

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Коротков М.М.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ

Учебное пособие

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 534.86

К

Коротков М.М.

К Ультразвуковая толщинометрия: учебное пособие / М.М. Коротков. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 94 с.

Учебное пособие подготовлено на основе программы для технических университетов, осуществляющих подготовку специалистов второй образовательной ступени (специалист, магистр-специалист) в сфере неразрушающего контроля и технической диагностики по дисциплине «Физические методы контроля и диагностики».

Основная его цель – дать базовые знания будущим специалистам по неразрушающему контролю (НК), технической диагностике (ТД) и управлению качеством (УК) по теоретическим основам ультразвуковой толщинометрии, ознакомить с технологией ее проведения.

Ультразвуковая толщинометрия имеет в настоящее время большое значение для получения информации о размерах объекта контроля – измерении толщины стенок труб, сосудов, резервуаров, корпусов морских и речных судов и других изделий, доступ к которым имеется только с одной стороны, а также принятии заключений об остаточном ресурсе эксплуатации изделий и управляющих решений по обеспечению качества продукции.

Автор надеется, что настоящее учебное пособие окажется полезным не только для студентов, изучающих акустические методы неразрушающего контроля, но также для преподавателей ВУЗов, сотрудников научно-исследовательских и заводских лабораторий, специалистов в сфере неразрушающего контроля и лиц других специальностей.

УДК 534.86

© Томский политехнический университет, 2008

© Коротков М.М., 2008

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ГЛАВА 1.	
АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ	6
1.1. Понятие об акустических колебаниях и волнах	6
1.2. Акустические свойства сред	10
1.3. Отражение и преломление акустических волн	14
1.4. Другие типы волн	22
ГЛАВА 2.	
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ...	30
2.1. Физические эффекты для получения акустических колебаний	30
2.2. Основные уравнения прямого и обратного пьезоэффекта	31
2.3. Акустическое поле преобразователя	37
2.4. Преобразователи для ультразвуковой толщинометрии	40
ГЛАВА 3.	
МЕТОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ	43
3.1. Общие сведения	43
3.2. Аппаратурная реализация УЗ толщинометрии	50
ГЛАВА 4.	
МЕТОДОЛОГИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ	62
4.1. Условия применимости УЗ толщинометрии	62
4.2. Средства ультразвуковой толщинометрии	65
4.3. Подготовка к измерению толщины	67
4.4. Проведение измерений	68
4.5. Некоторые сведения об ошибках измерений	70
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	77
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	92

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ультразвуковая толщинометрия – основной метод, применяемый с целью оценки фактического значения толщины стенок элементов конструкций способом однократных измерений в местах, недоступных для измерения толщины механическим измерительным инструментом.

Наиболее часто используемые приборы – ультразвуковые толщиномеры, которые измеряют время прохождения ультразвукового импульса от излучателя до противоположной поверхности объекта контроля и обратно к преобразователю. Для проведения таких измерений доступ к противоположной поверхности объекта контроля не требуется. Благодаря этому, если противоположная поверхность объекта контроля является труднодоступной или полностью недоступной, необходимость разрезать объект контроля (что требуется при использовании микрометра или штангенциркуля) отсутствует. С помощью ультразвуковых толщиномеров может быть измерена толщина изделий из большинства конструкционных материалов, таких как металлы, пластики, керамика, композиты, эпоксидная смола и стекло, а также толщина слоя жидкости или биологических образцов.

Так как ультразвук плохо распространяется в воздухе, между преобразователем и поверхностью объекта контроля наносится небольшое количество контактной жидкости. Обычно в роли контактной жидкости выступает глицерин, пропиленгликоль, вода или масло. Ультразвуковой импульс, излучаемый преобразователем, проникает в объект контроля, проходит до противоположной поверхности, отражается от нее и попадает обратно на преобразователь. Подобно эхолоту, толщиномер точно измеряет временной интервал между отправкой зондирующего импульса и получением отраженного эхосигнала, составляющий обычно несколько микросекунд. Для проведения измерений может потребоваться настройка параметра, называемого сдвигом нуля, необходимая для компенсации времени аппаратной задержки импульса в самом толщиномере и преобразователе. Полученный временной интервал толщиномер делит на два, получая время прохождения ультразвука в одну сторону. Это значение умножается на скорость распространения ультразвука в данном материале. Таким образом рассчитывается толщина объекта контроля.

Значение скорости ультразвука является существенной частью этих расчетов. Различные материалы проводят ультразвуковые волны с различной скоростью. Кроме этого, в некоторых материалах, особенно в

пластмассах, скорость ультразвука колеблется с изменением температуры. Таким образом, настройка ультразвукового толщиномера на правильную скорость ультразвука в материале, из которого выполнен объект контроля, является очень важной. Для этого используются опорные образцы известной толщины.

При любом измерении толщины выбор толщиномера и преобразователя зависит от материала, из которого выполнен объект контроля, диапазона измеряемой толщины и требуемой точности измерений. Кроме этого, необходимо учитывать форму объекта контроля, его температуру и другие специальные условия.

Одной из самых важных областей применения ультразвукового контроля является измерение остаточной толщины стенок металлических труб, резервуаров или баллонов, подверженных коррозии с внутренней стороны.

Многие современные ультразвуковые толщиномеры оснащены сложными системами регистрации и передачи данных, обеспечивающими сопряжение толщиномеров с компьютерными базами данных. Тысячи показаний могут быть получены и сохранены под идентификационными номерами (идентификаторами) в полевых условиях или при проведении контроля работающего оборудования на промышленном предприятии и загружены в компьютер для регистрации и статистического анализа. Некоторые портативные толщиномеры также предусматривают отображение эхосигналов на дисплее. Эти эхосигналы могут быть использованы опытным оператором для проверки точности показаний в сложных случаях контроля, а также для установки оптимальных значений параметров работы толщиномера.

В данном пособии рассмотрены вопросы, касающиеся физических основ метода, основы построения преобразователей для ультразвуковой толщинометрии, методы акустического контроля, применяемые для целей ультразвуковой толщинометрии и ее аппаратурная реализация, методология ультразвуковой толщинометрии.

ГЛАВА 1. АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

1.1. Понятие об акустических колебаниях и волнах

- **Акустическими волнами** называют распространяющиеся в упругой среде механические колебания частичек среды.

При движении волны частицы не перемещаются, а совершают колебания около своих положений равновесия.

- Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется **длиной волны λ** .

Длина волны связана со скоростью распространения C и частотой f (или периодом T) соотношением (1.1)

$$\lambda = C \cdot T = \frac{C}{f} \quad (0.1)$$

где λ – длина волны [м]; C – скорость распространения [м/с]; T – период [с]; f – частота [Гц].

Например для воздуха: $C = 330$ м/с

$$f = 20 \text{ Гц} \rightarrow \lambda = 16,5 \text{ м};$$

$$f = 20000 \text{ Гц} \rightarrow \lambda = 1,65 \text{ см};$$

$$f = 20000000 \text{ Гц} \rightarrow \lambda = 0,165 \text{ мм};$$

В зависимости от направления колебаний частиц по отношению к направлению распространения волны различают: **продольные, поперечные, поверхностные и нормальные волны (волны в пластинах)**.

В продольной волне частицы колеблются вдоль направления распространения волны. Колебания могут распространяться в твердой, жидкой и газообразных средах.

Если направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения, то такие колебания называются **поперечными (или сдвиговыми)**. Они могут распространяться только в среде, которая обладает упругостью формы.

Продольные и поперечные волны могут распространяться в чистом виде только в неограниченной среде (∞ или $\infty/2$) или в теле, размеры которого в направлениях, не совпадающих с направлением распространения волны, значительно превышают длину последней. Схематично продольные и поперечные волны представлены на рис. 1.1.

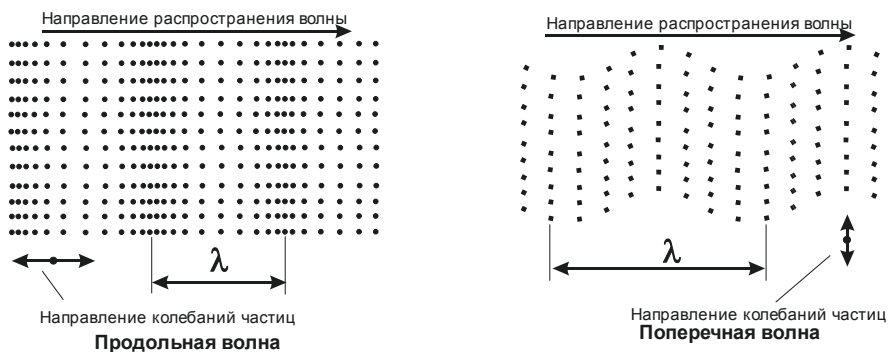


Рис. 1.1. Распространение продольных и поперечных волн

На свободной поверхности могут распространяться **поверхностные волны (волны Рэлея)**.

В поверхностной волне частицы одновременно совершают колебания в направлении распространения и перпендикулярно ему, описывая эллиптические или более сложные траектории. Амплитуда колебания по мере удаления от поверхности вглубь убывает по экспоненте, поэтому волна локализована в тонком поверхностном слое толщиной в одну – полторы длины волны и следует изгибам поверхности рис. 1.2.

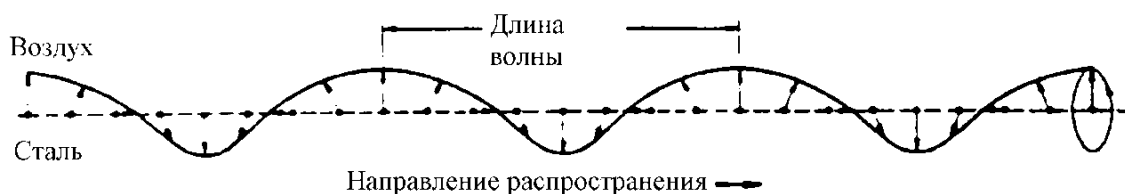


Рис. 1.2. Распространение поверхностных волн

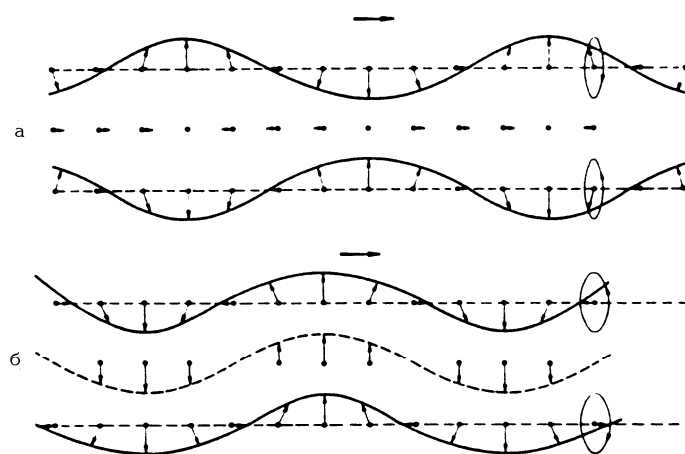


Рис. 1.3. Волны в пластинах
а – симметричная, б – ассиметричная

При распространении волны в плоских телах с постоянной толщиной (листах, тонких пластинках, проволоке) могут возникать нормальные волны или Волны Лэмба. При этом частицы совершают колебания по таким же траекториям, как в поверхностной волне, но на всю толщину листа, пластины оболочки. Обычно возникают и распространяются независимо две нормальные волны симметричная (волна сжатия или растяжения) и антисимметричная (волна изгиба) рис. 1.3.

Скорости распространения продольной, поперечной и поверхностной волн определяется упругими свойствами материала (модулями упругости и сдвига, коэффициентами Пуассона) и его плотностью. [1]

Скорость распространения нормальных волн в отличие от скорости распространения других типов волн зависит не только от свойств материала, но и от частоты звуковых колебаний и толщины изделия.

$$C_l > C_t > C_s; C_t \sim 0,55 C_l; C_s \sim 0,93 C_t.$$

Акустические волны различают также по форме фронта волны или волновой поверхности.

- **Фронт волны** это геометрическое место точек среды, в которых в рассматриваемый момент времени фаза волны имеет одно и то же значение.

Если в среде распространяется кратковременное возмущение (импульс), то **фронтом волны** называется граница между возмущенной и невозмущенной областями среды.

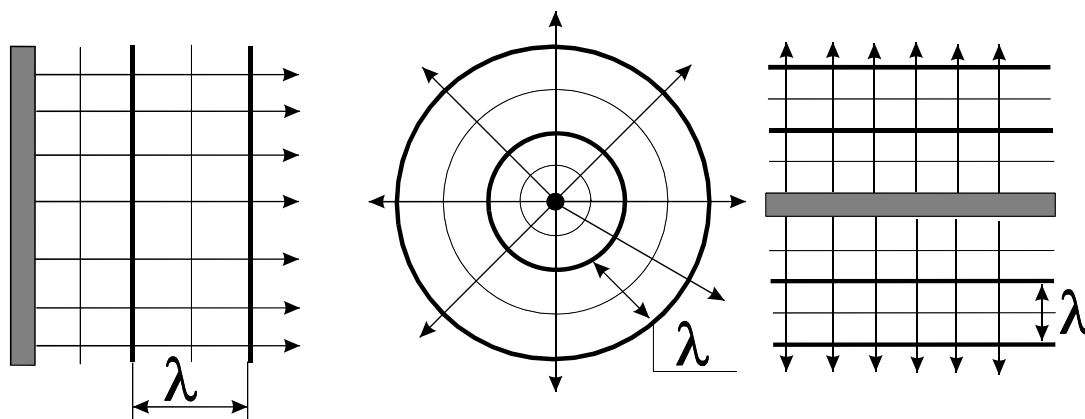


Рис. 1.4. Плоские, сферические, цилиндрические волны

Фронт или волновая поверхность непрерывно перемещается в среде и при этом деформируется. В неограниченной изотропной среде распространение упругих волн имеет пространственный характер, и, в зависимости от формы фронта, волны могут быть **плоскими, сферическими** и **цилиндрическими** рис. 1.4.

- **Плоские волны** возбуждаются пластинкой, если ее поперечные размеры намного превосходят длину волны. Волновые поверхности плоской волны имеют вид параллельных плоскостей.
- **Сферические волны** возбуждаются точечным источником или колеблющимся шаровым телом, размеры которого малы. Волновые поверхности сферической волны имеют вид концентрических сфер.
- **Цилиндрические волны** возбуждаются цилиндрическим телом (стержень, цилиндр и т. д.) длина которого значительно его поперечных размеров. Волновые поверхности имеют вид концентрических цилиндров.

На очень больших расстояниях сферические и цилиндрические волны переходят в плоские.

В зависимости от частот различают следующие волны:

- **Инфразвуковые** $f =$ до 16...20 Гц;
- **Звуковые** $f =$ 16–20000 Гц;
- **Ультразвуковые** $f =$ 20 кГц – 1000 МГц;
- **Гиперзвуковые** $f >$ 1000 МГц.

Для целей дефектоскопии используются волны различных диапазонов:

Звуковой $f =$ 1–8 кГц;

Ультразвуковой $f =$ 20 кГц – 50 МГц;

В настоящее время ведутся работы и удастся получать частоты до 1000 МГц.

Длина волны гиперзвуковых колебаний сравнима с длиной волны видимых световых волн. Это делает их похожими по своим свойствам со свойствами световых лучей, поэтому многие задачи рассматриваются с точки зрения геометрической акустики.

- **Геометрическая акустика** – упрощенная теория распространения звука, пренебрегающая дифракционными явлениями.

Геометрическая акустика основана на представлении о звуковых лучах, вдоль каждого из которых звуковая энергия распространяется не зависимо от соседних лучей. В однородной среде звуковые лучи – прямые линии.

С математической точки зрения геометрическая акустика есть предельный случай волновой теории распространения звука при стремлении длины волны к 0 и в этом отношении аналогична геометрической оптике в теории распространения света.

Коротковолновые УЗ – колебания распространяются в виде направленных лучей. Как и световые лучи, они могут отражаться, преломляться, фокусироваться, интерферировать, причем не только сами с собой, но и со светом, испытывать дифракцию и затухать по мере распространения.

Длина волны гиперзвуковых волн может стать сравнимой с размерами атомов. В этом случае начинается проявляться квантовый характер

такой волны и, по аналогии со световым потоком, такой поток звуковой энергии оказывается возможно рассматривать в виде потока частиц (фононов), которые взаимодействуют уже не с конечными объемами вещества или кристаллами, а уже с электронами атома. При этом возникают различные эффекты такого взаимодействия, которые позволяют изучать более широкий круг физических характеристик материалов.

С другой стороны инфразвуковые волны обладают большими длинами, проходят на большие расстояния, что позволяет контролировать физические свойства больших массивов вещества (напр. в геологоразведке).

Акустические волны ультразвукового диапазона обладают свойствами очень сильно отражаться от границы твердое тело – воздух. Расчеты показывают, что слои воздуха толщиной 10^{-5} мм и более при $f = 5$ МГц происходит 100 % отражение посланной энергии, при толщине слоя $< 10^{-5}$ мм отражение составляет ~ 90 %, а слой толщиной 10^{-6} мм отражает ~ 80 % посланной энергии. Благодаря этому свойству УЗ – колебания эффективно отражаются от трещин, воздушных полостей и т. д., что позволяет их легко обнаружить. [3, 4]

Все выше сказанное привело к широкому распространению акустических методов контроля качества материалов и изделий.

1.2. Акустические свойства сред

Энергетические характеристики волн

Независимо от типа волн, все они характеризуются важным параметром – **звуковая энергия**. Полная энергия звуковой волны складывается из кинетической энергии движения частиц среды и внутренней энергии. Плотность кинетической энергии равна

$$E_k = \rho \frac{V^2}{2}. \quad (1.2)$$

В бегущей волне плотность внутренней энергии равна плотности кинетической энергии, поэтому полная плотность энергии равна

$$E = E_k + E_e = \rho \cdot V^2. \quad (1.3)$$

Измеряется в $\frac{\text{дж}}{\text{м}^3}$; $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$.

Тогда **плотность потока энергии звуковой волны** равна

$$W = C \cdot E = \rho \cdot C \cdot V^2. \quad (1.4)$$

Измеряется в $\frac{\text{дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$; $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$

Среднее значение энергии за период называют **интенсивностью или силой звука**. Для плоской бегущей гармонической волны интенсивность равна

$$J = \frac{1}{2}W = \frac{1}{2}\rho \cdot C \cdot V^2. \quad (1.5)$$

Величина

$$p = \rho \cdot C \cdot V. \quad (1.6)$$

называется **акустическим давлением звуковой волны** и измеряется в

$$\frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}^2}, \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$$

Для УЗ дефектоскопии большое значение имеет **удельное волновое сопротивление среды** или **импеданс**, которое выражается как

$$z = \frac{p}{V} = \rho \cdot C. \quad (1.7)$$

Измеряется в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$

Коэффициент затухания

Ослабление амплитуды плоской гармонической волны в результате взаимодействия ее со средой происходит по закону $e^{-\delta x}$, где x – путь в среде, а δ – коэффициент затухания. В дальнейшем термин «затухание» будем относить только к ослаблению, учитываемому экспоненциальным множителем, в отличие от уменьшения амплитуды, связанного с расширением волнового фронта, например, в сферической волне. [10, 11]

Величина, обратная коэффициенту затухания, показывает, на каком пути амплитуда волны уменьшается в e раз, где e – число Непера, поэтому размерность коэффициента затухания м^{-1} . В литературе иногда эту единицу записывают непер/м (Нп/м), однако ГОСТом такая единица не предусмотрена. Часто коэффициент затухания выражают числом N отрицательных децибел, на которое уменьшается амплитуда волны на единичном участке пути $x = 1\text{м} \cdot N = 20 \lg e^{-\delta 1} = -8,68\delta\text{дБ} / \text{м}$, поэтому $1\text{м}^{-1} = 1\text{Нп} / \text{м} = 8,686\delta\text{дБ} / \text{м}$.

Коэффициент затухания складывается из **коэффициентов поглощения** δ_n и **рассеяния** δ_p

$$\delta = \delta_n + \delta_p. \quad (1.8)$$

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны.

Поглощение обусловлено вязкостью, **упругим гистерезисом** (т. е. различной упругой зависимостью при расширении и сжатии) и теплопроводностью. Последний механизм поглощения связан с тем, что процесс распространения акустической волны считают адиабатическим. Расширение или сжатие элементарного объема сопровождается изменением температуры, но они настолько кратковременны, что процесс выравнивания температуры можно не учитывать. В действительности теплопроводность существует и способствует потере энергии колебаний. Существуют также другие механизмы поглощения, проявляющиеся при более высоких частотах, чем применяют в акустическом контроле.

Рассеяние происходит из-за наличия в среде неоднородностей (с отличным от среды волновым сопротивлением), размеры которых соизмеримы с длиной волны. Различие в волновых сопротивлениях приводит к отражению волн. Малые размеры и большое число неоднородностей обуславливают статистический характер процесса рассеяния. Такими неоднородностями могут быть, например, капли воды в газе, взвешенные частицы или пузырьки воздуха в воде.

В газах и жидкостях, не засоренных инородными частицами, рассеяние отсутствует и затухание определяется поглощением. Коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. В связи с этим в качестве характеристики поглощения звука в жидкостях и газах вводят величину $\delta' = \delta / f^2$.

В случаях, когда в жидкости наблюдается дисперсия скорости ультразвука, квадратичная зависимость δ от частоты нарушается.

Коэффициент поглощения в твердых телах пропорционален f (стекло, биологические ткани, металлы, некоторые пластмассы) или f^2 (резина, многие пластмассы). Для одной и той же среды поглощение поперечных волн при $f = \text{const}$ меньше, чем продольных. Это обусловлено тем, что поперечные колебания не связаны с изменением объема и потери на теплопроводность отсутствуют.

Рассеяние отсутствует в однородных аморфных твердых материалах типа стекла, пластмассы. Слабое рассеяние в них может возникать под влиянием внутренних напряжений, вызывающих изменение скорости звука и преломление (отклонение) упругих волн. В гетерогенных материалах (чугун, гранит, бетон) рассеяние весьма велико. Большое рассеяние наблюдают также в большинстве металлов даже при высокой степени их однородности.

Металлы, применяемые на практике, имеют поликристаллическую структуру, они состоят из большого количества **кристаллитов (зерен)** – монокристаллов, не имеющих явно выраженной огранки. Чаще всего кристаллиты ориентированы случайным образом; при переходе ультразвука из одного кристаллита в другой скорость звука из-за анизотропии может измениться в большей или меньшей степени. В результате возникает частичное отражение, преломление ультразвука и трансформация типов волн, что определяет механизм рассеяния.

Чем больше упругая анизотропия кристаллов, тем больше рассеяние. Анизотропию характеризуют параметром упругой анизотропии. В кубическом кристалле он представляет собой меру относительного сопротивления кристаллов, двум типам сдвиговой деформации. Велика анизотропия в меди, цинке, аустенитной (нержавеющей) стали. Мала упругая анизотропия в вольфраме, алюминии. Альфа-железо и углеродистую сталь относят к промежуточным материалам по величине упругой анизотропии и рассеяния.

Большое влияние на величину коэффициента рассеяния в средах оказывает соотношение среднего размера неоднородностей и, среднего расстояния между неоднородностями с длиной волны ультразвука. В металлах параметр среды, влияющий на рассеяние, – средний размер кристаллитов D . При $\bar{D} \geq \lambda$ коэффициент δ_p пропорционален f^4 (рэлеевское рассеяние) (рис. 1.5). Общее затухание определяют в этом случае формулой

$$\delta = Af + Bf^4 \bar{D}^3, \quad (1.9)$$

где A и B – постоянные; f – частота колебаний.

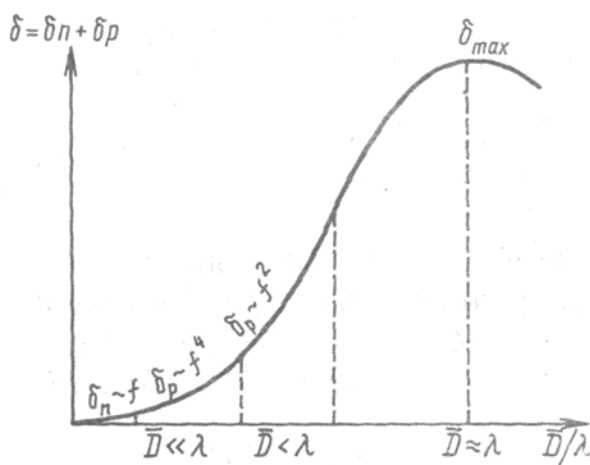


Рис. 1.5. Схематическая зависимость коэффициента затухания от соотношения среднего диаметра зерна и длины волны

Член Af обусловлен поглощением, он имеет превалирующее значение при малых f . В области $4 \leq \lambda/D \leq 10$ коэффициент δ_p пропорционален произведению $\bar{D}f^2$. В разнородных металлах показатель степени при f меняется от 2 до 4. Максимальное затухание наблюдается при $\lambda \approx \bar{D}$.

В углеродистой стали зерна состоят из очень большого числа мелких пластинок железа и цемента (Fe_3C). Размеры их значительно меньше среднего размера зерна \bar{D} . С этим, по-видимому, связан тот факт, что в широком диапазоне частот в мелкозернистых углеродистых сталях (вплоть до значений $f = 4 \dots 5$ МГц) затухание определяется поглощением, т. е. пропорционально частоте. В сварных швах из аустенитной стали происходит упорядочение ориентации кристаллов.

1.3. Отражение и преломление акустических волн

В ультразвуковой дефектоскопии для контроля материалов и изделий используются преобразователи, возбуждающие в объекте контроля волны различных типов в зависимости от поставленной задачи. Акустическая волна проходя через границу раздела двух сред частично отражается, а частично проходит. Знание углов преломления и отражения в зависимости от угла ввода позволяет изготавливать преобразователи, возбуждающие в объекте контроля необходимую волну.

Также важными характеристиками, определяющими количественно долю пройденной и отраженной волны, являются коэффициенты отражения R и прохождения (прозрачности) D .

Граница двух полубесконечных сред

Падающая на границу двух сред акустическая волна частично проходит через границу, а частично отражается от нее. При этом может происходить трансформация типов волн. В общем случае на границе двух твердых сред (рис. 1.6) возникают по две (продольная и поперечная) отраженных и преломленных волны. [6]

Направления отраженных и прошедших волн определяются из **закона синусов**:

$$\frac{\sin \beta}{C_{l1}} = \frac{\sin \alpha_t}{C_{t2}} = \frac{\sin \alpha_l}{C_{l2}} = \frac{\sin \gamma_l}{C_{l1}} = \frac{\sin \gamma_t}{C_{t1}}, \quad (1.10)$$

где $C_{l1}, C_{t1}, C_{l2}, C_{t2}$ – скорости распространения продольных и поперечных волн в верхней и нижней средах.

Этот закон следует из равенства фазовых скоростей вдоль границы для всех волн.

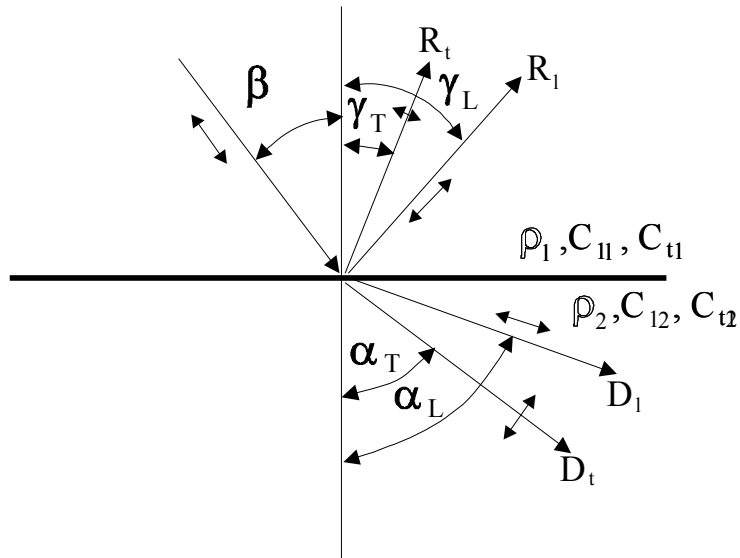


Рис. 1.6. Отражение и преломление волн на границе двух твердых тел

Угол отражения продольной волны будет равен углу падения β (т. к. падает продольная волна и скорости падающей и отраженной продольных волн равны).

Т. к. скорость распространения поперечной волны C_t меньше (≈ 2 раза) чем C_l , то поперечная волна отразится под углом γ_t , меньшим, чем γ_l .

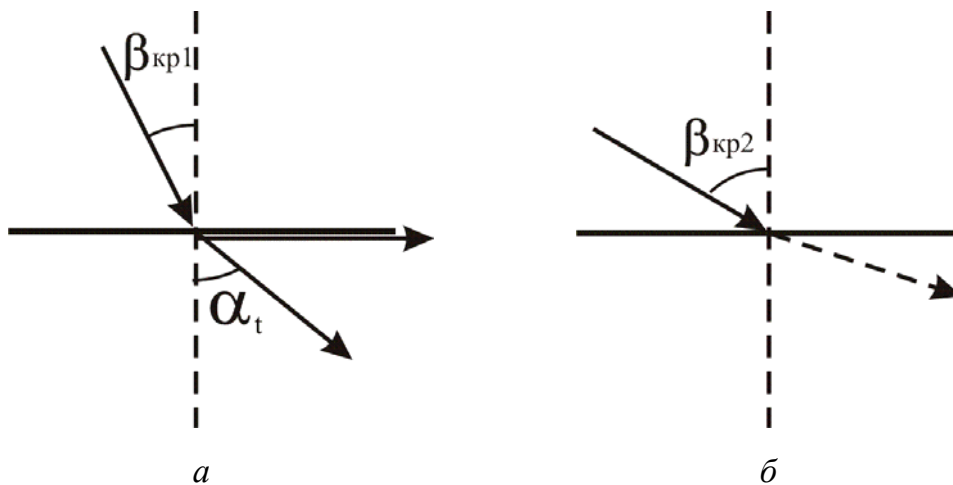


Рис. 1.7. Критические углы при падении волн на границу раздела двух сред:
а – первый критический угол; б – второй критический угол

Прошедшие продольные и поперечные волны также будут преломляться под разными углами, причем $\alpha_t < \alpha_l$. При увеличении угла падения β углы α и γ будут увеличиваться и при некотором значении $\beta_{кр1}$ (первый критический угол) преломленные продольные волны будут распространяться по поверхности, не проникая вглубь среды, а преломленная поперечная волна будет уходить вглубь среды, что видно из рис. 1.7, а.

При дальнейшем увеличении угла β до значения $\beta_{кр2}$ (второй критический угол) по поверхности пойдут поперечные (сдвиговые волны), как показано на рис. 1.7, б.

Если построить график зависимости углов $\alpha_l, \alpha_t, \gamma_l, \gamma_t$ от угла падения β , то он будет иметь вид, представленный на рис. 1.8.

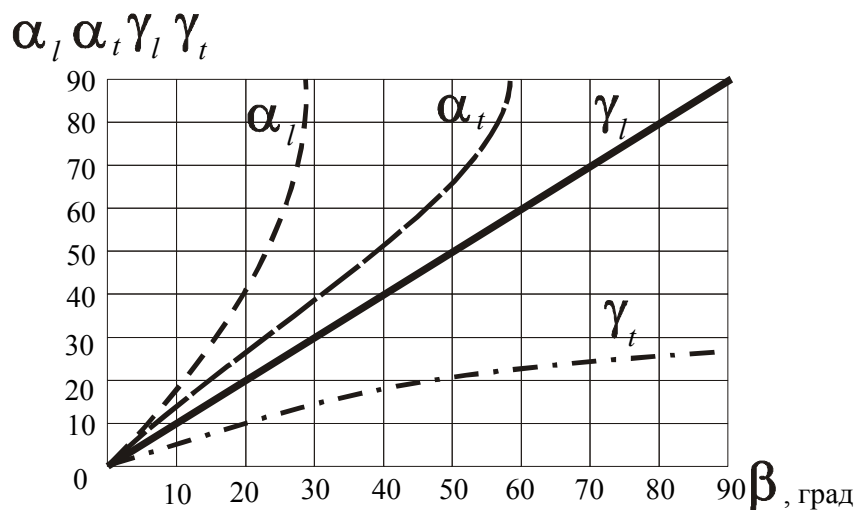


Рис. 1.8. Зависимость значений углов отражения и преломления от угла падения

Такой график строится для конкретного материала и позволяет быстро определять значения углов распространения отраженных и преломленных волн в средах в зависимости от β .

При $\beta=0$ расщепления падающей продольной волны на продольную и поперечную, отражение волны не происходит. Увеличение угла β от 0 до 90° вызывает трансформацию падающей продольной волны, в результате чего в первой среде возникают отраженные, а во второй среде – преломленные продольные поперечные волны.

При малых углах β поперечные (сдвиговые) волны очень слабы, однако с увеличением угла происходит перераспределение звуковой энергии, вследствие чего интенсивность поперечной волны увеличивается.

Для оргстекла при $\beta < 27^\circ$ во второй среде нельзя получить поперечных, а при $\beta > 57^\circ$ – продольных волн. Эти углы соответствуют $\beta_{кр1}$ и $\beta_{кр2}$ (для оргстекла), при которых происходит полное внутреннее отражение УЗК, падающих на поверхность раздела двух сред.

Амплитуда прошедшей A_{np} и отраженной $A_{отр}$ волн характеризуются соответствующими коэффициентами прозрачности

$$D = \frac{A_{np}}{A_0} \quad (1.11)$$

и отражения

$$R = \frac{A_{omp}}{A_0}, \quad (1.12)$$

где A_0 – амплитуда падающей волны.

При решении задач о поведении волн на границе сред эффективно использовать понятие нормального импеданса границы. Рассмотрим вначале случай **жидких или газообразных сред**. Нормальный импеданс волны здесь определяют как отношение акустического давления к нормальной составляющей колебательной скорости

$$Z = \frac{p}{v_n} = \frac{\rho c}{\cos \theta}, \quad (1.13)$$

где θ – угол между осью x и направлением волны.

Для расчета коэффициентов прозрачности и отражения имеются два граничных условия: равенство давлений и нормальных составляющих колебательной скорости сверху и снизу от границы. Из них следует, что при $x = 0$ суммарные импедансы волн сверху и снизу от границы равны:

$$\left. \frac{\sum P}{\sum v_n} \right|_{сверху} = \left. \frac{\sum P}{\sum v_n} \right|_{снизу} = Z_2. \quad (1.14)$$

Из данной формулы с учетом соотношения (1.10) и обозначая давление в отраженной волне p_0R , найдем

$$\frac{1 + R}{1/z_1 - R/z_1} = Z_2. \quad (1.15)$$

Решая относительно R , получим

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (1.16)$$

Снизу от границы в рассматриваемом случае $Z_2 = \rho_2 c_2 / \cos \alpha$, поэтому

$$R = \frac{\rho_2 c_2 / \cos \alpha - \rho c / \cos \beta}{\rho_1 c_1 / \cos \alpha + \rho c / \cos \beta}. \quad (1.17)$$

В дальнейшем рассмотрим случаи, когда импеданс границы Z_2 характеризуется более сложными выражениями, однако формула (1.16)

останется справедливой. Используя закон равенства импедансов сверху и снизу от границы (его можно получить из равенства давлений при $x=0$), получим $1 + R = D$. Отсюда

$$D = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (1.18)$$

Рассмотрим соотношение энергии падающей и преломленной волн. Интенсивность звука $I = |p|^2 / 2\rho c$. Для определения доли прошедшей и отраженной энергии можно выделить компоненту потока энергии, нормальную к границе. Эти компоненты для падающей и преломленной волн соответственно равны: $I_n = I \cos \beta$; $I_{2n} = I_2 \cos \alpha$. Отсюда коэффициент прозрачности по энергии

$$\tilde{D} = \frac{4ZZ_2}{(Z_2 + Z_1)^2}. \quad (1.19)$$

Сопоставление со значением D по амплитуде давления показывает, что \tilde{D} равен произведению величин D при прохождении через границу в прямом и обратном направлениях. Это положение важно для дефектоскопии, поскольку при введении акустических в объект контроля через какую-либо промежуточную среду волна обычно проходит через границу в двух направлениях; оно сохраняется для границ любых сред. Коэффициент отражения по интенсивности $\tilde{R} = R^2$ и равен

$$\tilde{R} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2. \quad (1.20)$$

С учетом этого легко проверить соблюдение закона сохранения энергии

$$\tilde{R} + \tilde{D} = 1. \quad (1.21)$$

Рассмотрим случай, когда скорость звука в нижней среде больше, чем в верхней. Мы знаем, что с увеличением угла β волна в нижней среде быстро приближается к границе и при $\beta = \arcsin \frac{C_{11}}{C_{12}}$ сольется с ней.

Значение $\beta = \beta_{кр1}$ называют критическим. Если $\beta > \beta_{кр1}$, то

$\sin \alpha = \frac{C_{11}}{C_{12}} \sin \beta > 1$. Это вполне допустимо с точки зрения теории ком-

плексных чисел

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{C_{l2}}{C_{l1}} \sin \beta \right)^2} = jC. \quad (1.22)$$

В выражение для преломленной волны в этом случае войдет множитель e^{-kC_x} . Он показывает, что эта волна, распространяясь вдоль оси y , затухает с увеличением расстояния x от поверхности, причем тем быстрее, чем угол β больше критического значения. Волна такого вида относится к типу неоднородных волн. Импеданс Z_2 будет мнимым

$$Z_2 = \frac{\rho_2 C_{l2}}{\cos \alpha} = \frac{\rho_2 C_2}{j \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1} \sin \beta \right)^2 - 1}} = -jZ_{2l}; \quad (1.23)$$

$$Z_2 = \frac{\rho_2 C_{l2}}{\cos \alpha} = \frac{\rho_2 C_2}{j \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1} \sin \beta \right)^2 - 1}} = -jZ_{2l}. \quad (1.24)$$

Коэффициент отражения $R = \frac{-jZ_2 - Z}{-jZ_2 + Z}$ является комплексной ве-

личной, причем $|R|=1$, т. е. отраженная волна имеет амплитуду, равную амплитуде падающей волны, но изменяет при отражении свою фазу.

Изменение этой фазы на величину, не кратную π , при углах β больше критического приводит к явлению незеркального отражения. Экспериментально установлено, что если на границу раздела сред падает ограниченная плоская волна под углом, несколько большим критического, то отраженный пучок лучей как бы смещается вдоль поверхности тела относительно падающего (рис. 1.9).

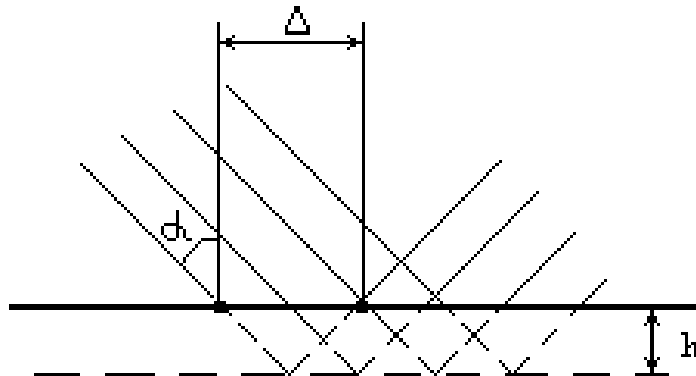


Рис. 1.9. Смещение пучка волн при незеркальном отражении

Смещение Δ такое, как если бы отражение происходило зеркально от некоторой мнимой границы расположенной на некоторой глубине h под действительной поверхностью $\Delta = 2h \cdot \operatorname{tg} \beta$. Разность фаз волны, отразившейся от мнимой границы, т. е. прошедшей путь AED, и прямой волны, прошедшей путь ABC, равна $2kh \cdot \cos \alpha$. Оказывается, что значение совпадает с изменением фазы коэффициента отражения.

Смещение пучка Δ тем больше, чем ближе угол падения α к критическому значению. Поэтому данное явление можно рассматривать как перенос энергии вдоль поверхности неоднородной волной. Чем ближе угол β к критическому значению, тем больше амплитуда неоднородной волны на заданной глубине, тем больше расстояние она пробегает вдоль поверхности.

Если первой и второй средой являются **твердые тела**, то из закона синусов вытекает возможность существования целого ряда критических углов. Первый критический угол существует, когда падающая волна продольная и $C_{l1} = C_{l2}$. Он соответствует условию слияния преломленной продольной волны с поверхностью, т. е.

$$\beta_{кр1} = \arcsin \left(\frac{C_{l1}}{C_{l2}} \right). \quad (1.25)$$

Вдоль границы в этом случае распространяется неоднородная волна. Эту волну называют **головной**, используют для целей дефектоскопии. Если преобразователь соприкасается лишь с небольшим участком поверхности объекта контроля (изделия), а остальная часть его поверхности свободна, то головная волна должна обращаться в нуль на этой поверхности для выполнения граничных условий – напряжения на поверхности равны нулю. Под поверхностью объекта головная волна имеет максимальное значение напряжения. Это значение располагается на луче, составляющем угол $\sim 12^\circ$ с поверхностью (для стали). Итак, с помощью головной волны можно обнаружить подповерхностные дефекты, при этом головная волна нечувствительна к неровностям объекта контроля.

Второй критический угол $\beta_{кр2}$ существует, когда падает продольная волна и $C_{l1} < C_{t2}$. Он соответствует условию слияния с поверхностью преломленной поперечной волны, т. е.

$$\beta_{кр2} = \arcsin \frac{C_{l1}}{C_{t2}}. \quad (1.26)$$

Соответствующую неоднородную волну трудно отличить от поверхностной рэлеевской волны.

Третий критический угол $\beta_{кр3}$ существует при падении поперечной волны. Поскольку $C_{t2} > C_{l2}$ при

$$\beta_{кр3} = \arcsin \frac{C_{t2}}{C_{l2}} \quad (1.27)$$

продольная отраженная волна сольется с поверхностью и станет неоднородной.

Граничных условий всегда достаточно для определения амплитуд всех отраженных и преломленных волн. Например, на границе двух плотно соединенных твердых тел имеются четыре условия (равенство нормальных и тангенциальных смещений и напряжений по обе стороны от границы), позволяющих рассчитать четыре волны, показанные на рис. 1.6. На практике часто встречается случай двух твердых тел, разделенных очень тонким слоем жидкости. Слой считается настолько тонким, что изменением фазы волны при его прохождении можно пренебречь, однако наличие его приводит к появлению четырех других граничных условий: нормальные напряжения и смещения равны, а тангенциальные напряжения по обе стороны от границы обращаются в нуль.

Формулы для коэффициентов отражения и прозрачности для **случая двух твердых тел или жидкости и твердого тела** могут быть получены путем обобщения соотношений, выведенных ранее для границы двух жидкостей. Формулы (1.16) и (1.19) можно записать

$$R = (\sum Z - 2Z_{пад}) / \sum Z; \quad (1.28)$$

$$\tilde{D} = 4Z_{пад}Z_{пр} / |\sum Z|^2, \quad (1.29)$$

где $\sum Z$ – сумма импедансов всех отраженных и преломленных волн; $Z_{пад}$ – импеданс падающей волны; $Z_{пр}$ – импеданс прошедшей волны.

В этом обобщенном виде формулы пригодны для случая, когда одна или обе среды – твердое тело, причем формулу (1.28) применяют для расчета отраженной волны, одинаковой по типу с падающей, а формулу (1.29) – для расчета всех коэффициентов прозрачности и коэффициента отражения для волны, не одинаковой по типу с падающей. Импедансы для продольной и поперечной волн в твердом теле имеют вид

$$Z_l = \frac{\rho c_l}{\cos \theta_l} \cos^2 2\theta_l; \quad (1.30)$$

$$Z_t = \frac{\rho c_t}{\cos \theta_t} \sin^2 2\theta_t, \quad (1.31)$$

где θ_1 и θ_t – углы между направлением распространения соответствующих волн и нормалью к поверхности.

При углах, больших критического значения, соответствующие импедансы становятся мнимыми подобно.

На рис. 1.10 приведены зависимости коэффициентов прозрачности по энергии, рассчитанные для сред, весьма часто встречающихся в дефектоскопии оргстекло – масло – сталь.

Значения некоторых физических характеристик для различных материалов приведены в Приложении 1.

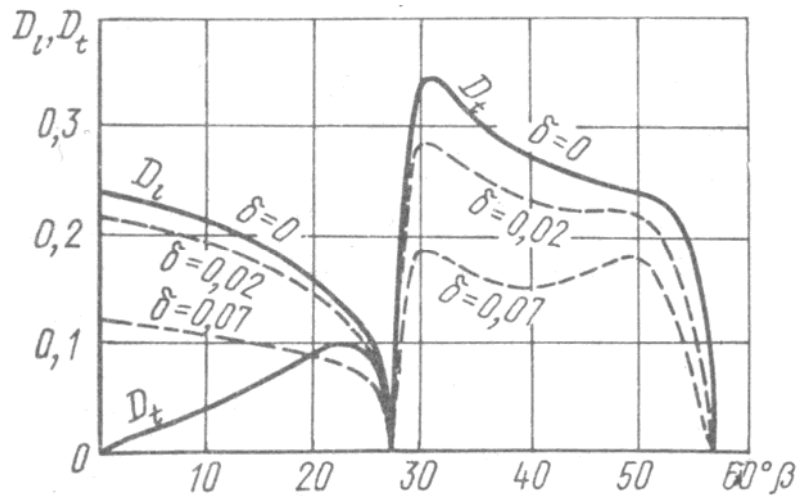


Рис. 1.10. Коэффициенты прозрачности для границы оргстекло – сталь

1.4. Другие типы волн

В ограниченных твердых телах кроме объемных волн существуют другие типы волн.

Так вдоль свободной поверхности твердого тела могут распространяться **поверхностные волны**.

Предположим, что существует волна, бегущая вдоль границы твердого тела и состоящая из линейной комбинации продольной и поперечной волн (рис. 1.11). Подстановка такой комбинации в волновое уравнение показывает, что такая волна должна затухать на расстояниях порядка длины волны от поверхности. Скорость распространения такой волны

$$C_s = \frac{0,87 + 1,12\sigma}{1 + \sigma} C_t, \quad (1.32)$$

где σ – коэффициент Пуассона

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (1.33)$$

Для металлов $\sigma \approx 0,3$ и $C_s \approx 0,93C_t$. Такая поверхностная волна называется **волной Рэлея**. Она способна распространяться на большое расстояние вдоль поверхности твердого тела, незначительно проникая внутрь тела. Так на расстоянии длины волны от поверхности интенсивность составляет приблизительно 5 %. При распространении поверхностной волны частицы двигаются, вращаясь по эллипсам, большая ось которых перпендикулярна границе. Вытянутость эллипса с глубиной увеличивается. Такие волны хорошо распространяются вдоль искривленных поверхностей, хотя на вогнутых участках они испытывают значительное дополнительное затухание вследствие излучения энергии вглубь изделия. Поверхностные волны успешно используются для выявления дефектов вблизи поверхности изделия.

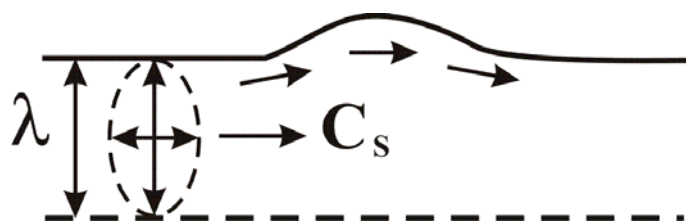


Рис. 1.11

Одним из решений волнового уравнения для поля \bar{U} вблизи границы твердого тела является также волна, представляющая собой линейную комбинацию поверхностной и объемной волн. В такой комбинации поверхностная компонента непрерывно трансформируется в объемную и уходит от поверхности. Единообразного названия такая волна пока не получила. Ее называют **вытекающей, поверхностно-продольной, ползучей** (рис. 1.12). Сама волна затухает довольно быстро вдоль поверхности тела, но порожденные ею объемные волны распространяются на значительные расстояния и могут использоваться для контроля. Совокупность поверхностно-продольной и порождаемой ею продольной (объемной) волн в дефектоскопии называют **головной волной**.

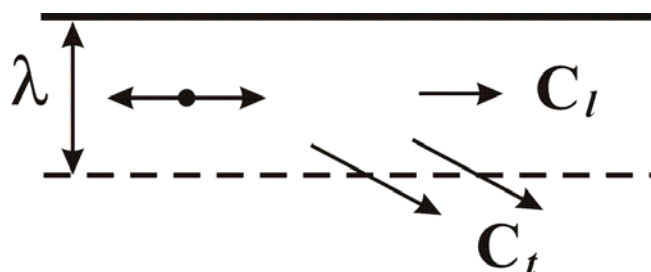


Рис. 1.12

Помимо рэлеевских волн существуют и другие типы поверхностных волн в твердых телах. Коснемся наиболее важных из них. Прежде

всего следует назвать поверхностные волны в кристаллах. Как известно, в кристаллах существует значительная анизотропия упругих свойств в трех главных направлениях. В связи с этим поверхностная волна имеет три компоненты смещения, существенно различающихся по скорости распространения. В связи с этим волновой вектор \bar{k} , который в изотропной среде совпадает с направлением вектора групповой скорости \bar{V} (или C) и, следовательно, с направлением распространения волны, отклоняется по направлению от вектора групповой скорости.

$$\bar{k} = \bar{n} \frac{\omega}{C}, \quad (1.34)$$

где \bar{n} – единичный вектор, характеризующий направления волны.

Такие поверхностные волны, схожие с рэлеевскими волнами, называют волнами **рэлеевского типа**.

В кристаллах, обладающих пьезоэффектом, существуют чисто **сдвиговые волны**, которые называются **волнами Гуляева – Блюштейна**. Эти волны распространяются со скоростью $C \approx C_t$, спадают с глубиной на расстоянии

$$l \approx K_{эм}^{-2} \cdot K_t, \quad (1.35)$$

где K_t – волновое число t – волны; $K_{эм}$ – коэффициент электро механической связи, характеризующей «силу» пьезоэффекта.

Обычно $l \approx 50 - 100 \lambda_t$. Волны такого же типа могут существовать и в пьезоэлектрических средах при приложении к ним внешних полей – электрического (за счет наведенного пьезоэффекта) и магнитного (за счет действия силы Лоренца на электроны в металлах). При этом имеется возможность управлять глубиной локализации таких волн с помощью изменения напряженности прикладываемых полей. [7, 8]

К важной разновидности поверхностных волн относятся **волны Лява**, возникающие в слоистой системе, состоящей из упругого полупространства и слоя, скорость поперечных волн в котором C_{t1} меньше их скорости в полупространстве C_{t2} , как показано на рис. 1.13.

При условии $C_{t1} < C_{t2}$ в такой системе могут существовать чисто сдвиговые поверхностные волны, фазовая скорость которых больше скорости C_{t1} , но меньше C_{t2} . Вообще, волны Лява не являются строго поверхностной волной, т. к. для их существования требуется слоистая среда. Волны Лява, также как и волны Рэля, часто наблюдаются при землетрясениях, поскольку земная кора имеет слоистую структуру.

В дефектоскопии волны Лява используются для контроля тонких неметаллических слоев на металлах.

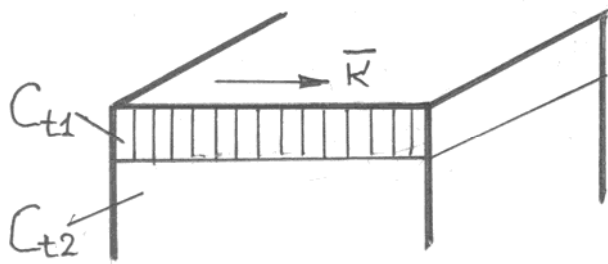


Рис. 1.13

Кроме волн, существующих на границе твердого тела с вакуумом, существуют волны на границе двух сред. К ним относятся волны с вертикальной поляризацией, распространяющейся вдоль границы твердого тела с жидкостью или **волны Стоунли**. Эти волны распространяются со скоростью, меньшей скорости звука в жидкости, спадая экспоненциально при удалении от общей границы. Волны Стоунли могут существовать и на границе двух твердых сред, если их плотности и упругие постоянные удовлетворяют определенным соотношениям.

Целый ряд поверхностных волн обусловлен чисто геометрическими факторами. Так на выпуклых цилиндрических поверхностях твердых тел, кроме волн рэлеевского типа, могут существовать и нерэлеевские волны, у которых продольная компонента, как и у рэлеевской волны, спадает по экспоненциальному закону, а сдвиговая часть убывает с глубиной, осциллируя. Такие волны получили название волн **смешанного типа**.

Сдвиговые поверхностные волны могут распространяться вдоль периодически неровной границы твердого тела, как показано на рис. 1.14.

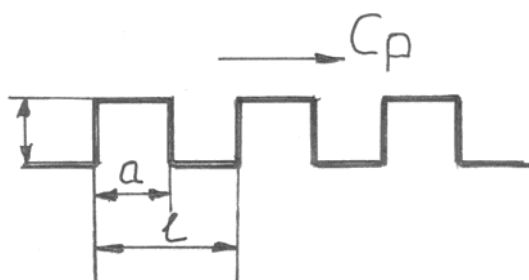


Рис. 1.14

Фазовая скорость такой волны равна

$$C = C_t \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2 \operatorname{tg}^2(kh)}}, \quad (1.36)$$

где a – длина выступа; l – период неоднородности; h – высота выступа; $k = 1, 2, \dots$

Выбором параметров неоднородностей a , l , h можно замедлять поверхностные волны, т. е. управлять распространением акустической волны.

Можно также сказать о **линейных волнах**, распространяющихся вдоль ребер упругих клиньев, в связи с чем такие волны называют еще **клиновыми**, что видно из рис. 1.15.

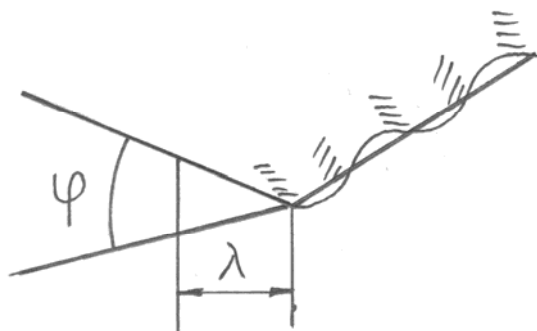


Рис. 1.15

Амплитуда таких волн быстро спадает при удалении от ребра, так что практически вся энергия волны оказывается сосредоточенной около острия клина. Скорость клиновых волн уменьшается с уменьшением угла раскрытия клина α_k и может оказаться на порядок ниже C_t при $\alpha_k \approx 5 - 10^0$.

Если твердое тело имеет две свободные поверхности (пластина), то в нем могут существовать специфические типы упругих волн. Их называют **волнами в пластинах** или **волнами Лэмба** (рис. 1.16). Это волны, бегущие вдоль границ среды и стоящие в перпендикулярном направлении.

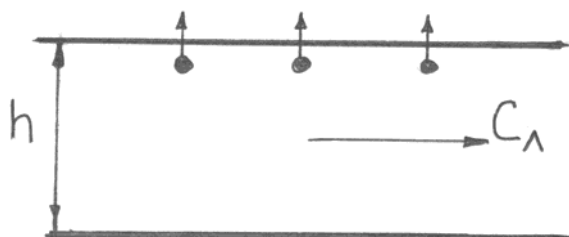


Рис. 1.16

Фазовая скорость нормальных волн зависит от частоты колебаний (длины волны λ) и толщины слоя h . Т. е. фазовая скорость нормальной волны имеет дисперсию (изменяется). В точках, где

$$h = n \frac{\lambda}{2} \quad (1.37)$$

скорость $C_p \rightarrow \infty$. Это означает, что вся поверхность колеблется одновременно. При $h \rightarrow \infty$ $C_p \rightarrow C_2$, т. е. при увеличении толщины слоя C_p стремится к скорости обычной волны.

Волны с нечетными n называют **симметричными**, т. к. движение частиц в них симметрично относительно оси пластины. Волны с четными n называют **антисимметричными**.

Для твердого слоя сущность явления образования поперечной волны с движущейся вдоль слоя фазой сохраняется. Однако все явления значительно усложняются из-за наличия в пластине продольных и поперечных волн. Если мы построим зависимость C_p от отношения $\frac{2h}{\lambda}$, то получим картину, представленную на рис. 1.17.

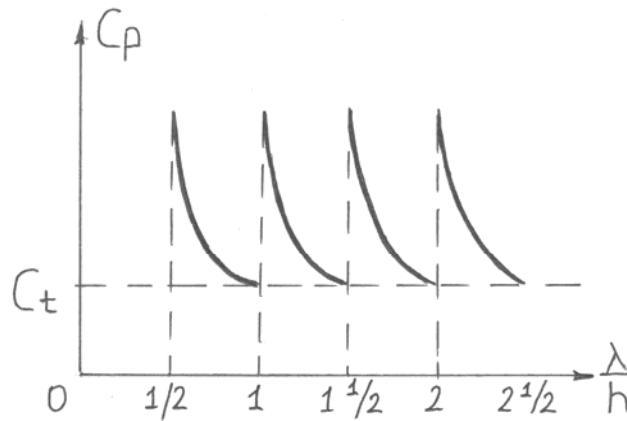


Рис. 1.17

При $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{2}, 1, 0, \frac{3}{2}, 2 \frac{5}{2}$ и т. д. $C_p \rightarrow \infty$. Кривые на таком графике называют **дисперсионными кривыми**. При отражении эти волны частично трансформируются друг в друга, фаза волны при отражении меняется на число, не кратное π . Система дисперсионных кривых будет сложнее.

Фазовая скорость волны C_p определяет скорость распространения фазы волны вдоль пластины. Она позволяет вычислить длину волны, и необходима при расчетах условий возбуждения волн. Скорость распространения энергии или импульса характеризуется групповой скоростью, которая нигде не обращается в бесконечность.

$$C_{\partial} = C_p - \lambda \frac{dC_p}{d\lambda}, \quad (1.38)$$

C_d совпадает с C_p когда производная $\frac{dC_p}{d\lambda}$ возрастает и $C_d \rightarrow 0$.

В рассматриваемых поперечных волнах частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной распространению волны.

Однако в пластине могут существовать другие волны, при которых колебания совершаются в направлении, перпендикулярном этой плоскости. Такие волны называются **нормальными поперечными волнами**. При отражении от границ пластины такие волны не трансформируются, а система дисперсионных кривых аналогична такой же системе для нормальных волн. Нормальные волны распространяются в пластине, как в волноводе, на большие расстояния. Их успешно применяют для контроля листов, оболочек, труб. Изменение сечения волновода, появление в нем неоднородностей (дефектов) вызывает отражение нормальных волн. Причем характеристики прохождения нормальных волн будут изменяться также продольными дефектами (например, расслоениями).

В круглых стержнях могут существовать симметричные и антисимметричные волны, сходные с волнами в пластинах (рис. 1.18). Кроме того, в круглом стержне могут существовать **крутильные волны**, заключающиеся в повороте некоторого сечения стержня вокруг его оси. Стержень, подобно пластине, служит волноводом, и упругие волны могут выявлять в нем как поперечно, так и продольно ориентированные дефекты. Волны в стержнях успешно применяются для контроля прутков и проволок.

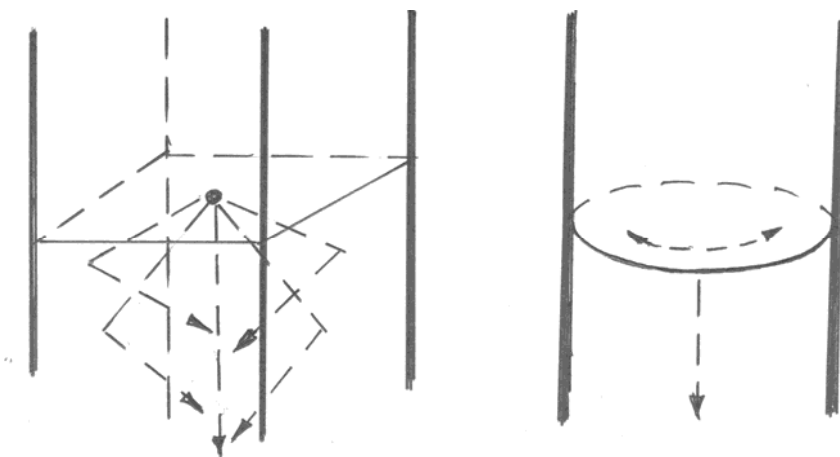


Рис. 1.18. Волны в стержнях

Кроме отмеченных существуют другие типы волн в твердых телах. Однако в практической дефектоскопии они используются мало.

Задача

1. Рассчитать для нормального падения коэффициенты отражения по энергии от слоя толщиной h в стали для волны частотой 2,5 МГц;

$h = 1 \cdot 10^{-6}; 1 \cdot 10^{-5}; 1 \cdot 10^{-4}; 1 \cdot 10^{-3}$ мм и ∞ (граница двух сред). Слой заполнен воздухом и водой.

Решение. Для границы двух сред воспользуемся формулой (1.17). Например, для границы сталь-воздух находим

$$\tilde{R} = \left(\frac{\rho c - \rho' c'}{\rho c + \rho' c'} \right) = \left(\frac{46,6 - 4,3 \cdot 10^{-4}}{46,2 + 4,3 \cdot 10^{-4}} \right) = 0,99998 = 99,998 \%$$

Для слоя воздуха толщиной 10^{-6} мм (тонкого слоя)

$$\tilde{R} = \left[1 + (Z_c c_c / \pi f h z)^2 \right]^{-1} = \left[1 + \left(4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,331 / 2,5 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 46,2 \right)^2 \right]^{-1} = 0,8667 = 86,67 \%$$

Аналогичны вычисления для других случаев. В результате получим табл. 1.1.

Таблица 1.1

h, мм	\tilde{R} для воды, %	\tilde{R} для воздуха, %
$1 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$	86,67
$1 \cdot 10^{-5}$	$2,67 \cdot 10^{-4}$	99,85
$1 \cdot 10^{-4}$	$2,67 \cdot 10^{-2}$	99,998
$1 \cdot 10^{-3}$	2,60	99,998
∞	0,906	99,998

Вопросы для самопроверки

1. Как движутся частицы среды при прохождении упругой волны?
2. Какие частоты колебаний характерны для ультразвуковых волн?
3. В каких средах (материалах) могут распространяться продольные волны?
4. От чего зависит длина упругой волны в безграничной среде?
5. У волны с каким фронтом амплитуда наиболее быстро уменьшается при распространении в идеальной безграничной среде?
6. Как изменится угол преломления прошедшей волны при увеличении угла падения волны на границу двух сред?
7. Как изменяется коэффициент затухания ультразвука с ростом частоты?
8. Во сколько раз уменьшилась амплитуда, если волна ослабла на 6 дБ?
9. Чем обусловлено затухание ультразвуковых колебаний в углеродистых сталях?

ГЛАВА 2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

2.1. Физические эффекты для получения акустических колебаний

Как мы уже говорили, ввод акустических колебаний в изделие и регистрация выходящих из изделия акустических колебаний осуществляется с помощью преобразователей электрической энергии в акустический сигнал (излучатели) и преобразователей акустической энергии в электрический сигнал (приемники).

В качестве излучателей и приемников для целей ультразвуковой толщинометрии используют чаще всего преобразователи, действие которых основано на пьезоэлектрическом и электромагнитно-акустическом эффекте.

Пьезоэлектрический эффект заключается в том, что при сжатии или растяжении пластинки из материала, обладающего пьезоэлектрическими свойствами, на ее гранях появятся электрические заряды, пропорциональные действующей силе и скорости механической деформации пластинки. Этот эффект обратим. Т. е. если мы к пьезопластинке приложим переменное электрическое поле, то ее геометрические форма и размеры будут меняться. Этим изменения пропорциональны амплитуде и скорости изменения электрического поля.

Электромагнитно-акустический эффект основан на эффектах электромагнитного поля. Работают в основном следующие три эффекта:

Эффект намагниченности – ферромагнитное изделие имеет внутреннее магнитное поле. При взаимодействии его с меняющимся внешним магнитным полем происходит смещение частичек среды.

Эффект магнитострикции – это изменение размеров материала при изменениях результирующего магнитного поля.

Эффект вихревых токов – переменное внешнее магнитное поле создает в изделии вихревые токи, которые создают свои переменные магнитные поля.

Магнитное поле вихревых токов, взаимодействуя с переменным внешним магнитным полем, приводит к смещению частичек среды.

В диапазоне частот до 10 МГц основной вклад дают эффекты вихревых токов и намагниченности.

С помощью электромагнитно-акустических преобразователей можно возбуждать как продольные, так и поперечные волны. Для примера рассмотрим рис. 2.1.

При таком расстоянии рабочей обмотки, изменение индукции B_n в зоне действия вихревых токов, расположено нормально к поверхности. Сила F взаимодействия такого поля с полем вихревых токов будет перпендикулярна B_n и $B_{\text{вихр.}}$, т. е. будет направлена по касательной к поверхности. Следовательно, частички среды будут также смещаться вдоль поверхности, т. е. возбуждаются поперечные волны. Для возбуждения продольных волн используют другой тип преобразователя. Здесь изменение индукции B_T направлено по касательной к поверхности, следовательно, возбуждаются отходящие от границы продольные волны.

2.2. Основные уравнения прямого и обратного пьезоэффекта

Описание пьезоэлектрического эффекта в общем случае достаточно сложно. Это связано с тем, что пьезоэффект многосторонне связан с другими свойствами пьезоматериала: упругими, электрическими, тепловыми.

Каждое из этих свойств описывает соответствующее поле: упругое, электрическое, тепловое. В свою очередь, каждое из этих полей описывается своим напряжением и своей деформацией.

Рассмотрим эти основные поля, действующие в пьезопреобразователе.

Упругое поле (поле механических напряжений или собственная упругость пластины).

Мы его описываем двумя величинами:

- упругим напряжением – σ ,
- упругой деформацией – $\varepsilon = \frac{\partial U}{\partial x}$.

Когда мы рассматриваем элементы теории упругости, мы говорим, что вектор смещения $\Delta \vec{U}$ зависит от расстояния между соседними точками $\Delta \vec{r}$, причем

$$\Delta \vec{U} = \vec{\varepsilon} \cdot \Delta \vec{r}, \quad (0.2)$$

где ε – линейная вектор-функция, является тензором второго ранга и называется тензором деформации.

Если рассмотреть только X-ую координату векторов $\Delta \vec{U}$ и $\Delta \vec{r}$, то можно записать

$$\Delta U = \varepsilon_x \cdot \Delta x \quad (0.3)$$

отсюда

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta U}{\Delta x} \quad (0.4)$$

или переходя к бесконечно малым приращениям, можем записать

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (0.5)$$

Связь между ε и σ дается законом Гука

$$\sigma = c \cdot \varepsilon = C \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (0.6)$$

где C – тензор модулей упругости. Здесь у нас независимая переменная – ε .

Можно в качестве независимой переменной взять σ , тогда будет иметь соотношение

$$\varepsilon = S \cdot \sigma, \quad (0.7)$$

где S – тензор упругой податливости.

Упругое поле имеет энергию, она равна

$$dW_{\text{упр}} = \sigma \cdot d\varepsilon. \quad (0.8)$$

Электрическое поле (собственное электрическое поле).

Описывается также двумя величинами:

- электрической напряженностью – E ;
- электрической деформацией (или электрическим смещением или электрическим током).

Пьезопластина – это диэлектрик. Ток в диэлектриках, если вы помните, описывается электрической функцией D . E и D связаны между собой соотношением

$$E = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D, \quad (0.9)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Величина ε определяет свойства пьезоматериала как диэлектрика, а пьезопластины – как конденсатора с емкостью

$$C_{nl} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{nl}}{h_1}, \quad (0.10)$$

где S_{nl} – площадь пьезопластины; h_1 – толщина пьезопластины.

Если в качестве независимой переменной взять E , то будет иметь место связь

$$D = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E. \quad (0.11)$$

Энергия электрического поля

$$dW_{эл} = EdD. \quad (0.12)$$

Тепловое поле (собственное поле).

Описывается также двумя величинами:

- тепловым напряжением (или температурой) – T ;
- тепловой деформацией (или энтропией) – S .

Энтропия S является функцией состояния системы и описывает степень необратимости тепловых процессов. Для замкнутой системы S всегда является возрастающей функцией, т. е. $dS \geq 0$. Для незамкнутой системы dS может быть как >0 , так и <0 . Энтропия S имеет размерность

$$[S] = \frac{\text{Дж}}{\text{град}}; \frac{\text{эрг}}{\text{град}}; \frac{\text{кал}}{\text{град}}; \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{град}}.$$

Энергия теплового поля

$$dW_{менл} = TdS. \quad (0.13)$$

Полная энергия пьезоэлектрического поля складывается из энергии этих трех полей. Полный дифференциал энергии равен

$$dW = dW_{упр} + dW_{эл} + dW_{менл}, \quad (0.14)$$

т. е.

$$dW = \sigma \cdot d\varepsilon + EdD + TdS. \quad (0.15)$$

Это есть **уравнение баланса энергий** для тела при наличии в нем трех полей.

Т. к. нас интересуют процессы преобразования электрической энергии в упругую и наоборот, то нам необходимо получить выражения для упругих напряжений и деформации, и для электрических напряжений и деформации.

Обычно пьезоэлектрическую систему рассматривают изолированной от окружающей среды, т. е. без обмена теплом (адиабатический процесс). В этом случае $dS=0$ и $dW_{менл.} = TdS=0$.

Тогда можно рассматривать только взаимодействие упругого и электрического полей.

Отличие пьезоэлектрика от обычного материала состоит в том, что внешние механические деформации, кроме собственного упругого напряжения, создают также и электрическое напряжение, а внешнее электрическое поле создает также механические деформации.

1. Рассмотрим **полное упругое напряжение** σ , действующее в пьезо-материале, находящемся в электрическом поле с напряженностью

E и под действием упругой деформации $\varepsilon = \frac{\partial U}{\partial x}$. Оно будет складываться из двух частей:

- собственно упругое напряжение $\sigma_{упр}$

$$\sigma_{упр} = C_D \cdot \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (0.16)$$

Через C_D мы обозначаем модули упругости при постоянном электрическом поле.

В пьезоэлектриках

$$C_D = \lambda + 2\mu. \quad (0.17)$$

В данном случае C_D определяет скорость распространения продольных волн

$$C_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_D}{\rho}} \quad (0.18)$$

или

$$C_D = \rho \cdot C_l^2; \quad (0.19)$$

- упругое внутреннее напряжение $\sigma_{эл}$, создаваемое электрическим напряжением E .

Связь между $\sigma_{эл}$ и E дается через пьезоконстанту e в виде

$$\sigma_{эл} = eE. \quad (0.20)$$

Для внешнего электрического напряжения (или для внешнего механического напряжения)

$$\sigma_{эл} = -eE = -e \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D = -\frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} D. \quad (0.21)$$

Отсюда нельзя написать $E = \frac{\sigma}{e}$, т. к. e – это тензор.

Таким образом полное механическое напряжение в пьезопластине

$$\sigma = \sigma_{упр} + \sigma_{эл} = C_D \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} D. \quad (0.22)$$

2. Рассмотрим **полное электрическое напряжение** в пьезоматериале, находящегося под действием механической деформации $\frac{\partial U}{\partial x}$. Оно

будет складываться из двух частей:

- собственно-электрического поля $E_{эл}$

$$E_{эл} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D; \quad (0.23)$$

- электрического поля $E_{упр}$. (внутреннего), создаваемого механической деформацией $\frac{\partial U}{\partial x}$.

Связь упругой составляющей электрического поля с механической деформацией также выражается через пьезоконстанту e , но только в виде

$$D_{упр} = e \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Это электрическое смещение, возникающее под действием механической деформации. Тогда

$$E_{упр} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D_{упр} = \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Для внешнего упругого воздействия

$$E_{упр} = -\frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Тогда полное электрическое напряжение

$$E = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D - \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (0.24)$$

где $\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D$ – электрическое напряжение электрического поля; $\frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}$ – электрическое напряжение за счет действия механического поля.

Таким образом, получается следующая система уравнений в частных производных, описывающая поля в пьезоэлектрическом материале.

$$\begin{cases} \sigma = C_D \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} D; \\ E = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D - \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}. \end{cases} \quad (0.25)$$

Анализ пьезопреобразователей заключается в решении этой системы уравнений при граничных условиях, задаваемых конкретной конструкцией преобразователей.

Важное значение при анализе работы преобразователя имеет понятие **коэффициенты электромеханической связи β** .

Он определяется как отношение взаимной упруго-электрической энергии преобразователя к среднему геометрическому значению упругой и электрической энергии.

Внутренняя энергия пьезопреобразователя определяется выражением

$$W = \frac{1}{2} \sigma \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} E \cdot D. \quad (0.26)$$

Подставим сюда значения σ и E . Получим

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} C_D \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{\epsilon \epsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} D^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{\epsilon \epsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x}; \\ W &= \frac{1}{2} C_D \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 - \frac{e}{\epsilon \epsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} D^2. \end{aligned} \quad (0.27)$$

В этом выражении:

$$\frac{1}{2} C_D \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 \text{ – механическая энергия;}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} D^2 \text{ – электрическая энергия;}$$

$$\frac{e}{\epsilon \epsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x} \text{ – удвоенная взаимная упруго-электрическая энергия.}$$

Тогда по определению β

$$\beta = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{e}{\epsilon \epsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x}}{\sqrt{\frac{1}{2} C_D \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} D^2}} = \frac{e \cdot \sqrt{\epsilon \epsilon_0}}{\epsilon \epsilon_0 \cdot \sqrt{C_D}} = \frac{e}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 C_D}}. \quad (0.28)$$

Т. к. $C_D = \rho C_l^2$, можно записать

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{C_l} \cdot \frac{e}{\sqrt{\rho \epsilon \epsilon_0}}; \\ \beta^2 &= \frac{e^2}{\rho \epsilon \epsilon_0 C_l^2}. \end{aligned} \quad (0.29)$$

Множитель $\frac{e}{\sqrt{\rho\epsilon\epsilon_0}}$ имеет размерность (м/с). Квадрат коэффициен-

та электромеханической связи β^2 описывает эффективность работы преобразователя при излучении и приеме.

2.3. Акустическое поле преобразователя

Акустическое поле излучения преобразователя определяется давлением (или действующей компонентой тензора напряжения), которое действует на элементарный приемник, расположенный в произвольной точке пространства.

Акустическое поле приема определяется сигналом приемного преобразователя при действии элементарного излучателя, расположенного в произвольной точке пространства.

Акустическое поле излучения – приема определяется сигналом приемного преобразователя, возникающим при отражении сигнала возбуждающего преобразователя от элементарного рассеивателя, расположенного произвольной точке пространства.

Обычно поле приема преобразователя повторяет его же поле излучения. Поэтому поле излучения – приема одного и того же преобразователя пропорционально квадрату поля излучения.

Для наглядности мы рассмотрим формирование полей излучения с точки зрения геометрической акустики, путем построения моделей прохождения лучей продольных, сдвиговых и поверхностных волн в некоторых телах, ограниченных плоскими и кривыми поверхностями.

Будем считать твердые тела однородными, изотропными, а ограничивающие их поверхности – гладкими.

Рассмотрим геометрию волнового опля дискового излучателя, расположенного на плоской поверхности твердого упругого полупространства с неограниченными размерами по осям X, Y, Z. Считаем, что излучатель создает напряжение σ_{xk} , нормальное к поверхности. Если пренебречь влиянием промежуточных слоев между излучателем и средой, то волновое поле будет иметь вид, представленный на рис. 2.2.

Такое поле имеет две зоны:

- 1) ближняя зона (зона Френеля) толщиной $r_0 \approx \frac{a^2}{\lambda}$, в пределах которой отсутствует расхождение лучей и пучок лучей в сечении повторяет сечение пластины. При этом

$$P(x) = P_0 \cdot 2 \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \left[\sqrt{a^2 + x^2} - x \right] \right). \quad (2.29)$$

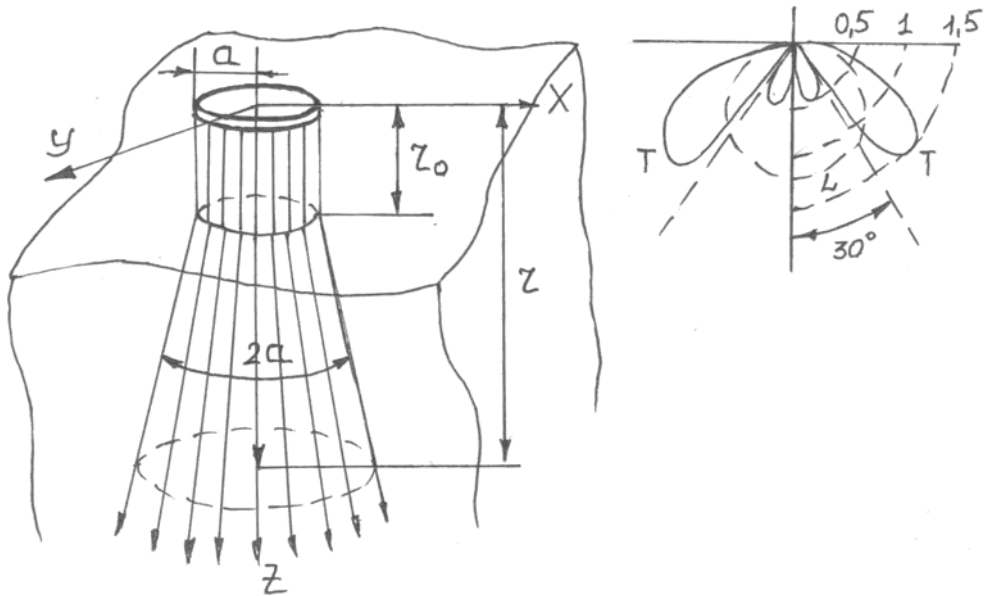


Рис. 2.2

Для ближней зоны максимум наблюдается при $x = \frac{a}{2n\lambda}$ (рис. 2.3)

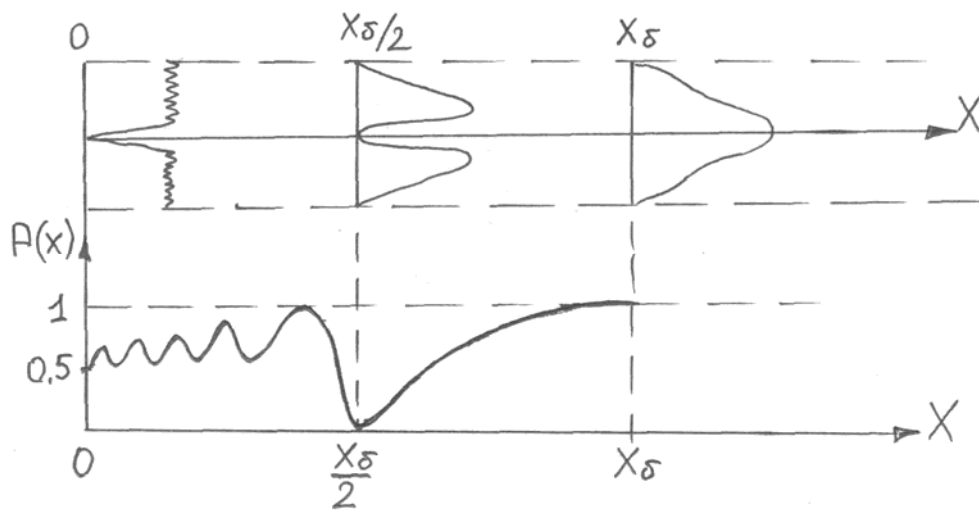


Рис. 2.3

- 2) дальняя зона (зона Фраунгофера)— это зона при $z > r_0$, в пределах которой наблюдается расхождение лучей. Она характеризуется тем, что интенсивность акустической волны при удалении от преобразователя уменьшается обратно пропорционально расстоянию r . Угол расхождения θ , за пределами которого интенсивность волны меньше 0,1 равен

$$\theta = \arcsin 0,54 \frac{\lambda}{a}, \quad (2.30)$$

где λ – длина волны.

Для дальней зоны диаграмма направленности имеет вид, показанный на рис. 2.4.

$$P_m(x) = P_0 \frac{S_a}{\lambda x}; \quad (2.31)$$

$$P(x, \alpha) = P_m(x) \cdot \Phi(\alpha); \quad (2.32)$$

$$P(x, \gamma) = 2P(x) \frac{J\left(\pi \frac{a}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\pi \frac{a}{\lambda} \sin \alpha} = 2P(x) \frac{J(\alpha k \cdot \sin \alpha)}{\alpha k \cdot \sin \alpha}, \quad (2.33)$$

где $J(\alpha k \cdot \sin \alpha)$ – функция Бесселя первого рода

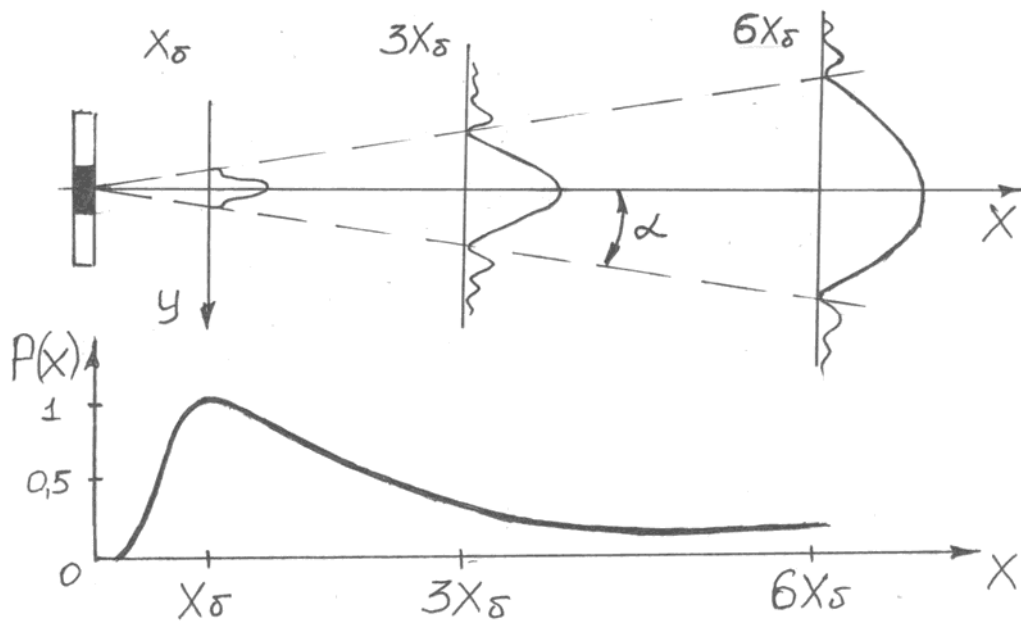


Рис. 2.4

На рис. 2.5 показано изменение формы пучка при увеличении диаметра преобразователя.

Такая картина является идеальной. Практически мы всегда имеем дело с ограниченными телами. Кроме того, нормально приложенная к поверхности среды сила, вызовет в ней не только нормальную компоненту напряжения. На границах преобразователя возникнут напряжения, перпендикулярные направлению действующей силы, т. е. параллельно поверхности. В результате на границе излучателя возникнут сдвиговые и поверхностные волны, затухающие с глубиной. Взаимодействие всех этих волн приводит к искажению идеальной картины.

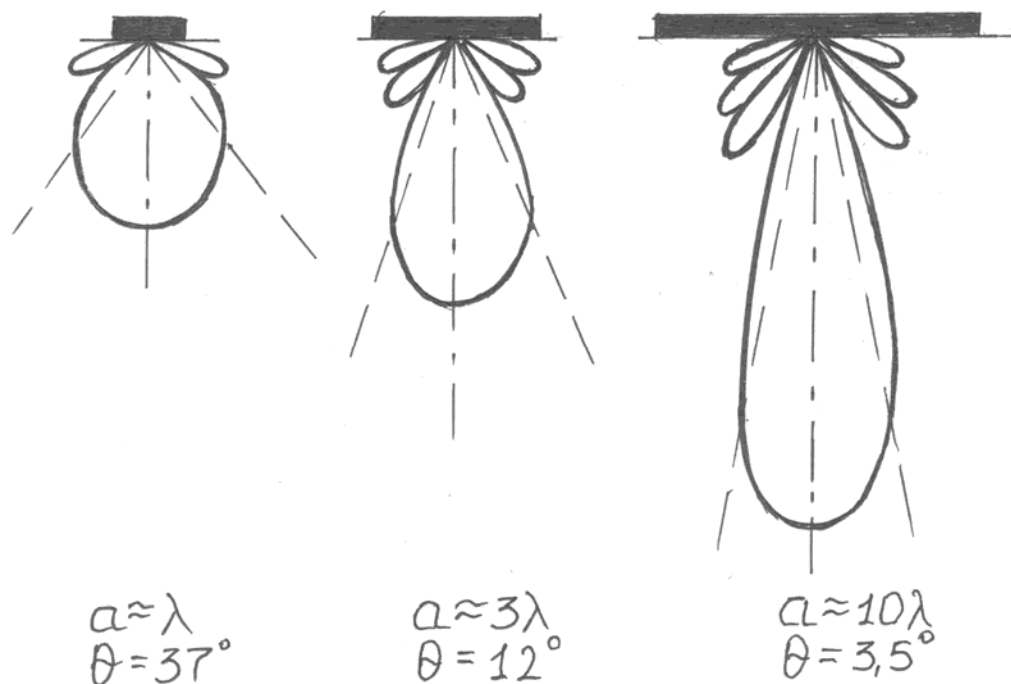


Рис. 2.5

Кроме того, реальные тела имеют ограниченные размеры, т. е. существуют границы. Отраженные от границ волны взаимодействуют с первичными, создавая сложные акустические поля.

2.4. Преобразователи для ультразвуковой толщинометрии

По назначению преобразователи делят на **нормальные (прямые)**, служащие для генерации продольных волн и **наклонные (призматические)**, используемые для возбуждения нормальных, поперечных и поверхностных волн.

По функциональным признакам преобразователи подразделяют на отдельные, совмещенные и отдельно-совмещенные.

Отдельные преобразователи в процессе контроля выполняют функции либо излучателя, либо приемника и их включают по отдельной схеме (пьезоэлемент подключен либо к генератору, либо к усилителю). Совмещенные преобразователи включают по совмещенной схеме (пьезоэлемент соединен одновременно с генератором и усилителем) и они выполняют поочередно функции то излучателя, то приемника. Отдельно-совмещенные преобразователи содержат два пьезоэлемента, включенных отдельно, но конструктивно объединенных в одном корпусе.

Схемы типовых преобразователей, получивших применение для целей ультразвуковой толщинометрии приведены на рис. 2.6. Все преобразователи имеют следующие основные элементы: пьезоэлемент, корпус, демпфер, служащий для гашения свободных колебаний пьезо-

пластины и получения коротких импульсов, протектор, защищающий пьезоэлемент от износа. [20]

Прямой преобразователь предназначен для работы по совмещенной схеме. Пьезопластину в таких преобразователях обычно изготавливают из ЦТС, также используют керамику ПКР и метаниобат свинца. Толщину пьезопластны делают равной половине длины волны. Для ЦТС на частотах 1...10 МГц она равна 0,16...1,6 мм. Пьезопластину ПЭП делают обычно круглой. Размеры выбирают с учетом поля излучения-приема. Увеличение диаметра сужает диаграмму направленности в дальней зоне, но в то же время увеличивает протяженность ближней зоны, где оценка размеров и местоположения дефектов затрудняется наличием максимумов и минимумов сигнала. Целесообразно применять пластины малого размера для контроля тонких изделий и большого – для контроля изделий значительной толщины.

В **раздельно-совмещенном преобразователе** для предупреждения прямой передачи сигналов от излучателя к приемнику имеется акустический экран. При работе с таким преобразователем, изменяя углы призм (от 0 до 10°), высоту и расстояние между ними, изменяют минимальную и максимальную глубину прозвучивания изделия. Также конструкция раздельно-совмещенного преобразователя подразумевает использование призмы, служащей для ввода упругих волн под углом к поверхности изделия.

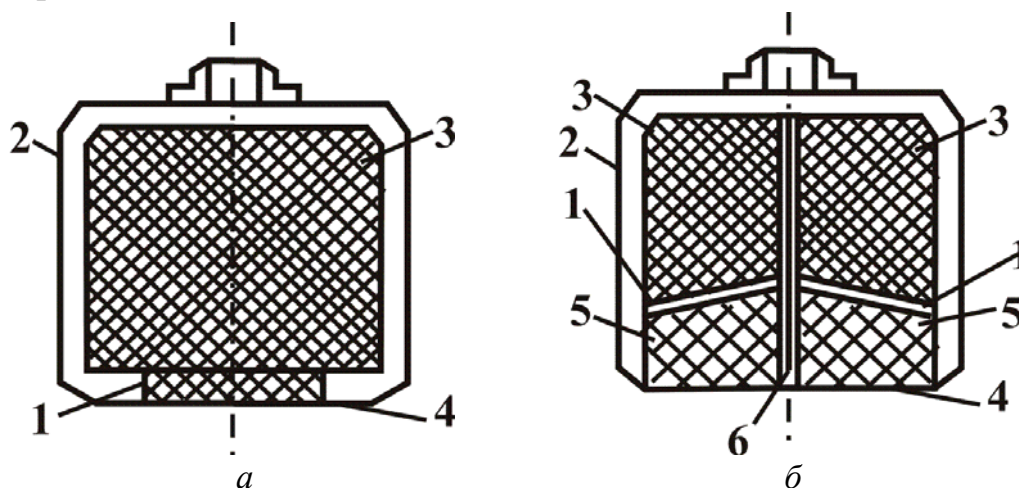


Рис. 2.6. Конструкции ультразвуковых преобразователей:
1 – пьезоэлемент; 2 – корпус; 3 – демпфер;
4 – протектор; 5 – призма; 6 – акустический экран

Раздельно-совмещенные преобразователи отличаются минимальным уровнем собственных шумов, очень малой мертвой зоной, высокой чувствительностью. С их помощью можно добиться выравнивания чувствительности к дефектам, расположенным на разной глубине.

Обычно призмы изготавливают из оргстекла. Пластины располагаются под небольшим углом $4...5^\circ$. Между пластинами помещается звукопоглощающий экран. Углы наклона призм, расстояние между пластинами подбирается так, чтобы обеспечить выявление дефектов в заданном диапазоне толщин. Максимум излучения находится несколько выше точки пересечения акустических осей из-за затухания и расхождения. [22]

Вопросы для самопроверки

1. От каких параметров зависит направленность излучения?
2. Какие параметры определяют рабочую частоту преобразователя?
3. Как следует раздельно-совмещенный преобразователь подключать к толщиномеру?
4. Какой из ниженазванных параметров определяет рабочую частоту преобразователя?
5. Каково назначение пьезоэлемента в преобразователе?
6. Что такое точка Кюри пьезоматериала?
7. Прямой преобразователь последовательно устанавливается на образцы из органического стекла и стали. В каком случае протяженность ближней зоны поля излучения больше?
8. Чем отличаются ближняя и мертвая зоны с точки зрения контроля?
9. От каких параметров зависит величина мертвой зоны?
10. Назовите отличительные особенности совмещенных и раздельно-совмещенных преобразователей.
11. За счет чего величина мертвой зоны у раздельно-совмещенных преобразователей меньше, чем у совмещенных?

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

3.1. Общие сведения

Акустическими методами называют методы контроля, основанные на изменении упругих колебаний и волн в контролируемом объекте.

Согласно ГОСТ 23829–79 акустические методы делят на две большие группы:

Активные – использующие излучение и прием акустических колебаний

Пассивные – основанные только на приеме колебаний.

К активным методам относят методы, основанные на прохождении и отражении УЗК.

Активные методы

Эхо-метод.

Высококачественный генератор вырабатывает кратковременные импульсы (либо с высокочастотным заполнением – радиоимпульсы, либо просто короткие импульсы). Посланный излучателем импульс, отразившись, возвращается обратно к преобразователю, который работает в это время на прием (рис. 3.2).

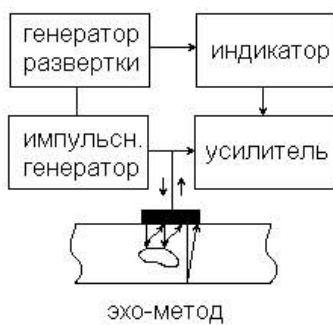


Рис. 3.1. Схема эхо-метода

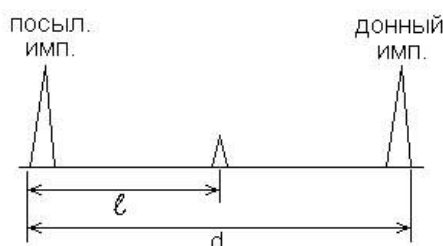


Рис. 3.2

С преобразователя сигнал поступает на усилитель, а затем, на отклоняющие пластины ЭЛТ (рис. 3.2).

Эхо-метод позволяет контролировать изделия при одностороннем доступе к ним. Это особенно ценно при проверке изделий, в которых отсутствует двусторонний доступ. Кроме того, чувствительность эхо-метода значительно выше теневого. В эхо-методе отражение даже 1 % энергии очень хорошо не только обнаруживается, но и измеряется. Кроме того, эхо-метод позволяет определить, на какой глубине находится дефект. Если временное расстояние между зондирующим и отраженным от противоположной поверхности детали (донный импульс) принять за размер детали, то время между посылаемым импульсом и моментом прихода отраженного от дефекта импульса дает глубину залегания дефекта.

Кроме того, по амплитуде отраженного сигнала можно судить о размерах дефекта, а изучая спектральный состав отраженного импульса, можно получить информацию о типе и форме дефекта.

Главный недостаток эхо-метода – наличие мертвой зоны под датчиком, что не дает возможности применять его для тонких изделий. Наличие мертвой зоны связано с тем, что при близко расположенном дефекте в момент прихода эхо-сигнала от него еще продолжается излучение зондирующего импульса. Для уменьшения мертвой зоны повышают частоту УЗК, что позволяет уменьшить длительность зондирующего импульса.

Длительность импульса определяет и разрешающую способность метода, т. е. минимальное расстояние между дефектами по глубине, при котором их эхо-сигналы воспринимаются раздельно. Очевидно разрешающая способность эхо-метода по глубине равна длительности зондирующего импульса.

Повышение частоты с целью увеличения разрешения ограничено сверху тем, что короткие волны начинают отражаться от границ кристаллических зерен металла, что вызывает появление помех. Кроме того, с увеличением частоты возрастает затухание УЗК.

Эхо-метод – основной способ измерения толщины. Рассмотрим подробнее его возможности и ограничения.

Точность измерения рассмотрим для наиболее простого случая, когда измерение выполняют по первому донному сигналу. Если скорость c распространения ультразвука в объекте известна, то, измеряя время t прохождения ультразвука в объекте в прямом и обратном направлениях, определяют толщину по формуле

$$h = 0,5ct. \quad (3.1)$$

Оценку погрешности измерения расстояния выполним как применительно к измерению толщины, так и применительно к определению координат дефектов. Относительная погрешность $\Delta h/h = \Delta c/c + \Delta t/t$.

Настройку на скорость звука выполняют по образцу или по участку ОК известной толщины таким же способом, как измеряют толщину, поэтому погрешности измерения скорости и времени приблизительно совпадают, в результате $\Delta h/h = 2\Delta t/t$.

Существуют приборы с автоматической подстройкой скорости звука, в которых факторы, влияющие на точность измерения скорости и толщины, отличаются.

Погрешность Δt измерения времени складывается из погрешностей Δt_n , обусловленных влиянием ряда факторов, поэтому $\Delta t = \sum_n \Delta t_n$

Диапазон измеряемых толщин. Минимальную толщину изделий, контролируемых эхо-методом, определяет мертвая зона толщиномера. Она аналогична мертвой зоне дефектоскопа. Для ее сокращения в приборах групп 1 и 3 добиваются минимальной длительности зондирующего импульса, а в приборах группы 2 – применяют РС-преобразователи. В результате мертвая зона для толщиномеров групп 1 и 3 составляет 0,2...0,3 мм, а для толщиномеров группы 2 – 0,5...1,5 мм.

Для измерения других (кроме толщины) размеров изделий ультразвук применяют в настоящее время довольно редко, так как здесь более удобными оказываются другие средства измерения, например оптические. Применение ультразвука для измерения диаметров труб рационально в комплексных установках для ультразвукового контроля труб, включающих также дефектоскоп и толщиномер.

По схеме, показанной на рис. 3.3, контроль выполняют импульсным эхо-методом в локальной иммерсионной ванне. Между преобразователями 1–4 и контролируемой трубой 5 помещают тонкий экран 6 с окнами. Измеряют время прихода сигналов от экрана II до наружной III и внутренней IV стенок трубы. Поскольку расстояние от преобразователя до экрана точно известно, интервал времени между зондирующим импульсом I и эхосигналом от экрана II служит для корректировки скорости звука в иммерсионной жидкости, которая может изменяться под влиянием температуры. [1]

По интервалу II – III измеряют расстояние от экрана до трубы: $l = c_{жс} (t_{III} - t_{II}) / 2$, где t_{II} и t_{III} , – время прихода импульсов II и III; $c_{жс}$ – скорость звука в жидкости. Небольшая величина этого расстояния, одинаковость амплитуд и форм эхосигналов II и III повышают точность измерения. Интервал между эхосигналами III и IV используют для изме-

рения толщины стенки трубы. По измерениям, выполненным с помощью преобразователей 1 и 3, 2 и 4, автоматически выполняется расчет диаметров трубы в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Например, диаметр в горизонтальном направлении равен $D = D_э - l - l'$ где $D_э$ – диаметр экрана; l и l' – расстояние от экрана до трубы слева и справа от нее. Сопоставление результатов измерений всеми четырьмя преобразователями дает возможность оценить форму трубы, выявить возможную овальность. С учетом результатов измерения толщины стенки трубы измеряются ее внутренний диаметр, разностенность трубы по сечению. Таким образом, приведенная схема дает возможность оценить все геометрические характеристики поперечного сечения изделия и даже вычислить вес одного погонного метра трубы.

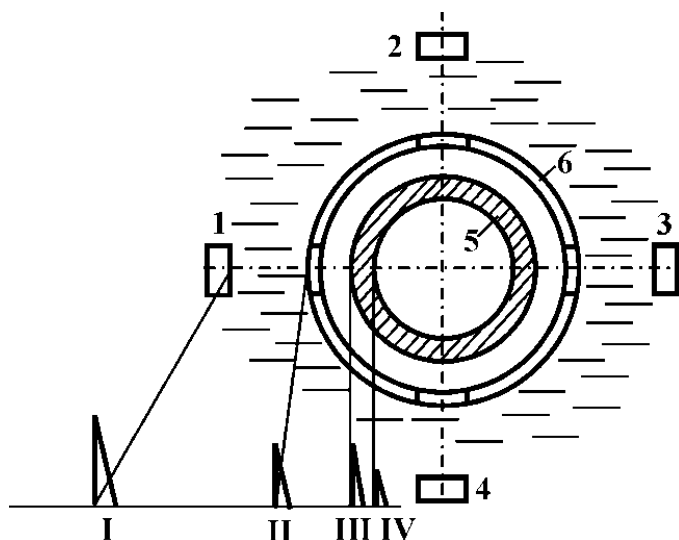


Рис. 3.3. Схема изменения диаметра и толщины стенки трубы

Измерение длины с помощью ультразвука целесообразно, когда требуется непрерывно измерять расстояния порядка 100...1000 мм. Например, рационально применять ультразвук для непрерывного контроля износа резца в процессе механообработки. Такие измерения нужны при автоматической обточке деталей. Преобразователь приклеивают на плоский торец резца и расстояние до режущей кромки контролируют по времени прихода ультразвукового импульса. Лучшие результаты дает применение поперечных волн, так как в этом случае затруднена трансформация волн и не возникают ложные сигналы.

Резонансный метод

Взаимодействие акустических волн, бегущих в среде в различных направлениях, в частности в твердом теле ограниченных размеров, приводит к возникновению стоячих волн на частотах, где возможно возбуждение колебаний.

Для примера рассмотрим плоскопараллельный слой (например однородную плиту), в котором возбуждается плоская волна в направлении толщины за счет передачи части энергии монохроматической волны, падающей на слой из жидкости. Из анализа следует, что на частотах, удовлетворяющих условию кратности толщины h слоя целому числу полуволн ($h = n\lambda/2$, где n – целое число), коэффициент отражения энергии волн R_J минимален, а коэффициент прохождения D_J максимален.

Расчет показывает, что амплитуда колебаний слоя при этом максимальна, что объясняется взаимным усилением прямых и обратных волн в слое. Это случай так называемого структурного (геометрического) резонанса. [22]

Если установить приемник колебаний за плитой и плавно изменять частоту колебаний в падающей волне, то можно будет наблюдать зависимость амплитуды сигнала от частоты, показанную на рис. 3.4.

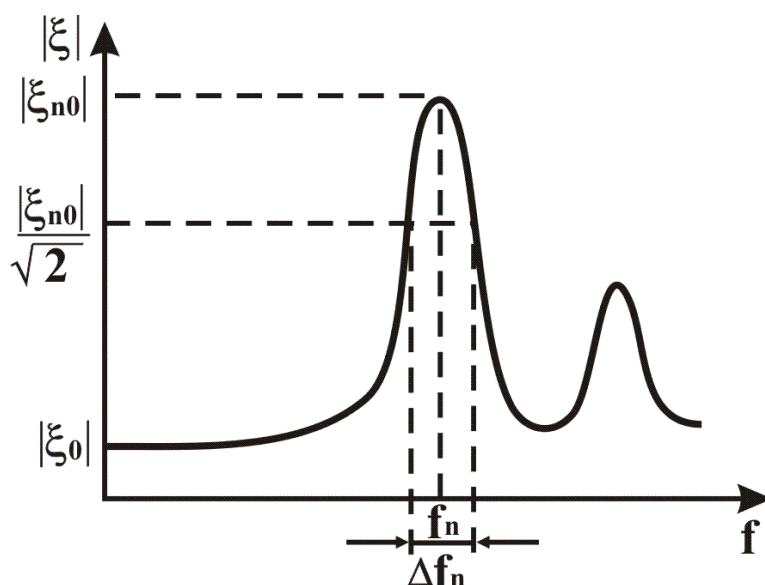


Рис. 3.4. Основные характеристики резонансных колебаний изделий

Частоты $f_n = nc/2h$ являются резонансными, а полный их набор называют спектром резонансных частот или резонансным спектром. По значениям резонансных частот f_n можно определить толщину пластинки в соответствии с соотношением

$$h = nc/2f_n. \quad (3.2)$$

Это используется в резонансной толщинометрии, например при контроле толщины стенок труб. Знание числа n не обязательно, т. к. очевидно, что разность между двумя соседними резонансными частотами

$$\Delta f = c/2h \quad (3.3)$$

т. е.

$$h = c/2\Delta f. \quad (3.4)$$

В общем случае $h = (m - n)c / [2(f_m - f_n)]$ где m и n – произвольные целые числа.

Предположим, что падающая на пластину волна не является монохроматической, а представляет собой короткий импульс. Возникающие в плите колебания теперь являются свободными колебаниями, при которых вновь подчеркиваются колебания с частотами, на которых прямые и обратные волны взаимно усиливаются. В итоге возбуждается совокупность стоячих волн, амплитуды которых различны и убывают с увеличением частоты, хотя, возможно, и немонотонно. Набор частот этих колебаний называют спектром частот собственных колебаний, или собственных частот.

В приведенном рассмотрении не учитывалось поглощение УЗ-волн в среде. Это оправдано, поскольку потери энергии колеблющимся телом (плитой) за счет излучения в окружающую среду, как правило, превышают потери ее из-за внутреннего поглощения. В этом случае значения собственных и резонансных частот практически совпадают. Если обратиться к общему случаю колебаний тела произвольной формы, ограниченного во всех трех измерениях, можно прийти к аналогичным выводам о существовании спектра резонансных и собственных частот и возможности их регистрации по изменению амплитуды колебаний приемника. В общем случае при учете затухания собственные колебания тела можно описать формулой вида:

$$\xi(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \xi_n(x, t); \quad (3.5)$$

$$\xi(x, t) = A_n \varphi_n(x) e^{-\delta_n t} \sin\left(\sqrt{\omega_n^2 - \delta_n^2} \cdot t + \phi_n\right), \quad (3.6)$$

где x – координаты произвольной точки колеблющегося тела; $\varphi_n(x)$ – распределение амплитуд колебаний по объему тела (форма колебаний); δ_n и A_n – коэффициент затухания и амплитуда колебаний на n -й собственной частоте; ϕ_n – фазовые сдвиги, определяемые начальными условиями возникновения колебаний.

Амплитуды A_n зависят от амплитуды и пространственного распределения возбуждающей силы. При гармоническом возбуждении колебания описываются формулами:

$$f(x, y, z, t) = F(x, y, z) \exp(i \omega t), \quad (3.7)$$

где $F(x, y, z)$ – распределение в пространстве амплитуды возбуждающей силы; ω – круговая частота возбуждения.

Смещение в любой точке колеблющейся системы представляется в виде совокупности форм колебаний:

$$\xi(x, y, z) \exp(i \omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \xi_n(x, y, z) \exp(i \omega t). \quad (3.8)$$

Введя обозначение $\eta = 1/2Q$ общее решение, представляющее амплитуду колебаний системы в любой точке регистрации R с координатами (x_R, y_R, z_R) можно представить в виде

$$\xi(R) = F_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{M_n^* [\omega_n^2 (1 + i\eta) - \omega^2]}, \quad (3.9)$$

где приняты следующие обозначения:

$$M_n^* = \frac{N_n^2}{\xi_n^2(R) \chi_n(R)};$$

$$\chi_n(R) = \frac{1}{F_0} \int_S \frac{F(x, y, z) \xi_n(x, y, z)}{\xi_n(x_R, y_R, z_R)} dS;$$

$$F_0 = \int_S F(x, y, z) dS;$$

S – поверхность системы, на которую действует сила $F(x, y, z)$;

$$N_n = \sqrt{\int_V \xi_n^2 dV};$$

V – объем рассматриваемой колебательной системы.

Так как обычно $\eta \gg 1$, то при $\omega \approx \omega_n$ из-за резкого уменьшения знаменателя член с номером n имеет много большую величину, чем остальные, т. е.

$$|\xi_n(x)| \approx B_n(x) / \omega_n^2 \eta. \quad (3.10)$$

Обычно вместо коэффициента потерь вводят величину добротности объекта $Q = 1/2\eta$. Нетрудно показать, что

$$Q = 2\pi W_K / W_{II}, \quad (3.11)$$

где W_K – максимальная энергия колебаний тела; W_{II} – энергия, рассеянная за цикл колебаний из-за механических потерь в теле (трение, теплопроводность) или из-за излучения в окружающую среду

Метод позволяет выполнять измерения толщин от минимального значения $h_{\min} = c / (2f_{\max})$, где c – скорость звука в материале изделия, f_{\max} – максимальная частота прибора. Повышение этой частоты до 30 МГц позволяет измерять толщину стальных изделий, начиная от 0,06 мм. Измерение таких толщин другими методами выполнить не удастся. Погрешность при этом 1...2 %.

Резонансный метод пригоден для контроля изделий с относительно гладкими поверхностями. Изменение толщины в зоне измерения не должно превышать 8 %. причем измеряется средняя толщина, а не наибольшее ее уменьшение. Однако в контактном варианте обнаруживается ряд недостатков метода: погрешность измерения увеличивается до 2...5 % вследствие смещения резонансов под влиянием нестабильного акустического контакта, диаметр труб, контроль которых возможен, увеличивается до 10...12 мм.

3.2. Аппаратурная реализация УЗ толщинометрии

Эхо-импульсный толщиномер общего назначения

Обычно в литературе рассматривают два метода толщинометрии при ручном исполнении контроля: эхо – импульсный и резонансный. Однако с развитием эхо – импульсного метода резонансный оказался неконкурентоспособен с ним по диапазону прозвучивания, требованиям к шероховатости и геометрии поверхностей и другим параметрам. Вследствие этого в настоящее время применяют только эхо – импульсный метод. Принцип работы УЗ эхо – импульсного толщиномера с цифровой индикацией рассмотрим на основе схемы (рис. 3). Временная диаграмма работы такого прибора приведена на рис. 4.

Синхронизатор (С) периодически вырабатывает импульс, который запускает *генератор импульсов возбуждения (ГИВ)* и *генератор пусковых импульсов (ГПИ)*. ГИВ вырабатывает короткий электрический импульс 1 (рис. 3.6, а), возбуждающий передающую часть РС ПЭП. После отражения от противоположной стенки измеряемого объекта УЗ импульс попадает на приемную часть РС ПЭП, преобразуется в электрический сигнал и подается на *усилитель (У)*. Принципом измерения толщины УЗ методом является измерение времени между излучением зондирующего импульса и приемом

первого отраженного импульса. Для измерения почти никогда не привлекается непосредственно излучаемый импульс. Из-за задержки при прохождении в ПЭП, из-за своей ширины он вносит существенную погрешность в процесс измерения. Поэтому синхронизатор запускает также генератор пусковых импульсов, который с некоторой задержкой, учитывающей распространение УЗ в части акустического тракта от излучающей пластины до поверхности изделия, вырабатывает пусковой импульс 2. Последний, в свою очередь, запускает измерительный генератор (ИГ). Прямоугольный импульс, созданный ИГ (рис. 3.6, б), останавливается первым эхо – импульсом 3 (рис. 3.6, а), прошедшим через усилитель из изделия.

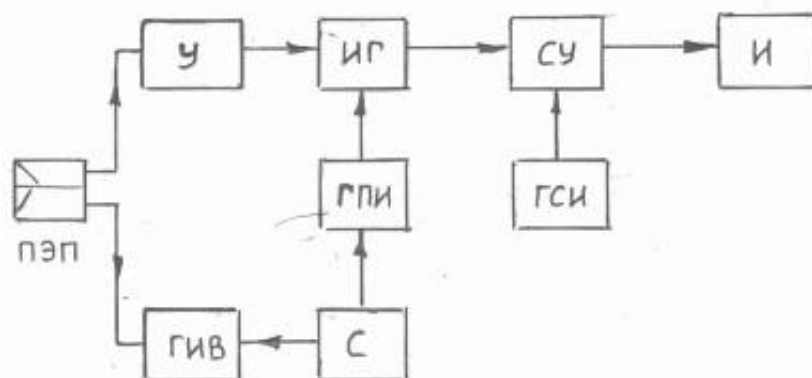


Рис. 3.5. Функциональная схема ультразвукового эхо-импульсного толщиномера

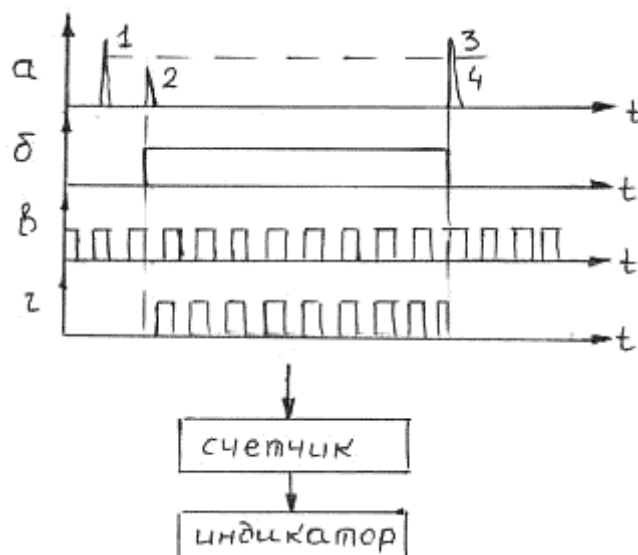


Рис. 3.6. Временная диаграмма работы эхо-импульсного толщиномера с цифровой индикацией:
 1 – зондирующий импульс, 2 – пусковой импульс,
 3 – эхо – импульс от стенки измеряемого объекта,
 4 – порог срабатывания сигнала на остановку измерительного импульса

Чтобы сделать измерение времени распространения УЗ колебаний независимым от амплитуды эхо-сигнала, обычно используется схема автоматической регулировки усиления, которая, несмотря на флуктуацию акустического контакта или влияние шероховатостей поверхностей, доводит принятый от задней стенки эхо-сигнал до постоянной величины 4 (рис. 3.6, а). Тем самым порог срабатывания постоянно располагается на одном и том же месте фронта эхо-сигнала. Фронтом измерительного импульса запускается счетное устройство (СУ), на которое поступают счетные импульсы (рис. 3.6, в) от генератора счетных импульсов (ГСИ), стабилизированного кварцевым элементом.

В качестве основной единицы измерительного времени используется длительность периода генерации ГСИ. Выбор частоты ГСИ зависит от скорости распространения УЗ колебаний и от требуемой точности измерения времени распространения УЗ колебаний, а, следовательно, и толщины стенки.

Например, чтобы достигнуть точности измерения толщины $\pm 0,1$ мм для стали со скоростью звука 5920 м/с, используется частота ГСИ 29,65 МГц. Длительность периода в этом случае точно равна времени распространения УЗ импульса через стальную пластину толщиной 0,1 мм (путь импульса туда и обратно). Частота генератора для других материалов пропорциональна скорости распространения УЗ колебаний в среде, а именно: 5890 м/с – 29,54 МГц; 5970 м/с – 29,85 МГц; 6236 м/с – 31,18 МГц; 6300 м/с – 31,50 МГц; 6364 м/с – 31,82 МГц. В толщиномерах старых систем настройка на нужную скорость звука осуществляется путем переключения частоты ГСИ. В микропроцессорных толщиномерах, выпускаемых со второй половины 80-х годов, при фиксированной частоте ГСИ настройка на нужную скорость осуществляется программным способом.

Счетчик (С), запущенный фронтом измерительного импульса, останавливается спадом того же импульса. Содержание счетчика (рис. 3.6, г) указывает тогда, сколько счетных единиц накоплено за время действия измерительного импульса. Эта информация подается на цифровой индикатор (И), который индицирует толщину измеряемого изделия.

Основной причиной, определяющей погрешность эхо-импульсных толщиномеров, является различие скоростей распространения ультразвука в различных материалах, а также изменение скорости распространения звука от внешних факторов, например изменение температуры окружающей среды.

Для компенсации влияния изменений скорости ультразвука в материале изделия разработаны самокалибрующиеся толщиномеры. Суть

идеи (рис. 3.7 и 3.8.) заключается в использовании двух пьезопластин или двух ПЭП, установленных на заданном расстоянии.

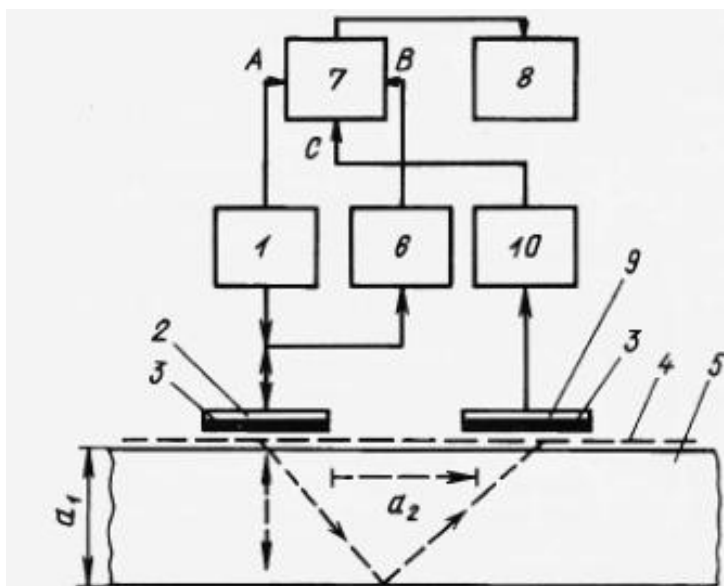


Рис. 3.7. Функциональная схема ультразвукового эхо-импульсного автокалибрующегося толщиномера:

1 – генератор, 2 – приемопередающий пьезоэлемент, 3 – защитный протектор, 4 – контактная жидкость, 5 – контролируемое изделие, 6 и 10 – усилители, 7 – измеритель временных интервалов, 8 – индикатор

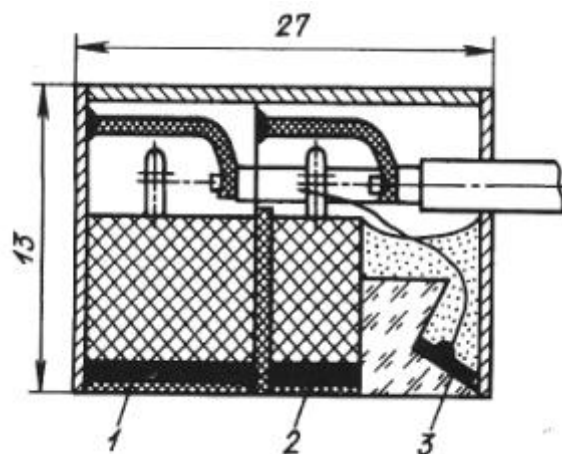


Рис. 3.8. Конструкция пьезопреобразователя для автокалибрующегося толщиномера.

1 – приемно – излучающий пьезоэлемент, 2 – приемный пьезоэлемент, 3 – пьезоэлемент для приема головных волн

Пьезоэлемент 2 излучает и принимает ультразвуковой импульс, прошедший нормально поверхности изделия. Пьезоэлемент 9, установленный на расстоянии a принимает ультразвуковой импульс излученный пьезопреобразователем 1. Из геометрических соображений легко

выразить толщину h изделия через расстояние a между пьезопластинами и временами t_1 и t_2 распространения ультразвуковых импульсов по двум путям.

$$h = \frac{at_1}{2\sqrt{t_2^2 - t_1^2}}. \quad (3.12)$$

Таким образом, используя один продольный тип ультразвуковых колебаний, исключаем из результатов измерений скорость упругих колебаний, а соответственно и вносимую ею погрешность. Одновременно можно выполнить и другую операцию – исключить толщину изделия и вычислить скорость распространения ультразвуковых колебаний. Аналогично

$$C_l = \frac{a}{2\sqrt{t_2^2 - t_1^2}}. \quad (3.13)$$

Резонансные толщиномеры

Резонансную толщинометрию осуществляют, накладывая приемно-излучающий преобразователь на поверхность изделия. Изменяя частоту возбуждения, добиваются возникновения резонанса и регистрируют соответствующую ему частоту. Схема измерений представлена на рис. 3.9.

Пьезопреобразователь возбуждают через резистор достаточно большей величины $R \gg |Z_{np}|_{\max}$, где Z_{np} – электрический импеданс преобразователя.

Тогда при изменении $|Z_{np}|$ ток I через преобразователь практически не будет меняться при изменении частоты возбуждения и напряжение U_{np} на нем будет пропорционально значению тока.

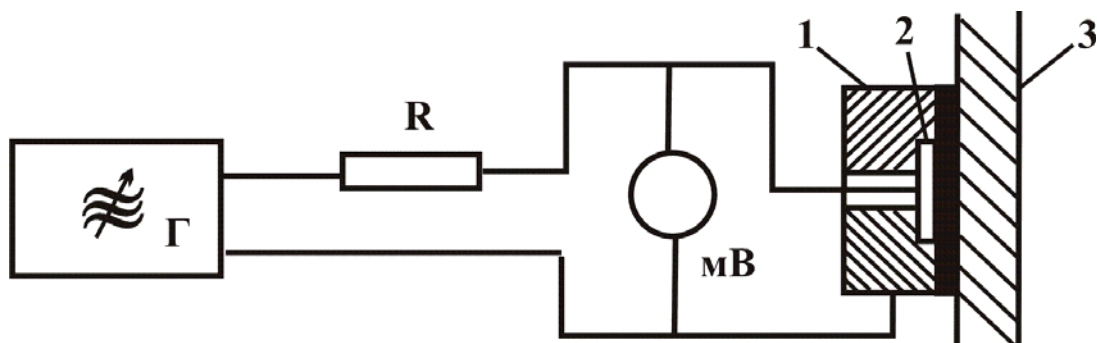


Рис. 3.9. Схема резонансной ультразвуковой толщинометрии:
1 – корпус пьезопреобразователя; 2 – пьезоэлемент; 3 – объект контроля

В момент резонанса импеданс преобразователя становится чисто активным (исчезает реактивная составляющая) и напряжение на преобразователе падает. В современных толщиномерах изменение (качение) частоты и ее измерение в момент резонанса осуществляются автоматически. Современное устройство резонансного контроля, предназначенное для отбраковки топливных таблеток ядерного реактора, предусматривает автоматическое качение частоты, регистрацию в виде цифрового кода до 14 значений резонансных частот и ввод их значений в ЭВМ с целью оперативной обработки данных и принятия решения о качестве изделия.

Контактный резонансный толщиномер

Контактный резонансный толщиномер работает по схеме, показанной на рис. 3.10, а. Он включает генератор колебаний 1, который возбуждает преобразователь 4, контактирующий с ОК 8 через слой контактной жидкости. Частоту колебаний генератора измеряют модулятором 5. Резонансы акустических колебаний вызывают изменение режима работы колебательного контура генератора. Частотным фильтром 2 эти изменения отделяют от всех других. Они кратковременны и имеют вид пиков. Резонансные пики усиливают усилителем 3 и подают на индикатор ЭЛТ 7.

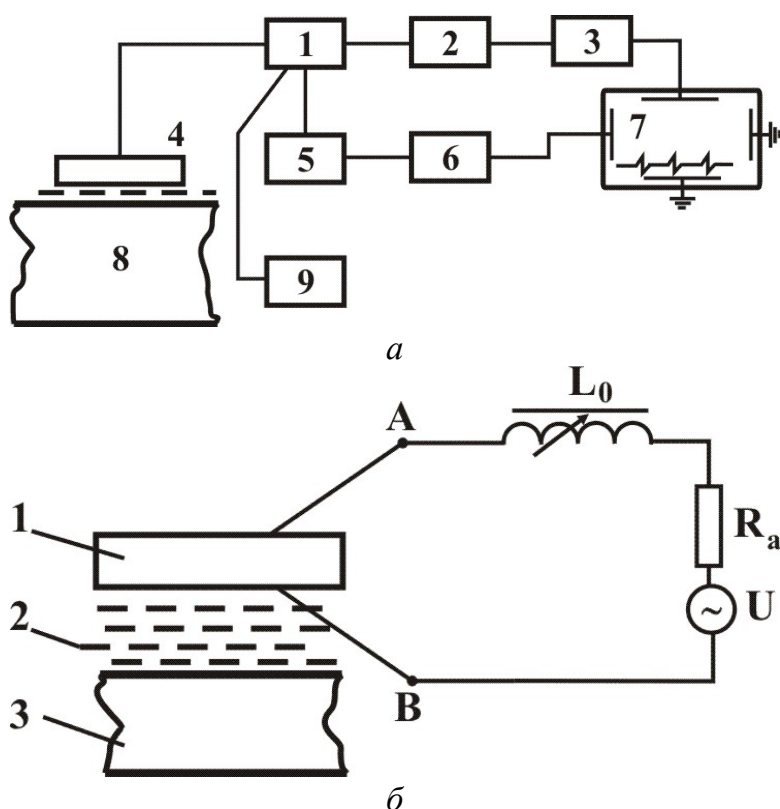


Рис. 3.10. Схема контактного резонансного толщиномера (а) и его автогенератора (б)

Модулятор управляет блоком временной развертки 6. Его линейно изменяющееся напряжение также подают на ЭЛТ. В результате линия горизонтальной развертки пропорциональна изменению частоты, а резонансные частоты отмечаются появлением пиков на соответствующих участках линии развертки. Измерительный блок 9 обеспечивает возможность перевода частотно-временных интервалов между резонансными пиками в измеряемую величину – толщину ОК. Чем больше измеряемая толщина, тем больше резонансных пиков и тем меньше интервал между ними.

В рассматриваемом приборе резонансные частоты регистрируют по изменению режима колебательного контура генератора (рис. 3.10, б). Нагрузку генератора определяет суммарное комплексное электрическое сопротивление:

$$\underline{Z}_{\Sigma} = (-j\omega C)^{-1} - j\omega L_0 + R_a + \underline{Z}_p; \quad (3.14)$$

$$1/\underline{Z}_p = 1/R_p + j/X_p, \quad (3.15)$$

где C – емкость пьезопластины; Z_p – ее эквивалентное комплексное электрическое сопротивление как пьезоэлемента.

Оно состоит из параллельно включенных активной и реактивной частей. Индуктивность L_0 варьируют, намагничивая ее ферромагнитный сердечник и тем самым меняя его магнитную проницаемость. При этом круговая частота ω генератора автоматически изменяется таким образом, чтобы обеспечивалось условие $\text{Im}[\underline{Z}_{\Sigma}] = 0$. Когда частота соответствует резонансу акустических колебаний, $1/X_p = 0$. С точки зрения эквивалентной электрической цепи – это частота антирезонанса. В этом случае модуль комплексного суммарного сопротивления становится минимальным: $Z_{\Sigma} = R + R_p$. При неизменном напряжении генератора ток в цепи возрастает, но напряжение на пьезопластине падает. X_p определяется условиями нагрузки пьезопластины. Демпфером и протектором пренебрегаем (в ПЭП для резонансного толщиномера они часто отсутствуют). В результате отмечаемые прибором резонансные частоты соответствуют условиям свободных колебаний не ОК, а пакета, состоящего из трех слоев: пьезопластины 1, контактной жидкости 2 и ОК 3, которые имеют вид

$$z_1 \text{tg} k_1 h_1 + z_2 \text{tg} k_2 h_2 + z_3 \text{tg} k_3 h_3 + (z_1 z_3 / z_2) \text{tg} k_1 h_1 \text{tg} k_2 h_2 \text{tg} k_3 h_3 = 0. \quad (3.16)$$

Здесь z , k , h – волновое сопротивление, волновое число и толщина соответствующего слоя системы. На рис. 3.11 показана в логарифмиче-

ском масштабе зависимость резонансных частот f от толщины h_3 стального ОК. Нагрузка поверхности кварцем вызывает повышение резонансных частот (штриховые линии). Это объясняется тем, что в пакете кварц – ОК на резонансных частотах укладывается на одну полуволну больше, чем указывает n . На частотах ниже 10 МГц толщина пластины кварца меньше полуволновой, поэтому в ОК укладывается $(n + \delta)$ полуволн, где $\delta < 1$. Введение слоя масла приводит к промежуточным значениям резонансной частоты (штрихпунктирные линии).

Из рис. 3.11 видно, что для уменьшения погрешности от смещения резонансных частот следует работать на частотах, возможно более близких к резонансной частоте пьезопластины, использовать резонансные пики, соответствующие высшим гармоникам, увеличивать толщину слоя масла до оптимальных (четвертьволновых) значений, производить градуировку прибора и измерение толщины при одинаковой силе прижатия преобразователя к поверхности изделия и образца, по которому выполняют градуировку.

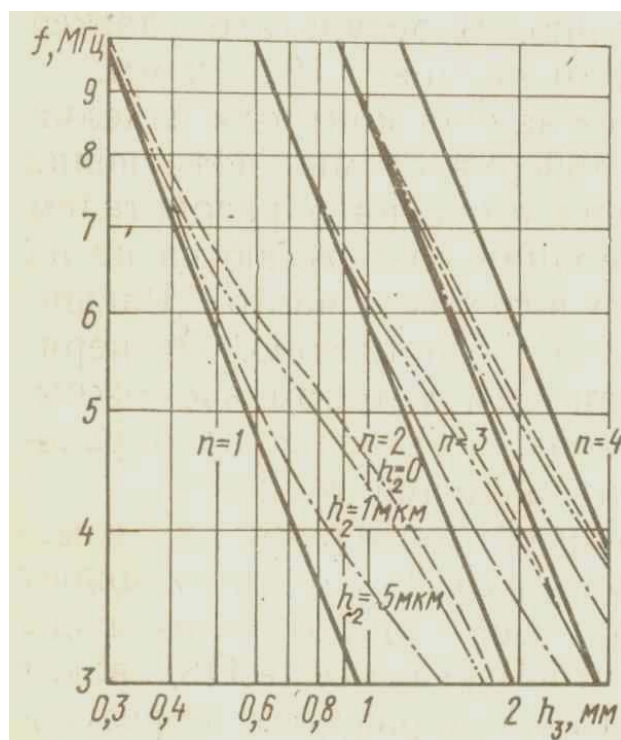


Рис. 3.11. Резонансные частоты пакета: преобразователь – слой масла толщиной h_2 – изделие

Колеблющиеся ПЭП и ОК можно представить как две связанные колебательные системы. Чем слабее связь этих систем, тем точнее резонансные частоты ОК соответствуют режиму свободных колебаний. Выбирая контактную жидкость с малым значением волнового

сопротивления z_2 или делая ее толщину равной нечетному числу четвертей волны, ослабляют связь колеблющихся систем. Однако при этих условиях генератор слабо реагирует на резонансы колебаний ОК, т. е. резонансные пики слабы. В этом состоит принципиальный недостаток контактного резонансного метода с регистрацией резонансных частот по изменению режима колебаний контура генератора.

Для материалов с небольшим затуханием ультразвука ширина резонансных пиков на половине их высоты составляет около 1 % от частоты. Связанная с этим погрешность измерения не превышает 0,5 %. Общая погрешность измерения контактных резонансных толщиномеров с учетом возможного смещения резонансных частот достигает 2...5 %.

Если резонансную частоту отмечать не по изменению режима работы генератора, а с помощью отдельного приемника, то связь между возбуждающим преобразователем и изделием можно значительно ослабить без существенной потери чувствительности и резко повысить точность измерений.

Рассмотрим другие факторы, ограничивающие применение резонансного метода. Один из наиболее частых объектов применения резонансных дефектоскопов-толщиномеров – измерение толщины стенок труб. В этом случае плоская поверхность преобразователя соприкасается с искривленной поверхностью изделия на сравнительно небольшом участке. Область, в которой устанавливаются резонансы колебаний, сокращается, и высота резонансных пиков сильно уменьшается. Одновременно с продольными волнами возбуждаются волны Рэлея и Лэмба, обтекающие во круг трубы и дающие резонансы, мешающие измерению. В результате удается измерять толщину стенок труб диаметром не менее 10...12 мм.

В практике довольно часто возникает задача контроля изделий с неровными или непараллельными поверхностями. Изменение толщины изделия в зоне взаимодействия его с преобразователем приводит к тому, что резонансные колебания возбуждаются не на одной частоте, а в пределах некоторого интервала частот. Расширение резонансных пиков затрудняет их регистрацию. Эксперименты показали, что измерения резонансным методом возможны, когда изменение толщины изделия в зоне контакта с преобразователем не превосходит 8 % от среднего значения толщины.

Иммерсионный резонансный толщиномер

Иммерсионный резонансный толщиномер применяют для измерения толщины непрерывно движущихся труб. Трубу протягивают через локальную иммерсионную ванну, где толщина слоя воды между нею и ПЭП составляет 40...50 мм. Через воду в ОК вводят ультразвуковые колебания, частоту которых варьируют. В результате в слое иммерси-

онной жидкости возникают резонансные колебания. Толщина слоя во много раз больше длины волны на минимальной частоте (около 3 МГц), поэтому резонансных пиков будет очень много и они близко расположены на линии развертки. Коэффициент отражения от границы – иммерсионная жидкость – ОК зависит от толщины стенки ОК. На частотах, определяемых по формуле

$$h = n\lambda/2 = nc/(2f_n), \quad (3.17)$$

где f_n – частота, соответствующая гармонике n , т. е. кратных полуволновым, он имеет минимумы, в результате на этих частотах высота резонансных пиков слоя воды резко уменьшается, образуются минимумы. По частоте минимума или по частотному интервалу между минимумами измеряют толщину.

Иммерсионно-резонансный толщиномер предназначен прежде всего для слежения за изменением толщины стенки. В связи с этим измерение ведут на резонансной частоте либо соответствующей основной частоте свободных колебаний изделия ($n=1$ и $h = \lambda/2$), либо на одной из низших гармоник ($n=2; 3$). Повышение частоты увеличивает влияние затухания, делает резонансы более заметными.

Основной источник погрешностей иммерсионно-резонансного толщиномера связан с дискретностью определения частоты, на которой устанавливаются резонансы в изделии. Дискретность эта обусловлена интервалом между резонансами слоя воды, по минимуму которых определяют резонанс ОК. Для того, чтобы достаточно точно определить положение резонансной частоты ОК, нужно увеличить высоту столба воды. Однако чем больше высота столба, тем медленнее должна модулироваться частота, т. е. чтобы частота колебаний, отраженных от ОК в момент прихода волны к преобразователю, не на много отличалась от частоты его колебаний, измененной под действием генератора прибора. Отсюда возникает отмеченная выше взаимосвязанность ограничений производительности и точности для иммерсионно-резонансного способа контроля.

Этот способ (как и другие иммерсионные способы) имеет определенное преимущество перед контактным резонансным способом при контроле труб малого диаметра. Минимальный диаметр измеряемых труб 3...4 мм против 10...12 мм. Это объясняется тем, что погружение трубы в жидкость способствует быстрому затуханию обтекающих трубу волн Рэлея и Лэмба.

Задачи

1. Какой толщины h_2 должен быть слой иммерсионной жидкости (воды), чтобы погрешность вносимая этим фактором в измерение толщины стенки

стальной трубы (номинальная толщина $h_3 = 1$ мм) иммерсионно-резонансным методом, была не более 0,2 %?

Решение. Рассматриваемая погрешность определяется расстоянием между резонансными пиками столба воды. Применим формулу (3.17) к двум гармоникам m и n и воспользуемся следующим правилом: если некоторая величина выражается в виде двух равных друг другу дробей, то она же равняется отношению разностей числителей и знаменателей этих дробей. В результате $h_2 = c_2(m - n) / [2(f_m - f_n)] = c_2 / (2\Delta f)$, если считать $m - n = 1$; c_2 – скорость звука в воде.

Ориентировочную частоту, на которой измеряют толщину стенки трубы, рассчитаем по формуле (3.17), считая, что измерение выполняем на третьей гармонике $f_3 = 3c / (2h_3)$. Допустимую погрешность измерения частоты определим

дифференцированием выражения $|df/f| = |dh/h|$; $\Delta f = df = \frac{\Delta h_3}{h_3} f_3 = 0,002 f_3$.

Подставляя это значение в формулу для h_2 , находим

$$h_2 = \frac{c_2}{2\Delta f} = \frac{c_2 \cdot 2 \cdot h_3}{2 \cdot 0,002 \cdot 3c_3} = \frac{1,49 \cdot 1}{0,002 \cdot 3 \cdot 5,91} = 42 \text{ мм}$$

Принимаем толщину иммерсионного слоя равной 50 мм.

2. Какой должен быть диапазон частот резонансного толщиномера (f_{\min}, f_{\max}), чтобы обеспечить измерение толщины стальных изделий от $h_{\min} = 0,35$ мм и более?

Решение. Максимальную частоту определяем из формулы (3.17). Для уменьшения частоты принимает $n=1$.

$$f_{\max} = \frac{c}{2h_{\min}} = \frac{5,91}{2 \cdot 0,35} = 8,4 \text{ МГц}$$

При увеличении толщины изделия резонанс с $n=1$ перемещается в более низкочастотную область. При f_{\min} он уходит за линию развертки. Чтобы можно было выполнять измерения, на линии развертки должен в это время появиться резонанс с $n=2$, отсюда $f_{\min} = 0,5 f_{\max} = 4,2 \text{ МГц}$. Рационально выбрать диапазон частот от 4 до 9 МГц.

3. Измеряется толщина стальной трубы $h=1$ мм резонансным контактным толщиномером при $n=2$. Какая будет погрешность измерения от изменения толщины слоя контактной жидкости? Как ее уменьшить?

Решение. По рис. 3.11 для $n=2$, $h=1$ мм находим, что при изменении толщины слоя контактной жидкости от 0 до 5 мкм резонансная частота изменяется от 6 до 6,3 МГц. Это может быть воспринято как изменение толщины от 1 до 0,9 мм (если градуировку толщиномера выполняли для собственных частот изделия), т. е. на $\pm 5\%$. Уменьшения погрешности можно добиться, перейдя на измерение по пику, соответствующему $n=3$, т. е. ближе к резонансной толщине пьезопластины.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные причины, определяющие погрешности эхо-импульсных толщиномеров.
2. Сформулируйте условия для толщины слоя контактной жидкости при контактном и иммерсионном способах ввода акустических колебаний
3. Какие типы генераторов применяются в эхо-импульсных толщиномерах?
4. Назовите основные преимущества использования резонансных толщиномеров перед эхо-импульсными.
5. Чем ограничена минимальная измеряемая толщина в эхо-импульсном методе измерения толщины.

ГЛАВА 4. МЕТОДОЛОГИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

4.1. Условия применимости УЗ толщинометрии

Как правило, УЗ метод измерения толщины применяют в местах, недоступных или труднодоступных для измерения толщины механическим измерительным инструментом. Особенно широко этот метод используют для определения толщины стенок труб, котлов, сосудов, то есть объектов замкнутого типа или с односторонним доступом. Обычно измерения производят на эквидистантных (равноудаленных друг от друга) поверхностях или участках поверхности, хотя принципиально возможны измерения и в других случаях.

Необходимость и возможность проведения измерений должна быть согласована между заказчиком и специалистами по УЗ контролю с целью:

- оценки технической возможности измерения толщины с заданной погрешностью;
- проведения своевременной подготовки производства (разработка методики измерения толщины, изготовление образцов, приспособлений и т. п.)

Погрешность измерений обычно определяют при доверительной вероятности $P=0,95$. При необходимости она может быть оценена при более высоком значении доверительной вероятности.

В соответствии с принятыми в метрологии правилами оценка годности объекта по фактическим показаниям прибора (без учета погрешности) производится, если выполняется одно из следующих условий:

1. Погрешность измерений не превышает 35 % от половины поля допуска на контролируемый размер. При одностороннем допусковом контроле (отдельно по верхнему или по нижнему отклонению) погрешность измерения не превышает 35 % соответствующего предельного отклонения;

В конструкторской документации указаны предельные значения измеряемой величины и погрешность измерения;

2. Погрешность измерения превышает значения, указанные в п.1, и нет возможности применить более точное средство измерения, назначены сокращенные приемочные границы, смещение Δ которых определено по правилу:

$$\Delta = |\delta| - 0,35(\Delta_n + \Delta_e) / 2, \quad (4.1)$$

где δ – погрешность измерения; $\Delta_{\text{н}}$, $\Delta_{\text{в}}$ – нижнее и верхнее отклонения от номинального размера.

Если условия 1–3 не выполняются, а также в тех случаях, когда конструкторская документация предусматривает факультативное измерение толщины УЗ методом, оценка годности объекта не производится.

Как правило, ручные измерения толщины производятся дискретно в отдельных точках. В настоящее время могут быть разработаны методики непрерывного контроля толщины с целью выявления участков, выходящих за пределы приемочных границ.

Документация, содержащая требование измерения толщины должна включать в себя схему разметки объекта на точки, в которых необходимо производить измерения. Схема разметки должна иметь привязку начала отсчета.

Значительно реже акустические методы используют для измерений длин и диаметров ОК. К измерению размеров относится вопрос применения акустических методов для контроля шероховатости поверхности объектов.

Как уже упоминалось в Главе 3, для измерения толщины используют эхо-метод и методы локальных колебаний (резонансные). В редких случаях используют метод прохождения. При контроле методами отражения и прохождения измеряют время пробега импульса в ОК. Иногда измеряют амплитуду прошедшего сигнала или его фазу. При контроле методом колебаний измеряют резонансные частоты. Различают три вида задач при измерении толщины, которым соответствуют три группы приборов:

1. Ручной контроль изделий с гладкими параллельными поверхностями, например изделий после их изготовления.
2. Ручной контроль изделий с грубыми непараллельными поверхностями, например изделий, внутренняя поверхность которых поражена коррозией.
3. Автоматический контроль в потоке (обычно труб).

При решении задач 1 и 3 основное требование – высокая точность измерений. При решении задачи 2 важное требование – высокая чувствительность, чтобы фиксировать рассеянное отражение от неровной противоположной поверхности, определять места наибольшего локального утончения стенок. Требования к точности измерения снижены. При ручном контроле нужно обеспечить широкий диапазон измерений, причем главная трудность – в снижении минимально измеряемой толщины. Результаты измерений необходимо представить в наглядной форме, например на цифровом табло. При автоматическом контроле нужно обеспечить высокую производительность измерений (т. е. выполнить возможно большее количество измерений в единицу времени) и следить за тем, чтобы толщина была не меньше и не больше заданного допуска.

В связи с существенным различием сформулированных задач их обычно решают с применением разных способов измерений и разных толщиномеров. Рассмотрим пригодность различных акустических методов для решения сформулированных выше задач измерения толщины.

Необходимо обратить внимание на специфическую ошибку измерения изделий малой толщины. Когда толщина ОК меньше минимального значения, измеряемого прибором, то прибор может зафиксировать не первый донный сигнал (который слился с зондирующим импульсом), а второй. В результате будет допущена ошибка: измеренное значение толщины будет вдвое больше истинного.

Максимальная толщина ОК физическими причинами обычно не ограничена, кроме большого затухания ультразвука в некоторых материалах. В конкретных приборах ее определяет минимальная скорость развертки, используемой для преобразователя времени прихода эхосигналов в электрическое напряжение. Обычно максимальную толщину (для материалов с небольшим затуханием ультразвука) ограничивают размером 200...1000 мм. Большие толщины измеряют импульсными дефектоскопами и механическими средствами.

Ограничивающие параметры объекта контроля. Наружная поверхность ОК должна обеспечить возможность надежного акустического контакта с преобразователем, так же как при дефектоскопии. Влияние неровности наружной поверхности на погрешность измерения рассмотрено выше. Состояние внутренней поверхности ОК определяет выбор типа ультразвукового толщиномера. Для контроля изделий с неровной внутренней поверхностью применяют только приборы группы 2, обладающие высокой чувствительностью и использующие для измерения первый донный сигнал.

Радиус кривизны ОК – важная эксплуатационная характеристика толщиномера, поскольку эти приборы чаще всего используют для контроля толщины стенок труб. Уменьшение радиуса кривизны приводит к уменьшению площади контакта преобразователя с поверхностью ОК и, следовательно, к уменьшению амплитуды измеряемого эхосигнала. Поэтому для эхо-импульсных толщиномеров минимальный радиус кривизны допускают приборы группы 2. Они позволяют контролировать трубу диаметром 5...10 мм, причем точность измерений и мертвая зона слабо зависят от радиуса кривизны. Приборами группы 1 контролируют трубы диаметром 10...20 мм и больше, причем погрешность и мертвая зона увеличиваются с уменьшением радиуса трубы. Этот же недостаток присущ также импульсным приборам группы В. Значительно лучшие показатели по минимальному радиусу кривизны поверхности имеют иммерсионные резонансные автоматические толщиномеры. Ими можно вести контроль толщины стенок труб диаметром 3 мм и более.

4.2. Средства ультразвуковой толщинометрии

Для измерения толщины следует применять следующую аппаратуру:

1. Эхо-импульсные УЗ толщиномеры с цифровой индикацией результата измерения;
2. УЗ дефектоскопы второй и выше групп по ГОСТ 23 049. Дефектоскопы с блоком цифрового отсчета (БЦО) применяют в диапазоне действия этого блока, а без БЦО – в диапазоне действия задержки развертки;
3. Импортные дефектоскопы и толщиномеры, если они имеют технические параметры, аналогичные указанным выше приборам.

Современные УЗ толщиномеры и дефектоскопы позволяют:

- измерять толщину стенки стальных объектов в диапазоне от 0,15 мм до нескольких метров;
- измерять скорость УЗ волн в материале;
- запоминать результаты измерений с последующей их распечаткой или выводом на персональную ЭВМ;
- производить допусковый контроль (прибор сигнализирует о выходе за установленные пределы);
- производить измерения на поверхностях с кривизной $R > 3$ мм;
- автоматизировать операции настройки;
- на малых толщинах (менее 10 мм) получать погрешность измерения менее 0,1 мм;
- работать на свежезаряженном комплекте батарей до 300 часов.

Основные технические параметры современных УЗ толщиномеров приведены в табл. 4.1.

Более подробная информация о выпускаемых современных толщиномерах содержится в приложении 2.

Таблица 4.1

Основные технические данные УЗ толщиномеров

Тип толщиномера, страна, фирма изготовитель	Диапазон измерений (по стали), мм	Точность индикации, мм	Тип индикатора	Габариты, мм/мм/мм/
УТ-93П, Молдова	0,8...300	0,1	ЖК 2)	40/85/160
T-GAGE, Англия, Sonatest	0,56...199,9	0,02	ЖК	32/62/127
Echometer-70, Германия, Karl Deutsch	0,7...250	0,01 или 0,1 1)	ЖК	35/80/130
DM2, Германия, Krautkramer	1,2...300	0,1	СД	33/65/150
DM3, Германия, Krautkramer	0,6...300	0,1	ЖК	33/65/115

Тип толщиномера, страна, фирма изготовитель	Диапазон измерений (по стали), мм	Точность индикации, мм	Тип индикатора	Габариты, мм/мм/мм/
CL304, Германия, Krautkramer	0,13...380	0,003 или 0,03	ЖК	63/190/29
DME, Германия, Krautkramer	0,75...300	0,1	ЖК	42/72/165
АТ-100, Россия, АО «НПО Альянс»	1,0...600	0,01 или 0,1	СД или ЖК	40/65/170

Примечания: 1. Меньшее значение относится к диапазону до 9,99 мм.
 2. ЖК – жидкокристаллический; СД – светодиодный.
 3. Вес толщиномера CL304 – 1,8 кг, остальных – не более 0,4 кг.

Для измерения толщины следует применять прямые и РС ПЭП с жестким протектором, обладающие высокой чувствительностью, низким уровнем шумов в диапазоне частот 2,0...10,0 МГц. Для особо точных измерений толщины металла (при толщинах менее 10 мм) могут применяться высокодемпфированные ПЭП с частотой до 20 МГц. Диаметры ПЭП от 5 до 25 мм.

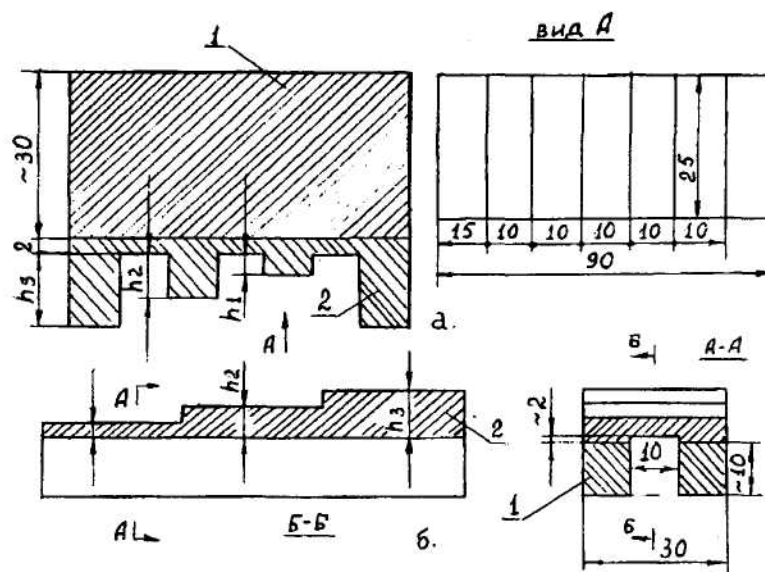


Рис. 4.1. Стандартные образцы предприятия для настройки скорости развертки при измерении толщины антикоррозионной наплавки:
 а – со стороны основного металла; б – со стороны антикоррозионной наплавки:
 1 – основной металл, 2 – антикоррозионная наплавка

Образцы для настройки УЗ толщиномеров

Для настройки толщиномеров используют стандартные образцы предприятия (СОП), изготовленные из материалов измеряемого объек-

та, имеющие толщину, равную номинальной или минимальной толщине объекта, кривизну и шероховатость поверхности соответствующие тем же характеристикам объекта. При измерении толщины труб и гибов с наружным диаметром менее 100 мм, целесообразно выполнять СОП в виде фрагментов этих изделий.

Если измеряется толщина биметалла, то СОП также должен быть изготовлен из биметалла. Для настройки скорости при измерении толщины антикоррозионной наплавки применяют образцы, примеры которых приведены на рис. 4.1.

Толщина металла образца на точках, по которым производится настройка, должна быть измерена с погрешностью не более $+0,01$ мм.

4.3. Подготовка к измерению толщины

Объект контроля должен быть размечен, точки измерения пронумерованы в соответствии со схемой, указанной в чертежно-технической документации. Разметку следует выполнять так, чтобы она не мешала измерению и не стиралась при осуществлении процесса измерения. Например, разметка может быть сделана с помощью маркировочного фломастера.

Для измерения толщины основного металла подготавливается площадка 30×30 мм с центром в точке измерения. Для измерения толщины антикоррозионной наплавки готовят площадку 50×50 мм. Подготовленная площадка должна быть свободна от загрязнений, отслаивающейся окислы и краски. Шероховатость поверхности изделия со стороны ввода УЗ колебаний должна быть не более $R_a=6,3$ мкм по ГОСТ 2789.

Допускается проводить измерения по поверхности, покрытой плотной пленкой окиси или тонким ровным слоем краски. Возможность выполнения толщинометрии и точностные характеристики измерения в этих условиях должны быть предварительно установлены экспериментально проверкой специалистами по контролю. В некоторых случаях выполняется контроль по поверхности без предварительной обработки, однако точностные характеристики при этом ухудшаются.

Допускается выполнять измерения сосудов и трубопроводов, наполненных водой или другой жидкостью.

При измерении толщины на участках зачистки поверхностных дефектов в месте максимальной глубины выборки для установления ПЭП должна быть подготовлена плоская площадка $\Phi 15$ мм, параллельная поверхности изделия. В некоторых случаях измерение может быть выполнено со стороны, противоположной выборке.

Если выборка имеет крутой профиль и обеспечить плоскую площадку для установки ПЭП не представляется возможным, следует из-

мерить толщину в точках вокруг выборки. Глубину выборки измеряют микрометрическим либо индикаторным глубиномером. Толщину изделия в месте выборки находят как разницу между минимальной его толщиной в окрестности выборки по данным измерений УЗ методом и максимальной глубиной выборки по результатам измерения глубиномером. Погрешность этого измерения принимается равной погрешности измерения УЗ прибором.

Настройку толщиномеров и глубиномеров дефектоскопов выполняют с учетом рекомендаций и инструкции по эксплуатации конкретного типа прибора. Для настройки глубиномера дефектоскопа иногда могут быть составлены более рациональные методики, чем это указано в инструкции по эксплуатации (это относится например к дефектоскопу УД2-12). Настройку выполняют с использованием СОП. Если возможно, целесообразно настроенный прибор проверить хотя бы в одной точке по кромке контролируемого объекта. [13]

4.4. Проведение измерений

На каждом из заранее намеченных участков выполняют однократное измерение толщины. Если произошла грубая ошибка, то есть погрешность измерения существенно превысила ожидаемую в данных условиях, то этот результат отбрасывают и выполняют три измерения взамен ошибочного. За результат измерения принимают среднеарифметическое значение.

При измерении толщины труб раздельно-совмещенным преобразователем акустический экран должен быть ориентирован перпендикулярно образующей трубы.

При измерении УЗ дефектоскопами следует обеспечить равенство амплитуд измеряемых импульсов и идентичность считывания результатов измерений.

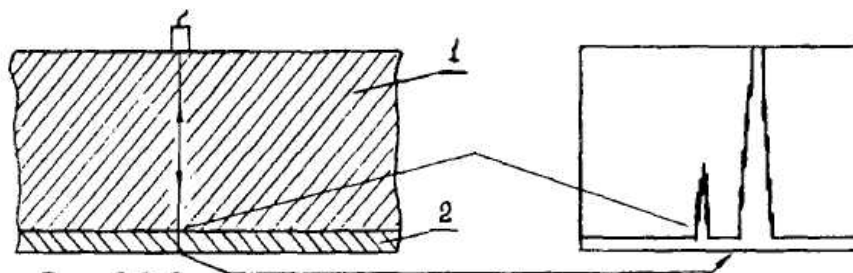
Измерения толщины антикоррозионных покрытий выполняют УЗ дефектоскопами. При измерении со стороны основного материала используют прямые совмещенные ПЭП с частотой 2...6 МГц с жестким протектором. Для измерения антикоррозионных покрытий номинальной толщиной от 2 до 8 мм со стороны покрытия применяют РС ПЭП с частотой 4...6 МГц, имеющие фокусное расстояние от 4 до 10 мм и максимальный размер контактной поверхности 16 мм, а покрытий номинальной толщиной более 8 мм – РС ПЭП с частотой 4...5 МГц, имеющие фокусное расстояние от 20 до 30 мм и максимальный размер контактной поверхности 30 мм.

На площадке, выделенной для измерения толщины, выбирают такое положение ПЭП, при котором эхо-импульс от границы раздела

двух металлических сред имеет наиболее гладкую форму и крутой передний фронт.

Заведомо недостоверные показания-эхо-импульсы от дефектов вблизи зоны сплавления, границ отдельных слоев или проходов, структурные шумы из наплавки – не учитывают.

При измерении со стороны основного металла толщина покрытия определяется как разность положений эхо-импульсов от дна и зоны сплавления, как показано на рис. 4.2.



*Рис. 4.2. Схема измерения толщины антикоррозионного покрытия со стороны основного металла:
1 – основной металл, 2 – антикоррозионное покрытие*

Некоторые особенности имеет измерение остаточной толщины в местах коррозионных повреждений. Перед измерением целесообразно получить сведения о характере ожидаемых коррозионных повреждений внутренней поверхности (например, визуальным осмотром, с помощью оптических приборов, в частности с использованием приборов на основе волоконной оптики или радиографическим контролем) и, по возможности, произвести зачистку поверхности, подвергнутой коррозии. При измерении остаточной толщины изделий в местах пятнистой или язвенной коррозии внутренней поверхности в заранее намеченных местах должны быть выполнены измерения с шагом не более 3 мм. За результат измерения принимают минимальное показание прибора. При измерении остаточной толщины изделий толщиной до 20 мм со стороны, противоположной подвергнутой коррозии, прибор не фиксирует изменения толщины, связанные с наличием одиночных язв сферической формы диаметром до 2,5 мм.

При отсутствии сведений о характере коррозионных повреждений изделия они могут быть ориентировочно получены при установке ПЭП в заранее намеченном месте изделия на основе следующих рекомендаций:

- прибор стабильно показывает значение толщины, равное номинальной толщине изделия или близкое к нему – изделие коррозионным повреждениям не подвергнуто;

- прибор стабильно показывает значение толщины меньше номинальной толщины изделия – объект подвергнут равномерной коррозии;
- прибор показывает номинальное значение толщины, а при дальнейшей перестановке ПЭП на ограниченном участке – нулевое (или нестабильное) значение и значение меньше номинального – изделие подвергнуто язвенной коррозии (нулевое и нестабильное показания соответствуют установке ПЭП над скосом язвы).

Если результат измерения существенно отличается от ожидаемого и не связан с грубой ошибкой измерения, целесообразно эти участки проконтролировать дефектоскопом, так как причиной уменьшения показания толщины может быть нарушение сплошности металла. Применение дефектоскопа может быть полезным и в других случаях, когда возникает неопределенность в оценке показаний толщиномера.

Контроль с целью определения минимального значения проводят дефектоскопом путем непрерывного сканирования. Крайнее левое положение эхо-импульса фиксируется фронтом строка АСД.

Считывание результата измерения производится после получения устойчивого и достоверного показания. Для цифровых приборов оно характеризуется либо одним значением, либо двумя, изменяющимися в пределах дискретности прибора. В последнем случае записывают более неблагоприятное значение.

Проверка настройки прибора по СОП производится периодически, а также после окончания измерений. При оформлении протокола (заключения) результат измерения должен быть представлен в виде

x, Δ от Δ_n до Δ_v ; P

x , мм – результат измерения;

Δ_n, Δ_v , мм – нижний и верхний пределы погрешности измерений;

P – вероятность, с которой погрешность измерения находится в этих границах.

Пример: 3,80 мм +0,20 мм, $P=0,972$.

Наименьшие разряды числовых значений результата измерения и численного показателя точности должны быть одинаковы.

4.5. Некоторые сведения об ошибках измерений

При выполнении любых измерений следует помнить, что никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно. Различают три вида ошибок:

Систематическими называют ошибки, величина которых одинакова во всех измерениях, проводимых одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов.

Рассмотрим подробнее причины возникновения систематических ошибок.

Окончательную настройку УЗ толщиномера производят по контрольной точке, замер в которой выполнен мерительным инструментом. Очевидно, что ошибка измерения при такой настройке не может быть меньше той, которая определяется погрешностью мерительного инструмента. Предположим, что при измерении толщины мерительным инструментом вместо истинного значения 72,21 мм получено значение 72,33 мм. Систематическая ошибка в этом случае составляет 0,12 мм. Много это или мало?

Прежде всего следует отметить, что чем точнее мы хотим измерить, тем труднее это сделать. Поэтому не следует требовать от измерения большей точности, чем это необходимо для решения поставленной задачи. Однако, если мы производим измерение толщины толщиномером с приборной погрешностью $\pm 0,1$ мм, а учет только одной систематической ошибки дает большее значение, то становится очевидным, что этот результат может удовлетворить нас в довольно редких случаях. Поэтому измерение толщины в контрольной точке мерительным инструментом должно выполняться особенно тщательно.

Существует и другая группа систематических ошибок, природа которых известна и величина может быть определена достаточно точно. Такие ошибки могут быть устранены путем введения поправок. Примером является измерение толщины изделия из материала со скоростью звука C_1 , если настройка толщиномера производилась по СОП со скоростью звука $C_0=C_1$.

Задача

Контролируют изделие с действительной скоростью звука $C_d=5850$ м/с. Номинальная толщина изделия составляет 140 мм. Настройка толщиномера выполнена по СОП со скоростью $C_0=5920$ м/с. Определим погрешность измерения, связанную с систематической ошибкой настройки.

Решение. Действительное значение толщины изделия

$$H_d = C_d \cdot t_d.$$

Показание толщиномера

$$H_0 = C_0 \cdot t_d.$$

Здесь t_d – действительное время прохождения ультразвуком толщины изделия (туда и обратно).

Из выше приведенных уравнений определим действительную толщину:

$$H_d = \frac{C_d}{C_0} \cdot H_0 = \kappa H_0,$$

где k – поправочный коэффициент. Погрешность измерения, связанная с систематической ошибкой настройки

$$\Delta H = H_0 - H_{\partial}.$$

Для нашего примера $H_0=141,7$ мм, $\Delta H=1,7$ мм.

Случайными называют ошибки, действие которых неодинаково в каждом измерении и не может быть учтено.

Величина случайных ошибок различна даже для измерений, выполненных одинаковым образом. Случайные ошибки при измерении толщины возникают из-за:

- колебания параметров толщиномера (дефектоскопа) и преобразователей в допустимых пределах;
- неточной установки нуля глубиномера;
- смещения ПЭП при повторных его установках в точку измерения;
- колебания толщины прослойки контактной жидкости вследствие неравномерного прижима ПЭП к изделию;
- неточного считывания результата измерения с экрана дефектоскопа;
- других факторов.

В теории измерений показано, что влияние случайной ошибки на результат измерения уменьшается с увеличением числа измерений. В практике для получения удовлетворительного значения ошибки при наименьших трудозатратах достаточно выполнить в контролируемой точке 5 (реже 7) измерений.

Грубыми называют ошибки (промахи), приводящие к результату, существенно отличающемуся от ожидаемого в данных условиях. Источником таких ошибок является недостаток внимания оператора. Для исключения промахов нужно соблюдать аккуратность и тщательность в работе и записи результатов. Иногда можно выявить промах, повторив измерение в несколько иных условиях (например, настроить прибор на другую цену деления). Следует иметь в виду, что многократное измерение подряд одной и той же величины не всегда дает возможность установить промах. Для надежного выявления промаха нужно либо повторить измерение спустя некоторое время, когда оператор уже забыл полученные им цифры, либо произвести повторное измерение, начиная с настройки прибора, другим дефектоскопистом, который не знает результатов, полученных первым.

Методика определения погрешности измерений толщины

За наиболее вероятное значение измеряемой величины обычно принимают ее среднее арифметическое значение, вычисленное из всего ряда измеренных значений:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4.2)$$

где x_i – результат i -го измерения толщины; n – число измерений.

Для оценки величины случайной ошибки измерения пользуются средней квадратической ошибкой, которой называется величина

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}. \quad (4.3)$$

Обозначим действительное значение измеряемой величины через x . Погрешность измерения этой величины Δx . Пусть α означает вероятность того, что результат измерения отличается от действительного значения на величину, не большую, чем Δx . Это принято записывать в виде

$$P(\bar{x} - \Delta < x < x + \Delta) = \alpha. \quad (4.4)$$

Эта вероятность носит название доверительной вероятности или коэффициента надежности. Интервал значений от $x - \Delta x$ до $x + \Delta x$ называется доверительным интервалом.

Написанное выражение означает, что с вероятностью, равной α , результат измерения не выходит за пределы доверительного интервала от $x - \Delta x$ до $x + \Delta x$. Разумеется, чем большей надежности мы требуем, тем большим получается соответствующий интервал. Доверительные вероятности для доверительного интервала, выраженного в долях средней квадратической ошибки $\varepsilon = \Delta x / \sigma$ сведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Доверительные вероятности для доверительного интервала, выраженного в долях средней квадратической ошибки

ε	1,0	1,5	2,2	2,4	2,5	2,6
α	0,683	0,866	0,972	0,984	0,988	0,990

Приведем пример пользования таблицей. Определим, какой доверительный интервал нужно выбрать, чтобы примерно 98 % результатов попали в него, если $x=1,27$, $\sigma=0,032$. Из таблицы находим, что значению $\alpha=0,98$ соответствует значение $\varepsilon=2,4$, следовательно $\sigma \cdot \varepsilon = 0,032 \times 2,4 = 0,077$, и указанной доверительной вероятности соответствует интервал:

$$1,193 < x < 1,347$$

Округлив, получаем $1,19 < x < 1,35$

Иногда этот результат записывают в виде: $x=1,27\pm 0,08$ с доверительной вероятностью 0,98. В тех случаях, когда систематическая ошибка превышает $1/3$ средней квадратической ошибки, ее также необходимо учитывать при определении доверительного интервала.

Систематическая составляющая погрешности измерений вычисляется по формуле

$$\Delta_c = \frac{\sum_{i=1}^n (x_d - x_i)}{n}, \quad (4.5)$$

где x_d – результат измерения, выполненного мерительным инструментом.

Доверительный интервал в этом случае принимает вид:

$$\bar{x} - \Delta x + \Delta_c < x < \bar{x} + \Delta x + \Delta_c. \quad (4.6)$$

Таким образом, для правильного описания погрешности измерений должны быть указаны доверительный интервал и вероятность, с которой суммарная погрешность не выходит за его пределы.

Возможно определение указанных величин двумя способами. По первому для измерений подготавливают 2–3 образца изделий, действительная толщина x_d которых, определенная с погрешностью, не превышающей 20 % приборной погрешности для данного диапазона, лежит в пределах одного диапазона измерений прибора.

Производят настройку прибора. На подготовленных участках выполняют 50 измерений толщины. По приведенным выше формулам вычисляют систематическую составляющую погрешности Δ_c , среднее квадратическое отклонение σ и доверительный интервал. Последний обычно определяют для доверительной вероятности $P=0,955$.

По второму способу производят настройку прибора. На образце изделия выполняют измерения в 50 точках. После этого изделие разрезают и в тех же точках измеряют действительную толщину x_d .

Дальнейшие вычисления производят по формулам так же, как описано для первого способа.

Задачи

1. Оценить погрешность измерения толщины стального изделия в диапазоне 3...300 мм с помощью контактного импульсного толщиномера. Приборная погрешность – 1 %, частота $f = 5$ МГц, $\chi = 0,1$, толщина слоя жидкости $\Delta h_{ж}$ изменяется от 0 до 0,01 мм, отношение скоростей звука в изделии и жидкости равно 4.

Решение.

$$\begin{aligned} \Delta h/h &= 2 \left[\Delta t_1/t + \chi c / (2fh) + c_H \Delta h_{\text{жс}} / (c_{\text{жс}} h) \right] = \\ &= 2(0,01 + 0,1 \cdot 5,9 / 2 \cdot 5 \cdot h) + 4 \cdot 0,01 / h = 0,02 + 0,046h. \end{aligned}$$

Для $h=3; 10; 50; 300$ мм находим $\Delta h/h = 3,5; 2,5; 2,1; 2,0\%$

2. Оценить, как изменяется время прихода донного сигнала для РС преобразователя при изменении толщины стального изделия. Излучатель и приемник одинаковые. Толщина призмы из оргстекла $h_A = 20$ мм, расстояние между центрами пластин $2g=25$ мм.

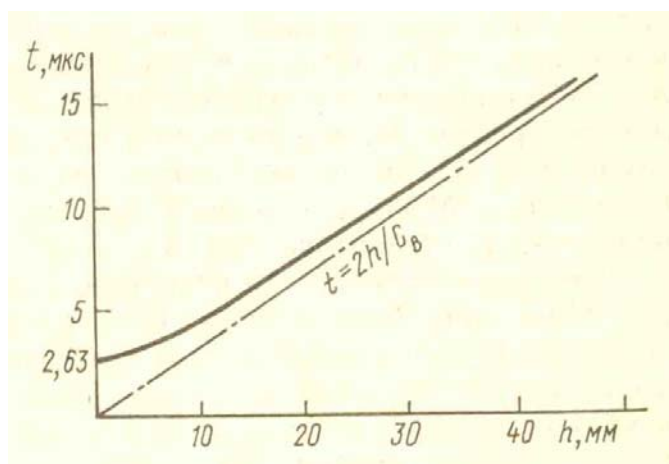


Рис. 4.3. Изменение пути ультразвука при измерении РС преобразователем объектов малой и большой толщины

Решение. Время t' прохождения импульса, соответствующего донному сигналу, рассчитаем, предполагая, что он излучается и принимается центральными точками преобразователей $t' = 2h_A / (c_A \cos \theta_A) + 2h / (c_B \cos \theta_B)$. Величины, относящиеся к призме, отмечены индексом А, к изделию — В. В схеме прибора предусмотрено автоматическое вычитание из измеряемого времени t' минимального времени пробега в призмах $t_0 = 2h_A / c_A$. Таким образом, измеряемое прибором время равно

$$t = t' - t_0 = \frac{2h_A}{c_A} \left(\frac{1}{\cos \theta_A} - 1 \right) + \frac{2h}{c_B \cos \theta_B}.$$

Углы и расстояния связаны двумя уравнениями

$$\begin{aligned} \sin \theta_A / c_A &= \sin \theta_B / c_B; \\ g &= h_A \operatorname{tg} \theta_A + h \operatorname{tg} \theta_B. \end{aligned}$$

Отсюда

$$h = \left\{ g - h_A \operatorname{tg} \left[\operatorname{arc} \left(\sin \theta_B c_A / c_B \right) \right] \right\} / \operatorname{tg} \theta_B;$$

$$t = \frac{2h_A}{c_A} \left\{ \frac{1}{\cos[\arcsin(c_A \sin \theta_B / c_B)]} - 1 \right\} + \frac{2h}{c_B \cos \theta_B}.$$

Последние две формулы дают параметрическую (через θ_B) искомую связь между t и h . Для преобразователя с заданными параметрами кривая приведена на рис. 4.3. Ее рассматривают как оценочную и не используют для градуировки, поскольку возможно прохождение лучей не только между центрами пьезопластин

Вопросы для самопроверки

1. Почему нужно настраивать толщиномер последовательно несколько раз по образцам малой и большой толщины?
2. Когда необходимо проверять настройку толщиномера по СОП?
3. Как называются ошибки, величина которых одинакова во всех измерениях, проводимых одним и тем же методом, с помощью одних и тех же измерительных приборов?
4. От каких факторов зависит максимальная измеряемая толщина?
5. Опишите требования к качеству подготовки поверхности для ультразвуковой толщинометрии.
6. Как должен располагаться акустический экран ПЭП при измерении толщины труб относительно образующей трубы?
7. Как влияет непараллельность поверхностей стенок изделия на возможность и точность измерения толщины?
8. Как называются ошибки, приводящие к результату, существенно отличающемуся от ожидаемого в данных условиях?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1

Значения физических характеристик для некоторых материалов

Материал	Модуль упругости E (мн/м ²)·10 ⁻³	Плотность ρ (кг/м ³)·10 ⁻³	Коэффициент Пуассона σ	Скорость звука (м/с)		Удельное волновое сопротивление (кг/(м ² ·с))·10 ⁻⁶
				C _l	C _t	
Алюминий	7,1	2,7	0,34	6260	3080	16,9
Вольфрам	36,2	19,1	0,35	5460	2620	104,2
Углеродистая сталь	20,4	7,8	0,28	5850	3230	45,6
Молибденовая сталь	18,6	8,4	0,28	5320	2950	44,5
Чугун	20,5	8,8	0,27	3500...5600	2200...3200	29,0
Никель	12,5	8,9	0,31	5630	2960	41,8...49,5
Медь	12,5	8,9	0,35	4700	2260	24,2...41,8
Олово	5,5	7,3	0,39	3320	1670	24,2
Титан	19,8	4,5	-	6000	3500	27,0
Магний	4,1	1,74	0,33	4600	2200	7,82
Полистирол	-	1,1	-	2370	1120	2,61
Секло органическое	-	1,18	-	2670	1120	3,14
Резина	-	0,9	-	1480	-	1,4
Эбонит	-	1,3	-	240	-	3,12
Эпоксидная смола	-	1,1	-	2600	-	2,86
Фторопласт	-	2,2	-	1350	-	3,5
Вода	-	0,998	-	1490	-	1,49
Масло транс-фоматорное	-	0,9...0,92	-	1380...1400	-	1,25...1,27
Спирт	-	0,79	-	1200	-	0,92
Воздух	-	1,3·10 ⁻³	-	331	-	4,3·10 ⁻⁴
Водород	-	0,9·10 ⁻⁴	-	1248	-	1,1·10 ⁻⁴

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Приборы ультразвуковой толщинометрии

Ультразвуковые толщинометры серий DM 4, DM 4E, DM 4DL



Рис. 1. Ультразвуковой толщиномер DM 4DL

Легкие компактные и простые в обслуживании ультразвуковые толщинометры для измерения толщины стенок изготавливаемого и работающего оборудования, в особенности объектов, подвергающихся коррозии. Пригоден для измерения на изделиях из различных материалов.

Исполнение DM4 и DM4DL имеет режим DUAL MULTI для измерений толщины основного материала, за исключением толщины покрытия.

Семейство толщиномеров DM4E, DM4 и DM4DL имеет несколько возможностей, облегчающих их эксплуатацию:

- автоматическая коррекция нуля, обеспечивающая быструю и достоверную калибровку при легком управлении. В приборе во время измерений непрерывно проводится коррекция нуля, что предотвращает зависимость настройки от изменения характеристик преобразователя, как, например, истирание или температурные изменения;
- автоматическая коррекция траектории распространения звука, рассчитанная на преобразователи фирмы «Крауткрамер», обеспечивающая линейность измерений во всем диапазоне толщин;
- в режиме измерений с фиксацией минимального значения постоянно индицируется и запоминается наименьшая толщина в исследуемой области изделия;
- многообразие применяемых преобразователей – в том числе диалоговых с автоматическим распознаванием типа или высокотемпературных;

- указанные возможности делают семейство толщиномеров DM 4E, DM 4 и DM 4DL особо удобным для оценки точечной коррозии.

Дополнительно в DM 4DL:

- встроенная память на 5390 результатов измерения;
- распечатка протокола через последовательный интерфейс;
- обработка и анализ результатов с помощью программы пользователя или стандартную программу Terminal.

Таблица 1

Параметр	Значение
Диапазон измерений:	0,5...500 мм по стали при обычных измерениях, зависит от преобразователя, материала, поверхности;
Разрешающая способность индикации:	0,01 мм для толщин до 99,99 мм; 0,1 мм для толщин > 99,99 мм;
Скорость ультразвука:	1000...9999 м/с;
Частота индикации:	4 Гц; 25 Гц в режиме фиксации минимального значения;
Индикатор:	4-х значный ЖК-индикатор с включаемой подсветкой, размер цифр 12,7 мм;
Интерфейс:	RS 232C (только в DM 4DL);
Запоминание результатов:	5390 измерений с разбивкой на файлы с числом до 999 (только в DM 4DL);
Рабочий диапазон температур	-20 + 50 С;
Время работы от комплекта батарей	: до 200 часов (без включения подсветки);
Питание:	2 сухих элемента типа 316, 1,5 В
Размеры (ШхВхГ):	150 x 77 x 33 мм
Масса:	255 грамм, включая батареи

Ультразвуковой толщиномер с графическим дисплеем DMS 2



Рис. 2. Ультразвуковой толщиномер DMS 2

Особенности:

- индикация отраженных сигналов и структуры памяти объемом до 150 тыс. результатов измерения с комментарием;
- предел измерения 0,6...635 мм при работе с РС-преобразователями;
- измерение толщины по многократным отражениям (DUAL-MULTI);
- измерение толщины основного материала под плотно прилегающим лакокрасочным покрытием;
- наличие опции удвоения;
- отображение сигнала на экране и встроенная память;
- пределы измерения 0,2...635 мм при работе с совмещенными и РС-преобразователями, развертку типа В.

Технические характеристики толщиномера приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики толщиномера DMS 2

Параметр	Значение
Диапазон измерений: <ul style="list-style-type: none">• для DMS 2;• для DMS 2E	0,2...635 мм 0,66...635 мм (зависит от преобразователя, материала, поверхности и температуры изделия)
Скорость звука	1000...9999 м/сек
Полоса частот усилителя	0,5...15 МГц
Индикатор: <ul style="list-style-type: none">• ЖК в отраженном свете;• включаемая подсветка	71×95 мм 240×320 точек
Разрешающая способность измерений	0,01 мм или 0,1 мм
Тактовая частота	<ul style="list-style-type: none">• 4 или 8 Гц;• 32 Гц для режима MIN или развертки типа В
Интерфейсы	RS 232 C, полностью конфигурируемый; внешняя клавиатура через PS 2, параллельный порт
Встроенная память	до 150 000 результатов измерения и 1100 изображений на экране при развертке А или В с возможностью расширения через дополнительное устройство
Рабочая температура	от -100 °С до +500 °С
Питание	<ul style="list-style-type: none">• 4 сухих батареи или аккумулятора типа АА;• от сети переменного тока 220 В через сетевой блок питания

Параметр	Значение
Продолжительность работы	до 40 часов при тактовой частоте 4 Гц и подсветке
Размеры	256 x 129 x 30 мм
Масса	725 г, включая батареи

Стандартный комплект включает:

- комплект (4 шт.) сухих батарей.
- защитный резиновый чехол с лямкой.
- компакт-диск с инсталляционной программой для переустановки программного обеспечения.
- инструкция по эксплуатации на русском, немецком или английском языке.
- принадлежности, необходимые для работы с DMS 2: комплектация ультразвуковыми преобразователями и кабелями согласно задаче контроля.

Ультразвуковые толщиномеры ТУЗ-1 и ТУЗ-2



Рис. 3. Ультразвуковые толщиномеры ТУЗ-1 и ТУЗ-2

Назначение: предназначены для измерения толщины различных изделий из металлов и неметаллов, включая изделия, доступ к которым имеется только с одной стороны. Приборы могут быть использованы во всех отраслях промышленности. С помощью ТУЗ-1 и ТУЗ-2 измеряется толщина стенок трубопроводов, сосудов давления, котлов и других ответственных и особо опасных объектов, в том числе для определения степени коррозионного и эрозионного износа по остаточной толщине.

Особенности толщиномера ТУЗ-1:

- 3 режима измерений: обычный, дифференциальный (измерение отклонения от заданного размера), сканирование («захват» и индикация минимального значения толщины при движении преобразователя по поверхности);
- калибровка по одному образцу;
- коррекция погрешности за счет V-образной траектории распространения ультразвука;
- 3 уровня регулировки чувствительности;
- сигнализация недопустимого утонения объекта контроля;
- подсветка дисплея;
- встроенная память и выход на персональный компьютер (порт RS 232);
- аккумуляторное питание и контроль степени разряда батарей.

Особенности толщиномера ТУЗ-2:

- простота в эксплуатации; большой яркий дисплей;
 - калибровка по одному образцу;
 - коррекция погрешности за счет V-образной траектории распространения ультразвука;
 - автоматическая калибровка «нуля»;
 - 3 уровня регулировки чувствительности;
 - сигнализация недопустимого утонения объекта контроля;
 - аккумуляторное питание и контроль степени разряда батарей;
 - прочный алюминиевый корпус для тяжелых условий эксплуатации.
- Технические характеристики толщиномеров приведены в табл. 3.

Таблица 3

*Технические характеристики
толщиномеров ТУЗ-1 и ТУЗ-2*

Параметр	Значение	
	ТУЗ-1	ТУЗ-1
Диапазон измерения (по стали), мм	0,6...300	0,6...300
Рабочие частоты преобразователя, МГц	2,5; 5; 10	2,5; 5; 10
Погрешность измерения, мм	$\pm(0,1 + 0,005 H)$	$\pm(0,1 + 0,005 H)$
Разрешающая способность, мм	0,1	0,1
Дискретность установки скорости ультразвука, м/с	1	1
Диапазон установки скорости ультразвука, м/с	100...9999	100...9999
Емкость внутренней памяти	2400 измерений	-
Диапазон рабочих температур, °С	-10...+50	-20...+50

Параметр	Значение	
	ТУЗ-1	ТУЗ-1
Электрическое питание	аккумуляторное 2,4 В	аккумуляторное 4,8 В
Время непрерывной работы, час	не менее 25	не менее 20
Степень защиты корпуса	IP 53	IP 65
Габариты электронного блока, мм	164×84×30	126×85×35
Габариты преобразователя, мм	не более 25×40	не более 25×40
Масса с аккумулятором, кг	0,5	0,5

Толициномер A1209



Рис. 4. Ультразвуковой толициномер А 1209

Назначение: предназначен для измерения толщины стенок труб, котлов, сосудов, обшивок судов, литья, листового проката и других изделий из чёрных и цветных металлов. Поверхности изделий могут быть гладкими или грубыми и корродированными с шероховатостью до Rz160 и радиусом кривизны от 3 мм. Прибор позволяет контролировать изделия из металлов, покрытых краской, а также из пластмасс, стекла керамики. Им можно выявлять язвы коррозии площадью около 1 кв. мм на внутренних стенках труб толщиной более 2 мм.

Особенности:

- Автоматическая адаптация к состоянию поверхности изделия;
- Адаптация к ультразвуковым преобразователям;
- Индикация текущего значения толщины или минимального за интервал контроля;
- Индикация толщины с дискретностью 0,1 или 0,01 мм;
- Звуковая индикация приёма эхо-сигналов;
- Трёхуровневая индикация качества акустического контакта;
- Запись показаний с возможностью просмотра и коррекции;
- Инфракрасный порт связи с персональным компьютером;

- Подсветка индикатора для работы в темноте;
- Индикация состояния батареи питания;
- Автоматическое выключение питания.

Технические характеристики толщиномера приведены в табл. 4.

Таблица 4

Технические характеристики толщиномера А 1209

Параметр	Значение
Диапазоны измеряемых толщин (по стали): <ul style="list-style-type: none"> • с преобразователем на 10 МГц • с преобразователем на 5 МГц 	0,5...20 мм 0,9...300 мм
Погрешность измерений	$\pm(0,5 \% + 0,01$ или $0,1$ мм)
Диапазон перестройки скорости ультразвука	1000...9999 м/с
Питание (от элемента или аккумулятора размера АА)	3 шт
Продолжительность работы (от сухих элементов)	100...150 ч
Диаметры рабочих поверхностей преобразователей: <ul style="list-style-type: none"> • на 10 МГц • на 5 МГц 	6 мм 12 мм
Диапазон рабочих температур	от -20 до $+50$ °С
Габаритные размеры: <ul style="list-style-type: none"> • электронный блок • ультразвуковые преобразователи (5/10 МГц) 	127 х 66 х 30 мм 22×45 / 18×43 мм
Масса с элементами питания	290 г
Диаметры рабочих поверхностей преобразователей: <ul style="list-style-type: none"> • на 10 МГц • на 5 МГц 	6 мм 12 мм

Толщиномер А1270



*Рис. 5. Ультразвуковой толщиномер А 1270:
а – корпус толщиномера; б – преобразователь*

Назначение: предназначен для толщинометрии изделий из алюминия или его сплавов без применения контактных жидкостей. Возможно измерение толщины плоских, цилиндрических и сферических деталей и узлов из сплавов алюминия; дефектоскопия заготовок и изделий с целью обнаружения дефектов типа расслоений, неметаллических включений; контроль сотовых конструкций с обшивками из алюминиевых сплавов; диагностика степени коррозионного и эрозийного повреждения материалов; оценка степени анизотропии проката; контроль напряженно деформированного состояния деталей и узлов двигателей; контроль степени затяжки болтовых соединений.

Таблица 5

Технические характеристики толщиномера А 1270

Параметр	Значение
Диапазоны измеряемых толщин (по алюминию)	от 0,5 до 25 мм
Погрешность измерения толщины	$\pm (1 \% + 0,01 \text{ мм})$
Дискретность отсчета толщины	0,01 мм
Минимальный радиус кривизны контролируемой поверхности	300 мм
Шероховатость поверхности, не более	Rz40
Число запоминаемых результатов измерений	2000
Частота смены показаний, не менее	4 Гц
Питание (встроенная аккумуляторная батарея)	7,2 В
Продолжительность работы от сухих элементов	с подсветкой экрана не менее 8 часов, без подсветки не менее 10 часов
Размер отображающего поля экрана (76×56 мм)	320×240 точек
Диапазон рабочих температур	от $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Габаритные размеры электронного блока	245×120×40 мм
Масса с элементами питания	650 г

Описание:

А 1270 разработан для применения в аэрокосмической промышленности. Прибор рассчитан на использование совмещенного ЭМА преобразователя поперечных волн. Результат измерения отображается в мм с точностью до второго знака после запятой (одна сотая миллиметра). Результат контроля можно записать в энергонезависимую память и затем многократно просматривать на экране прибора. Накопленные

данные по USB порту можно перенести на внешний компьютер для последующего документирования и распечатки. Графическая и текстовая информация отображаются на жидкокристаллическом экране с подсветкой для работы при слабом освещении. Для управления прибором используется пленочная клавиатура. Для подключения ЭМА преобразователя применены разъемы LEMO серии 0B.

Особенности:

Использование совмещенного ЭМА преобразователя сдвиговых (SH) волн; работа без применения контактной жидкости; слабая зависимость результатов измерений от неровностей поверхности; наличие памяти для хранения данных; возможность вывода данных на PC через USB-порт; корреляционная обработка сигналов.

Базовый комплект поставки:

электронный блок ЭМА толщиномера, ЭМАП E7590 (для толщинометрии изделий из алюминия; 0,5...25 мм), чехол, зарядное устройство с контроллером питания, сетевой адаптер с кабелем, кабель USB типа AB, программа для переноса данных из А 1270 в ПК, сумка.

Технические характеристики толщиномера приведены в табл. 5.

Толщиномер T-MIKE ES

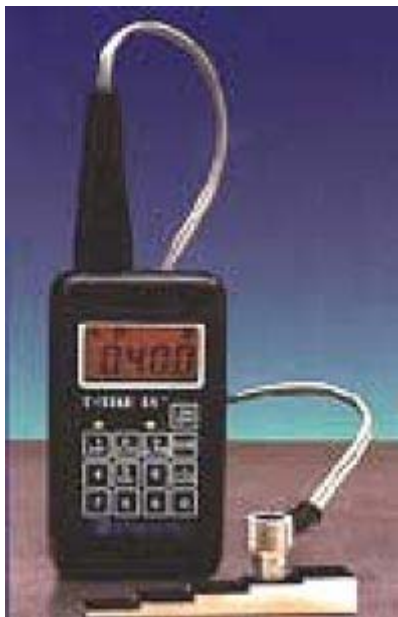


Рис. 6. Ультразвуковой толщиномер T-MIKE ES

Назначение: для быстрого измерения малых толщин; регулируемый порог чувствительности – индикация на LED дисплее, для привлечения внимания оператора, когда размер толщины выше или ниже выбранного значения; функция отклонения показывает положительное или отрицательное различие между заданной и измененной толщиной; име-

ется связь с компьютером для сохранения данных, а так же составления отчетов. T-Mike ES обычно комплектуется отдельно-совмещенным преобразователем на 5 МГц.

Особенности:

- Прост в эксплуатации.
- Приспосабливаемая материальная калибровка
- Просматривает способ для быстрого испытания
- Минимальный показ толщины
- Индикация отклонения от номинальной толщины
- Эргономичный корпус и клавиатура индустриального исполнения 300 часов работы от 4-х щелочных батареи AA типа.

Технические характеристики толщиномера приведены в табл. 6.

Таблица 6

Технические характеристики толщиномера T-MIKE ES

Параметр	Значение
Габариты:	64 x 114 x 33 мм
Вес:	312 г
Корпус:	алюминиевый
Клавиатура:	водонепроницаемая
Дисплей:	LCD цифровой с янтарной подсветкой крупные цифры индикатор контакта ПЭП и объекта переключение дюймы / миллиметры мигание дисплея при разряженных элементах питания
Измеряемые толщины	0,6 mm – 500 mm (зависит от типа ПЭП, состояния поверхности объекта контроля его температуры и материала)
Питание:	4 Alkaline или NiCad элемента питания типа AA легко заменяемые 300 часов работы 80 часов работы с подсветкой
Материалы:	быстрая и легкая калибровка для широкого разнообразия металлов и пластмасс, включая стали, нержавеющей стали, алюминий, чугун и оргстекло

Толщиномер A1207C

Назначение: для оценки износа рельсов и измерения фактической толщины металлических деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта, измерения толщины стенок металлических и пластиковых труб, котлов, сосудов, обшивок с шероховатостью поверхностей до Rz160 и радиусом кривизны от 40 мм.

A1207C применяется на транспортных, трубопрокатных и машиностроительных предприятиях, в химической, пищевой, нефтегазовой промышленности, в судостроении и судоремонте, тепловой и атомной энергетике, в коммунальном хозяйстве.



Рис. 7. Ультразвуковой толщиномер A1207C

Особенности:

- Встроенный износостойкий совмещенный преобразователь на 2,5 МГц
 - Возможность работы на сильном морозе
 - 4 предустановленные скорости ультразвука с возможностью их изменения
 - Низкая стоимость
 - Простота и удобство использования
 - Малые габариты и масса
 - Экономичность
 - Возможность замены пользователем встроенного УЗ преобразователя
 - Полный цифровой тракт
 - Встроенный аккумулятор
 - Разъем для внешнего источника питания и заряда аккумулятора
- Технические характеристики толщиномера приведены в табл. 7.

Таблица 7

Технические характеристики толщиномера A1207C

Параметр	Значение
Диапазоны измеряемых толщин (по стали)	от 10 до 250 мм
Погрешность измерений	± 0,5 % от измеряемой толщины ± 0,1
Диапазон настроек скорости ультразвука	от 1000 до 9000 м/с
Время работы без подзарядки аккумулятора	24 ч
Диаметр рабочей поверхности преобразователя	10 мм
Диапазон рабочих температур	от -30 до +60 °С
Габаритные размеры электронного блока	140×25×16 мм
Масса	55 г

Подводный толщиномер CYGNUS



а

б



в

*Рис. 8. Подводный толщиномер CYGNUS:
а – корпус толщиномера; б – преобразователь;
в – внешний вид комплекта поставки*

Назначение: предназначен для измерения остаточной толщины металлических конструкций, обшивки корпусов судов, стенок трубопроводов под водой. Толщиномер имеет сертификат Ллойда и одобрен к использованию Международной Ассоциацией классификационных обществ, членом которой является Российский Морской регистр судоходства.

Описание:

Принцип работы толщиномера CYGNUS 1 основан на измерении временной задержки между излучаемым ультразвуковым импульсом и принимаемыми отраженными «эхо-сигналами», так называемый способ измерения «эхо-эхо». Величина временной задержки, а также количество принятых «эхо-сигналов» определяют действительную толщину металла без учета защитного лакокрасочного или битумного покрытия. Таким образом, с помощью толщиномера CYGNUS 1 возможно проведение замеров толщины металла без предварительной подготовки поверхности и удаления защитного покрытия.

Конструктивно толщиномер представляет собой блок измерения, совмещенный с блоком питания в едином герметичном корпусе, и выносной датчик на кабеле для непосредственного контакта с поверхностью. Конструкция датчика позволяет получать данные практически на любых профилях конструкций, в том числе и на сильно корродированных поверхностях, а использование звукопроводящей защитной мембраны исключает физический износ материала датчика при работе на необработанных шероховатых покрытиях.

Прибор прост в использовании и не требует специальных знаний и навыков при эксплуатации и проведении технического обслуживания. После включения толщиномер работает в автоматическом режиме постоянно излучая и принимая ультразвуковые сигналы. Встроенная система самодиагностики определяет количество отраженных «эхо-сигналов» и позволяет избежать вывода ложных значений. Измерение толщины принимается достоверным и отображается на экране толщиномера или надводном устройстве только при регистрации не менее трех «эхо-сигналов».

Благодаря применению современных электронных компонентов техническое обслуживание толщиномера сведено к минимуму. Толщиномер не требует дополнительной калибровки в процессе выполнения работ, т. к. подстройка на «ноль» производится автоматически при получении первого «эхо-сигнала». Для работы с различными типами металлов в инструкции по эксплуатации приводится таблица корректировочных коэффициентов результатов измерений. При необходимости возможна дополнительная настройка прибора под конкретный тип металла с помощью специального калибровочного инструмента, входящего в комплект ЗИП. В комплект ЗИП также входят все необходимые запасные части, смазочные материалы и инструменты для проведения технического обслуживания прибора, в том числе и десять комплектов уплотнительных колец и защитных мембран.

Особенности:

Отличительной особенностью толщиномера CYGNUS 1 является возможность использования его как в автономном варианте, так и в комплекте с устройством отображения данных на поверхности: цифровым репитером или персональным компьютером. В первом случае водолаз считывает данные с жидкокристаллического индикатора повышенной яркости на корпусе толщиномера. Во втором – данные с толщиномера через соединительный кабель поступают на поверхность, где отображаются на цифровом репитере или персональном компьютере. Специальное программное обеспечение дублирует показания толщиномера на экран монитора, а также позволяет сохранять значения в файл с возможностью ком-

ментариев по каждому измерению. В дальнейшем файл данных может быть переконвертирован в формат Word или Excel.

Дополнительно прибор может быть укомплектован устройством отображения и сохранения данных измерений на поверхности, включающий в себя соединительный кабель длиной до 1000 м и устройство отображения/хранения информации по выбору: цифровой репитер сигнала или персональный компьютер со специальным программным обеспечением, запасными комплектами уплотнительных колец и защитных мембран.

Специальная модификация толщиномера позволяет устанавливать его на миниатюрные и малогабаритные телеуправляемые подводные аппараты. При таком способе использования измеряемые данные передаются на поверхность по кабель-тросу подводного аппарата и отображаются на мониторе оператора.

Технические характеристики толщиномера приведены в табл. 8.

Таблица 8

Технические характеристики толщиномера CYGNUS 1

Параметр	Значение
Диапазон измерения скорости звука для работы с различными типами металлов и сплавов, м/с	2000...7000
Толщина измеряемого металла, мм	1...250
Точность измерения, мм	±0,1
Допустимая толщина защитного покрытия (краска, битум, эпоксидная смола и т. п.)	до 5 мм
Рабочая температура	-10...+30 °С
Источник питания	аккумуляторы 7,5 В
Время непрерывной работы от одного источника питания, ч	не менее 16
Габариты, мм (длина / диаметр)	237 / 85
Вес, кг	0,98
Рабочая глубина, м	300

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн 2. Акустические методы контроля: практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов / под ред. И.Н. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Изд-во. Иностран. Литературы, 1956 (1957).
3. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль: учебник для специалистов 1 и 2 уровней квалификации. – М.: НПО ЦНИИТМАШ, 1993. – 202 с.
4. Йофе В.К., Мясникова Е.Н., Соколова Е.С. Сергей Яковлевич Соколов. – С.-Петербург.: ГЭТУ, 1997. – 176 с.
5. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
6. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник. В 2 кн. / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. Кн. 2. – 352 с.
7. Бреховский Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
8. Викторов И.А. Ультразвуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
9. Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. – Киев: Техника, 1972. – 469 с.
10. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
11. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
12. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. – С.-Петербург: Изд-во. «Радиоавионика», 1995.
13. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: справочник. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
14. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля многослойных конструкций из композитных материалов. – М.: Машиностроение, 1991.
15. Методы акустического контроля металлов / под ред. Н.П. Алешина. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
16. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композитных материалов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 261 с.

17. Скучик Е. Основы акустики. В 2 т. – М.: Мир, 1976. Т. 1, 2. – 546 с.
18. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред И.П. Голяминой. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
19. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
20. Физическая акустика. В 4 т. / под ред. У. Мэсона. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Ч. А. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
21. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1965. – 392 с.
22. Акустическая диагностика на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич и др. – М.: Наука, 1998. – 304 с.

Учебное издание

КОРОТКОВ М.М.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ

Учебное пособие

Издано в авторской редакции


Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*

Подписано к печати 28.09.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 5,47. Уч.-изд. л. 4,94.
Заказ ____-11. Тираж 35 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru