

## Тема 8. «Ультразвуковой метод контроля»

Ультразвуковой метод контроля был предложен советским физиком С.Я. Соколовым в 1928 году и основан на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний с частотой 0,5 — 25 МГц в контролируемых изделиях с помощью специального оборудования — ультразвукового преобразователя и дефектоскопа.

В настоящее время метод ультразвукового контроля является одним из основных методов неразрушающего контроля. Методы ультразвуковой дефектоскопии позволяют производить контроль сварных соединений, сосудов и аппаратов высокого давления, трубопроводов, поковок, листового проката и другой продукции. Ультразвуковой контроль является обязательной процедурой при изготовлении и эксплуатации многих ответственных изделий, таких как части авиационных двигателей, трубопроводы атомных реакторов или железнодорожные рельсы.

По сравнению с другими методами неразрушающего контроля ультразвуковой метод обладает важными преимуществами:

- высокая чувствительность к наиболее опасным дефектам типа трещин и непроваров, пор и пр.;
- низкая стоимость;
- безопасность для человека (в отличие от рентгеновской дефектоскопии);
- возможностью вести контроль непосредственно на рабочих местах без нарушения технологического процесса;
- при проведении УЗК исследуемый объект не повреждается;
- возможность проводить контроль изделий из разнообразных материалов, как металлов, так и неметаллов;

К недостаткам ультразвукового метода контроля можно отнести:

-невозможность оценки реального размера и характера дефекта, трудности при контроле металлов с крупнозернистой структурой из-за большого рассеяния и сильного затухания ультразвука;

-повышенные требования к состоянию поверхности контроля по шероховатости и волнистости. Согласно «Инструкции по визуальному и звуковому контролю» РД 03-606-03 максимально допустимая шероховатость при ультразвуковом контроле составляет Ra 6,3 / Rz 40;

Согласно ГОСТ 23829-85 ультразвуковые методы контроля делятся на 2 большие группы:

1 группа - использующие излучение и приём акустических колебаний и волн (активные методы)<sup>4</sup>

2 группа - основанные только на приёме колебаний и волн (пассивные методы).



Методы	Описание
<b>Методы прохождения</b>	выявляют глубинные дефекты типа нарушения сплошности, расслоения.
<b>Методы отражения</b>	выявляют дефекты типа нарушения сплошности, определяет их координаты, размеры, ориентацию путём прозвучивания изделия и приёма отраженного от дефекта эхо-сигнала.
<b>Импедансный метод</b>	предназначен для контроля клеевых, сварных и паяных соединений, имеющих тонкую обшивку, приклеенную или припаянную к элементам жёсткости.
<b>Методы свободных колебаний</b>	применяются для обнаружения глубинных дефектов.
<b>Методы вынужденных колебаний (резонансные)</b>	применяются в основном для измерения толщины изделия и для обнаружения зоны коррозионного поражения, расслоений в тонких местах из металлов.

<b>Акустико-эмиссионный метод</b>	обнаруживает и регистрирует только развивающиеся трещины или способные к развитию под действием механической нагрузки (квалифицирует дефекты по степени их опасности во время эксплуатации).
-----------------------------------	--

Чувствительность ультразвукового контроля определяется минимальными размерами выявляемых дефектов или эталонных отражателей, выполненных в настроечном образце. В качестве эталонных отражателей обычно используют плоскодонные сверления, ориентированные перпендикулярно направлению прозвучивания, а также боковые сверления или зарубки.

**Сущность метода.** Звуковые волны не изменяют траектории движения в однородном материале. Отражение акустических волн происходит от границы раздела сред с различными удельными акустическими сопротивлениями. Чем больше различаются акустические сопротивления, тем большая часть звуковых волн отражается от границы раздела сред.

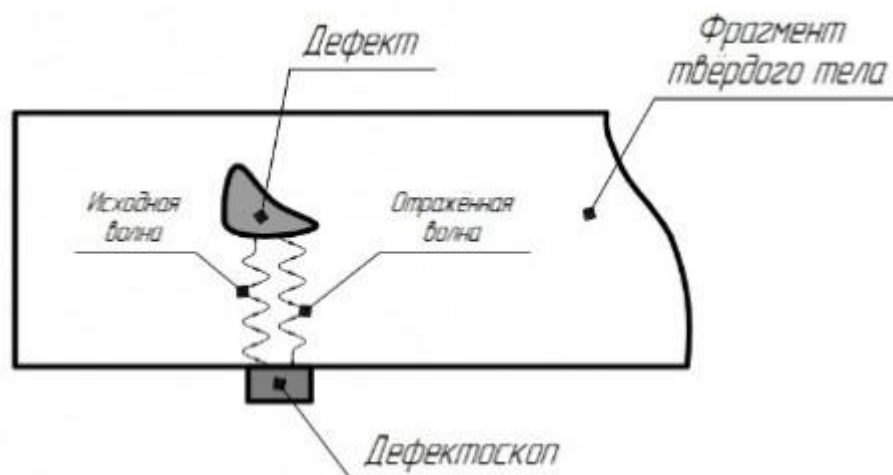


Рисунок 1 – Иллюстрация к сущности метода УЗК

Пустоты в металле обычно содержат газ или смесь газов, возникающих вследствие процесса сварки, литья и т.д. Эти газовые смеси не успевают выйти наружу при кристаллизации металла, то эти пустоты имеют удельное акустическое сопротивление примерно на пять порядков меньшее, чем сам металл. В этом случае отражение акустических волн будет практически полным и достаточно легко фиксируется.

Разрешающая способность акустического исследования, то есть способность выявлять мелкие дефекты отдельно друг от друга, определяется длиной звуковой волны, которая в свою очередь зависит от

частоты ввода акустических колебаний. Чем больше частота, тем меньше длина волны. Эффект возникает из-за того, что при размере препятствия меньше четверти длины волны, отражение колебаний практически не происходит, а доминирует их дифракция. Поэтому, как правило, частоту ультразвука стремятся повышать. С другой стороны, при повышении частоты колебаний быстро растёт их затухание, что сокращает возможную область контроля. Практическим компромиссом стали частоты в диапазоне от 0,5 до 10 МГц.

Существует несколько методов возбуждения ультразвуковых волн в исследуемом объекте. Наиболее распространённым является использование пьезоэлектрического эффекта. В этом случае излучение ультразвука производится с помощью преобразователя, который преобразует электрические колебания в акустические путём *обратного пьезоэлектрического эффекта*. Пройдя через контролируемую среду, ультразвуковые колебания попадают на приёмную пьезопластину преобразователя и, вследствие *прямого пьезоэлектрического эффекта* вновь становятся электрическими, которые и регистрируются измерительными цепями.

Прямой пьезоэффект представляет собой способность некоторых материалов образовывать электрические заряды на поверхности при приложении механической нагрузки, обратный пьезоэффект заключается в изменении механического напряжения или геометрических размеров образца материала под воздействием электрического поля. В качестве пьезоэлектрических материалов обычно используют естественный материал кварц, турмалин, а также искусственно поляризованную керамику на основе титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ), титаната свинца ( $\text{PbTiO}_3$ ) и цирконата свинца ( $\text{PbZrO}_3$ ).

В зависимости от конструкции и подключения, пьезопластины преобразователя могут выполнять роль только излучателя ультразвуковых колебаний или только приёмника, либо совмещать в себе обе функции.

Также используются электромагнитно-акустический (ЭМА) метод, основанный на приложении сильных переменных магнитных полей к металлу. КПД этого метода гораздо ниже, чем у пьезоэлектрического, но зато этот метод может работать через воздушный зазор и не требует особых условий к качеству поверхности.

Для обеспечения хорошего контакта между ультразвуковым преобразователем и контролируемой поверхностью, а также для предотвращения образования воздушного зазора, создающего помехи звуковому импульсу, необходимо использовать различные контактные жидкости или гели. Контактная жидкость должна иметь

специальный химический состав, соответствующий диапазону температур той или иной контролируемой поверхности и ее структуре. Так, для контроля арматурных стержней и неровных поверхностей необходимо использовать контактный гель высокой степени вязкости, при контроле нагреваемых поверхностей рекомендуется применять контактные гели на водной основе, а при очень низких температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) в качестве контактной жидкости можно использовать пропиленгликоль. Также стоит отметить, что в некоторых случаях (в частности, при контроле оборудования, используемого в ядерной промышленности) требуются контактные среды с ограниченным галогенным и серным составом.

Наиболее широкое распространение в практике ультразвуковой дефектоскопии нашли методы прохождения и отражения (импульсные методы), реже применяют другие методы: резонансный, импедансный и метод акустической эмиссии.

#### *Импульсные методы (прохождения и отражения)*

Среди многочисленных методов прохождения и отражения на сегодняшний день наибольшее применение в дефектоскопии нашли: теневой, зеркально-теневой, и эхо-метод. Эхо-метод, в отличие от других, применим при одностороннем доступе к исследуемому объекту, и при этом позволяет определить размеры дефекта, его координаты и характер.

В общем случае, суть перечисленных методов заключается в излучении в изделие и последующем принятии отраженных ультразвуковых колебаний с помощью специального оборудования - ультразвукового дефектоскопа и пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) и дальнейшем анализе полученных данных с целью определения наличия дефектов, а также их эквивалентного размера, формы, вида, глубины залегания и пр.

*Эхо-импульсный способ* самый широко распространённый и простой.

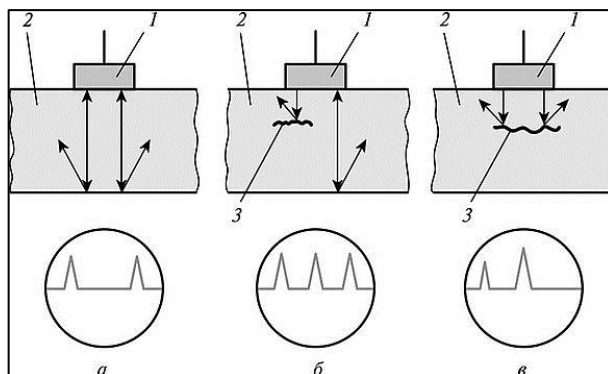


Рисунок 2 – Схема действия эхо-импульсного метода

Излучающий преобразователь можно одновременно использовать в качестве приемника. В момент посылки импульса на экране прибора возникает всплеск. Ультразвуковой импульс проходит через деталь 2 и, отражаясь от ее противоположной стороны, возвращается к излучателю. Приход отраженного сигнала также регистрируется прибором (а). Если на пути ультразвука в детали имеется дефект 3, то на экране прибора появится новый добавочный сигнал (б). Если дефект полностью перекрывает ультразвуковой пучок, то на экране прибора всплеск от отраженного импульса будет отсутствовать (в). Величина этого сигнала дает представление о размерах дефекта, а интервал между вводом в изделие начального импульса и приемом отраженного сигнала позволяет определить глубину его залегания.

Регистрация эхо-сигналов осуществляется путем преобразования в электрические импульсы отраженных волн, усиления и регистрации на экране электронно-лучевой трубки дефектоскопа. Причем усиление сигнала происходит нелинейно, т.е. более мощный сигнал усиливается в меньшей степени, чем более слабый. Также в усилителях предусмотрена поправка на глубину залегания дефекта: чем дальше запаздывание эхо-сигнала, тем больше он усиливается.

К достоинствам данного способа следует отнести:

-Возможность провести проверку с использованием только одного преобразователя;

-Хорошо находит внутренние дефекты;

-Очень точно определяет местонахождение дефекта.

Основные его недостатки это:

-К поверхностным отражателям помехоустойчивость оставляет желать лучшего;

-Отражённый сигнал слишком сильно зависит от того, как ориентирован дефект;

-Нельзя контролировать акустический контакт, когда преобразователь перемещается по проверяемому объекту, потому что эхо на участках без дефектов отсутствует.

В настоящее время этот метод получил наибольшее распространение. С его помощью проверяются лопатки роторов турбин и компрессоров авиационных двигателей, контролируются цапфы осевых шарниров втулок вертолетов, цилиндры двигателей внутреннего сгорания, барабаны колес, ответственные крепежные детали. Метод также применяется для определения толщины стенок деталей, структуры материала при одностороннем доступе к проверяемому изделию. Для получения надежных

результатов контроля дефектоскоп настраивают по эталонной детали с известным дефектом.

*Эхо-зеркальный метод.*

Является разновидностью эхо-метода, и используется для обнаружения дефектов, ориентированных вертикально к поверхности изделия.

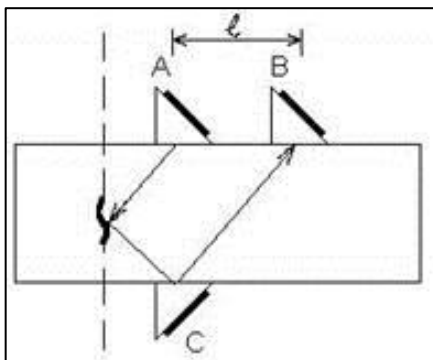


Рисунок 3 – Эхо-зеркальный метод

Обычным эхо-методом такой дефект не обнаруживается из-за очень малой площади его сечения в плоскости поверхности. Для обнаружения таких дефектов используются два преобразователя: наклонные искатели А и В располагаются на некотором расстоянии  $L$  с одной стороны изделия, либо второй тоже наклонный искатель С располагается с противоположной стороны. Расстояние  $L$  определяется толщиной изделия и углом ввода УЗК в изделие. Т.к. площадь дефекта в сечении, перпендикулярном вводимому наклонному лучу значительно превышает площадь нормального к поверхности сечения дефекта, то повышается вероятность обнаружения и чувствительность контроля. Иными словами, их располагают так, чтобы один прибор мог улавливать сигнал излучаемый другим. К недостаткам следует отнести необходимость менять через определённые промежутки времени расстояние между преобразователями.

*Теневой метод.*

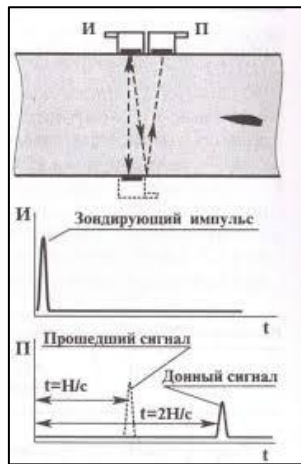


Рисунок 4 – Теневой метод

При теневом методе контроля о наличии дефекта судят по уменьшению амплитуды УЗ-колебаний, прошедших от излучателя к приемнику. Чем больше размер дефекта, тем меньше амплитуда прошедшего сигнала. Излучатель и приемник ультразвука располагают при этом соосно на противоположных поверхностях изделия, т.е. требуется доступ преобразователей к проверяемому изделию с двух сторон, причём устройства обязаны находиться на одной акустической оси.

Основные достоинства подобного метода это: хорошая помехоустойчивость и низкая зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта.

На данном слайде приведены принципиальные схемы работы различных методов УЗК.

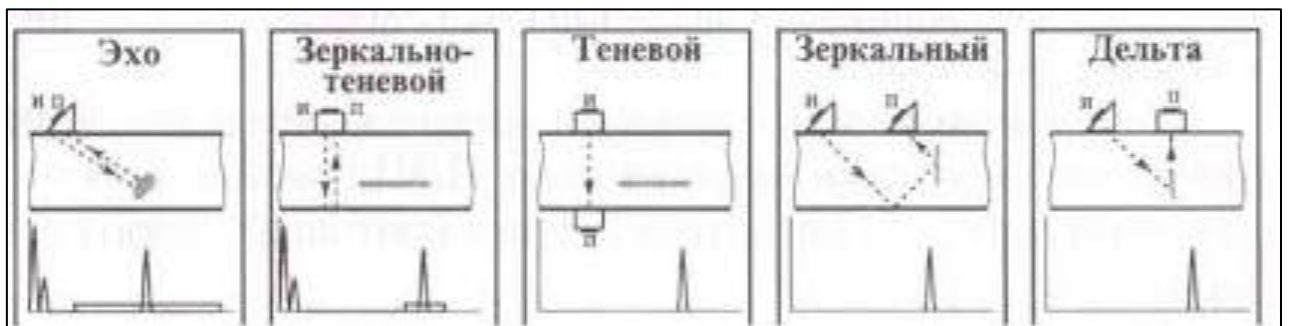


Рисунок 5 – Схемы работы разных методов УЗК

Самой массовой областью применения ультразвуковой дефектоскопии являются сварные соединения. Основным документом по ультразвуковому контролю сварных швов является ГОСТ 55724-2013 «Контроль



неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые», в котором рассмотрены в полном объёме методы контроля стыковых, тавровых, нахлесточных и угловых сварных швов, выполненных различными способами сварки.

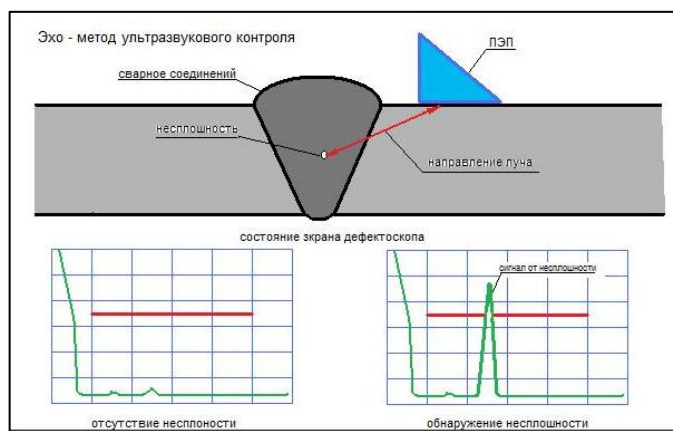


Рисунок 6 – Применение УЗК при контроле сварных соединений

В зависимости от области использования, различают ультразвуковые дефектоскопы общего и специального назначения. Дефектоскопы общего назначения могут использоваться для контроля самой разнообразной продукции, а специализированные дефектоскопы созданы для решения узкоцелевых задач. К наиболее популярным моделям ультразвуковых дефектоскопов общего назначения относятся:

<u>Ультразвуковой дефектоскоп УД2-70</u>	<u>Ультразвуковой дефектоскоп А1214 Expert</u>	<u>Ультразвуковой дефектоскоп УСД-60</u>	<u>Ультразвуковой дефектоскоп УД2В-П46</u>	<u>Ультразвуковой дефектоскоп STARMANS DIO 1000 SFE</u>
				

#### *Импедансный метод.*

Импедансный метод разработан советским ученым Ю.В. Ланге в 1958 году. Он основан на использовании зависимости полного механического сопротивления (импеданса) контролируемого изделия от качества соединения отдельных его элементов между собой. Этим методом можно выявлять дефекты в клеевых, паяных и других соединениях, между тонкой обшивкой и элементами жёсткости или заполнителями в многослойных конструкциях.

Импедансный метод основан на использовании зависимости полного механического сопротивления (импеданса) контролируемого изделия от качества соединения его отдельных элементов между собой. Механическим импедансом  $Z$  называют отношение возмущающей силы  $\Gamma$  к скорости  $V$  частиц среды в точке приложения силы:  $Z = \Gamma / V$ .

Метод применяется для контроля соединений, имеющих несколько слоев: обнаружения несплошности клеевых и паяных соединений, контроля качества посадки шпилек, штифтов, осей и других деталей, установленных с натягом. Наибольшее распространение получил контроль клеевого соединения обшивки с сотовым наполнителем. При данном контроле не требуется двустороннего доступа к изделию и нанесения контактной жидкости на его поверхность. Датчиком в этих дефектоскопах является стержень, совершающий продольные колебания. Если излучатель находится над участком обшивки с цельным клеевым соединением, то конструкция колеблется как единое целое и сила реакции изделия на стержень излучателя достигает большой величины (а), т.е. механический импеданс имеет максимальное значение, так как определяется жесткостью всей конструкции.

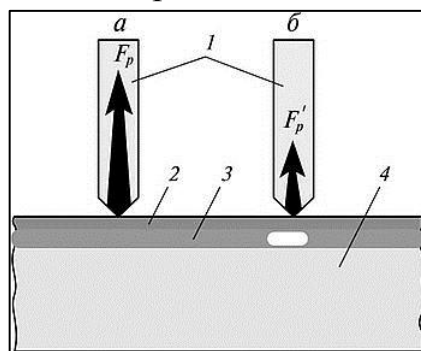


Рисунок 7- Импедансный метод УЗК: а — на участках с хорошей склейкой; б — в зоне непрочлея; 1 — датчики; 2 — внешний лист (обшивка); 3 — слой клея; 4 — внутренний лист (подложка);  $\Gamma_p$  — сила реакции

При нахождении излучателя над непрочлеенной зоной участок обшивки колеблется независимо от внутреннего листа-подложки, и сила реакции резко уменьшается, поскольку жесткость обшивки на этом участке будет значительно меньше. Изменение силы реакции фиксируется с помощью пьезоэлемента, помещенного на конце датчика (б). Изменение механического импеданса контролируемого изделия может быть обнаружено по изменению фазы силы реакции, оказываемой на излучатель возбуждаемыми в изделии упругими колебаниями, или по изменению ее амплитуды.

Техника контроля импедансным акустическим прибором относительно проста и заключается в том, что предварительно настроенный датчик перемещается по контролируемой поверхности. В процессе контроля необходимо следить, чтобы ось датчика не отклонялась от перпендикулярного положения более чем на  $10^\circ$ . Изменение силы реакции фиксируется загоранием лампочки или стрелочным индикатором.

Режим работы выбирают в зависимости от свойств контролируемых материалов и особенностей конструкции. Чувствительность импедансного метода зависит от конкретных условий его применения. Контроль соединений однородных слоев одинаковой толщины импедансным методом обычно невозможен. Для выбора оптимальных режимов контроля и определения чувствительности метода необходимы контрольные образцы с искусственными дефектами различных размеров. Эти образцы должны иметь те же основные параметры (толщину и материал обшивки и соединенных с нею элементов, размер сотовой ячейки и т.д.), что и контролируемое изделие. Длина и ширина образцов могут быть меньше, чем соответствующие размеры изделий.