АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2021, том 67, № 3, с. 270–274

ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.8,620.179.16

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПЛАСТИНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛН ЛЭМБА

© 2021 г. С. И. Муякшин[a], *, И. Н. Диденкулов[a, b], П. Н. Вьюгин[a], В. В. Чернов[b], Д. М. Денисов[c]

[a] *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", пр. Гагарина 23, Нижний Новгород, 603950 Россия*

[b] *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук", ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия*

[c] *ООО "Научно-инновационный центр Институт исследований, разработок и трансферта технологий", ул. Крымский вал 3, стр. 2, Москва, 119049 Россия*

**e-mail: serg_mun@list.ru*

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.
После доработки 21.02.2021 г.
Принята к публикации 10.03.2021 г.

Приводятся результаты исследования взаимодействия волн Лэмба с неоднородностями в пластинах из композитного материала. Выяснено, что волны этого типа испытывают дифракцию на неоднородностях типа отверстия и локализованной массовой нагрузки поверхности. Предложен и проверен экспериментально метод обнаружения и локализации неоднородностей, основанный на сравнении распределения амплитуд волнового поля по поверхности пластины до и после появления неоднородности. Статья подготовлена по материалам доклада на 3-й Всероссийской акустической конференции (21–25 сентября 2020 г., г. Санкт-Петербург).

Ключевые слова: волны Лэмба, дифракция, распределение амплитуд, локализация неоднородностей

DOI: 10.31857/S0320791921030114

ВВЕДЕНИЕ

Многие технические изделия содержат тонкие пластины и оболочки, например емкости для газов и жидкостей. Они, как правило, изготавливаются из металлов. В последние годы металл часто заменяется полимерными композитными материалами (ПКМ), которые находят все более широкое применение в промышленности, особенно в транспортном машиностроении. Использование разнообразных видов ПКМ стимулирует изучение их акустических свойств. В частности, представляет интерес излучение и экранировка шума конструкциями из ПКМ. Поэтому не удивительно, что в этом направлении активно ведутся как экспериментальные исследования (см., например, [1]), так и работы, сочетающие расчетный и экспериментальный подходы [2]. Кроме того, во время эксплуатации конструкции из ПКМ подвергаются статическим и динамическим нагрузкам, что может привести к появлению повреждений.

Важной задачей является обнаружение и локализация повреждений. Для ее решения наряду с традиционными методами ультразвукового неразрушающего контроля (nondestructive testing – NDT) активно развиваются системы мониторинга состояния конструкций (structural health monitoring – SHM) [3–8]. Их задачей является постоянное или инспекционное (периодическое) слежение за структурной целостностью элементов сложных технических систем. Особую значимость эти методы приобретают для современных конструкций из композитных материалов, которые, как уже говорилось, находят широкое применение в транспортном машиностроении. Для их реализации используются различные типы волн в широком диапазоне частот: от десятков и сотен кГц до десятков МГц [3–8]. В отличие от NDT-систем, SHM-системы используют сети из большого числа датчиков, установленных на конструкцию или интегрированных в нее. Чаще всего применяются пьезоэлектрические преобразователи, которые используются как для излучения, так и для приема [3, 6, 7]. Благодаря этому фактически в режиме реального времени может произ-

водиться обнаружение повреждений, возникающих в процессе эксплуатации таких сложных технических систем, как летательные аппараты (ЛА), железнодорожный подвижной состав, трубопроводы. Критически важными конструкционными элементами ЛА, например, являются тонкостенные оболочки, подкрепленные ребрами жесткости (крылья, фюзеляж, оперение, баллоны высокого давления и т.д.).

Хорошо известно, что в пластинах и тонкостенных структурах могут распространяться волны Лэмба [4, 9, 10]. Поэтому именно этот тип волн наиболее привлекателен для реализации концепции SHM-систем. Однако, как сказано в обзорах [3, 4], работы в этом направлении находятся на раннем этапе развития. Это обусловлено многомодовым характером распространения волн Лэмба, сложностью селективного возбуждения нужных мод, сложным характером взаимодействия волн с повреждениями различного типа (отверстие, расслоение, трещина и т.д.) и трудностями в создании алгоритмов обработки пространственно-временной информации, необходимых для обнаружения и локализации повреждений.

Для обнаружения и локализации дефектов используется несколько различных подходов. Среди них преобладают методы, основанные на сравнении распределений сигналов по датчикам до и после появления дефекта, если таковой возник [3–6]. Такие подходы в англоязычной литературе называются “baseline”-методами. В некоторых работах этой направленности используется статистический подход [7]. Авторы некоторых публикаций [8] претендуют на создание “baseline free”-методов, которые, как ясно из названия, не требуют регистрации опорного поля. В конце нашей работы будет уделено специальное внимание анализу их аргументов.

Анализ публикаций показывает, что в них не уделяется достаточного внимания физике взаимодействия волн Лэмба и неоднородностей. Данная работа в какой-то степени восполняет этот пробел. В ней экспериментальным путем показано, как использование известных закономерностей рассеяния и дифракции волн на неоднородностях и приемов обработки сигналов, сложившихся в радио- и акустической локации, может помочь в разработке методов решения задачи обнаружения и локализации повреждений в тонких пластинах и оболочках.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Будем исходить из того, что двумерные волны, распространяющиеся в тонких пластинах [9, 10], подчиняются тем же общим закономерностям, что и волны другой физической природы. При падении плоской волны длиной λ на неоднородность с поперечником D на расстоянии R от нее, удовлетворяющем неравенству $R < D^2/\lambda$, формируется область частичной тени, где волна ослаблена. При увеличении расстояния из-за дифракции эта область расширяется и в, так называемой, “волновой зоне” при $R > D^2/\lambda$ возникает сектор, где имеется определенная угловая зависимость амплитуды: в середине этой области ослабление максимально, к краям эффект уменьшается. Угловую ширину этого сектора можно грубо оценить соотношением $\theta \approx \lambda/D$, которое применимо, если λ/D существенно меньше 1. Вычитая из поля, искаженного неоднородностью, опорное поле (“baseline field”), можно получить диаграмму рассеяния падающего поля неоднородностью. Когда поперечник неоднородности существенно больше длины волны, диаграмма рассеяния вытянута в направлении распространения. Поэтому рассеянный сигнал (напомним, он получается вычитанием возмущенного и опорного полей) в этом направлении существенно больше сигнала, рассеянного назад. Отсюда следует, что локация “на просвет” энергетически выгоднее локации с использованием сигнала обратного рассеяния. Для реализации “просветной” схемы зондирования приемники должны располагаться в пределах некоторого сектора за неоднородностью. Регистрируя возмущения углового распределения амплитуды разностного поля с помощью нескольких приемников, можно, во-первых, установить факт появления неоднородности, во-вторых – оценить направление на нее.

В случае применения для “просветного” зондирования неоднородностей волн Лэмба картина усложняется из-за их модовой структуры. В классической работе Лэмба [10] было показано, что моды этих волн делятся на две группы: симметричные и антисимметричные. Нулевая антисимметричная мода представляет собой простую изгибную волну, в которой все слои пластины движутся в фазе, а в нулевой симметричной (“перистальтической”) моде движение симметрично относительно средней линии пластины. Фазовая и групповая скорости симметричной моды выше, чем антисимметричной. Поэтому возбужденный в пластине волновой импульс при распространении распадается на несколько сигналов, которые достигнут приемника в разные моменты времени. Из общих соображений ясно (это подтверждается экспериментально), что разные моды ослабляются неоднородностями по-разному. Поэтому одной из задач предварительной обработки принятых сигналов является выбор временных окон, в которых эффект максимален. В этих окнах и должен производиться их дальнейший анализ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная установка представляла собой жесткое основание, на котором по окружности с радиусом 150 мм с шагом по углу 30° было установлено 8 пьезоэлектрических преобразователей (ПП) наклонного типа, которые использовались как приемники на частоте ниже резонансной. В центре основания располагался излучатель такого же типа. Основание с излучателями устанавливалось на исследуемую пластину из композитного материала. Акустический контакт ПП с пластиной обеспечивался с помощью вазелина. Излучались импульсы, состоящие из 3–5 периодов несущей частоты с амплитудой до 200 В. Аналоговые сигналы с приемных ПП подавались на 8-ми канальный цифровой осциллограф фирмы National Instruments типа NI PXI-5105. Программа сбора, обработки и отображения данных была разработана в среде NI LabVIEW.

Первые опыты показали, что на частотах около 100 и 200 кГц использованный нами ПП наклонного типа эффективно возбуждал в композитном материале антисимметричные (изгибные) и симметричные волны Лэмба со скоростями 1300–1500 и 2000–2600 м/с, соответственно. Ослабление этих волн оказалось весьма значительным и составило примерно 0.6–1.0 дБ/см. Было установлено, что “медленная” антисимметричная мода волны Лэмба хорошо ослабляется как отверстием, так и нагрузкой поверхности в виде массивного стального цилиндра. На рис. 1 показано распределение амплитуд разностных сигналов по приемникам для отверстия и цилиндра диаметром 10 мм. Видно, что цилиндр ослабляет сигнал всего лишь в 1.5 раза меньше, чем отверстие. Это позволило использовать цилиндры различного диаметра в качестве имитаторов дефекта, что заметно упростило исследования. Интересно отметить, что неоднородность в виде отверстия или нагрузки поверхности в виде массы слабо влияет на “быструю” симметричную моду. Поэтому в разностном сигнале последняя, как правило, почти полностью подавляется.

Для проверки возможностей “просветной” локации был проведен ряд опытов с пластиной из композитного материала. В качестве неоднородностей использовались как 10 мм отверстие в пластине, так и имитаторы различных диаметров. Для изменения положения отверстия основание с ПП переставлялось или поворачивалось относительно центрального излучателя. Имитатор можно было устанавливать в нужное положение без перемещения основания с датчиками относительно исследуемой пластины.

Проведенные опыты подтвердили изложенные выше качественные соображения. Амплитуды разностных сигналов измерялись во временных окнах, соответствовавших приходу изгибной

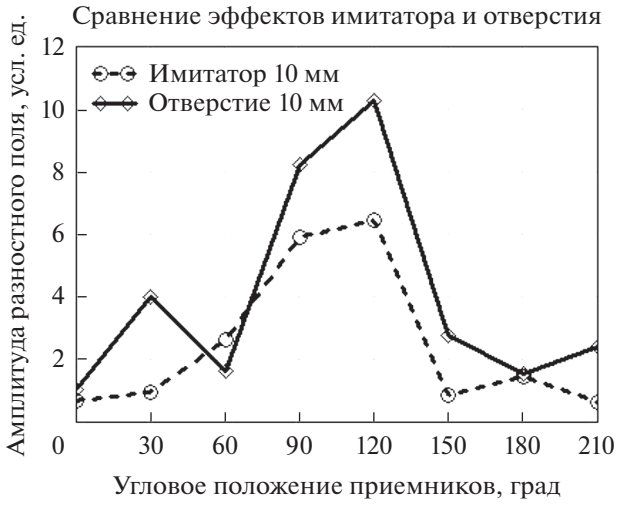

Рис. 1. Сравнение угловых распределений амплитуд разностных сигналов за отверстием и имитатором.

(медленной) моды, т.к. именно она лучше всего “чувствовала” неоднородность. На рис. 2а показано, как распределение амплитуд разностных сигналов по приемникам сдвигается при изменении углового положения дефекта. Очевидным способом определения направления на неоднородность в данном случае является расчет “центра тяжести” углового распределения разностного поля по следующей формуле:

$$\mathrm{Angle}_k = \frac{\sum_{n=0}^{7} \mathrm{Diff_amp}_{n,k} \mathrm{Ang}W_n}{\sum_{n=0}^{7} \mathrm{Diff_amp}_{n,k}}. \qquad (1)$$

Здесь Angle_k – расчетное значение углового положения имитатора, $\mathrm{Diff_amp}_{n,k}$ – амплитуда разностного сигнала на датчике n при положении имитатора k, $\mathrm{Ang}W_n$ – весовая функция (угловые координаты приемников). Индексы принимают следующие значения: $n = 0...7$ (номера приемников), $k = 0...8$ (номера угловых положений имитатора).

На рис. 2б показан результат расчета направления на неоднородность указанным выше методом при повороте основания с ПП относительно центрального излучателя с шагом 10°.

Метод вычитания, использованный для выделения рассеянных неоднородностью сигналов, позволил установить, как изменяется их задержка в зависимости от углового положения неоднородности. Когда неоднородность лежит на линии, соединяющей излучающий и приемный ПП, задержка разностного сигнала практически равна задержке прямого (невозмущенного) сигнала. По мере увеличения угла между этой линией и на-

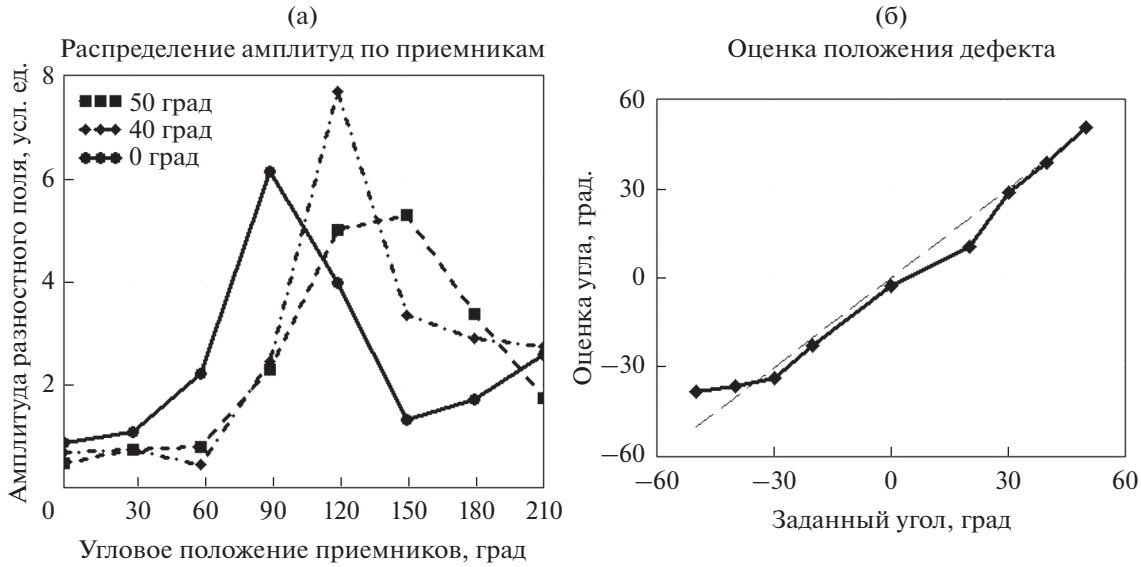

Рис. 2. Определение направления на неоднородность: (а) – смещение распределения амплитуд разностных сигналов по приемникам при смещении дефекта; (б) – оценка углового положения дефекта.

правлением на дефект задержка будет расти. Ее легко рассчитать по формуле:

$$t_d = \frac{R_0 + \sqrt{R_0^2 + R^2 - 2RR_0\cos(\theta - \theta_0)}}{V}. \qquad (2)$$

Здесь R_0 – радиус окружности, на которой находятся приемники, R – расстояние от центра окружности (излучателя) до неоднородности, θ_0 – направление на приемник, θ – направление на неоднородность, V – скорость волны. После простых преобразований из (2) можно получить формулу (3) для расчета расстояния от центрального излучателя до неоднородности. Ее особенностью является независимость от скорости распространения выбранной для анализа моды.

$$R = R_0 \frac{\left[(t_d/t_0)^2 - 1\right]}{2(t_d/t_0 - \cos(\theta - \theta_0))}. \qquad (3)$$

Здесь t_d – измеренная задержка сигнала бистатического рассеяния зондирующего импульса на неоднородности, t_0 – задержка прямого сигнала. Под бистатической схемой эхолокации понимается передача и прием зондирующего сигнала разнесенными в пространстве антеннами. Формула (3) справедлива при $t_d/t_0 > 1$, что выполняется, если излучатель, неоднородность и приемник не лежат на одной прямой. На рис. 3б показаны расчетные и экспериментальные задержки принятых сигналов при нахождении отверстия на расстоянии 50 мм от центра основания. Соответствующее распределение амплитуд разностных сигналов показано на рис. 3а. Измеренные задержки для приемников, находящихся в секторе от 60° до 180°, хорошо совпадают с расчетными, что показывает возможность определения расстояния от центрального излучателя до неоднородности. Для этого найденное направление θ и задержку t_d нужно подставить в формулу (3). Такой расчет можно провести для нескольких соседних приемников, а результаты усреднить. Как видно из рис. 3, при отклонении направления на приемник от направления на неоднородность задержка растет, а амплитуда разностного сигнала падает. При этом из-за уменьшения амплитуды сигнала и мультимодального характера распространения волн Лэмба точность определения задержки падает. Поэтому на практике использование описанного метода определения расстояния до неоднородности возможно для групп приемников, расположенных под небольшими углами относительно направления на неоднородность. Предложенный в данной работе подход можно было бы также назвать “методом малоуглового бистатического дифференциального рассеяния”.

Таким образом, “просветный” метод, реализованный в данной конфигурации датчиков, дает возможность определить положение неоднородности (дефекта) в цилиндрической системе координат.

Насколько можно судить по литературе [3–8], предлагаемый нами подход к решению задачи обнаружения и локализации повреждений является оригинальным. Метод предполагает сравнение распределения волнового поля по исследуемой области до и после момента появления повреждения, т.е. относится к группе “baseline”-методов. Альтернативой такому подходу являются т.н. “baseline free”-методы. Один из них описан в ра-

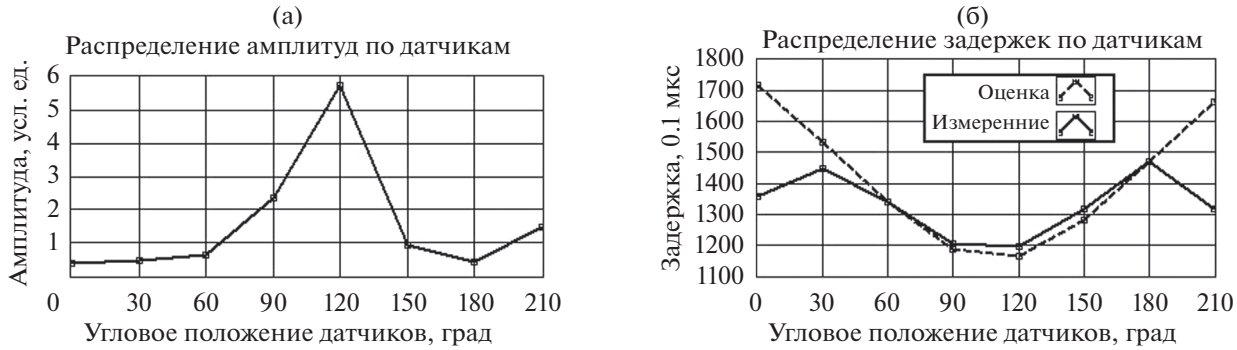

Рис. 3. Определение расстояния до неоднородности: (а) – распределение амплитуд разностных сигналов; (б) – сравнение расчетных и экспериментальных задержек.

боте [8]. Авторы этой работы утверждают, что baseline free-методы имеют преимущество по сравнению с методами сравнения. Нам, однако, представляется, что это преимущество кажущееся, поскольку в обоих случаях должна быть решена задача обнаружения, для чего необходимо выбрать порог обнаружения. Только для baseline- и baseline free-методов порог должен выбираться из разных соображений: в первом случае должны учитываться возможные изменения параметров системы под воздействием внешних факторов, которые приводят к изменениям опорного поля, а во втором – собственные и внешние шумы приемного тракта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что антисимметричные волны Лэмба низшей (нулевой) моды в пластинах дифрагируют на дефектах типа отверстия и локализованной массовой нагрузки поверхности. Рассеянное поле может быть выделено путем вычитания невозмущенного опорного поля из поля, возмущенного дефектом. Выполненные в работе эксперименты на основе предложенного метода подтвердили, что в диагностической системе с центральным излучателем направление на дефект может быть определено по угловому распределению рассеянного поля, регистрируемого с помощью нескольких приемников, а расстояние от центрального излучателя до дефекта – по задержкам сигналов малоуглового бистатического рассеяния. Было также продемонстрировано, что массивный цилиндр служит отличным имитатором дефекта. Он легко перемещается по поверхности, что может быть использовано для оценки точности работы систем обнаружения и локализации на всей контролируемой площади. Предложенный метод может найти применение в задачах диагностики пластинчатых конструкций (оболочек), выполненных как из традиционных, так и из композитных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зверев А.Я., Черных В.В.* Экспериментальное определение акустических и виброакустических характеристик многослойных композитных панелей // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 6. С. 727–736.

2. *Дубинский С.В., Севастьянов Ф.С., Голубев А.Ю., Денисов С.Л., Костенко В.М., Жаренов И.А.* Расчетно-экспериментальное исследование влияния виброакустических нагрузок на прочность композитного соединения // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 4. С. 460–470.

3. *Xinlin Qing, Wenzhuo Li, Yishou Wang, Hu Sun*. Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications // Sensors. 2019. V. 19. P. 545–572. https://doi.org/10.3390/s19030545

4. *Zhongqing Su, Lin Ye, Ye Lu*. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review // J. Sound Vib. 2006. V. 295. P. 753–780. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.01.020

5. *Wang Ch.H., Rose J.T., Chang F.-K.* A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring // Smart Materials and Structures. 2004. V. 13. P. 415–423.

6. *Zhongqing Su, Lin Ye, Xiongzhu Bu*. A damage identification technique for CF/EP composite laminates using distributed piezoelectric transducers // Composite Structures. 2002. V. 57. P. 465–471.

7. *Wang Qiang, Yuan Shenfang*. Baseline-free imaging method based on new PZT sensor arrangements // J. intelligent material systems and structures. 2009. V. 20. № 9. P. 1663–1673. https://doi.org/10.1177/1045389X09105232

8. *Navarro J.C.* Robust structural damage detection by using statistical hybrid algorithms. PhD thes., Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2019. 106 p.

9. *Викторов И.А.* Физические основы применения волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 169 с.

10. *Lamb H.* On wave in an elastic plate // Proc. R. Soc. Lond. A. 1917. V. 93. P. 114–128.