1\div 10$ м/с. При меньших значениях скорости форма детализации искажается в зависимости от внутренней кинетики актов разрушения.

5. Одинаковые трещины отрыва вблизи средней плоскости пластины и у свободной поверхности отличаются по величине структурного коэффициента не менее чем в два раза. Поэтому, если известен тип трещины, детализация сигнала позволяет оценить глубину ее расположения.

6. Измерение отношений парциальных энергий более предпочтительно для ранжирования актов эмиссии по длительности в тонком листе по сравнению с детальным анализом формы спектров или оценкой их характерных частот. При этом следует учитывать тип, ориентировку и расположение источника. В результате их изменения в пластине толщиной 9 мм с ростом структурного коэффициента от 0 до 6 медианная частота в полосе 60-180 кГц уменьшается в $\sim 1,5-2$ раза, а отношение парциальных энергий $W(60\div 120 \text{ кГц})/W(120-180 \text{ кГц})$ увеличивается в $\sim 10-20$ раз.

Цитируемый источник:

Weaver R.L., Pao Y.-H. // Journal of Applied Mechanics. – 1982. – V. 49. – pp. 821-836.

Публикации по диссертационной работе:

1. Кудря А.В., Марков Е.А. Количественная оценка разрушения по акустической эмиссии в различных масштабах измерения. // Материаловедение. – 2007. – N 1. – С. 13-18.
2. Kudrya A.V., Alekseev I.G., Markov E.A. Ductility estimation in materials by measurement of acoustic emission. // The 6th international conference of slovenian society for non-destructive testing “Previous experience and current innovations in non-destructive testing”. – 2001. – pp. 66-73.
3. Кудря А.В., Марков Е.А., Алексеев И.Г. Измерение неоднородности вязкости в конструкционных материалах по акустической эмиссии. // Труды международной научной конференции “Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов”. – Петербург.- 2004 г. – С. 23-28.

4. Кудря А.В., Алексеев И.Г., Марков Е.А. Использование метода акустической эмиссии для мониторинга материалов и конструкций. // Годишник на Технически Университет във Варна. - 2001. – С. 122-127.
5. Кудря А.В., Марков Е.А., Алексеев И.Г. Прогноз риска преждевременного разрушения структурнонеоднородных материалов. // Сб.тезисов докладов 1-й Евразийской научно - практической конференции «ПРОСТ-2002», Москва 2002 – С. 65.
6. Кудря А.В, Марков Е.А., Алексеев И.Г. Прямые измерения неоднородности вязкости по акустической эмиссии. // Сборник тезисов и докладов XV Международной конференции, Тольятти, 2003. – С. 3-66.
7. Кудря А.В., Марков Е.А., Алексеев И.Г. Акустико-эмиссионный контроль степени риска трещин в материалах и конструкциях. // Сб.тезисов докладов 2-й Евразийской научно -практической конференции «ПРОСТ-2004», Москва 2004 – С. 154.
8. Кудря А.В., Марков Е.А. Информативность структуры сигналов акустической эмиссии для наблюдения процессов разрушения. // Сб. Тезисов II Международная школа “Физическое материаловедение”, XVIII Уральская школа металловедов-термистов “Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов”. - Тольятти. - 2006. - С. 13.
9. Кудря А.В., Марков Е.А. Применение частотно-временного анализа сигналов акустической эмиссии в задачах разрушения. // Сб.тезисов докладов 3-й Евразийской научно-практической конференции «ПРОСТ-2006», Москва 2006 – С. 184.
10. Кудря А.В., Марков Е.А. Классификация источников акустической эмиссии (типа трещины) в тонкой пластине на основе оценки структуры излучения. // Деформация и разрушение (в печати).