УДК 620.179.16

А. А. Понькина¹, аспирант О. В. Муравьева^{1,2}, д-р техн. наук, проф. Л. В. Волкова¹, канд. техн. наук, доц. Т. С. Чухланцева¹, магистрант Е-mail: fotinaa@list.ru ¹Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова ²ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН»

Влияние волновой толщины стенки листа на эпюры смещений нормальных волн Лэмба

Проведены теоретические исследования влияния толщины и рабочей частоты на эпюры смещений в листах для симметричной и антисимметричной мод нормальных волн Лэмба. Предложены рекомендации по выбору оптимального силового воздействия преобразователя для достижения максимальной эффективности при измерениях толщины стенки листа. Так, для моды A0 компонента смещений W_{A0} преобладает над U_{A0} на всем диапазоне относительной толщины пластины. А для моды S0 при относительной толщине $k_{t}d \geq 1,8$ смещение W_{S0} преобладает над U_{S0} .

Ключевые слова: волны Лэмба, листы, дисперсионные кривые, изменение толщины.

Введение

Волны Лэмба широко используются при контроле листов и труб благодаря возможности обнаружения дефектов на больших расстояниях от преобразователя. Преимущество использования нормальных волн Лэмба в том, что некоторые моды могут быть чувствительны к изменению толщины стенки трубы [1–7].

Для возбуждения-приема волн Лэмба используются различные типы преобразователей (пьезопреобразователи по методу клина, электромагнитно-акустические преобразователи, преобразователи с сухим точечным контактом) [8–10]. Каждый из указанных преобразователей позволяет сформировать силовое воздействия как в виде вертикальной, так и в виде горизонтальной силы. При этом эффективность возбуждения-приёма волн Лэмба определяется соотношением горизонтальной и вертикальной составляющей в эпюре смещений волн Лэмба определенной моды. Распределение осевой и горизонтальной компо-

[©] Понькина А. А., Муравьева О. В., Волкова Л. В., Чухланцева Т. С., 2020

нент смещений по толщине пластины определяется геометрическими параметрами объекта контроля, его упругими свойствами и рабочей частотой преобразователя.

Цель работы – изучение влияния толщины и рабочей частоты на эпюры смещений волн Лэмба и их соотношение на поверхности пластины с целью оценки эффективности возбуждения-приема волн Лэмба.

Методы исследования

Нормальные волны Лэмба характеризуются многообразием типов (мод) – осесимметричных продольных (S), антисимметричных изгибных (A) и SH-волн различных порядков. Для нормальных волн характерна геометрическая дисперсия скорости, т. е. зависимость фазовой и групповой скорости волн от произведения частоты колебаний и поперечных размеров листа. Дисперсионные кривые являются основной характеристикой нормальных волн [11–13].

На рис. 1 приведены схематичные изображения деформации листа толщиной 2d в *z*-направлении при распространении в нем симметричных S0 и антисимметричных A0 волн нулевого порядка. Каждая из мод характеризуется двумя компонентами смещений — осевой горизонтальной *U* и вертикальной по толщине *W*.

Исследование влияния толщины и рабочей частоты на эпюры смещений волн Лэмба и их соотношение на поверхности пластины основано на теоретическом анализе решений для осевой горизонтальной и вертикальной компонент смещений для симметричных и антисимметричных волн Лэмба с использованием формул И. А. Викторова [14].

Смещения в волнах Лэмба определяются толщиной листа, рабочей частотой, номером моды, фазовыми и групповыми скоростями мод, также положением точки наблюдения по толщине листа. Изменение осевых горизонтальных и вертикальных смещений по толщине принято строить в зависимости от волновой толщины листа, соотвестствующей отношению толщины листа и длины волны данной моды волны Лэмба на данной частоте, при этом необходимым является знание дисперсионных кривых фазовых и групповых скоростей волн Лэмба. Для расчета фазовых и групповых скоростей волн Лэмба по дисперсионным кривым использовалась специализированная программа Elastic Waveguide Tracer [15].

Расчеты проведены для листов с различным соотношением $k_t d$ (k_t – волновое число волны Лэмба данной моды, d – полутолщина листа) для материала сталь со следующими свойствами: модуль Юнга E = 210 ГПа, модуль сдвига G = 82 ГПа, плотность материала $\rho = 7800$ кг/м³.



Рис. 1. Схематичное изображение деформации листа

Результаты и их обсуждение

Эпюры смещений U и W для симметричной S0 и антисимметричной A0 мод по толщине при $k_t d = 1,8$ представлены на рис. 2. Видно, что эпюры смещений каждой из компонент для каждой из мод ведут себя неравномерно по толщине листа. Ввиду того, что возбуждение-прием акустических волн осуществляется либо с поверхности листа (пьезопреобразователи), либо с тонкого приповерхностного слоя (ЭМА-преобразователи), далее будем анализировать смещения на поверхности z = d.

На рис. З представлены зависимости компонент смещений на поверхности пластины в зависимости от ее волновой толщины k_td . Видно, что для моды S0 вертикальная компонента W_{S0} преобладает над горизонтальной компонентой U_{S0} в диапазоне от $k_td = 1,8$ и выше. Для моды A0 компонента смещений W_{A0} преобладает над U_{A0} примерно в полтора раза на всем диапазоне относительной толщины пластины.



Рис. 2. Эпюры смещений *U* и *W* для симметричной S0 (*a*) и антисимметричной A0 (δ) мод по толщине при $k_t d = 1,8$



Рис. 3. Зависимость амплитуд нормальной W и касательной U компонент смещений для симметричной моды S0 (*a*) и антисимметричной моды A0 (*б*) от соотношения k_id

Соотношение нормальных и касательных смещений для мод S0 и A0 представлены на рис. 4. При относительной толщине $k_t d = 1,6$ соотношения смещений для мод S0 и A0 равны. Начиная с $k_t d \ge 1,8$ смещение $W_{\rm S0}$ преобладает над $U_{\rm S0}$. Диапазоны $k_t d$ для максимальной эффективности возбуждения мод A0 и S0 с использованием различных компонент смещений $k_t d$ приведены в таблице.

Диапазоны *k,d* для максимальной эффективности возбуждения мод A0 и S0 с использованием различных компонент смещений

	Мода А0		Мода S0	
Диапазон k _t d	Компонента $U_{\rm A0}$	Компонента W_{A0}	Компонента $U_{\rm S0}$	Компонента W_{S0}
	_	0,4–2,2	<1,8	≥1,8



Рис. 4. Зависимость отношений амплитуд нормального и касательного смещений для симметричных и антисимметричных волн от соотношения *k*_t*d*

Выводы

Таким образом, исследованные зависимости могут быть использованы для оптимального выбора силового воздействия при возбужденииприеме волн Лэмба различных мод и различных частот для достижения максимальной эффективности преобразования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационноизмерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Список литературы

1. *Khalili, P., Cawley, P.* Excitation of single-mode Lamb waves at high-frequency-thickness products // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2015. Vol. 63, no. 2. Pp. 303-312.

2. *Matuszyk, P. J.* Modeling of guided circumferential SH and Lamb-type waves in open waveguides with semi-analytical finite element and perfectly matched layer method // Journal of Sound and Vibration. 2017. Vol. 386. Pp. 295-310.

3. *Nagy, P. B., Simonetti, F., Instanes, G.* Corrosion and erosion monitoring in plates and pipes using constant group velocity Lamb wave inspection // Ultrasonics. 2014. Vol. 54, no. 7. Pp. 1832-1841.

4. Rose, J. L. Ultrasonic guided waves in solid media. Cambridge university press, 2014. – 530 p.

5. Wu, J., Tang, Z., Lü, F., Yang, K. Ultrasonic guided wave focusing in waveguides with constant irregular cross-sections // Ultrasonics. 2018. Vol. 89. Pp. 1-12.

6. Ильяшенко, А. В. Теоретические аспекты применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике слоистых анизотропных сред / А. В. Ильяшенко, С. В. Кузнецов // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 3–21. 7. *Муравьева, О. В.* Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 3–11.

8. Петров, К. В. Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, М. Ю. Соков, О. В. Муравьева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 135–146.

9. Стрижак, В. А. Особенности возбуждения электромагнитноакустического преобразователя при волноводном методе контроля / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 159–166.

10. *Перов, Д. В.* Локализация отражателей в пластинах при ультразвуковом контроле волнами Лэмба / Д. В. Перов, А. Б. Ринкевич // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 27–41.

Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов /
В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин.
Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. – 234 с.

12. *Муравьев, В. В.* Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Л. В. Волкова // Сталь. – 2016. – № 10. – С. 75–79.

13. Аббакумов, К. Е. Дисперсионное уравнение для продольной волны в слоистой среде с неоднородными граничными условиями при различных направлениях распространения / К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 22–30.

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

15. Программа для исследования волноводного распространения акустических сигналов "Elastic Waveguide Tracer" : св-во о гос. рег. программы для ЭВМ РФ. Номер регистрации (свидетельства): RU 2013615397. Дата регистрации: 14.02.2013. Авторы: Муравьев, В. В., Муравьева, О. В., Трефилов, Д. В. A. A. Ponkina¹, postgraduate student

O. V. Murav'eva^{1,2}, DSc in engineering, professor

L. V. Volkova¹, CSc in engineering, associate professor

T. S. Chukhlantseva¹, magister student

E-mail: fotinaa@list.ru

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation ²Udmurt Federal Research Centre UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Effect of Sheet Wall Thickness on Displacement Diagrams of Normal Lamb Waves

Theoretical studies of the effect of thickness and operating frequency on displacement diagrams in sheets for symmetric and antisymmetric modes of normal Lamb waves are carried out. Recommendations for choosing the optimal force action of the transducer to achieve maximum efficiency when measuring the sheet wall thickness are offered. Thus, for the A0 mode, the displacement component W_{A0} prevails over U_{A0} over the entire range of relative plate thickness. And for the S0 mode with a relative thickness of $k_{td} \ge 1.8$, the W_{S0} offset prevails over U_{S0} .

Keywords: Lamb waves, sheets, dispersion curves, change in thickness.