58 Методы измерений

III. Методы измерений

УДК 621.762:534.212

## МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ВОЛН ЛЭМБА, ВОЗБУЖДАЕМЫХ КОРРОЗИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В.С. Беляев, В.Б. Бычков, Ю.А. Судденок, А.В. Тябликов, В.Н. Шорин

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл. belyaev@vniiftri.ru

Проведён сравнительный анализ возможностей преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) различных типов по обнаружению акустикоэмиссионных сигналов при имитации коррозии в тонкой пластине из алюминиевого сплава. Сигналы возбуждались двумя способами: падением калиброванных песчинок и травлением раствором соляной кислоты слабой концентрации. Сравнение производилось сопоставлением спектров отношений сигнал/шум, измеренных для семи типов ПАЭ. Наилучшие показатели отмечены у датчика ПАЭР 2500Д отечественного производства.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, коррозия, преобразователь акустической эмиссии, волны Лэмба, спектр, отношение сигнал/шум.

## ACOUSTIC EMISSION METHOD. TRANSDUCERS FOR REGISTRATION OF LAMB WAVES EXCITED BY CORROSION PROCESSES

V.S. Belyaev, V.B. Bychkov, Yu.A. Suddenok, A.V. Tyablikov, V.N. Shorin

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region belyaev@vniiftri.ru

A comparative analysis of the possibilities of acoustic emission transducers (AET) of various types for the detection of acoustic emission signals in the simulation of corrosion in a thin plate made of aluminum alloy was carried out. The signals were excited in two ways: by dropping of the calibrated sand grains and etching with a solution of hydrochloric acid of weak concentration. The comparison was made by comparing the spectra of signal/noise ratios measured for seven types of AET. The best indicators were observed in the AETR 2500D sensor of domestic production.

Key words: acoustic emission, corrosion, acoustic emission transducer, Lamb waves, spectrum, signal/noise ratio.

В задачах неразрушающего контроля широко применяется метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на приёме акустических сигналов, генерируемых возникающими в нагруженной конструкции дефектами. При диагностике коррозионных дефектов сигналы акустической эмиссии, как прави-

Альманах современной метрологии, 2019, № 3 (19)

ло, невелики; обнаружение их представляет собой сложную задачу [1]. В настоящей работе проведён сравнительный анализ обнаружительной способности ПАЭ различных типов при приёме волн Лэмба, возбуждаемых имитацией коррозионного воздействия в пластинах из сплава АМг6. Рассматриваются тонкие пластины, удовлетворяющие условию: толщина пластины меньше длины акустической волны.

Акустические волны, моделирующие сигналы акустической эмиссии коррозионного происхождения, могут возбуждаться различными способами.

Узкополосное возбуждение акустических волн в большинстве случаев осуществляется либо модулированным нужной частотой лазерным лучом, сфокусированным на поверхность пластины [2], либо электроакустическим преобразователем, расположенным на грани клина, приклеенного на поверхность пластины.

Широкополосное возбуждение акустических волн может производиться:

- короткими импульсами лазерного излучения, сфокусированного на поверхность [2];
- дозированной струёй калиброванного песка, падающего с определённой высоты на поверхность пластины [3];
- акустической эмиссией, вызванной коррозией пластины при дозированном внесении раствора кислоты на её поверхность [4].

Охарактеризуем вкратце распространение звуковых волн в пластинах, наглядно описываемое дисперсионными кривыми.

Система дисперсионных кривых нормальных волн в пластине имеет моды нулевого порядка *a*0 и *s*0, которые существуют при любой частоте и толщине. Лэмбовские звуковые волны в пластине (рис. 1 [5]): изгибная волна *a*0 (антисимметричная мода) и волна растяжения — сжатия *s*0 (симметричная мода) — при увеличении частоты переходят в поверхностную волну Рэлея (колебания частиц совершаются только вблизи поверхности).



и антисимметричная мода *a*0 (б)

Моды первого и более высоких порядков возникают при определённых критических значениях толщины, которые соответствуют резонансным частотам продольных и поперечных волн.

Зависимости фазовых скоростей звуковых мод s0, a0, s1, a1, s2, a2 от частоты, рассчитанные для пластины АМг6 толщиной 3 мм, приведены на рис. 2. Синим цветом выделены кривые для антисимметричных мод, красным — для симметричных. Фазовая скорость симметричной акустической волны на низкой частоте близко к скорости продольной волны. На больших частотах скорости симметричной и антисимметричной волн стремятся к скорости рэлеевских волн.



Рис. 2. Зависимости фазовых скоростей звуковых мод от частоты

Зависимости групповых скоростей звуковых мод s0, a0, s1, a1, s2, a2 от частоты, рассчитанные для такой же пластины, приведены на рис. 3. Синим цветом выделены кривые для антисимметричных мод, красным — для симметричных. Для старших мод на нижних частотах наблюдается сильная дисперсия групповой скорости.



Рис. 3. Зависимости групповых скоростей звуковых мод от частоты

Альманах современной метрологии, 2019, № 3 (19)

Расчёты деформации при распространении симметричной нулевой моды звука в этой пластине показывают, что на частотах до 500 кГц перпендикулярная к поверхности пластины составляющая деформации незначительна по сравнению с составляющей деформации, находящейся в плоскости пластины. Длины волн для симметричной нулевой моды звука с частотой свыше 500 кГц не превышают 1 см. Это затрудняет приём симметричной нулевой моды звука акустическими датчиками с диаметрами чувствительного элемента около 1 см на всех частотах.

Расчёты деформации для той же пластины при распространении антисимметричной нулевой моды звука показывают, что на всех частотах перпендикулярная к поверхности пластины составляющая деформации не меняет относительной амплитуды и формы. Длины волн для антисимметричной нулевой моды звука с частотой свыше 130 кГц менее 1,2 см. Соответственно для размеров чувствительного элемента более 6 мм на частотах свыше 130 кГц начинается падение чувствительности акустических датчиков к лэмбовской звуковой антисимметричной волне.

Перейдём к описанию экспериментов.

В экспериментах применялись ПАЭ следующих типов:

- PKWDI, LN150I со встроенными предусилителями;
- GT200, GT205, GT300 (с усилителем);
- ПАЭР 2500Д с предусилителем;
- ZET601.

Сигнал с ПАЭ усиливался и подавался на вход универсального цифрового осциллографа, одним из инструментов которого является быстрое преобразование Фурье (БПФ). Осциллограф работал в режиме запуска по превышению некоторого уровня, составлявшего примерно треть от уровня максимального сигнала. От времени превышения регистрировалась сигналограмма длительностью 1 мс. Для измеренных датчиками сигналограмм делалось БПФ с окном *flat top*, которое усреднялось по 200 сигналограммам, и спектрограмма представлялась в логарифмическом масштабе относительно уровня 1 мВт в полосе 1 кГц. Из спектрограммы акустических сигналов вычиталась спектрограмма, полученная при отсутствии акустических сигналов. Пример результирующей спектрограммы для ПАЭР 2500 приведён на рис. 4.

Исследование обнаружительной способности датчиков к лэмбовским волнам, возбуждаемым падающими песчинками, производилось с помощью дозатора песка ДПВ. Блок-схема дозатора песка и взаимное расположение составных частей приведены на рис. 5. Механические части дозатора — бункер, наклонный жёлоб и вибраторы — размещались на специальном штативе, обеспечивающем возможность регулировки высоты падения рабочего материала (величины зазора между выпускающим отверстием бункера и жёлобом с помощью регулятора) и наклона жёлоба для задания скорости продвижения зёрен по жёлобу и режима производительности соответственно.



Рис. 4. Спектр отношения сигнал/шум, получаемого с ПАЭР 2500 при регистрации волн Лэмба, возбуждаемых падающими песчинками



Рис. 5. Блок-схема дозатора песка: 1 — двухканальный генератор импульсов; 2 — бункер для рабочего материала; 3 — наклонный жёлоб; 4 — верхний вибратор; 5 — нижний вибратор; 6 — траектория движения песка; 7 — объект; 8 — направление вибраций; 9 — регулятор зазора подачи песка в жёлоб; h — регулируемая высота падения песка

Подача рабочего материала из бункера по жёлобу производилась с помощью электромагнитных вибраторов, обеспечивающих вибрацию жёлоба в ортогональных направлениях, при этом производительность ДПВ должна задаваться частотой и амплитудой выходных сигналов питающего вибраторы генератора, входящего в состав ДПВ. Генератор, питающий вибраторы,

Альманах современной метрологии, 2019, № 3 (19)

располагался в непосредственной близости от штатива. Внизу, под нижней кромкой жёлоба, располагался объект имитационного воздействия (пластина из сплава АМг6) с установленным акустическим датчиком. В режиме работы — поверка ДПВ, там находится устройство взвешивания песка (весы).

Датчики располагались на расстоянии 80 мм от центра пятна падения песчинок на пластину АМг6 толщиной 3 мм. Дозатор ограничивал период падения песчинок величиной не менее 100 мс. Использовался калиброванный кварцевый песок (песчинки размером 0,25–0,3 мм). Песчинки падали с высоты 53 см на пластину, расположенную под углом 45° к направлению падения. Результаты по уровням отношения сигнал/шум для волн Лэмба, возбуждаемых импульсами падающих песчинок, для исследуемых ПАЭ сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Тип ПАЭ	Диапазоны частот, кГц					
	0–100	100-200	200-300	300-500	500-900	
ZET 601	30	32	23	25	18	
GT200	24	42	33	28	15	
GT205	46	43	28	27	16	
GT300	32	34	34	33	31	
PKWDI	35	40	34	39	35	
LN150I	33	42	33	36	18	
ПАЭР 2500С-1	49	42	36	27	13	
ПАЭР 2500С-2	46	48	38	23	13	
ПАЭР 2500Д-3	49	49	44	30	19	
ПАЭР 2500Д-4	44	46	38	29	17	

Максимумы отношений сигнал/шум (в дБ) на выходе ПАЭ для волн Лэмба разных частотных диапазонов

Таким образом, при регистрации волн Лэмба несомненное преимущество имеют для низких частот ПАЭ GT205 и ПАЭР 2500, для высоких частот — GT300 и PKWDI.

В другом эксперименте был проведён анализ обнаружительной способности ПАЭ к акустическим волнам Лэмба, образующимся при ускоренной коррозии пластины АМг6 под действием раствора соляной кислоты.

Преобразователь устанавливался вертикально на плоскую пластину АМг6 толщиной 3 мм и прижимался с силой от 0,22 до 5 Н. Лэмбовские акустические колебания возбуждались в результате травления алюминиевой пластины 2-процентным раствором соляной кислоты. Пластины располагались горизонтально с закреплением концов через резиновые прокладки.

Были просверлены лунки диаметром 2 мм и глубиной 0,5–2 мм в центральной области пластины. Лунки заполнялись до верха, так чтобы объём раствора составлял 1,5–6 мкл. Преобразователи располагались симметрично относительно пластины с двух сторон в местах на расстоянии 12–15 см от места травления. В отличие от возбуждения ультразвука падающими песчинками процесс возбуждения ультразвука микродозами раствора соляной кислоты — процесс нестационарный. Динамика импульсов акустической эмиссии для одной из инжекций раствора кислоты приведена на рис. 6. Длительность процесса акустической эмиссии вследствие коррозии составляла от четверти часа до часа.



Рис. 6. Количество регистрируемых в минуту импульсов акустической эмиссии в зависимости от времени, прошедшего после заполнения лунки

Помимо суммарной амплитуды изменяется во времени спектральный состав акустической эмиссии. На рис. 7 приведены спектры акустической эмиссии в разные интервалы времени, прошедшего после заполнения лунки раствором соляной кислоты. Низкочастотный характер акустической эмиссии со временем меняется на более высокочастотный. Для сравнительных измерений выбирались одинаковые интервалы времени, прошедшего с момента инжекции 2-процентного раствора соляной кислоты.

Для акустических датчиков PKWDi и GT300, использовавшихся на первом этапе эксперимента, не удалось зафиксировать превышение сигналом предустановленного уровня для данной концентрации кислоты.

Альманах современной метрологии, 2019, № 3 (19)



Рис. 7. Спектры акустической эмиссии в зависимости от времени, прошедшего с момента инжекции 2-процентного раствора соляной кислоты

На следующем этапе эксперимента одновременно устанавливались по два ПАЭ, один из которых всегда был ПАЭР-2500Д. Синхронизация осциллографа осуществлялась от канала, к которому был подключён ПАЭР-2500Д. По двум тысячам регистраций импульсов акустической эмиссии датчиком ПАЭР-2500Д одновременно регистрировались сигналы с датчика PKWDi или сигналы с датчика GT300. Такой приём позволил принять, накопить и выделить из шума спектры для малых сигналов, получаемых с высокочастотных датчиков. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2

	Частота	Отношение	Частота	Отношение	
	пика, кГц	сигнал/шум, дБ	пика	сигнал/шум, дБ	
PKWDI	100	11	170	10	
GT300	20	8	100	5	
ПАЭР 2500Д	100	20	160	21	

Отношение сигнал/шум при регистрации импульсов АЭ, возбуждаемых химической коррозией

При уменьшении концентрации HCl в растворе до 0,5 объёмных процента с помощью датчика ПАЭР 2500Д уверенно регистрировались спектры импульсов акустической эмиссии, вызванных воздействием на пластину из АМг6 дозы в 5 мкл раствора.

66 Методы измерений

Полученные результаты позволяют рекомендовать датчик ПАЭР 2500Д для применения в задачах обнаружения акустикоэмиссионых сигналов коррозионного происхождения.

## Литература

- 1. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Диагностика технических устройств. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. Глава 3.
- 2. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
- 3. Баранов В.М., Гриценко А.И., Карасевич А.М. и др. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. М.: Наука, 1998. 304 с.
- 4. Бигус Г.А., Попков Ю.С. Перспективы применения метода акустической эмиссии для слежения за развитием коррозионных повреждений // Технология машиностроения. 2008. № 8. С. 40–43.
- 5. Ультразвук / под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.

Альманах современной метрологии, 2019, № 3 (19)