

Волна И. Анисимкина как длинноволновая ветвь низшей моды Лэмба

В. А. Николаевцев,^{*} С. Г. Сучков,[†] А. В. Селифонов,[‡] Д. С. Сучков[§]

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83

(Статья поступила 14.11.2019; Подписана в печать 09.01.2020)

Исследована область существования волны И. Анисимкина в пластине закаленного стекла, эффективность и селективность ее возбуждения клиновидным ультразвуковым преобразователем с фазированной решеткой пьезопреобразователей. Установлено, что мода И. Анисимкина в изотропной пластине существует как длинноволновая ветвь основной симметричной моды Лэмба. Построена карта зависимости эффективности возбуждения волн Лэмба и И. Анисимкина от частоты и разности фаз между элементами фазированной решетки. Показано, что эффективное селективное возбуждение волны И. Анисимкина возможно только при использовании фазированной решетки преобразователей.

PACS: 43.20.Rz.

УДК: 534.2.

Ключевые слова: волна И. Анисимкина, волна Лэмба, клиновидный преобразователь, фазированная решетка, селективное возбуждение.

ВВЕДЕНИЕ

В ультразвуковой дефектоскопии широко используются волны в пластинах — волны Лэмба [1]. Недавно описанные волны И. Анисимкина [2], как вырождение высших мод Лэмба, имеют практически однородное распределение смещений по сечению пластины и поэтому наиболее удобны для дефектоскопии. В ультразвуковой дефектоскопии пластинчатых материалов используют клиновидные преобразователи волн Лэмба, которые подбираются под конкретные толщины и упругие свойства материалов для достижения максимальной эффективности возбуждения ультразвуковых сигналов. Однако таким преобразователем часто возбуждаются не одна, а несколько мод Лэмба, имеющих разные скорости распространения. Это не мешает выявлению наличия дефектов в исследуемых образцах, но не позволяет осуществлять прецизионную дефектоскопию с определением координат и формы дефектов [3]. Для этих целей требуется обеспечение селективного возбуждения «чистых» пластинчатых мод Лэмба. Особый интерес, как было указано, представляет возбуждение волны И. Анисимкина.

В данной работе исследуются условия существования и возбуждения волны И. Анисимкина в изотропных пластинах и определяются условия ее одномодового возбуждения преобразователем в виде фазированной решетки.

*E-mail: nikolaevcev@ya.ru

†E-mail: suchkov.s.g@mail.ru

‡E-mail: selifonofi@mail.ru

§E-mail: suchkovds@ya.ru

1. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Решение задачи возбуждения собственных волн Лэмба в пластине (область 1 на рис. 1) толщиной h клиновидным преобразователем (область 2 на рис. 1) с преобразователем в виде фазированной решетки (ФР) малоапертурных пьезопреобразователей, расположенных на одной из поверхностей клина (область 3 на рис. 1), было проведено методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics. Для устранения влияния отраженных сигналов на нерабочих границах размещены акустические поглотители (области 4 на рис. 1). Расчет потока энергии акустических волн производится по сечению 5. Латеральный размер структуры равен 30 мм.

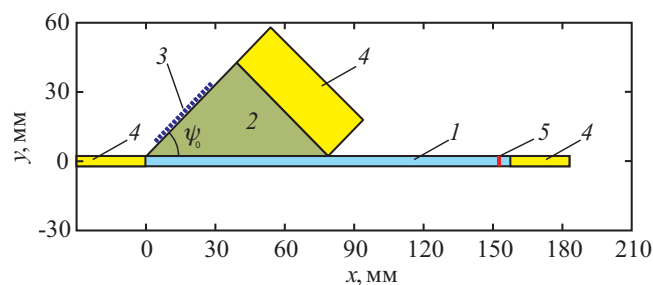


Рис. 1: Геометрия и размеры исследуемой структуры для возбуждения волн Лэмба и И. Анисимкина в пластине

ФР малоапертурных пьезопреобразователей (область 3 на рис. 1) создает на поверхности клина дискретно изменяющееся по поверхности и непрерывно изменяющееся во времени по гармоническому закону давление

$$p_n(t) = p_0 \sin((n-1)\Delta\varphi + \omega t),$$

где n — номер элемента фазированной решетки, $\Delta\varphi$ — разность фаз между соседними элементами фазированной решетки.

На границе «клин-пластина» задаются краевые условия «жесткого контакта», то есть условия непрерывности всех упругих смещений и компонент тензора механических напряжений. Граничные условия «жидкой связи» исследовались в работе [4], где было показано, что наличие тонкого жидкого слоя на границе между клином и пластиной практически не сказывается на эффективности возбуждения волн Лэмба, имеющих сдвиговые смещения, сравнимые с продольными смещениями, но существенно снижает эффективность возбуждения волны И. Анисимкина. Границы пластины вне контакта с клином считаются свободными.

При численном моделировании акустических полей в структуре, изображенной на рис. 1, рассматривались клин из оргстекла и пластина из закаленного стекла. Акустические характеристики указанных материалов измерены авторами и приведены в таблице 1.

Поток энергии акустических волн в пластине через её поперечное сечение (5, рис. 1) определялся по формуле Умова-Пойнтинга. Амплитуда давления на клин со стороны ФР составляет $p_0 = 10^5$ Па.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выявления условий возникновения волны И. Анисимкина рассмотрим дисперсионные характеристики волн Лэмба в пластине закаленного стекла. Они рассчитаны по классическому дисперсионному уравнению [1]. На рис. 2 моды Лэмба обозначены S_0, S_1, S_2, A_0, A_1 и A_2 , дисперсионная характеристика продольной объемной акустической волны (ОАВ) обозначена L , дисперсионная характеристика поперечной ОАВ обозначена T , $k_0 = 2\pi h$ — характеристическое волновое число, условно разделяющее длинноволновую и коротковолновую области.

В области длинных волн ($k < k_0/3$) ветвь характеристики S_0 приближается к дисперсионной характеристике L , что означает близость скоростей распространения волны Лэмба и продольной ОАВ. Эта ветвь называется волной И. Анисимкина [5], которая в рассматриваемой пластине возникает при вырождении не высшей, как показано в [2] для анизотропной пластины, а основной симметричной моды Лэмба. Фазовая скорость волны И. Анисимкина V_A при $k \rightarrow 0$ стремится не к скорости продольной ОАВ в закаленном стекле ($V_L = 4734$ м/с), а к меньшему значению $V_A = 4055$ м/с. Волна И. Анисимкина является квазипродольной с отношением поперечной и продольной составляющих упругих смещений $u_t/u_l \sim 10^{-1}$, в отличие от указанного в работе [2] отношения $u_t/u_l \sim 10^{-2}$.

Для определения областей эффективного возбуждения волны И. Анисимкина в пластине с помощью клиновидного преобразователя с ФР (угол клина $\psi_0 = 45^\circ$) построена двумерная карта распределения потока энергии волн Π (мВт) в координатах $(f, \Delta\varphi)$ (см. рис. 3). Область изменений фазового сдвига охватывает все возможные значения $(-180^\circ, 180^\circ)$, а частот-

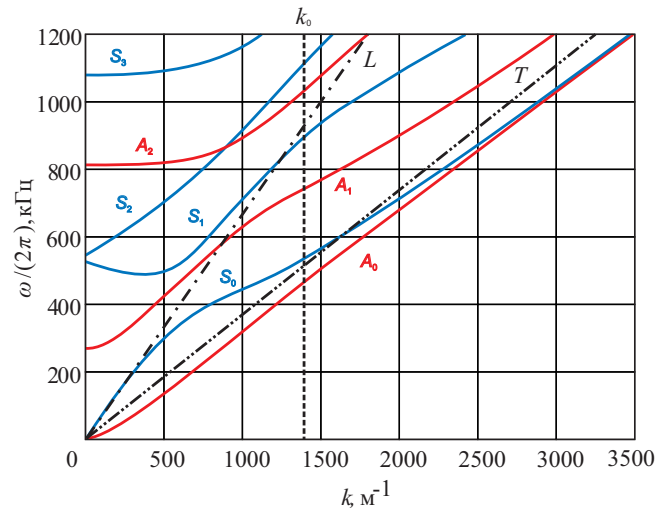


Рис. 2: Дисперсионные характеристики волн Лэмба в пластине закаленного стекла

ный диапазон соответствует рис. 2. Семейство прямых линий на карте есть геометрическое место точек частотной зависимости интенсивности возбуждения волн Лэмба одиночным широкоапертурным преобразователем ($\Delta\varphi = 0$) при разных углах клина ($0^\circ < \psi < 90^\circ$).

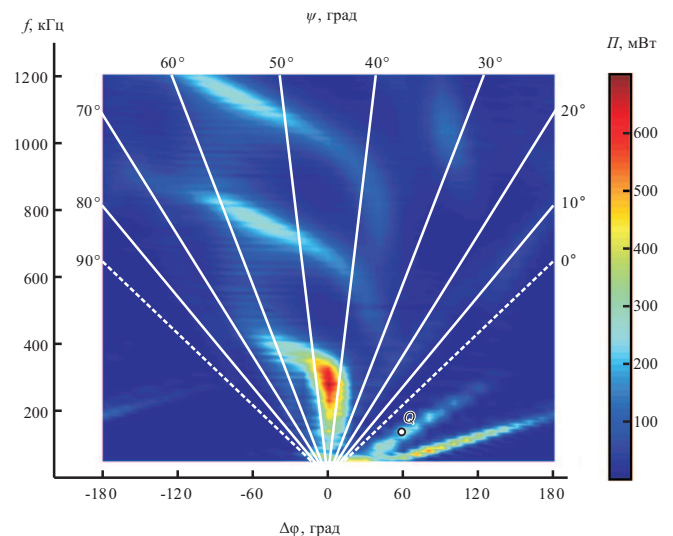


Рис. 3: Карта эффективности возбуждения волн Лэмба клиновидным преобразователем с ФР в закаленном листовом стекле

На рис. 3 выделяются несколько областей возбуждения различных мод Лэмба. В частности, в области, содержащей точку Q, возбуждается квазипродольная мода Лэмба QL_0 , имеющая вышеуказанные характеристики волны И. Анисимкина. Как видно, эта волна образует отдельную ветвь на карте, что обосновывает справедливость введения для нее специального названия. Структура акустического поля при возбуждении волны И. Анисимкина представлена на рис. 4. Другие

Таблица I: Акустические характеристики материалов

Величины \ Материалы	Скорость продольной ОАВ, м/с	Скорость поперечной ОАВ, м/с	Плотность, кг/м ³
Оргстекло	2670	1120	1180
Закаленное стекло	4734	2329	2316

моды Лэмба в этой области не возбуждаются. Соотношение амплитуд $u_t/u_l \sim 10^{-1}$ достигается в длинноволновой области ($k < 400 \text{ м}^{-1}$) дисперсионной характеристики волны S_0 .

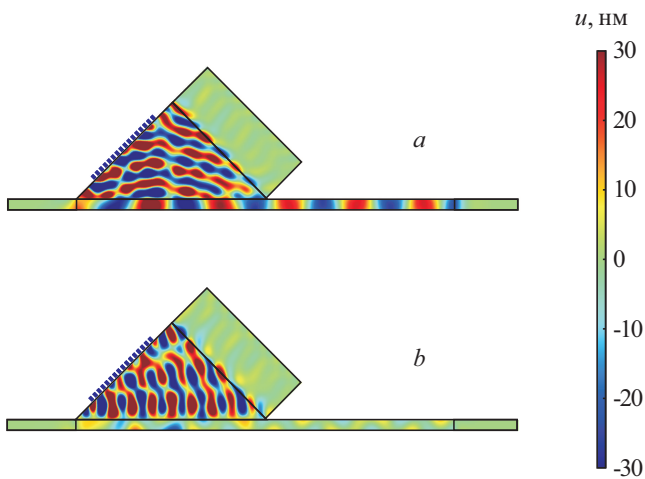


Рис. 4: Распределение продольных (а) и поперечных (б) смещений для волны И. Анисимкина (точка Q)

Поскольку область, содержащая точку Q, лежит вне сектора, ограниченного штриховыми линиями $\psi = 0^\circ$ и $\psi = 90^\circ$, то волну И. Анисимкина клиновидным преобразователем с одиночным пьезопреобразователем ($\varphi = 0$) невозможно возбудить ни при каком угле клина, а возможно только при использовании преобразователя с фазированной решеткой пьезопреобразователей.

Для экспериментальной проверки существования квазипродольной волны И. Анисимкина в изотропной пластине был проведен эксперимент, в котором ультразвуковые волны возбуждались через торец пластины из закаленного стекла пьезопреобразователем продольной волны, а принимались на противоположном торце таким же преобразователем. Было обнаружено, что при нанесении на поверхность пластины жидкой массовой нагрузки (вода, глицерин), на частотах ниже 150 кГц амплитуда принятого сигнала практически не менялась. В то время как на частотах выше 300 кГц сигнал полностью исчезал. Это говорит о том, что на частотах вблизи точки Q ($50 \text{ кГц} < f < 150 \text{ кГц}$) существует квазипродольная волна с очень малыми поперечными смещениями (волна И. Анисимкина), на распространение которой практически не влияет наличие поглощающего жидкого слоя

на поверхности пластины. Для анализа характер-

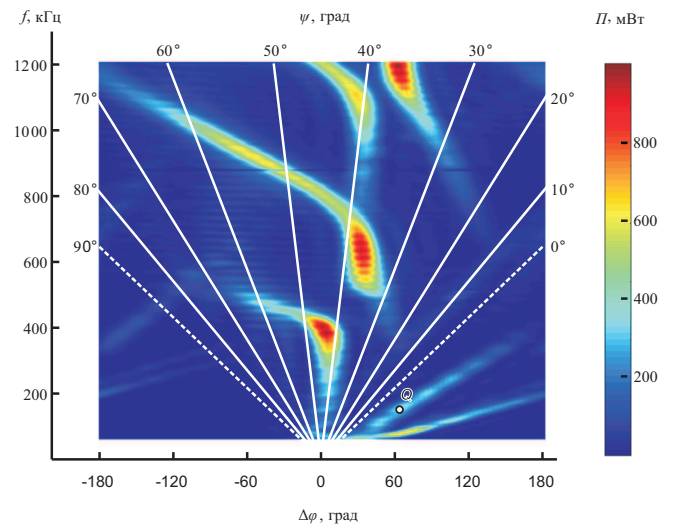


Рис. 5: Карта эффективности возбуждения волн Лэмба клиновидным преобразователем с ФР в пластине флинтгласа

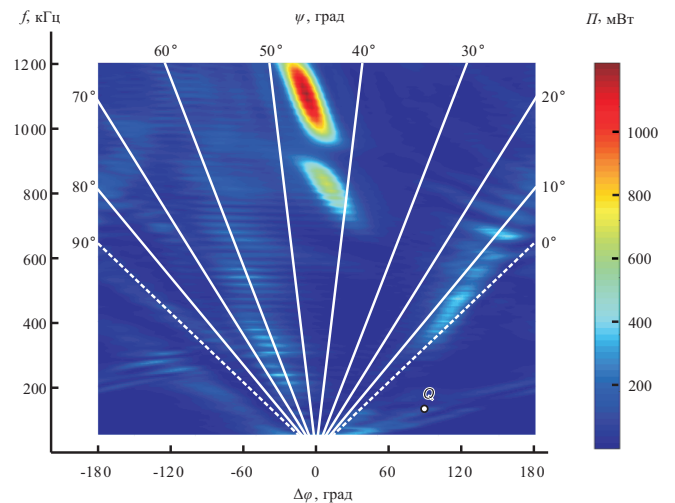


Рис. 6: Карта эффективности возбуждения волн Лэмба клиновидным преобразователем с ФР в пластине борсиликатного стекла

ности появления волны И. Анисимкина в различных материалах были рассчитаны карты эффективности возбуждения для других материалов, существенно отличающихся от закаленного стекла по упругим

свойствам — флинтгласа и борсиликатного стекол. На рис. 5 и рис. 6 представлены соответствующие карты. Видно, что в этих материалах также обнаруживаются волны И. Анисимкина, являющиеся длинноволновым вырождением низшей симметричной волны Лэмба.

Области возбуждения волны И. Анисимкина (отмечены точкой Q) также образуют отдельную ветвь и для ее возбуждения также необходима фазированная решетка пьезопреобразователей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование клиновидного ультразвукового преобразователя с фазированной решеткой пьезопреобразователей позволяет эффективно и селективно возбуждать волну И. Анисимкина в изо-

тропных пластинах. Эта волна существует в длинноволновой области ($k < 400$ 1/м) и является вырождением основной симметричной моды Лэмба. Она имеет практически однородное распределение смещений по сечению пластины и поэтому наиболее удобна в прецизионной дефектоскопии. Использование «жидкой связки» клина с пластиной, как это обычно бывает при дефектоскопических исследованиях, приводит к снижению эффективности ее возбуждения в закаленном стекле приблизительно на 3дБ [4], что, однако, не является критичным для целей дефектоскопии. Таким образом использование преобразователей с фазированной решеткой позволит использовать волну И. Анисимкина для точного измерения координат, размеров и формы микро- и нанотрещин и других дефектов в листовых материалах.

- [1] Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. Наука. М. 1966.
[2] Anisimkin I.V. // Ultrasonics. 2004. **42**, N 10. P. 1095.
[3] Suchkov D.S., Nikolaevtsev V.A., Suchkov S.G., Selifonov A.V. // in Proc. of Forum Acusticum. 2011. P. 2815.

- [4] Nikolaevtsev V.A., Suchkov S.G., Selifonov A.V., Suchkov D.S., Yankin S.S., Suchkova S.M. // in Proc. of IEEE APEIE. 2016. P. 42.
[5] Onoe M., Kaga S. // in Proc. of IEEE IFCS. 2010. P. 584.

I. Anisimkin wave as long-wave brunch of the lowest Lamb wave

V. A. Nikolaevtsev^a, S. G. Suchkov^b, A. V. Selifonov^c, D. S. Suchkov^d

Research and Technology Center «Micro- and Nano-electronics», N.G. Chernyshevsky Saratov State University. Saratov 410012, Russia

E-mail: ^anikolaevcev@ya.ru, ^bsuchkov.s.g@mail.ru, ^cselifonoff@mail.ru

The efficiency and selectivity of the I. Anisimkin waves excitation in a hardened glass plate by a wedge-shaped ultrasonic transducer with a phased array of the piezoelectric transducers was investigated. The map of Lamb and I. Anisimkin waves excitation efficiency dependence was obtained. It was found that the I. Anisimkin mode in an isotropic plate is not the degeneration of higher Lamb mode, but it is the degeneration of the main symmetric Lamb mode in the long-wavelength brunch. It was shown that the effective selective excitation of the I. Anisimkin wave is impossible by a wedge-shaped transducer with a single piezoelectric transducer without using of a phased array.

PACS: 43.20.Rz.

Keywords: I. Anisimkin wave, Lamb wave, wedge-shaped transducer, phased array, selective excitation.

Received 14 November 2019.

Сведения об авторах

1. Николаевцев Виктор Андреевич — канд. физ.-мат. наук, вед. инженер; тел.: (845) 227-11-96, e-mail: nikolaevcev@ya.ru.
2. Сучков Сергей Германович — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, руководитель НТЦ «Микро- и нанозлектроника» СГУ имени Н.Г.Чернышевского; тел.: (845) 227-11-96, e-mail: suchkov.s.g@mail.ru.
3. Селифонов Антон Викторович — инженер; тел.: (845) 227-11-96, e-mail: selifonoff@mail.ru.
4. Сучков Дмитрий Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, зам. руководителя НИИМФ СГУ имени Н.Г.Чернышевского; тел.: (845) 227-11-96, e-mail: suchkovds@ya.ru.