МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

А.И. Коробов, А.А. Карабутов, О.А. Сапожников

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ

Методическая разработка
специального физического практикума
кафедры акустики

Физический факультет МГУ
2011

УДК 537.

Рецензенты:

доцент, кандидат физ.-мат. наук. В.Г. Андреев;

доцент, доктор физ.-мат. наук А.В. Шанин

Печатается по решению методической
комиссии кафедры акустики

А.И. Коробов, А.А. Карабутов, О.А. Сапожников. Ультразвуковые волны в твёрдых телах. Методическая разработка специального физического практикума кафедры акустики.— М.: Физический факультет МГУ, 2011, 32 с.

Исследуются основные свойства объёмных и поверхностных упругих волн в изотропных материалах. Рассматриваются вопросы их излучения, распространения и приёма. Проводится знакомство с работой стандартного ультразвукового дефектоскопа, с помощью которого производится измерение скоростей продольных и поверхностных волн в различных материалах. Задача ориентирована на студентов старших курсов физического факультета.

© А.И. Коробов, А.А. Карабутов, О.А. Сапожников, 2011 г.
© Физический факультет МГУ, 2011 г.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Введение

Акустические методы находят широкое применение в физических исследованиях, в частности они позволяют изучать разнообразные явления в твёрдых телах. В общем случае в среде могут распространяться упругие волны нескольких типов, характеристики которых несут информацию о различных свойствах среды. Наряду с объёмными (продольными и поперечными) упругими волнами в исследованиях широко применяются поверхностные волны. Усовершенствование техники эксперимента, расширение диапазона частот упругих волн (до 10^{11} Гц) наряду с развитием теоретических представлений о механизме распространения упругих волн в твёрдых телах привели к тому, что ультразвуковые методы стали весьма полезными, а иногда и незаменимыми в физике твёрдого тела. В частности, сведения об электронных свойствах металлов и полупроводников, природе фазовых переходов, ангармонизме межатомных сил взаимодействия могут быть получены с помощью современных акустических методов.

Кроме того, ультразвуковые волны в твёрдых телах в настоящее время находят широкое применение на практике. Высокая чувствительность ультразвуковых волн к наличию механических неоднородностей среды привела к созданию ультразвуковой дефектоскопии, позволяющей определить наличие и характер дефектов в материалах, «непрозрачных» при исследовании другими методами. В настоящее время ультразвуковая дефектоскопия является одним из главных методов в системе неразрушающего контроля. Малая величина скорости упругих волн (на пять порядков меньше скорости распространения электромагнитных волн), а следовательно, и длины волны при той же частоте позволяет создавать

микроминиатюрные высокоэффективные устройства обработки информации (линии задержки, фильтры, системы кодирования и т.д.). Использование нелинейных эффектов при распространении ультразвуковых волн в твёрдых телах привело к созданию частотных умножителей, смесителей, параметрических усилителей, а также приборов корреляционного анализа сигналов.

Объёмные и поверхностные волны играют большую роль и в природных условиях. Например, упругие волны непрерывно возникают и затухают в земной коре, и наиболее интенсивно это проявляется при землетрясениях. Такие волны называются сейсмическими. При этом продольная волна носит название Р-волны (*prima*), поскольку она при землетрясениях и взрывах приходит от места возникновения первой. Поперечная волна, приходящая вслед за продольной, называется S-волной (*seconda*). Упругие Р- и S-волны успешно используются при анализе землетрясений, для геофизических исследований, поиска полезных ископаемых. По свободной поверхности среды могут распространяться еще и поверхностные волны. При землетрясениях именно они обычно вызывают наибольшие разрушения.

Цель настоящей работы – ознакомление с экспериментальной методикой возбуждения и приёма, а также с основными закономерностями распространения объёмных и поверхностных ультразвуковых волн в изотропных твёрдых телах.

1.2. Объёмные волны

В общем случае деформация твёрдого тела характеризуется изменениями объёма и формы элементов среды, что сопровождается

возникновением механических напряжений. Уравнение движения частиц среды (2-й закон Ньютона) имеет вид [1]:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \tag{1}$$

Здесь индексы $i, j = 1, 2, 3$ соответствуют декартовым координатам x, y, z, ρ – плотность среды, $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ – вектор смещения частиц. Правая часть уравнения (1) описывает силу, действующую на единицу объёма среды. Она выражается через пространственные производные от тензора механических напряжений T_{ij}. В общепринятом обозначении тензора напряжений первый индекс показывает направление силы, действующей на единичную площадку, второй – направление нормали к этой площадке. Когда индексы совпадают, сила перпендикулярна площадке (например, T_{xx}), а при разных индексах – касательна этой площадке (например, T_{xy}).

Деформация среды может быть охарактеризована пространственными производными $\partial u_i / \partial x_j$ компонент вектора смещения. Например, $\partial u_x / \partial x$ характеризует продольную деформацию, $\partial u_y / \partial z$ – деформацию сдвига. Для задания деформации произвольного вида обычно вводится тензор деформаций $S_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)/2$. Тензор напряжений связан с тензором деформаций - сила возникает под действием деформации среды и, наоборот, при наличии силы среда деформируется. Для малых деформаций упругого тела (когда амплитуда волны мала) связь между компонентами тензоров T_{ij} и S_{ij} может считаться линейной, т.е. имеет вид закона Гука. Можно показать, что в изотропной среде [2]:

$$T_{ij} = \lambda S_{kk} \delta_{ij} + 2\mu S_{ij}, \tag{2}$$

где δ_{ij} – символ Кронёкера, а λ и μ – константы, характеризующие упругость среды. Они называются постоянными Ламе. Коэффициент λ

описывает напряжения при изменении объёма. Константа μ характеризует сдвиговые деформации и называется модулем сдвига.

Если подставить закон Гука (2) в уравнение движения (1), то получится следующее уравнение [1]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu)\,\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\,\mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u} \qquad (3)$$

Это уравнение называется уравнением Ламе. Оно позволяет определить характеристики распространения произвольного упругого возмущения в изотропном твёрдом теле.

Рассмотрим одномерные возмущения, для которых деформация среды изменяется в пространстве лишь в одном направлении - например, вдоль оси x. Тогда все компоненты вектора смещения $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ зависят лишь от x и t, и уравнение (2) записывается в виде трёх скалярных уравнений:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} \ . \qquad (4)$$

Как видно, все компоненты смещения описываются дифференциальными уравнениями, имеющими вид классического волнового уравнения $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$. Иначе говоря, упругие возмущения являются волнами. Примечательно, что скорости распространения соответствующих волн являются неодинаковыми для продольных и поперечных (по отношению к направлению распространения) деформаций, т.е. в среде имеется несколько типов упругих волн – *продольные*, характеризуемые продольной компонентой смещения u_x, и *поперечные*, характеризуемые перпендикулярными к направлению распространения компонентами смещения u_y и u_z. Согласно (4), продольные волны распространяются со скоростью

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}\ , \tag{5}$$

а поперечные волны – с меньшей скоростью

$$c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{6}$$

Здесь индексы у скоростей соответствуют английским названиям волн (*longitudinal* и *transversal*, соответственно).

Отметим, что согласно формулам (5) и (6) скорости объёмных волн не зависят от частоты, т.е. в среде отсутствует дисперсия. Это неудивительно, поскольку в безграничной сплошной однородной среде отсутствуют возможные причины для частотной избирательности – нет никаких характерных пространственных или временных масштабов, с которыми можно было бы сравнить длину волны или её частоту.

Иногда в теории упругости вместо постоянных λ и μ используют модуль Юнга $E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu)$ и коэффициент Пуассона $\sigma = \lambda/[2(\lambda + \mu)]$. В этом случае выражения для скоростей продольных и поперечных волн в изотропном теле принимают вид:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}\ , \quad c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \tag{7}$$

Заметим, что отсюда следует $c_t/c_l = \sqrt{(1-2\sigma)/\,[2(1-\sigma)]}$. Поскольку для большинства твёрдых тел коэффициент Пуассона лежит в диапазоне $0.25 \le \sigma \le 0.35$ [3], то для них $c_t \approx (0.5-0.6)\,c_l$.

Характер деформации среды при распространении в ней продольных и поперечных волн проиллюстрирован на рис. 1. В продольной волне частицы среды смещаются вдоль направления распространения. При этом исходный невозмущённый элементарный объём (выделен квадратным контуром слева) после прихода волны изменяется, т.е. среда сжимается или растягивается:

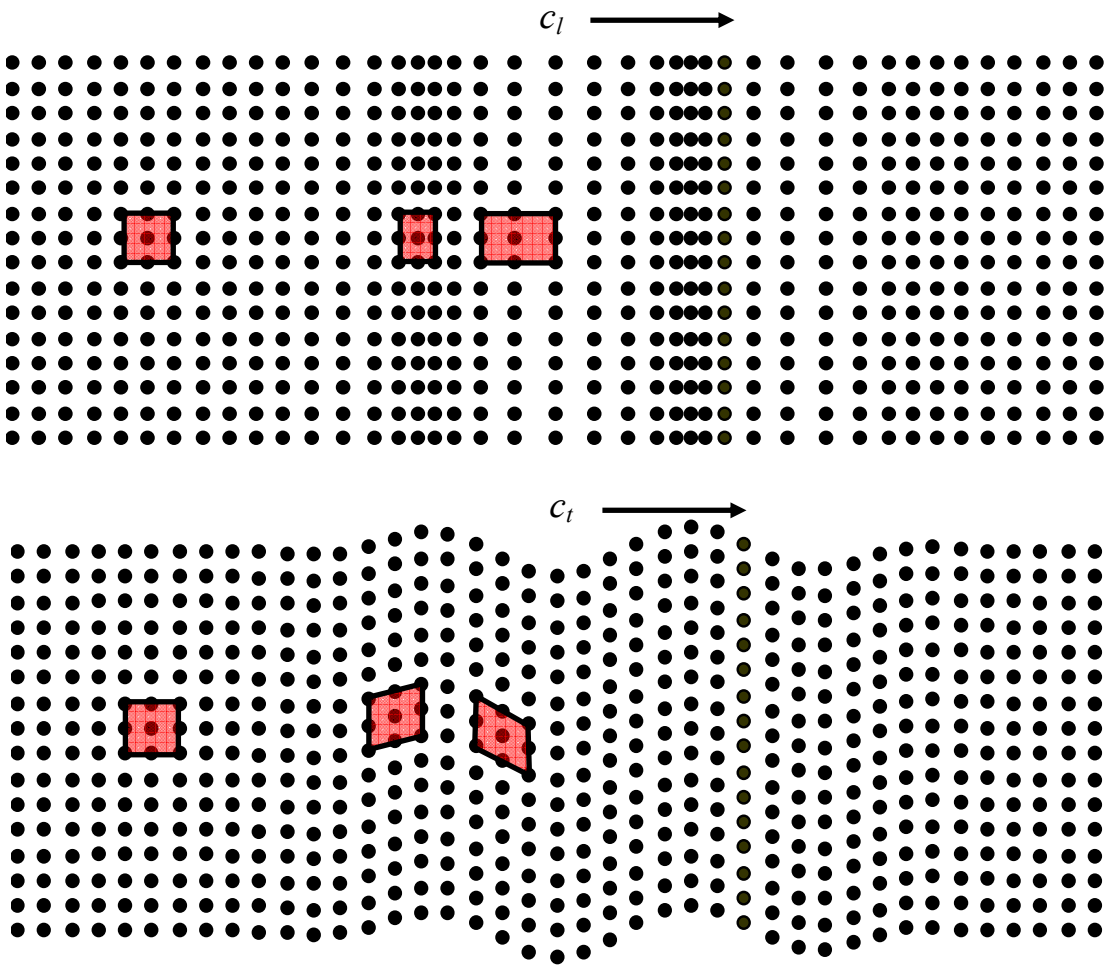

Рис.1 Деформация среды при распространении в ней плоской продольной (сверху) и поперечной (снизу) волн

на рисунке квадраты в области деформаций превращаются в прямоугольники. В поперечной волне частицы среды смещаются перпендикулярно направлению распространения волны: происходит чистый сдвиг, не сопровождающийся изменением объёма – на рис. 1 внизу в области локализации волны исходные квадраты превратились в параллелограммы той же площади. Сопротивление среды сжатию выражено всегда сильнее, чем сдвигу (в идеальной жидкости для деформации сдвига вообще не требуется усилий), т.е. эффективная жёсткость среды при распространении продольных волн выше, чем при распространении поперечных волн. Именно этим можно объяснить более высокую скорость продольных волн.

1.3. Поверхностные волны

Если твёрдое тело ограничено, то помимо продольных и поперечных волн в нём могут существовать и другие типы волн, характеристики которых определяются наличием границы. Граница изменяет упругие свойства твёрдого тела около неё и вдали от неё по-разному. Так, свободная поверхность твёрдого тела оказывается своеобразным волноводом, способным переносить упругие волны, локализованные в приповерхностном слое – поверхностные волны; они называются также волнами Рэлея.

Общие характеристики рэлеевских волн можно установить на основе уравнения (3) при учёте условия отсутствия напряжений на свободной границе полупространства. Пусть ось x направлена вдоль поверхности в направлении распространения волны, а ось z перпендикулярна поверхности и направлена вглубь среды. Тогда граничное условие записывается при $z = 0$ и имеет вид: $T_{xz} = T_{yz} = T_{zz} = 0$.

Наиболее просто решение задачи находится в случае гармонической волны. Пусть вдоль поверхности с некоторой скоростью c_R распространяется волна, параметры которой не зависят от поперечной координаты y. Компоненты вектора смещения в гармонической волне могут быть представлены в виде $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0(z)\exp\left[-i\omega\left(t - x/c_R\right)\right]$. Если подставить это выражение в уравнение Ламе (3) и учесть граничные условия, то можно получить выражение для скорости волны c_R и компонент вектора амплитуды смещения $\mathbf{u}_0(z)$. Фазовая скорость поверхностных волн c_R меньше фазовых скоростей продольных и поперечных волн c_l и c_t и определяется из уравнения [1 - 5]:

$$\eta^3 - 8\eta^2 + 8(3 - 2\xi)\eta - 16(1 - \xi) = 0, \qquad (8)$$

где $\eta = (c_R/c_t)^2$ – искомая величина, $\xi = (c_t/c_l)^2 = (1-2\sigma)/\left[2(1-\sigma)\right]$ – известная константа. Из (8) видно, что скорость поверхностных волн не зависит от частоты, а определяется лишь упругими свойствами твёрдого тела.

Для практических расчётов удобно пользоваться приближённым решением уравнения (8) [3, 7]:

$$c_R \approx c_t \frac{0.875 + 1.125\sigma}{1+\sigma} \ . \tag{9}$$

Величина c_R/c_t слабо зависит от коэффициента Пуассона. Согласно формуле (9), в практически интересном диапазоне $0.25 \le \sigma \le 0.35$ получается $c_R \approx (0.92 - 0.94)c_t$.

Поперечная структура волны задаётся векторной функцией $\mathbf{u}_0(z)$. Можно показать, что её y-компонента равна нулю, а остальные компоненты зависят от глубины z следующим образом [7]:

$$u_{0x} = A\left[\left(1-\frac{c_R^2}{2c_t^2}\right)e^{-qz} - \sqrt{\left(1-\frac{c_R^2}{c_l^2}\right)\left(1-\frac{c_R^2}{c_t^2}\right)}e^{-sz}\right], \tag{10}$$

$$u_{0z} = -iA\sqrt{1-\frac{c_R^2}{c_l^2}}\cdot\left[\left(1-\frac{c_R^2}{2c_t^2}\right)e^{-qz} - e^{-sz}\right], \tag{11}$$

где A – константа, характеризующая амплитуду волны, а коэффициенты затухания q и s имеют вид:

$$q = \frac{\omega}{c_R}\sqrt{1-\frac{c_R^2}{c_l^2}} \ , \quad s = \frac{\omega}{c_R}\sqrt{1-\frac{c_R^2}{c_t^2}} \ . \tag{12}$$

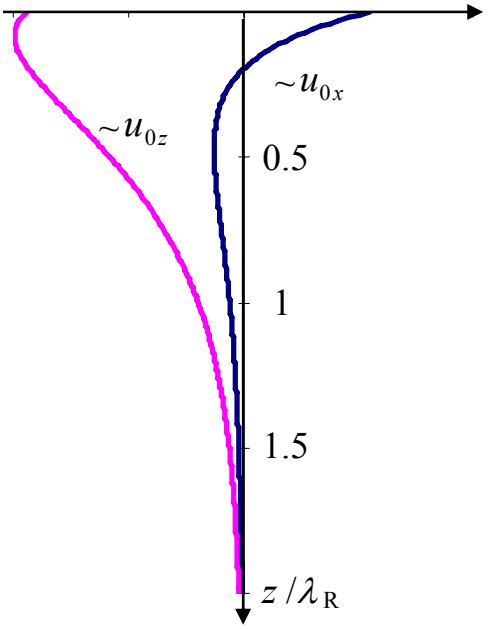

Рис. 2. Изменение с глубиной амплитуд компонент смещения в поверхностной волне

Зависимости величин u_{0x} и iu_{0z} от расстояния показаны на рис. 2 для случая $\sigma = 0.25$. Согласно (10) и (11), заметный спад смещения происходит на масштабах q^{-1}, s^{-1}, которые имеют порядок длины рэлеевской волны $\lambda_R \sim c_R/\omega$. Таким образом, возмущение распространяется лишь тонком приповерхностном слое, что и позволяет называть волну «поверхностной».

Вследствие сдвига фазы колебаний вертикальной компоненты смещения u_{0z} относительно горизонтальной u_{0x} на $\pm\pi/2$ (наличие множителя i в выражении (11)), движение частиц среды происходит по эллиптическим траекториям, большая полуось которых перпендикулярна поверхности, а малая параллельна направлению распространения волны. Из выражений (10)−(11) следует, что на некоторой глубине $\sim(0.15-0.3)\lambda_R$ эллипс вырождается в отрезок прямой линии, при этом движение частиц в гармонической волне происходит чисто в вертикальном направлении. Выше этой характерной глубины частицы среды движутся против часовой стрелки, ниже – по часовой стрелке (если волна распространяется слева направо). Таким образом, поверхностную волну в целом нельзя считать ни продольной, ни поперечной.

Так же как и скорости объёмных волн c_l и c_t, скорость поверхностной волны c_R не зависит от частоты (см. (8) - (9)). Физическая причина отсутствия дисперсии волн Рэлея та же, что и для объёмных волн – отсутствие в полубесконечной однородной среде характерных пространственных и временных масштабов. Отметим, что поперечная

структура волны зависит от частоты; в частности, толщина приповерхностного слоя, в котором локализована энергия волны, уменьшается обратно пропорционально частоте. Это означает, что если волна не является монохроматической, то поперечный профиль зависит от вида частотного спектра волны.

На рис.3 показан характер деформации среды при распространении в ней поверхностной волны. Картинка соответствует импульсному возмущению в виде 1−2 периодов синусоидальной волны – именно такие сигналы используются при измерениях в данной задаче практикума. Если сравнить рис. 1 и 3, то можно увидеть, что волна Рэлея не похожа ни на продольную, ни на поперечную волны. Кроме уже обсуждённой выше локализации деформаций вблизи поверхности в слое порядка длины волны, отметим смешанный продольно-поперечный характер смещений частиц среды.

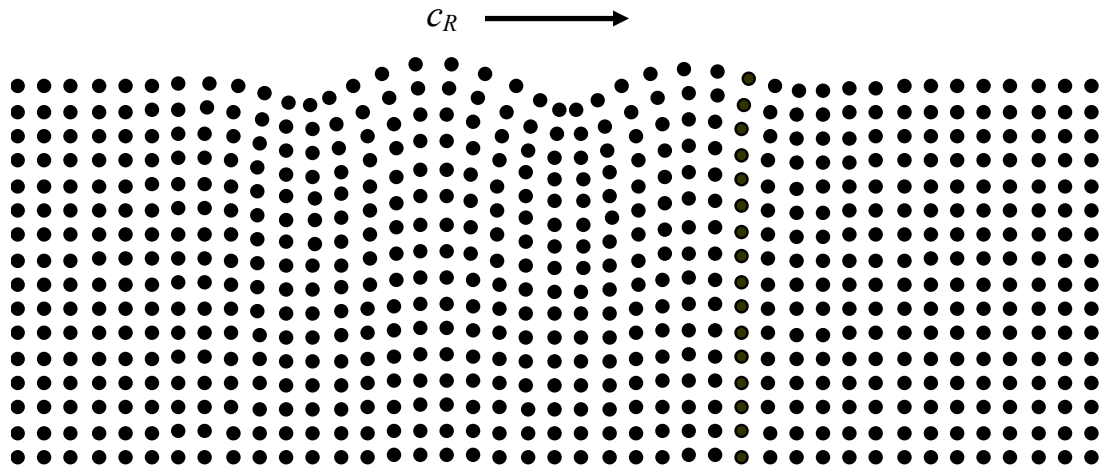

Рис.3 Деформация среды при распространении в ней поверхностной волны Рэлея

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Некоторые принципы ультразвуковых измерений

В настоящей работе исследуются поверхностные волны и один тип объёмных волн – продольные волны. Возбуждение упругих волн осуществляется с помощью пьезоэлектрических преобразователей, создающих упругие импульсы на мегагерцовых частотах. Приём осуществляется либо тем же пьезодатчиком (режим эхо-импульсов), либо аналогичным дополнительным пьезопреобразователем. Задача заключается в наблюдении на мониторе электрических сигналов, соответствующих приходящим на датчик упругим волнам, и измерении времени распространения указанных волн. Такой подход является стандартным в современном неразрушающем контроле материалов и конструкций [8, 9].

Базовой частью экспериментальной установки является промышленный прибор отечественного производства − универсальный ультразвуковой дефектоскоп УД2В-П45. В силовом электронном блоке дефектоскопа создаётся короткий импульс электрического напряжения. Этот импульс подаётся на датчик, основой которого является пьезоэлектрическая пластина. За счёт обратного пьезоэффекта толщина пластины изменяется пропорционально напряжению на её обкладках [8]. Внешняя сторона пьезопластины является рабочей поверхностью датчика. Она прижимается к поверхности исследуемого образца. В результате в образце возбуждается продольная волна − короткий импульс в виде нескольких периодов синусоидального сигнала. Этот импульс распространяется в образце и отражается от возможных рассеивателей и границ. Рассеянный сигнал может быть принят либо тем же датчиком, либо вторым аналогичным датчиком, помещённым в другом месте поверхности

образца. При приёме акустическая волна приводит к изменению толщины пьезопластины датчика и возникновению электрического сигнала за счёт прямого пьезоэффекта. Принятые сигналы обрабатываются приёмным электронным блоком и отображаются на жидкокристаллическом мониторе дефектоскопа. По их амплитуде и задержке при известной скорости волны можно находить глубину залегания и силу рассеивателей (дефектов или границ образца). Решение указанной задачи является основным назначением дефектоскопа. В современном промышленном производстве ультразвуковая дефектоскопия применяется для поиска дефектов материала (поры, различные включения, неоднородная структура) и контроля качества проведения работ при сварке, пайке, склейке. Ультразвуковой контроль уже давно является обязательной процедурой при изготовлении и эксплуатации многих ответственных изделий, таких как части авиационных двигателей, трубопроводы атомных реакторов или железнодорожные рельсы. Измерение скоростей упругих волн позволяет также определить упругие константы исследуемого материала [9].

При проведении измерений важно обеспечить должный контакт между поверхностями датчика и образца, чтобы упругая волна могла проходить из одного тела в другое (говорят, что нужен «хороший акустический контакт»). Дело в том, что при простом соприкосновении двух поверхностей они контактируют друг с другом лишь в небольшом количестве точек, т.к. всегда имеются шероховатости и неровности. В результате из-за большой разницы акустических импедансов воздуха и твёрдого тела прохождение акустической волны через границу раздела оказывается очень неэффективным. Чтобы обойти указанную трудность, поверхность контакта обычно смачивается жидкостью или гелем, которые, в отличие от воздуха, близки по акустическому импедансу к материалу образцов. В настоящей работе в качестве такой согласующей жидкости используется трансформаторное масло, небольшое количество которого

наносится кисточкой на поверхность контакта. Отметим, что даже при слабом прижиме датчика к образцу слой контактной жидкости достаточно тонок, т.е. он не влияет на характеристики излучаемых и принимаемых сигналов.

Если расстояние между источником и приёмником известно, дефектоскоп можно применить для измерения скорости упругих волн в однородных материалах. Именно для таких измерений используется дефектоскоп в настоящей работе.

2.2. Особенности работы с ультразвуковым дефектоскопом УД2В-П45

Как отмечалось выше, принцип работы дефектоскопа довольно прост: он возбуждает в образце короткие акустические импульсы и принимает эхо-импульсы (при использовании одного датчика) или проходящие импульсы (при использовании двух датчиков). Дефектоскопы разных

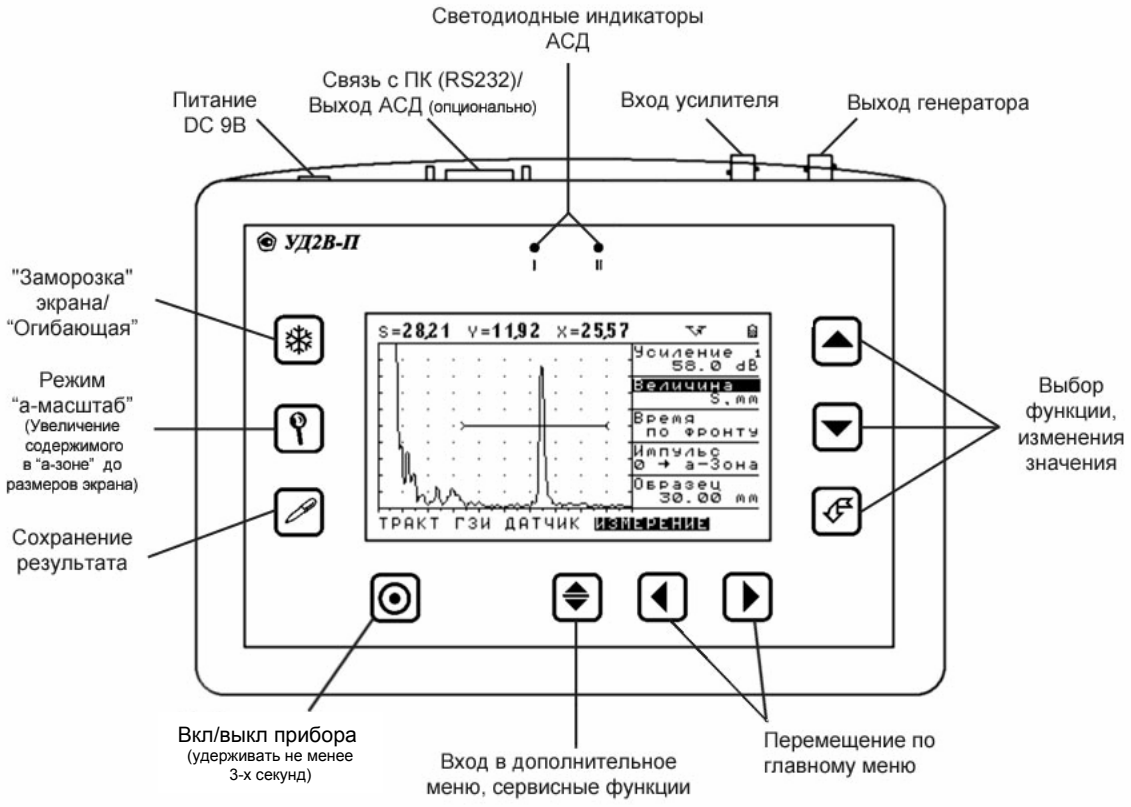

Рис. 4. Внешний вид передней панели дефектоскопа УД2В-П45

моделей отличаются рабочими частотами, размером датчиков, способом обработки сигнала и его вывода на экран.

Внешний вид передней панели дефектоскопа УД2В-П45, используемого в данной работе, показан на рис. 4. Для включения прибора необходимо нажать кнопку «вкл/выкл» и удерживать её в нажатом состоянии не менее 3 секунд (кнопка расположена в левом нижнем углу лицевой панели). Выключение производится аналогичным образом.

Управляющее меню дефектоскопа состоит из главного «меню», разделы которого отображаются в информационной строке под окном отображения, и «подменю», отображаемого в ячейках колонки справа от окна изображения. Перемещение между разделами главного меню осуществляется кнопками и . Выбор соответствующего раздела подменю производится кнопками и . Вход в режим редактирования значения выбранного пункта подменю осуществляется кнопкой . Изменение значений производится кнопками и . Для выхода из режима редактирования необходимо нажать на кнопку . Помимо главного меню и подменю, есть дополнительное сервисное меню, вход в которое осуществляется с помощью кнопки , расположенной под окном изображения слева от кнопок и . Для запоминания содержимого экрана в интересующий оператора момент измерений необходимо нажать на кнопку «заморозка» экрана, которая находится в верхнем левом углу.

Ультразвуковые преобразователи подключаются к дефектоскопу посредством кабелей, присоединяемых к высокочастотным разъёмам «вход усилителя» и «выход генератора» справа на верхней боковой стороне дефектоскопа.

2.3. Методика измерения скорости продольных волн

При измерении скорости продольных волн эхо-импульсным методом используется один преобразователь, как показано на рис. 5. В качестве

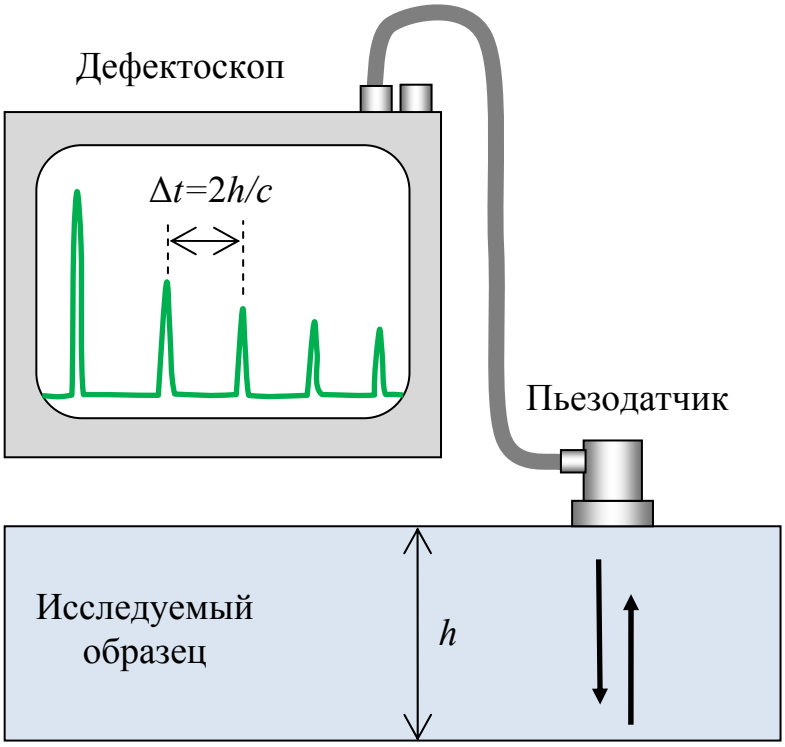

Рис. 5. Принцип измерения скорости продольных волн в плоскопараллельной твердотельной пластине. При излучении короткого импульса на датчике появляется периодическая серия эхо-импульсов, следующих друг за другом с периодом $\Delta t=2h/c$, где h – толщина пластины, c – скорость продольных волн.

образцов используются плоскопараллельные пластины из различных материалов: оргстекла, стекла, меди, латуни, стали, алюминиевого сплава (дюралюминий) и магниевого сплава (электрон). На пьезопреобразователь подаётся короткий электрический импульс, в результате чего происходит излучение в образец импульсной продольной волны, имеющего вид короткого радиоимпульса с центральной частотой около 5 МГц и длительностью огибающей около 0.6 мкс. Указанный ультразвуковой импульс распространяется в образце, отражается от тыльной поверхности, возвращается к датчику, отражается от него, и вновь распространяется в направлении тыльной поверхности. Этот процесс многократно повторяется до тех пор, пока импульс не затухнет из-за поглощения в среде и дифракционной расходимости. В результате на мониторе дефектоскопа можно наблюдать затухающую серию эквидистантных импульсов. Для проведения измерения времени прихода и пикового значения сигналов часто достаточно знать поведение огибающей высокочастотного импульса. Для этого в электронном приёмном устройстве дефектоскопа предусмотрена операция детектирования. На мониторе дефектоскопа сигналы представляются, как правило, в виде импульсов огибающей (см. рис. 5).

Отметим, однако, что использование полного сигнала, а не огибающей, позволяет более точно измерять задержки сигналов. Поэтому в некоторых случаях имеет смысл отказаться от рассмотрения огибающей и провести анализ высокочастотного заполнения. Переход между режимами огибающей и полного сигнала в дефектоскопе УД2В-П производится в разделе меню «ТРАКТ» и разделе подменю «Детектор».

Поскольку каждый последующий эхо-импульс проходит расстояние, равное удвоенной толщине пластины h, то временная задержка между соседними импульсами равна $\Delta t = t_2 - t_1 = 2h/c$. Следовательно, скорость волны найдётся как:

$$c = \frac{2h}{t_2 - t_1} \tag{13}$$

2.4. Способ возбуждения и приёма поверхностных волн

Для измерения скорости поверхностной волны нужно иметь способы её эффективного возбуждения и приёма. При этом необходимо добиться того, чтобы поверхностная волна наблюдалась отдельно от объёмных волн. Для этой цели в настоящей работе используется метод возбуждения и приёма поверхностных волн, основанный на использовании эффектов взаимодействия между различными типами упругих волн, происходящими при падении ультразвукового пучка на границу раздела двух сред.

Используемый в работе метод возбуждения поверхностной волны пояснён на рис. 6. На плоскую поверхность исследуемого помещается клиновидный блок из оргстекла. В его верхней части располагается пьезоэлектрический излучатель, создающий пучок продольных волн, падающих на поверхность образца под углом падения φ. Излучатель может скользить вдоль верхней выпуклой поверхности клина, что позволяет

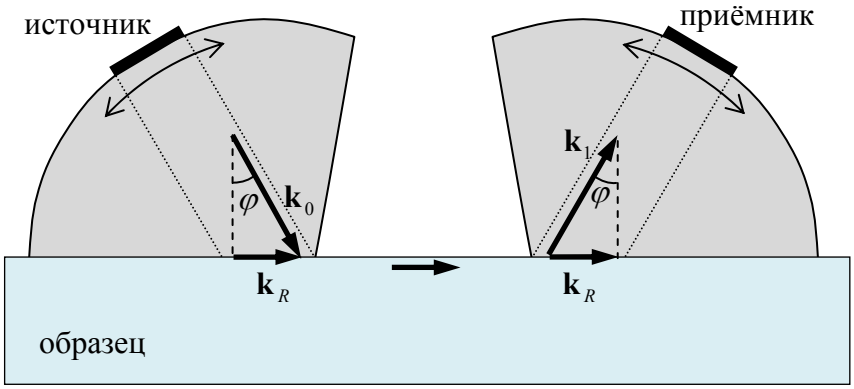

Рис. 6. Метод клина для возбуждения и приёма поверхностных волн

изменять угол падения. При падении волны на поверхности образца возникают упругие напряжения и появляется возможность для возбуждения поверхностной волны. Однако в общем случае эффективность такой генерации волны Рэлея очень мала. Исключение составляет случай волнового резонанса, когда след падающей из клина волны движется по поверхности исследуемого образца со скоростью рэлеевской волны $c_R^{(\text{обр})}$. Если $c_l^{(\text{кл})}$ − скорость продольной волны в материале клина, то скорость следа волны составляет $V = c_l^{(\text{кл})} / \sin\varphi$. Условие волнового резонанса $V = c_R^{(\text{обр})}$ даёт следующее выражение для угла падения, при котором возбуждение поверхностной волны происходит наиболее эффективно:

$$\sin\varphi = \frac{c_l^{(\text{кл})}}{c_R^{(\text{обр})}} \quad . \tag{14}$$

Отметим, что в формулу (14) для угла φ входят скорости волн в различных материалах: $c_l^{(\text{кл})}$ − скорость продольных волн в материале клина, а $c_R^{(\text{обр})}$ − скорость поверхностных волн в материале образца. Поэтому угол оптимального возбуждения φ для разных материалов будет разным.

В случае гармонической волны формула (14) следует из требования согласованности фаз падающей волны и волны Рэлея, что эквивалентно условию совпадения касательной проекции волнового вектора падающей волны с волновым вектором волны Рэлея (рис. 6): $\left(\omega / c_l^{(\text{кл})}\right)\sin\varphi = \omega / c_R^{(\text{обр})}$, что даёт (14).

Заметим, что в общем случае продольная волна, падающая из клина на образец, может создать в образце две преломлённые волны - продольную и поперечную. Углы преломления ψ_l и ψ_t определяются законом Снеллиуса: $c_l^{(\text{кл})} / \sin\varphi = c_l^{(\text{обр})} / \sin\psi_l = c_t^{(\text{обр})} / \sin\psi_t$. Нетрудно видеть, что если угол φ выбрать по формуле (14), то синусы углов преломления для объёмных волн окажутся равными $\sin\psi_l = c_l^{(\text{обр})} / c_R^{(\text{обр})}$ и $\sin\psi_t = c_t^{(\text{обр})} / c_R^{(\text{обр})}$, т.е. превысят единицу, поскольку поверхностная волна распространяется медленнее обеих объёмных волн. Таким образом, при возбуждении поверхностных волн в соответствии с условием (14) объёмные волны внутрь образца распространяться не будут - будет происходить их полное внутреннее отражение. Это облегчает процесс исследования поверхностной волны.

Так как скорость поверхностных волн зависит от физических характеристик материала образца, то для их возбуждения для каждого образца необходимо подбирать соответствующий угол падения φ. При этом условие (14) может быть достигнуто лишь при $c_R^{(\text{обр})} > c_l^{(\text{кл})}$. Именно поэтому в качестве материала клина следует брать тот, в котором скорость продольных волн невелика. Выбор оргстекла ($c_l^{(\text{кл})} \approx 2700$ м/с) обусловлен, в частности, этим обстоятельством. Другой удобной особенностью оргстекла является относительно высокий коэффициент поглощения ультразвуковых волн, что позволяет исключить реверберацию в клине.

Описанное устройство может работать и в качестве приёмников поверхностных ультразвуковых волн, поскольку под действием волны, распространяющейся вдоль поверхности образца, в материале клина возбуждаются объёмные волны. Наиболее эффективно генерация волн в клине происходит при совпадении скорости движения их следа со скоростью источника, которым в данном случае является поверхностная волна. Это означает, что излучение будет происходить преимущественно под углом φ, задаваемым формулой (14).

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Измерение скорости продольных волн эхо-импульсным методом (к упражнению 1)

Перед началом измерения следует соединить кабелем пьезоэлектрический датчик (см. рис. 7), с любым из двух каналов дефектоскопа (см. рис. 5). Рабочую поверхность датчика с помощью кисточки слегка смазать трансформаторным маслом для обеспечения акустического контакта с образцом. Включить дефектоскоп, нажав и удерживая более 3 секунд кнопку включения (см. рис. 4).

Рис. 7. Внешний вид пьезоэлектрического датчика, используемого для возбуждения и приёма продольных волн

После появления картинки на экране следует выбрать эхо-импульсный режим дефектоскопа, т.е. посылка и приём импульсов будут осуществляться одним и тем же пьезоэлектрическим датчиком. Для этого необходимо сделать следующее.

1) *Войти в дополнительное сервисное меню, нажав кнопку* .
2) *В появившемся меню переместить курсор (чёрная полоса) кнопками* *и* *выделить пункт «*Режим контроля*».*
3) *Перейти в режим редактирования кнопкой* .
4) *Переключить режим работы в режим «*эхо*» кнопками* *и* *(альтернативным является режим «*теневой*» - он в данных измерениях не нужен).*
5) *Выйти из режима редактирования кнопкой* *(фон слова «*эхо*» при этом станет светлым) и из дополнительного меню кнопкой* .
6) *Перейти в меню к разделу «*ДАТЧИК*», используя кнопки* *и* *(добиться того, чтобы в нижней части экрана появилось слово «*ДАТЧИК*» на тёмном фоне)*

7) *Кнопками* *и* *выбирать раздел подменю «*Совм. режим*» (добиться того, чтобы в правой части экрана появилось слово «*Совм. режим*» на тёмном фоне).*

8) *Войти в режим редактирования (* *) и перевести его статус кнопками* *и* *в состояние «*Да*».*

9) *Выйти из режима редактирования (* *).*

Далее следует выставить параметры дефектоскопа таким образом, чтобы при прижиме датчика к поверхности образца на экране наблюдалась серия переотражённых импульсов. Для этого проделать следующее:

1) *Выбрать меню раздел «*ОСНОВНЫЕ*» (слово в нижней части экрана), используя кнопки* *и* *.*

2) *Выделить в подменю раздел «*Усиление*» (слово в правой части экрана) кнопками кнопками* *и* *и войти в режим редактирования кнопкой* *. Установить значение* 50 дБ*, пользуясь кнопками* *и* *. Выйти из режима редактирования кнопкой* *.*

3) *Выделить в подменю раздел «*Скорость*» кнопками* *и* *и войти в режим редактирования кнопкой* *. Установить значение* 1000 м/с*, пользуясь кнопками* *и* *. (Конкретное значение скорости в данных измерениях непринципиально и выбрано здесь лишь для удобства). Выйти из режима редактирования кнопкой* *.*

4) *Выделить в подменю раздел «*Задержка*» кнопками* *и* *, войти в режим редактирования кнопкой* *. С помощью кнопок* *и* *установить значение задержки* 1 мкс*. Выйти из режима редактирования кнопкой* *.*

5) *Выделить в подменю раздел «*Развертка*» кнопками* *и* *и войти в режим редактирования кнопкой* *. Прижать датчик к поверхности образца и, начиная от значения* 10.00 мм*, увеличивать значение развертки с помощью кнопок* *и* *до тех пор, пока на экране не будет видна серия затухающих импульсов. Установить такое значение развёртки, чтобы на экране поместилось два или более отражённых импульсов. Выйти из режима редактирования кнопкой* *.*

*б) Если амплитуды импульсов слишком велики или слишком малы, вновь выделить в подменю раздел «*Усиление*» кнопками* ▲ *и* ▼ *и войти в режим редактирования кнопкой* ↵. *Пользуясь кнопками* ▲ *и* ▼, *установить значение усилинеия таким образом, чтобы первый отражённый импульс занимал по высоте весь экран. Выйти из режима редактирования кнопкой* ↵.

После этого следует выбрать два переотражённых сигнала, временна́я задержка Δt между которыми будет использоваться для измерения скорости звука. Интервалы времени, в которых производится измерение времени прихода указанных двух импульсов, называются в настройках дефектоскопа «а-зоной» и «б-зоной». При измерении скорости звука необходимо настроить «а-зону» на первый отраженный импульс, а «б-зону» - на второй импульс. Типичный вид сигнала на экране дефектоскопа показан на рис. 8.

Чтобы не прижимать датчик к образцу в процессе настройки на а- и б-зоны, удобно текущую картинку (типа показанной на рис. 8) «заморозить», нажав на короткое время кнопку ❄. Для снятия «заморозки» после окончания настройки следует повторно нажать эту кнопку.

Последовательность подгонки положения зон к выбранным 1-му и 2-му отражённым импульсам является следующей:

*1) Выделить в меню раздел «*а-ЗОНА*», используя кнопки* ◄ *и* ►.

*2) Выделить в подменю раздел «*а-Начало*» кнопками* ▲ *и* ▼ *и войти в режим редактирования кнопкой* ↵.

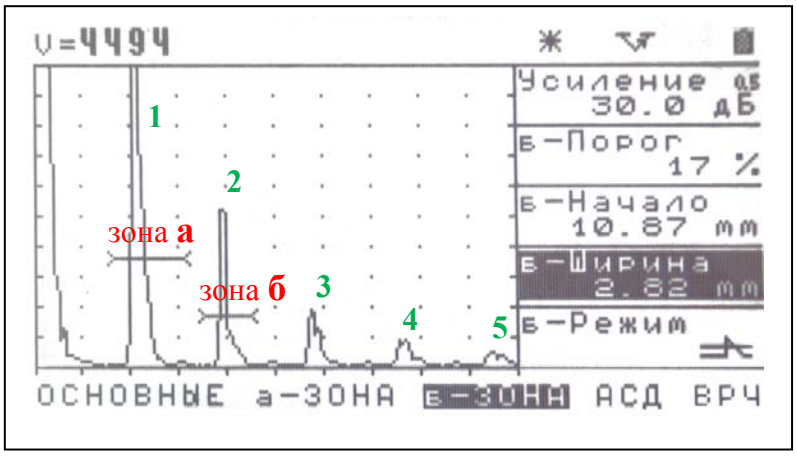

Рис. 8 Вид экрана дефектоскопа при наблюдении эхо-импульсов в пластине, с указанием порядка переотражений. Знаки интервалов >--< выделяют зоны **а** и **б**, в которых автоматически измеряется время прихода максимума сигнала. Цифрами отмечен порядковый номер эхо-импульсов

3) *Изменить начало зоны кнопками* *и* *таким образом, чтобы начало значка зоны >---< находилось на расстоянии порядка нескольких длительностей импульса слева от первого отражённого импульса. Режим регулировки (плавный или грубый) может быть установлен кнопкой* *. При плавной регулировке подменю будут отображать текст строчными буквами («а-Начало»), при грубой – заглавными («а-НАЧАЛО»). Выйти из режима редактирования нажать кнопку* *.*
4) *Аналогичным образом задать ширину интервала измерения (пункт подменю «*а-Ширина*») кнопками* *и* *таким образом, чтобы конец значка зоны >---< находился на расстоянии в несколько длительностей импульса справа от первого отражённого импульса. Выйти из режима редактирования, нажав кнопку* *.*
5) *Чтобы малоамплитудные шумы не влияли на измерения, необходимо выставить уровень отсечки – пункт подменю «*а-Порог*». Действуя аналогично предыдущим настройкам, установить высоту положения отрезка значка зоны >---< на уровне, превышающем шумы, но лежащем ниже пика импульса.*
6) *Если необходимо, отрегулировать усиление сигнала в пункте подменю «*Усиление*». Добиться того, чтобы вершина первого импульса находилась в верхней половине экрана.*
7) *Выделить в меню раздел «*б-ЗОНА*», используя кнопки* *и* *, а затем, выбрав в качестве импульса 2-й отражённый сигнал, выставить параметры в той же последовательности, как описано выше для 1-го импульса.*

Дефектоскоп позволяет измерять скорость звука автоматически. Однако для этого необходимо предварительно ввести информацию о толщине образца и указать явным образом, что и как будет измеряться. Это делается следующим образом:

1) *Выбрать меню «*ИЗМЕРЕНИЕ*» (слово в нижней части экрана), используя кнопки* *и* *.*
2) *Выделить подменю «*Усиление*» (слово в правой части экрана) кнопками* *и* *, войти в режим редактирования кнопкой* *, и установить усиление таким, чтобы оба используемых импульса были выше уровня, на котором находятся маркеры зон >---<. При этом должны загореться оба красных индикатора над экраном. Выйти из режима редактирования, нажав кнопку* *.*

3) *Выделить раздел подменю «*Величина*» кнопками* *и* *, войти в режим редактирования кнопкой* *, и выбрать в качестве измеряемой величины скорость «*V, м/с*». Выйти из режима редактирования, нажав кнопку* *.*

4) *Выделить раздел подменю «*Время*» кнопками* *и* *, войти в режим редактирования кнопкой* *, и выбрать в качестве метода регистрации времени прихода импульса «*по пику*». Выйти из режима редактирования, нажав кнопку* *.*

5) *Выделить раздел подменю «*Импульс*» кнопками* *и* *, войти в режим редактирования кнопкой* *, и выбрать в качестве режима измерения «*а → б-Зона*». Выйти из режима редактирования, нажав кнопку* *.*

6) *Выделить раздел подменю «Образец» кнопками* *и* *, войти в режим редактирования кнопкой* *, ввести численное значение толщины исследуемого образца, изменяя число на экране кнопками* *и* *. Выйти из режима редактирования кнопкой* *.*

Убедиться, что оба импульса полностью находятся в пределах экрана, а маркеры зон >--< находятся ниже пиков соответствующих импульсов. Если это условие не выполено, то отрегулировать высоту импульсов регулировкой раздела подменю «Усиление», а высоту положения маркеров >--< - в разделах меню «а-ЗОНА» и «б-ЗОНА», как пояснялось выше.

Значение скорости материала, выраженное в м/с, будет отражено в левом верхнем углу экрана. Для повышения точности измерения рекомендуется приложить датчик к 10-ти различным участкам поверхности образца, находящихся друг от друга на удалении не менее 1 см, и записать соответствующие показания. Затем рассчитать среднее значение и стандартное отклонение.

При переходе от одного образца к другому не забывайте изменить толщину образца в настройках дефектоскопа! Толщины образцов приведены в Приложении в Таблице 1.

3.2. Измерение скорости поверхностных волн (к упражнению 2)

Используется обсуждённая выше схема возбуждения и приёма поверхностных волн, показанная на рис. 6. Внешний вид акустической части измерительной установки показан на рис. 9. Для удобства установки взаимного расположения источника и приёмника на исследуемой твердотельной пластине может быть использована направляющая рамка. Измерение расстояния между источником и приёмником производится с помощью линейки, укреплённой на рамке. Угол наклона акустического пучка, падающего из клина на поверхность исследуемого образца, регулируется ручками-ползунками. Величина угла наклона находится по показаниям соответствующей шкалы. Для более плавного перемещения ползунка необходимо слегка нажать на него.

Перед началом измерения необходимо присоединить два кабеля, идущих от дефектоскопа, к излучающему и принимающему клиновым преобразователям. Разъёмы, с помощью которых осуществляется такое соединение, указаны на рис. 9. Важно осуществлять соединение и

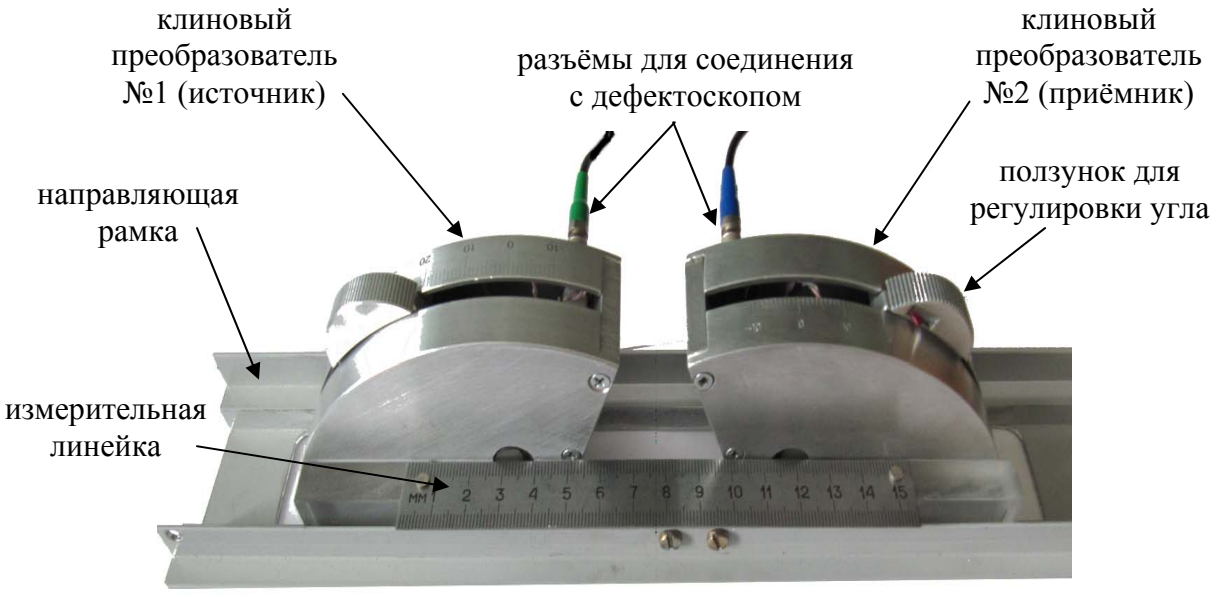

Рис. 9. Внешний вид источника и приёмника поверхностных волн

разъединение именно в этих местах, а не на дефектоскопе (где более высока вероятность повреждения разъёмов). Соединение и разъединение кабелей следует проводить максимально бережно, чтобы избежать их поломки. При этом усилия следует прилагать лишь к металлическим частям разъёмов.

Приёмник (серийный номер 14-014) и излучатель (серийный номер 14-127) подключаются к левому и правому гнёздам дефектоскопа соответственно (если смотреть на лицевую панель см. рис. 4).

Излучаемый сигнал имеют вид короткого радиоимпульса длительностью около 1 мкс и частотой заполнения около 2 МГц.

В отличие от предыдущего упражнения, при измерении скорости поверхностных волн используется не режим эхо-импульсов, а режим измерения «на проход». Поэтому дефектоскоп необходимо настроить соответствующим образом:

1) *Войти в дополнительное сервисное меню, нажав кнопку* .
2) *В появившемся меню переместить курсор (чёрная полоса) кнопками* *и* *выделить пункт «*Режим контроля*», перейти в режим редактирования кнопкой* *и переключить кнопками* *или* *режим работы в режим «*теневой*» (т.е. альтернативный к ранее использованному режиму «*эхо*»). Выйти из режима редактирования кнопкой* *и из дополнительного меню кнопкой* .
3) *Перейти в меню к разделу «*ДАТЧИК*», используя кнопки* *и*
4) *Кнопками* *и* *выберать пункт подменю «*Совм. режим*», войти в режим редактирования (* *) и перевести его статус кнопками* *и* *в состояние «*Нет*» (вместо ранее использованному состоянию «*Да*») . Выйти из режима редактирования (* *).*

Установить клиновые преобразователи на образце, поместив их в направляющую рамку, смазав предварительно поверхность образца маслом. Расстояние между преобразователями сделать минимальным. Перемещая полозки, установить углы падения и приёма равными 60^{o}. Далее следует

установить временно́е окно для наблюдения поверхностной волны. Для этого проделать следующие настройки:

1) *Выбрать меню раздел «*ОСНОВНЫЕ*», используя кнопки* *и* .
2) *Выделить в подменю раздел «*Усиление*» кнопками* *и* *и войти в режим редактирования кнопкой* . *Установить значение* 100 дБ, *пользуясь кнопками* *и* . *Выйти из режима редактирования кнопкой* .
3) *Убедиться, что в разделе подменю «*Скорость*» стоит значение* 1000 м/с. *Если это не так, то перейти к этому разделу кнопками* *и* , *войти в режим редактирования кнопкой* *и установить значение* 1000 м/с, *пользуясь кнопками* *и* , *а затем выйти из режима редактирования кнопкой* .
4) *Выделить в подменю раздел «*Развертка*» кнопками* *и* *и войти в режим редактирования кнопкой* . *Прижать датчик к поверхности образца и с помощью кнопок* *и* *установить значение* 50.00 мм. *Выйти из режима редактирования кнопкой* .
5) *Выделить в подменю раздел «*Задержка*» кнопками* *и* , *войти в режим редактирования кнопкой* . *С помощью кнопок* *и* *установить значение задержки* 30.00 мкс. *Выйти из режима редактирования кнопкой* .
6) *На этом этапе примерно в центре экрана должен быть виден импульс, соответствующий поверхностной волне. Если он не виден или слишком велик, то вернуться к разделу подменю «*Усиление*» и отрегулировать усиление так, чтобы импульс имел пиковое значение в верхней части экрана.*
7) *Меняя полозками на клиновых преобразователях величины углов падения и приёма (соблюдая их примерное равенство), добиться максимума сигнала. Записать полученные углы излучения* $\varphi_{изл}$ *и приёма* $\varphi_{пр}$ *для данного материала (они потребуются для отчёта).*

Нахождение скорости поверхностной волны основано на измерении задержки импульсного сигнала. Отметим, что в используемой установке и возбуждение, и приём поверхностных волн происходят посредством

продольных волн в клине, причём области взаимодействия указанных волн на поверхности являются распределёнными, т.е. нельзя говорить о каком-то конкретном расстоянии между источником и приёмником поверхностной волны. Абсолютное значение задержки связано и с задержкой продольных волн в излучающем и принимающем клиновых преобразователях. Чтобы избавиться от указанной неопределённости, в данной задаче измеряется не сама задержка, а её изменение при взаимном сдвиге источника и приёмника на известное расстояние. Для более точного измерения задержки необходимо изменить установки дефектоскопа таким образом, чтобы была видна тонкая временная структура сигнала. Рекомендуется выполнить следующие действия:

1) *Находясь в разделе меню «*ОСНОВНЫЕ*», перейти кнопками* ▲ *и* ▼ *в раздел подменю «*Задержка*» и войти в режим редактирования кнопкой* ↵*. С помощью кнопки* ▲ *увеличить задержку до тех пор, пока начало импульса не установится между 0-м и 1-м делениями у левой границы области изображения. Выйти из режима редактирования кнопкой* ↵*.*
2) *Перейти кнопками* ▲ *и* ▼ *в раздел подменю «*Развертка*» и войти в режим редактирования кнопкой* ↵*. С помощью кнопки* ▼ *уменьшить развёртку до тех пор, пока не проявится тонкая структура импульса (она представляет собой модуль от величины истинного сигнала). Сигнал на экране дефектоскопа будет иметь вид, показанный на рис. 10 а. Кноками* ▲ *и* ▼ *выбрать развёртку такой, чтобы расстояние между нулями наблюдаемого сигнала составляло примерно одно деление временной шкалы. Выйти из режима редактирования кнопкой* ↵*.*
3) *Вновь перейти кнопками* ▲ *и* ▼ *в раздел подменю «*Задержка*» и войти в режим редактирования кнопкой* ↵*. С помощью кнопки* ▲ *увеличить задержку до тех пор, пока первый ноль слева от самого высокого пика импульса не окажется максимально близко к левой границе области изображения. При этом сигнал должен выглядеть примерно так, как показано на рис. 10 б.*
4) *Записать получившееся значение задержки* t_1*. Выйти из режима редактирования кнопкой* ↵*.*

5) *Записать координаты x_1 и y_1 (в миллиметрах) точек пересечения края измерительной линейки и наклонных граней клиновых преобразователей. Рассчитать начальное расстояние $L_1=y_1-x_1$.*

6) *Перейти кнопками* *и* *в раздел подменю «*Развертка*», войти в режим редактирования кнопкой* *. С помощью* *вновь установить развёртку равной* 50.00 мм*. Выйти из режима редактирования кнопкой* *. На экране вблизи левой границы должен быть виден тот же короткий импульс, что и в начале измерений.*

7) *Аккуратно придерживая клиновые преобразователи, развести их так, чтобы расстояние между ними увеличилось примерно на 50 мм. Убедиться, что сигнал поверхностной волны присутствует на экране (при увеличении расстояния между клиновыми преобразователями сигнал сместится вправо). В противном случае проверить надёжность прижима клиновых преобразователей к поверхности образца и, если нужно, смазать поверхность маслом.*

8) *Записать координаты x_2 и y_2 (в миллиметрах) точек пересечения края измерительной линейки и наклонных граней клиновых преобразователей. Рассчитать новое расстояние $L_2=y_2-x_2$.*

9) *Повторить шаги 1 - 4 и записать получившееся значение задержки t_2*

10) *Рассчитать скорость поверхностной волны по формуле* $c_R=(L_2-L_1)/(t_2-t_1)$.

а **б**

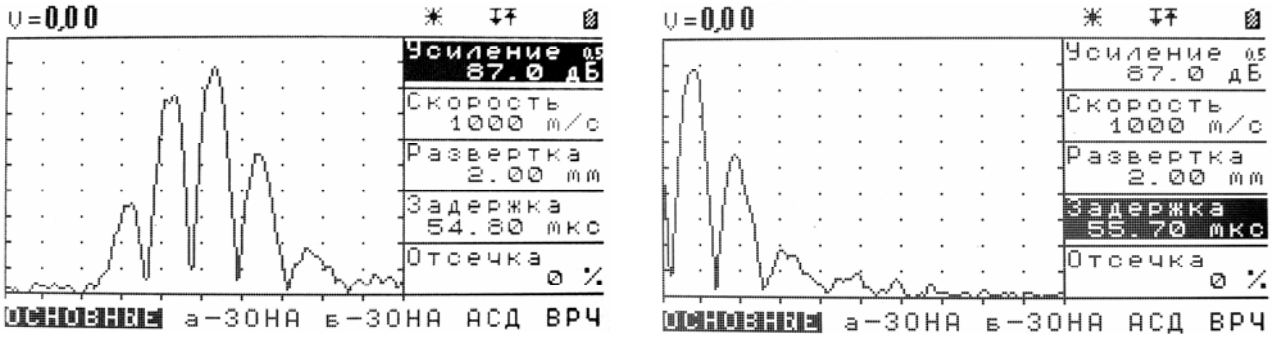

Рис. 10. Вид сигнала на экране дефектоскопа в процессе измерения задержки сигнала поверхностной волны. Изображённый на экране сигнал соответствует модулю полного сигнала, т.е. сам сигнал имеет вид радиоимпульса, состоящего из $2-3$ периодов синусоидальной волны. Слева (а) показан сигнал сразу после изменения развёртки шкалы (см. описание в тексте). Справа (б) показан сигнал после выставления задержки, при которой ноль сигнала, расположенный слева от его пика, подведён к началу шкалы.

3.3. Описание заданий

Перед началом выполнения работы нужно получить у лаборанта ультразвуковые преобразователи и соединительные кабели. После окончания измерений их следует сдать лаборанту или преподавателю.

Упражнение 1. Определение скорости продольных волн эхо-импульсным методом

Измерения проводятся последовательно для 7-и образцов - для всех материалов, указанных в Приложении (Табл. 1).

1. Ознакомиться с регулировками дефектоскопа, используя пояснения на рис. 4.
2. Подсоединить пьезоэлектрический датчик, показанный на рис. 7, к одному из двух кабелей, идущих от дефектоскопа (всё равно к какому) Убедиться, что второй кабель при этом свободен: если он подсоединён к одному из клиновых преобразователей, то отсоединить его. Внимание! Все подсоединения и отсоединения кабелей просьба проводить максимально аккуратно во избежание поломки высокочастотных разъёмов.
3. Включить дефектоскоп и провести измерения согласно п. 3.1.
4. Для каждого образца записать выдаваемое дефектоскопом значение скорости волны в 10-ти точках, приложив датчик к 10-ти различным участкам поверхности образца, находящихся друг от друга на удалении не менее 1 см. Рассчитать среднее значение измеренной скорости и её стандартное отклонение.
5. Пользуясь табличными значениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона (см. Табл. 1 в Приложении), по формуле (7) рассчитать теоретические значения скоростей продольных и поперечных волн для всех исследуемых материалов.

Упражнение 2. Определение скорости поверхностных волн

Измерения проводятся для 4-х образцов из следующих материалов: дюралюминий, сталь, стекло, электрон.

1. Отсоединить от кабеля пьезоэлектрический датчик, использованный в предыдущем упражнении. Подсоединить этот кабель и второй свободный

кабель к клиновым преобразователям в соответствии с описанием в начале п. 3.2.

2. Провести измерения в последовательности, изложенной в п. 3.2. Результатом измерения для каждого образца должны быть величины $L_1, L_2, t_1, t_2,$ рассчитанные на их основе скорости поверхностных волн $c_R = (L_2 - L_1)/(t_2 - t_1)$ и оптимальные углы для излучения $\varphi_{\text{изл}}$ и приёма $\varphi_{\text{пр}}$ поверхностных волн.

3. Пользуясь рассчитанными теоретическими значениями скорости поперечных волн и табличным значением коэффициента Пуассона (см. Табл. 1 в Приложении), для всех исследуемых материалов по формуле (9) рассчитать теоретические значения скоростей поверхностных волн, а по формуле (14) − значения углов оптимального возбуждения. Скорость продольных волн в материале клина считать равной $c_l^{(\text{кл})} = 2700$ м/с.

По результатам измерений и теоретических расчётов заполнить следующую таблицу, указав для экспериментальных значений ошибку (представив данные измерений в виде $\bar{c} \pm \Delta c$):

МАТЕРИАЛ	c_l (м/с)		c_t (м/с)	c_R (м/с)		φ (град)		
	теор.	эксп.	теор.	теор.	эксп.	теор.	эксп. $\varphi_{\text{изл}}$	эксп. $\varphi_{\text{пр}}$
Оргстекло								
Латунь								
Медь								
Дюралюминий								
Стекло								
Сталь								
Электрон								

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников В.А. Введение в акустику: Учебное пособие. Изд-во Моск. ун-та, 1992, 152 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости, 4 изд. - М.: Наука, 1987, гл. 3, § 24.
3. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. - М: Наука, 1966.
4. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. - М.: Наука, 1984, 403 с.
5. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах, 2 изд. - М., 1973, гл. 1, § 6.

Дополнительная литература

6. Физическая акустика. Под ред. У. Мэзона и Р. Терстона, пер. с англ., т. 7. - М., 1974, гл. 4.
7. Акустика в задачах. Под ред. Гурбатова С.Н и Руденко О.В. - М.: Наука, 1996, глава 6, § 6.1 - 6.2, с. 176-188.
8. Кайно Г. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. пер. с англ. - М.: Мир, 1990, 656 с.
9. Ермолов И.Н., Алёшин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. В 5 книгах. Книга 2: Акустические методы контроля: практическое пособие. Под ред. Сухорукова В.В. - М.: Высшая школа, 1991, 283 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Справочные данные об исследуемых образцах

Теоретические значения скоростей упругих волн могут быть рассчитаны по формулам (7) и (9) на основе известных значений коэффициента Пуассона и модуля Юнга материалов. В Таблице 1 приведены соответствующие данные.

Отметим, что все исследуемые плоскопараллельные пластины имеют разные толщины. В Таблице 1 для каждого образца его толщина указана в правой колонке. Для удобства, материалы расположены в порядке увеличения толщины.

Таблица 1. Параметры материалов и толщины соответствующих образцов

МАТЕРИАЛ	Плотность ρ (кг/м^3)	Коэф. Пуассона σ	Модуль Юнга E (10^{10} Н/м^2)	Толщина образца h (мм)
Оргстекло	1150	0.39	0.42	18.0
Латунь (~70%Cu, 30%Zn)	8500	0.36	10.	23.6
Медь	8900	0.35	12.3	26.3
Дюралюминий (~94% Al, 6% Cu+Mg+Mn)	2700	0.34	7.	29.3
Стекло	2500	0.24	7.	32.6
Сталь	7800	0.30	21.	39.5
Электрон (~90% Mg, 10% Al+Zn+Mn)	1800	0.35	4.8	41.7