

Влияние несплошностей на распространение волн Лэмба в пластинах

М. С. Смирнова[✉], А. В. Теплякова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] smirmariyaa@yandex.ru

Аннотация. Разработана математическая модель распространения волн Лэмба нулевой моды в тонкой стальной пластине на примере частного случая. Возбуждение волн осуществляется на основе метода клина в программе Comsol Multiphysics. Численно получены значения эквивалентного напряжения и напряжения по Мизесу при распространении волн, а также среднего эквивалентного напряжения на наклонной поверхности призмы, играющей роль приемника и излучателя. Рассмотрена форма полученных симметричных и антисимметричных волн нулевой моды. Изучено влияние размеров дефекта на скорость распространения волны Лэмба и, следовательно, на время фиксации прошедшего сигнала.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, волны Лэмба, дефектоскопия

Для цитирования: Смирнова М. С., Теплякова А. В. Влияние несплошностей на распространение волн Лэмба в пластинах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 54–60. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-54-60.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Influence of Discontinuities on the Propagation of the Lamb Wave in Plates

M. S. Smirnova[✉], A. V. Teplyakova

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉] smirmariyaa@yandex.ru

Abstract. A mathematical model of the Lamb propagation of the zero mode in a thin steel plate on propagation propagation has been developed. Wave excitation was carried out on the basis of the wedge method in the Comsol Multiphysics program. The paper calculates the measurement of the equivalent voltage and the von Mises voltage during wave propagation, as well as the average equivalent voltage on the inclined surface of the prism, which plays the role of a receiver and emitter. The article considers the shape of the obtained symmetric and antisymmetric waves of the zero mode. The influence of the defect dimensions on the Lamb propagation velocity and, consequently, on the fixation time of the transmitted signal is shown.

Keywords: non-destructive testing, Lamb waves, flaw detection

For citation: Smirnova M. S., Teplyakova A. V. Influence of Discontinuities on the Propagation of the Lamb Wave in Plates // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 54–60. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-54-60.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Существующие и используемые на данный момент в промышленности методы диагностики зачастую не позволяют получить полное представление об объекте контроля из-за наличия труднодоступных или недоступных участков изделия. Для более качественного и своевременного

мониторинга состояния промышленного оборудования необходимо разрабатывать новые методики и средства неразрушающего контроля. Они позволяют своевременно отслеживать состояние технического оборудования и снижают риски возникновения аварийных ситуаций.

Основные методы контроля предполагают непосредственный контакт изделия и измерительной системы, требующий снятия изоляции и зачистки исследуемого участка. Однако это трудозатратно и далеко не всегда возможно в связи с условиями эксплуатации. Кроме того, традиционные методы ультразвукового контроля не подходят для комплексного мониторинга протяженных объектов (тонкостенных труб, пластин, листов). Применение волн Лэмба в неразрушающем контроле позволяет проводить измерения в труднодоступных местах или на расстоянии, что существенно упрощает и ускоряет процесс диагностики.

В данной статье рассмотрено влияние несплошностей в тонких пластинах на распространение волн Лэмба нулевого порядка.

Граничные условия. Для моделирования распространения волн Лэмба в тонких пластинах будем применять метод клина. Для этого на призме из оргстекла задается колеблющаяся наклонная поверхность, выполняющая роль приемника и источника волн. Она описывается уравнением колебательной скорости, соответствующим огибающей по Гауссу:

$$V_0(t) = \sin(2\pi f_0 t) \exp\left[-\left(\frac{t-2T_0}{T_0/2}\right)^2\right],$$

где f_0 – заданная частота; T_0 – период; t – время.

Призма из оргстекла жестко закреплена на свободной пластине из стали Ст3 толщиной 2 мм. Для уменьшения помех и упрощения модели для остальных поверхностей призмы заданы слабоотражающие границы. Граничные условия на этих поверхностях описываются следующими выражениями:

$$S_n = -d \frac{\partial v}{\partial t},$$

$$d = d(\rho, c_s, c_p),$$

где S – тензор напряжений; n – единичный вектор нормали среды; d – тензор механического импеданса; ρ – плотность; c_s – скорость поперечной волны; c_p – скорость продольной волны.

Жесткая граница между призмой и пластиной описывается уравнениями

$$v_{src} = v_{dst},$$

$$S_{src} n_{src} = -S_{dst} n_{dst},$$

где v – колебательная скорость; src – среда-источник; dst – среда-приемник.

Остальные границы в рассматриваемой модели являются свободными и описываются уравнением

$$S_n = 0.$$

На рис. 1 представлена схема построенной модели с указанными граничными условиями.

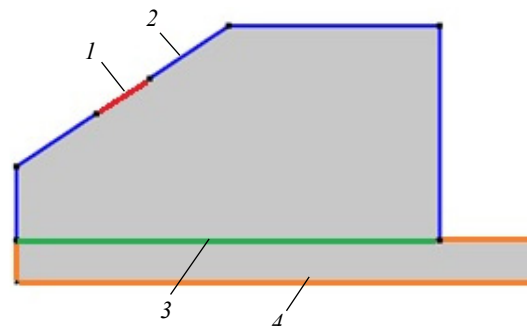


Рис. 1. Схема модели: 1 – колеблющаяся наклонная граница; 2 – слабоотражающие границы; 3 – жесткий контакт; 4 – свободные границы
Fig. 1. Model schema: 1 – oscillating inclined boundary; 2 – weakly reflecting boundaries; 3 – hard contact; 4 – free boundaries

Расчеты описанной модели проводились в COMSOL Multiphysics 6.0 в интерфейсе Elastic waves, в котором применяется в качестве расчетного метода разрывной метод Галеркина (DG-FEM). Благодаря особенностям программы построение сетки неконформное, максимальный размер треугольного элемента сетки равен $\lambda/1.5$.

Дисперсионные кривые. Особенностью волн Лэмба служит дисперсия скоростей. В данном исследовании рассматривается нулевая мода симметричной и антисимметричной волн. Их характеризуют уравнения [1]

$$\begin{cases} (k^2 + \gamma^2)^2 \operatorname{ch}(qh) \operatorname{sh}(\gamma h) - \\ - 4k^2 \gamma q \operatorname{sh}(qh) \operatorname{ch}(\gamma h) = 0, \\ (k^2 + \gamma^2)^2 \operatorname{sh}(qh) \operatorname{ch}(\gamma h) - \\ - 4k^2 \gamma q \operatorname{ch}(qh) \operatorname{sh}(\gamma h) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$q = \sqrt{k^2 - k_t^2},$$

$$\gamma = \sqrt{k^2 - k_l^2},$$

где $2h$ – толщина пластины; q – волновое число для скалярного потенциала с продольной волной; γ – волновое число для скалярного потенциала с поперечной волной; k – волновое число; k_l – волновое число продольной волны; k_t – волновое число поперечной волны.

Первое уравнение описывает симметричные волны Лэмба, второе – антисимметричные. Для упрощения записи используются обозначения S_0 и A_0 для симметричной и антисимметричной волн Лэмба нулевой моды соответственно.

Используя (1), можно построить дисперсионные кривые для определения оптимальной частоты для возбуждения волн A_0 и S_0 , приведенные на рис. 2.

Как видно из этого рисунка, максимальный спад фазовой скорости симметричной волны наблюдается в диапазоне волновых размеров пластины от 2 до 3, а для антисимметричной – от 0 до 1. Оптимален диапазон от 1 до 2 волновых размеров, так как в нем формируются только нулевые моды волн Лэмба и отсутствует сильная дисперсия фазовых скоростей. Для проведения исследований была выбрана частота 600 кГц, соответствующая нормативно-технической документации для проведения ультразвукового контроля и удовлетворяющая вышеописанному условию.

Результаты расчетов. В качестве расчетной модели была выбрана пластина из стали Ст3 толщиной 2 мм, шириной 1 м и длиной 250 мм. Призма преобразователя установлена с краю пластины. В результате расчета математической модели были получены графики среднего эквивалентного напряжения на наклонной поверхности призмы, которая исполняет роль излучателя и приемника. Данные построения служат аналогом сигнала, полученного с приемного преобразователя. Эквивалентному напряжению соответствует формула

$$S_e = -\frac{S_{xx} + S_{yy} + S_{zz}}{3}, \quad (2)$$

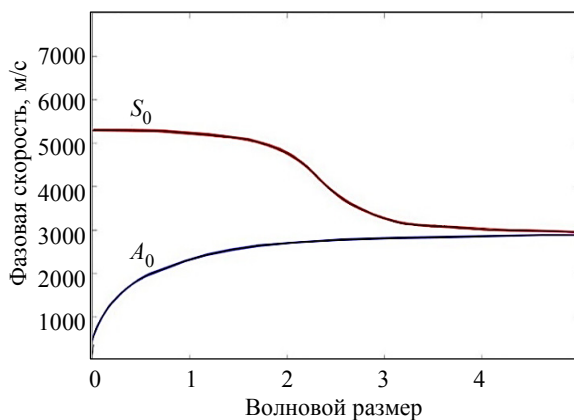


Рис. 2. Дисперсионные кривые фазовых скоростей волн Лэмба нулевой моды
Fig. 2. Dispersion curves of the phase velocities of the zero-mode Lamb wave

где S_e – эквивалентное напряжение; S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} – нормальные компоненты тензора напряжений.

На рис. 3 показаны полученные графики эквивалентного напряжения при распространении волн Лэмба в расчетной модели. Они отличаются структурой для симметричной и антисимметричной волн.

Положительные и отрицательные значения эквивалентного напряжения на рисунке соответствуют растяжению и сжатию в соответствии с (2).

На рис. 4 показаны результаты расчетов напряжения по Мизесу в рассмотренной модели. Структура волн Лэмба коррелирует с данными в исследовании [2]. Дополнительно стрелочками проиллюстрирована колебательная скорость. Деформация пластины в ходе распространения волн используется для наглядности и визуально усилена в 100 раз.

На рис. 5 приведен график среднего эквивалентного напряжения на наклонной поверхности преобразователя. Первый сигнал – зондирующий, он достаточно протяженный по времени, так как в него входят и все возможные переотражения внутри призмы. Далее принимаются сигналы симметричной и антисимметричной волн, отразившихся от торца пластины. Поскольку скорость этих волн различается практически в два раза, то они хорошо разрешаются между собой несмотря на затянутые сигналы. При увеличении длины пластины сигналы будут еще сильнее разбегаться во времени. Кроме того, из рис. 5 видно, что амплитуда антисимметричной волны значительно меньше симметричной и фронт ее более затянутый. Поэтому для контроля протяженных объектов целесообразнее использовать симметричную волну Лэмба.

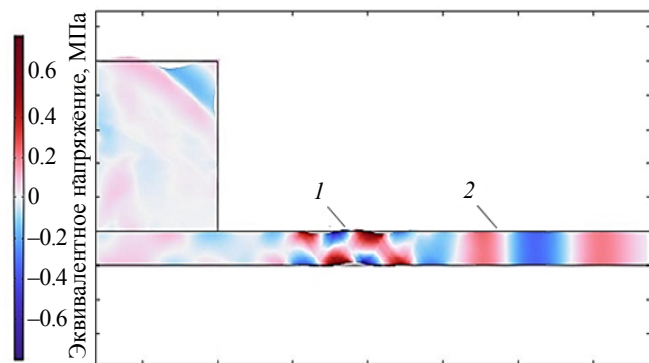


Рис. 3. Распространение волн Лэмба в пластине:
1 – антисимметричная волна; 2 – симметричная волна
Fig. 3. Propagation of the Lamb wave in the plate:
1 – antisymmetric wave; 2 – symmetric wave

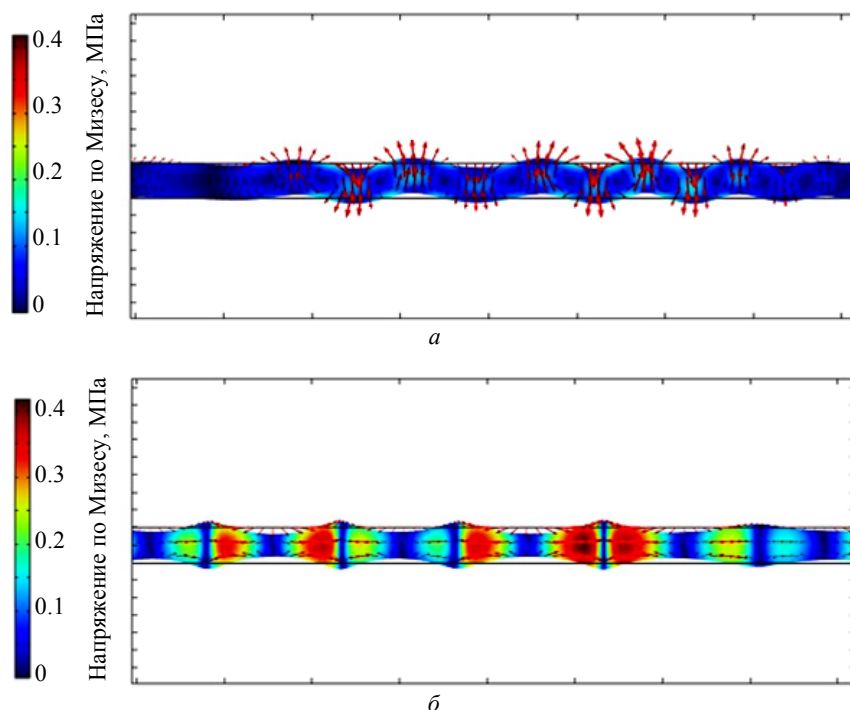


Рис. 4. Напряжение по Мизесу: *a* – антисимметричная волна; *б* – симметричная волна

Fig. 4. Von Mises stress: *a* – antisymmetric wave; *б* – symmetric wave

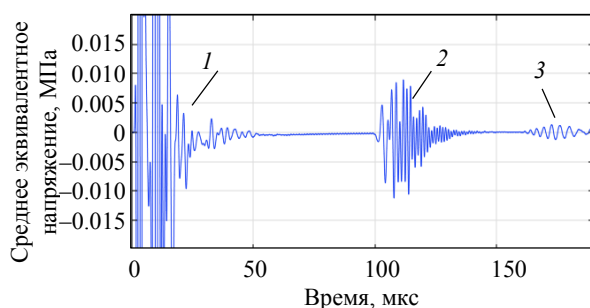


Рис. 5. Среднее эквивалентное напряжение на наклонной поверхности: 1 – зондирующий сигнал; 2 – S_0 отраженная от торца пластины; 3 – A_0 отраженная от торца пластины

Fig. 5. Average equivalent stress on an inclined surface: 1 – probing signal; 2 – S_0 reflected from the plate end; 3 – A_0 reflected from the plate end

Из представленной расчетной зависимости видно, что сигналы, пришедшие на приемный преобразователь, не имеют четко выраженного максимума, поэтому для повышения точности измерения времени необходимо проводить измерение по фронту на постоянном уровне отсчета.

Исследование влияния параметров несплошностей. Для оценки влияния дефектных мест в пластине на распространение волн Лэмба в описанную ранее бездефектную модель на расстоянии 150 мм от призмы преобразователя была добавлена модель дефекта. В качестве нее использовался поперечный пропил. Ширина пропила соответствует ширине рассматриваемой пластины.

На рис. 6 представлен рассчитанный сигнал, полученный в модели пластины с дефектом глубиной 1 мм и длиной 5 мм. Для сравнения на него наложен сигнал от бездефектной модели. Из расчета видно, что в модели с дефектом дополнительно формируются два сигнала, отраженные от дефекта (симметричная и антисимметричная волна). Так же формируются и сигналы, отраженные от торца пластины, и, в отличие от бездефектной модели, они имеют меньшую амплитуду. Из-за наложений волн друг на друга оценивать антисимметричную волну не представляется возможным, а для симметричной волны можно заметить уменьшение времени ее прихода на приемный преобразователь.

Далее на рис. 7 в увеличенном масштабе приведены результаты расчетов среднего эквивалентного напряжения, соответствующего первой полуволне сигнала, отраженного от торца пластины. Расчеты проводились для моделей дефектов в виде пропилов длиной 2, 5, 7 и 10 мм.

Из рис. 7 видно, что при наличии дефекта в сигнале, отраженном от торца пластины, вместо одного пика формируется два. Также при увеличении продольных размеров дефекта эти пики становятся более заметными и удаляются друг от друга, при этом незначительно меняется их амплитуда. Появление второго пика можно объяснить формированием дополнительной волны на заднем фронте пропила.

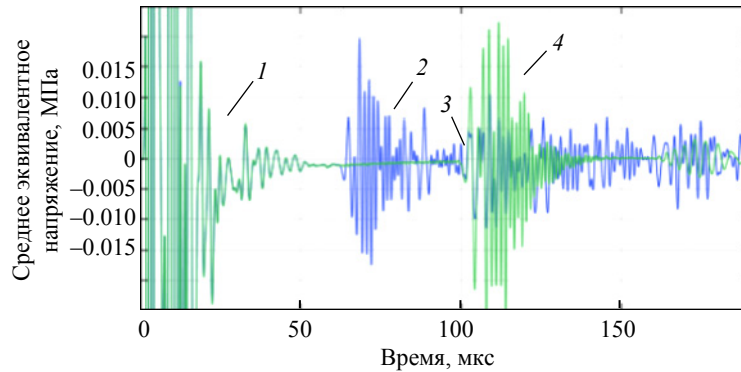


Рис. 6. Среднее эквивалентное напряжение на наклонной поверхности в модели пластины с дефектом 5 мм: 1 – сигнал переотраженных волн внутри призмы; 2 – S_0 отраженная от дефекта в модели с дефектом; 3 – S_0 отраженная от торца пластины в модели с дефектом; 4 – S_0 отраженная от торца пластины в модели без дефекта

Fig. 6. The average equivalent stress on the inclined surface in the plate model with a defect of 5 mm: 1 – the signal of the re-reflected waves inside the prism; 2 – S_0 reflected from the defect in the model with a defect; 3 – S_0 reflected from the end of the plate in the model with a defect; 4 – S_0 reflected from the end of the plate in the model without a defect

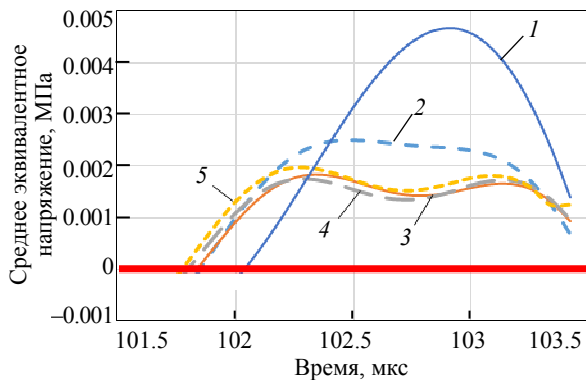


Рис. 7. Среднее эквивалентное напряжение в зависимости от протяженности дефекта:

1 – модель пластины без дефекта; 2 – дефект длиной 2 мм; 3 – дефект длиной 5 мм; 4 – дефект длиной 7 мм; 5 – дефект длиной 10 мм

Fig. 7. Average equivalent stress depending on the length of the defect: 1 – plate without defect; 2 – defect length 2 mm; 3 – defect length 5 mm; 4 – defect length 7 mm; 5 – defect length 10 mm

Сигнал от дефекта для всех рассмотренных моделей приходит в одно и то же время, амплитуда его практически не меняется. Это говорит о том, что на него основное влияние оказывает передний фронт пропила. Однако время прихода сигнала, отраженного от дальнего торца пластины, заметно уменьшается при увеличении протяженности пропила. Это связано с тем, что при прохождении волны Лэмба в дефектной зоне у нее значительно изменяется скорость из-за локального утонения пластины. На рис. 8 показано изменение времени прихода симметричной нулевой моды волны Лэмба, отраженной от дальнего торца рассмат-

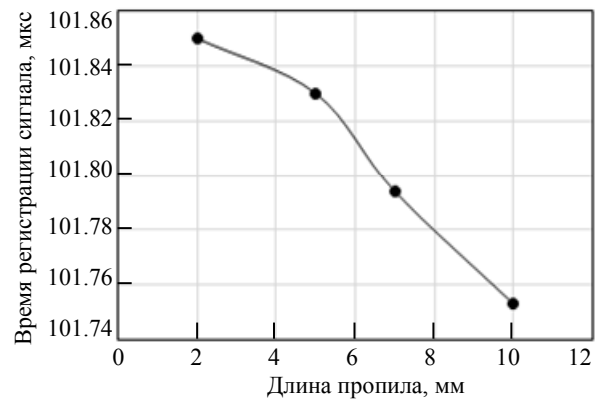


Рис. 8. Исследование влияния длины пропила для глубины 1 мм
Fig. 8. Investigation of the effect of the cut length for a depth of 1 mm

риваемой модели. Видно, что зависимость изменения времени прихода от длины пропила близка к линейной.

Аналогичные расчеты выполнены для оценки влияния глубины дефекта при его постоянной длине. Для этого рассчитывались модели для пластины с дефектом длиной 5 мм и различной глубиной: 0.5; 1; 1.5 мм. На рис. 9 показаны рассчитанные средние эквивалентные напряжения указанных моделей для первого пика.

Из представленных расчетов видно, что при увеличении глубины дефекта также формируются два пика вместо одного и при увеличении глубины уменьшается уровень второго пика. Меняется также амплитуда принятого сигнала и время его прихода.

На рис. 10 представлен график зависимости времени регистрации сигнала от глубины пропила.

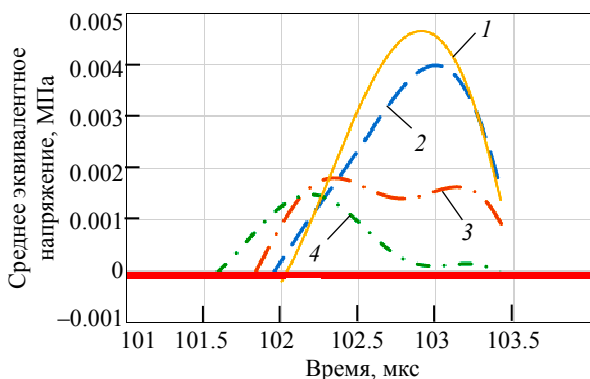


Рис. 9. Среднее эквивалентное напряжение в зависимости от глубины дефекта:

1 – пластина без дефекта; 2 – глубина дефекта 0.5 мм; 3 – глубина дефекта 1 мм; 4 – глубина дефекта 1.5 мм

Fig. 9. Average equivalent stress depending on the depth of the defect: 1 – plate without defect; 2 – defect depth 0.5 mm; 3 – defect depth 1 mm; 4 – defect depth 1.5 mm

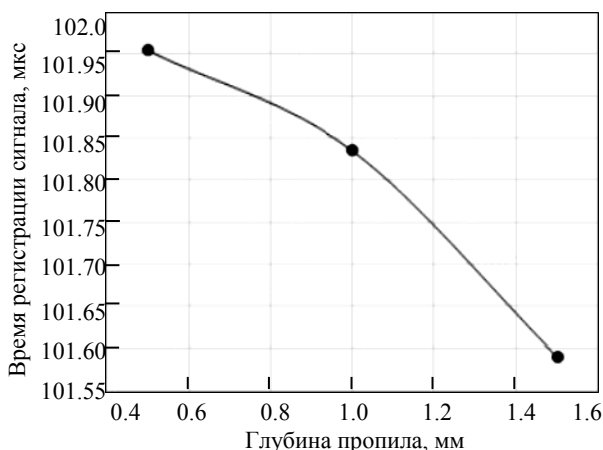


Рис. 10. Исследование влияния глубины пропила длиной 5 мм

Fig. 10. Investigation of the effect of cutting depth with a length of 5 mm

Из данного графика видно, что с увеличением глубины пропила время регистрации нулевой моды симметричной волны Лэмба от торца пластины уменьшается. Это можно объяснить тем, что при локальном уменьшении толщины пластины в зоне дефекта, в соответствии с дисперсионными зависимостями фазовых скоростей звука от волнового размера пластины, скорость симметричной волны возрастает.

Экспериментальное исследование. Для подтверждения полученных теоретических зависимостей был проведен эксперимент, целью которого стало выявление разницы во времени прихода сигналов, полученных от симметричной волны нулевой моды, для пластин с дефектами разной протяженности.

Для проведения эксперимента использовалась пластина из стали Ст3 толщиной 2 мм и длиной

1 м. Измерения проводились с помощью дефектоскопа Алтек PELENG УДЗ-204. Данный дефектоскоп позволяет с высокой точностью определять время прихода сигнала. Измерения проводились в теновом варианте с помощью специализированных преобразователей для возбуждения волн Лэмба, действующих на частоте 0.2 МГц. Данный способ был выбран для упрощения и исключения возможных мешающих факторов при отражении от торца пластины. На рис. 11 представлена схема экспериментальной установки.

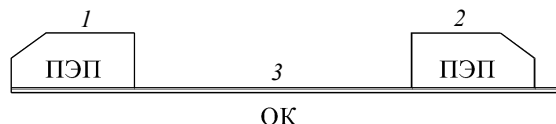


Рис. 11. Схема экспериментальной установки:

1 – излучатель; 2 – приемник; 3 – объект контроля

Fig. 11. Scheme of the experimental installation:

1 – emitter; 2 – receiver; 3 – object of control

Определение времени прихода сигнала осуществлялось по фронту волны на уровне на уровне на 6 дБ выше уровня шумов. Сначала был получен сигнал для участка пластины без дефекта. Затем между преобразователями сделали пропил шириной 5 мм, глубиной 0.5 мм и измерили еще раз. Аналогичные действия провели для дефекта шириной 10 мм. При этом преобразователи были жестко зафиксированы и расстояние между ними не изменялось.

На рис. 12 показаны результаты экспериментального определения влияния размера дефекта на время распространения волны Лэмба.

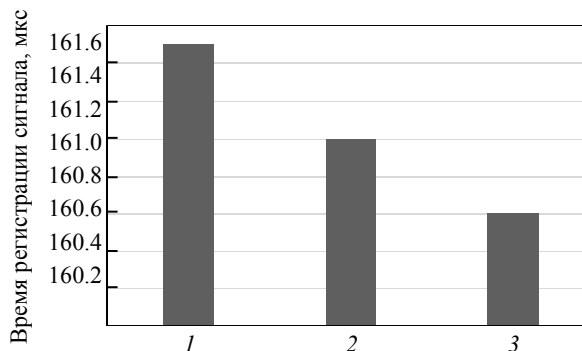


Рис. 12. Диаграмма времени регистрации сигнала:

1 – пластина без дефекта; 2 – пластина, с дефектом шириной 5 мм и глубиной 0.3 мм; 3 – пластина, с дефектом шириной 10 мм и глубиной 0.3 мм

Fig. 12. Signal registration time diagram:

1 – plate without defect; 2 – plate with a defect of 5 mm wide and 0.3 mm deep; 3 – plate with a defect of 10 mm wide and 0.3 mm deep

Из рис. 11 видно, что при увеличении продольных размеров дефекта время регистрации нулевой моды симметричной волны Лэмба, отразившейся от

торца пластины, уменьшается. Полученные данные коррелируют с теоретическими представлениями и полученной математической моделью.

Выводы и заключение. В ходе исследования была рассчитана математическая модель распространения волн Лэмба в тонкой стальной пластине в программе COMSOL Multiphysics 6.0. Исходя из полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Амплитуда симметричной волны Лэмба нулевой моды значительно больше аналогичной

антисимметричной, что показывает эффективность ее использования.

2. При наличии дефекта изменяется скорость прохождения волны Лэмба в области дефекта и, следовательно, по изменению времени регистрации сигнала, прошедшего через дефектную зону, можно оценивать степень повреждения пластины.

Полученные результаты коррелируют с теоретическими представлениями и проведенным экспериментом. Это показывает возможность использования данного программного комплекса для проведения дальнейших исследований в данной области.

Список литературы

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

2. Generation and detection of guided waves using PZT wafer transducers / J. H. Nieuwenhuis, J. Neumann,

D. W. Greve, I. J. Oppenheim // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2005. Vol. 5 (11). P. 2103–2111.

Информация об авторах

Смирнова Мария Сергеевна – студентка гр. 9582 кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: smirmariyaa@yandex.ru

Теплякова Александра Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: smaest@mail.ru

References

1. Viktorov I. A. Fizicheskie osnovy primeneniya ultrazvukovyh voln Rjeleja i Ljembera v tehnikе. M.: Nauka, 1966. 169 s. (In Russ.).

2. Generation and detection of guided waves using PZT wafer transducers / J. H. Nieuwenhuis, J. Neumann,

D. W. Greve, I. J. Oppenheim // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2005. Vol. 52 (11). P. 2103–2111.

Information about the authors

Mariia S. Smirnova – student gr. 9582 of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: smirmariyaa@yandex.ru

Alexandra V. Teplyakova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: smaest@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2023; принята к публикации после рецензирования 10.12.2023; опубликована онлайн 26.02.2024.

Submitted 21.10.2023; accepted 10.12.2023; published online 26.02.2024.
