Неразрушающий контроль материалов с помощью ультразвука

Основные понятия и принципы

Содержание

1. Почему используют ультразвук для неразрушающего контроля? 2
2. Задачи ультразвукового контроля 2
3. Обнаружение несплошностей 3
4. Методика контроля и техническое обеспечение 7
4.1 Ультразвуковой дефектоскоп 7
4.2 Проблема обнаружения 11
4.3 Преобразователь 13
4.4 Преломление и преобразование моды 14
4.5 Характеристики наклонных преобразователей 16
4.6 Раздельно-совмещенный преобразователь 17
5. Определение местоположения несплошностей 18
5.1 Калибровка инструмента 18
5.2 Определение дефектов с наклонным преобразователем 19
6. Оценка несплошностей 20
6.1 Метод сканирования 20
6.2 Оценка малых несплошностей: АРД метод 21
6.3 Затухание звука 25
6.4 Метод эталонных блоков 25
6.4.1 Сравнение амплитуд эхо-сигналов 25
6.4.2 Кривая амплитуда-расстояние (АРК) 26

1. Почему используют ультразвук для неразрушающего контроля?

Принцип ультразвукового метода контроля основан на том факте, что твердые материалы являются хорошими проводниками звуковых волн. Посредством чего, волны отражаются не только от граничных поверхностей, но и внутренних дефектов (трещины, различные включения и т.п.). Эффект взаимодействия звуковых волн с материалом усиливается по мере уменьшения длины их волн (и, соответственно, увеличения частоты колебаний).

$$\lambda = \frac{c}{f}$$, где

c - скорость звука [км/с];
f - частота [МГц];
λ - длина волны [мм].

Это означает, что ультразвуковые волны могут наиболее эффективно использоваться в диапазоне частот от 0.5 МГц до 25МГц. С более низкими частотами, эффект взаимодействия волн с внутренними дефектами снижается, и обнаружение дефектов в металлических структурах уже становится проблематичным (т.е. волны с большой длиной уже огибают дефекты).

Два наиболее часто используемых метода контроля внутренней структуры материала: рентгенография и ультразвуковые исследования частично перекрывают области применения друг друга и частично расширяют их.

Таким образом, многие задачи контроля можно решать более экономичным и безопасным ультразвуковым методом, а в ряде специальных проблем, как прежде, использовать рентген. В случаях, где предъявляются наиболее высокие требования безопасности (атомные электростанции, космическая промышленность) используются оба метода.

2. Задачи ультразвукового контроля

Если ограничить использование ультразвукового метода только обнаружением внутренних недостатков материала, то классификация задач оператора следующая:

1. Обнаружение отражателей
2. Определение их расположения
3. Оценка размеров отражателей
4. Определение свойств отражателей (тип, ориентация и т.п.).

Вместо использования слова “отражатель”, специалисты часто используют термин “несплошность”. Данный термин определяется как «неправильность в структуре объекта контроля, предположительно являющаяся дефектом». В действительности, только после определения местоположения, анализа и оценки, можно определить, действительно ли имеется недостаток, который влияет на работоспособность объекта контроля. Поэтому всегда используется термин "несплошность", пока нет уверенности, что выявленный отражатель, означает недопустимую неисправность, т.е. является «дефектом».

3. Обнаружение несплошностей

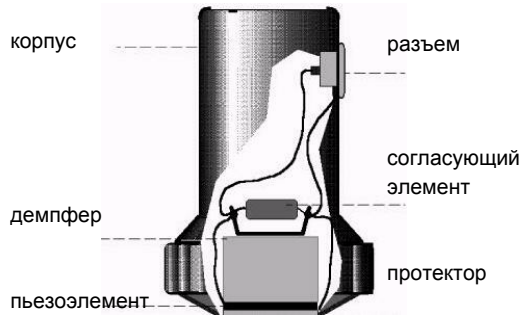


Рис.1а Прямой преобразователь

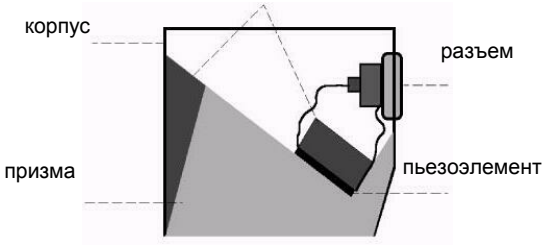


Рис.1б Наклонный преобразователь

Пьезоэлемент, возбуждаемый очень коротким электрическим импульсом, излучает ультразвуковой сигнал. Этот же элемент генерирует электрический сигнал при приеме ультразвуковых волн, вызывающих его колебания. Преобразователь контактирует с поверхностью объекта контроля с использованием специальной жидкости, либо пасты, для передачи ультразвуковых колебаний в объект контроля. Далее оператор сканирует объект контроля, т.е. плавно перемещает датчик по его поверхности. Во время этой процедуры, он внимательно наблюдает за дисплеем прибора для выявления сигналов, отраженных от несплошности, рис.2а+б.

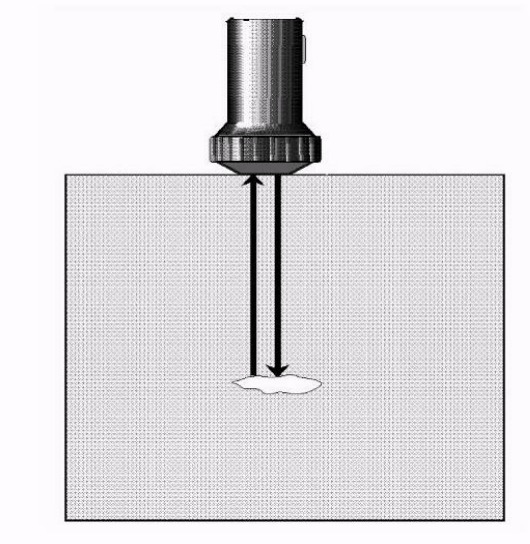


рис. 2а Обнаружение дефекта прямым излучением

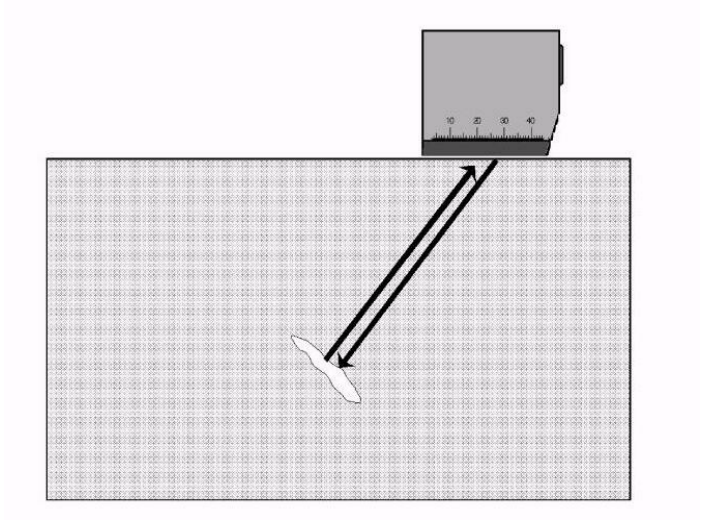


Рис. 2б Обнаружение дефекта при угловом излучении

Каждый датчик имеет некоторую направленность, т.е. ультразвуковые колебания охватывают только некоторую часть объекта исследований. Область, эффективная для ультразвукового контроля называется **«звуковым лучом»**, который является характеристикой датчика и материала, в котором проходят звуковые волны.

Звуковой луч может быть грубо разделен на сходящуюся (фокусную) область, **ближнюю зону**, и расходящуюся область, **дальнюю зону**, рис.3. Длина N ближней зоны и угол расхождения зависят от диаметра излучающего элемента, его эффективной частоты и скорости звука в материале объекта контроля.

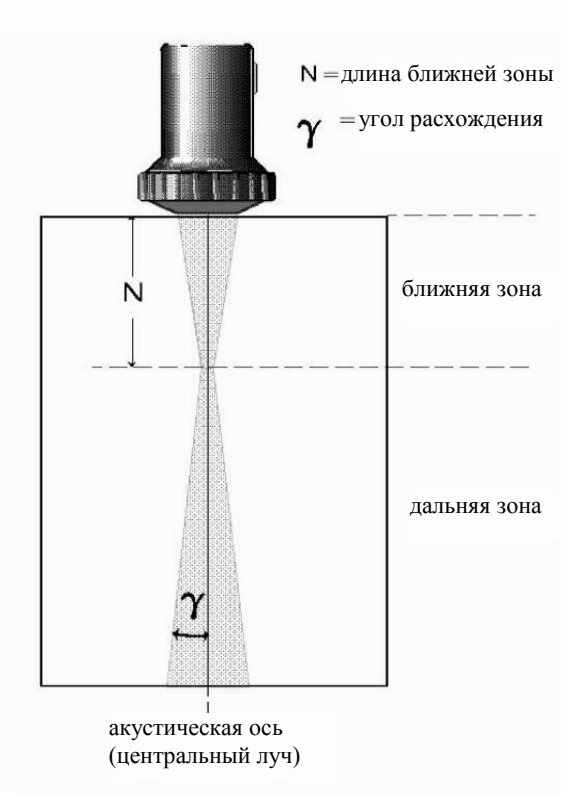


рис. 3 Звуковая зона

Центральный луч также называют **акустической осью**. Форма звукового луча играет важную роль в выборе преобразователя для решения поставленной задачи. Часто бывает достаточно построить акустическую ось, чтобы показать, как будет выглядеть решение проблемы.

Объемная несплошность (полое пространство, инородный материал) отражает звуковые волны в различных направлениях, рис. 4а+б.

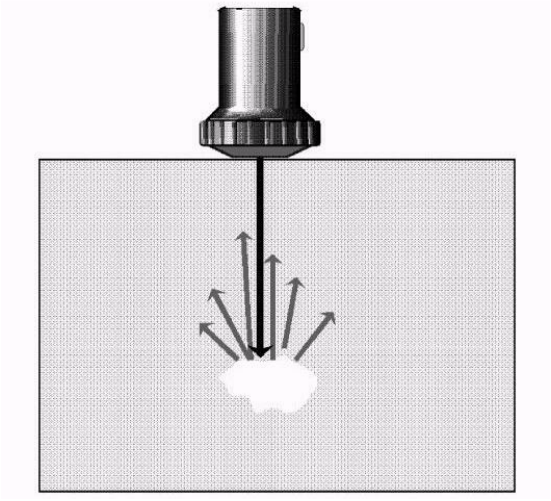


Рис. 4а объемная несплошность - прямой преобразователь

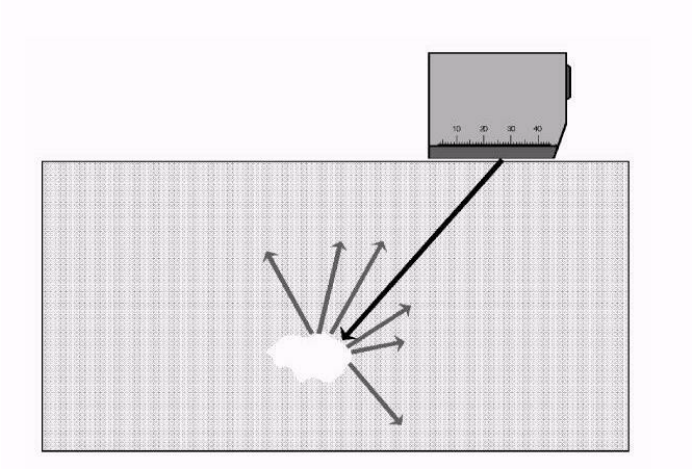


Рис. 4б Объемная неоднородность - датчик углового излучения

Часть звуковой волны, которая возвращается назад к преобразователю, после отражения от несплошности, главным образом зависит от направления самой звуковой волны, т.е. не имеет значения, проведено ли измерение прямым или наклонным

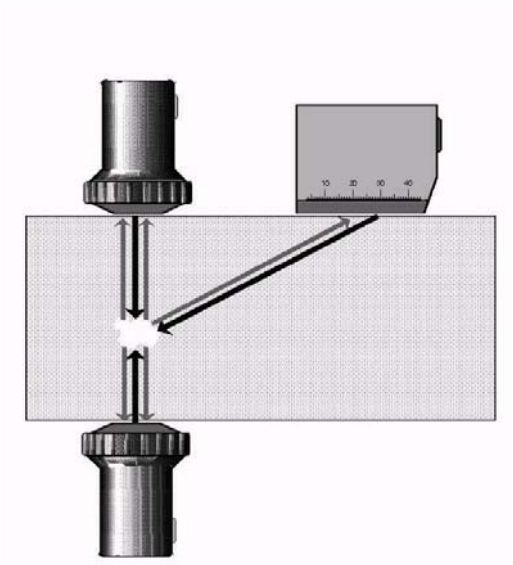


Рис. 5 Объемный дефект - обнаружение с различных поверхностей

преобразователем либо выполнено на различных поверхностях объекта контроля.

Если полученная часть отраженной звуковой волны является достаточной, тогда определение наличия объемной неоднородности не является проблематичным, т.е. оператор способен обнаружить ее при сканировании различных поверхностей объекта контроля.

Плоская несплошность (разрыв материала, трещина) отражает ультразвуковые волны в определенном направлении, рис. 6.

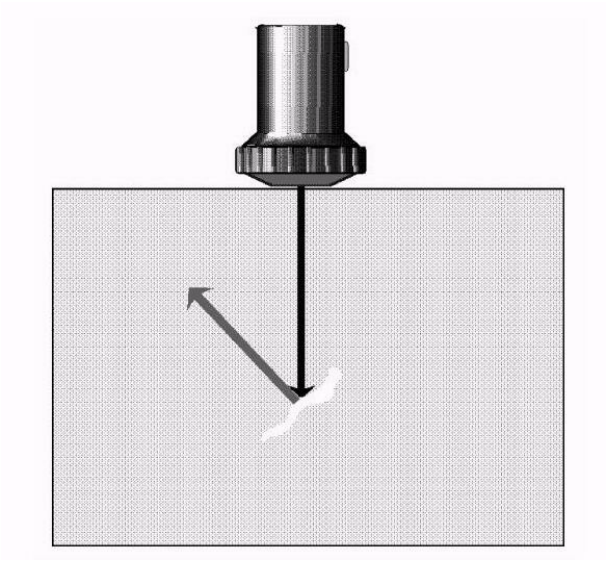


Рис. 6 Отражение от угловой, плоской несплошности

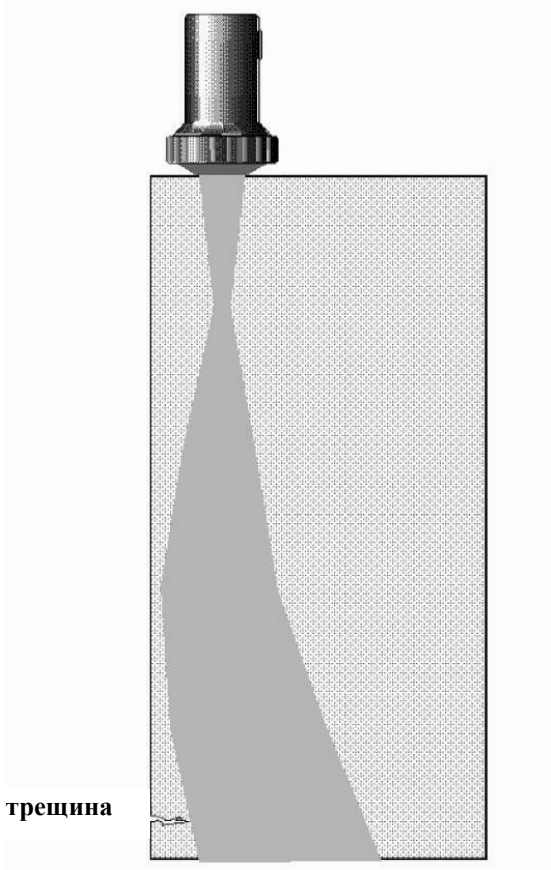


Рис. 7 Явное искажение звукового луча на боковой поверхности

Если отраженная часть звукового луча не получена преобразователем, тогда маловероятно, что несплошность будет обнаружена. Возможность обнаружения возрастает только при перпендикулярном попадании звукового луча.

При плоских несплошностях на открытой поверхности, таких как вертикальная трещина идущая с поверхности вглубь объекта, вертикальное сканирование не всегда приводит к желаемым результатам. В этом случае наблюдается перекрытие волн (интерференция) со звуковой волной отраженной от боковой поверхности объекта, в результате чего, звуковая волна отходит от боковой поверхности, рис. 7.

В подобных случаях, возможность обнаружения трещины весьма велика при применении **эффекта углового отражения**, рис. 8а. Под углом 90° между трещиной и поверхностью объекта испытаний, звуковые волны отражаются назад "внутрь себя" из-за двойного отражения, рис. 8б.

Использование эффекта углового отражения возможно даже тогда, когда плоская неоднородность, расположенная вертикально к поверхности, на саму поверхность не выходит. При условии, конечно, что отраженная о несплошность и о поверхность звуковая волна получена преобразователем, рис.9.

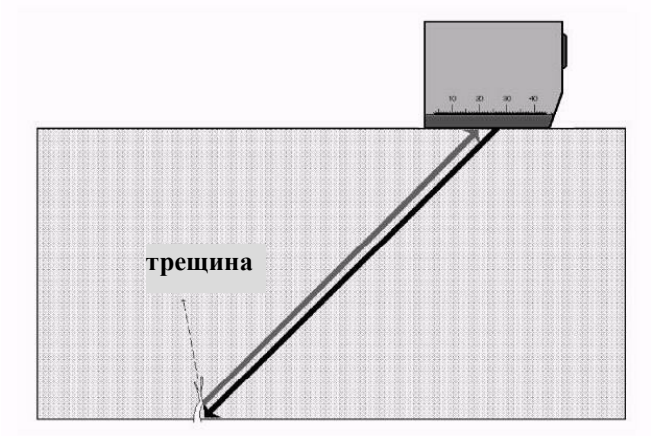


Рис. 8а Определение трещины при сканировании под углом 45°

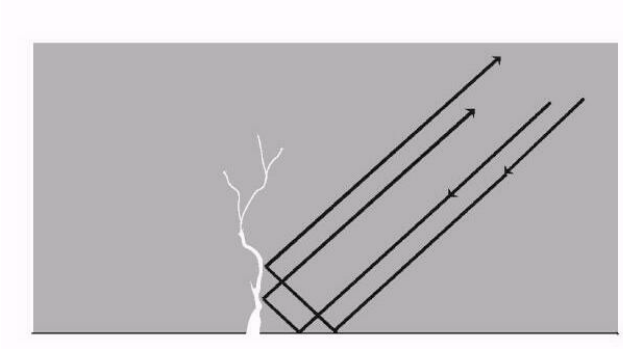


Рис. 8б Эффект углового отражения

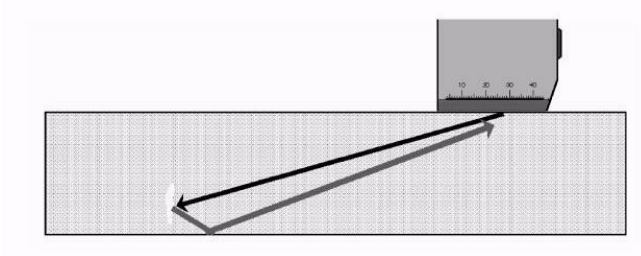


Рис. 9 Плоский, вертикальный отражатель близко с поверхностью.

Часто в толстостенных объектах, в которых имеются вертикальные несплошности, это условие не может быть выполнено, так как волны, отраженные от несплошности и поверхности не возвращаются к преобразователю. В этом случае используется второй преобразователь для получения отраженных частей звуковой волны, делая, таким образом, возможным обнаружение дефекта.

При таком типе исследований, **тандемной технике**, один из преобразователей используется в качестве передатчика, а второй как приемник. Оба движутся по поверхности объекта контроля со смещением на некоторое фиксированное расстояние. Сканирование проводится для вертикально расположенных несплошностей на различной глубине объекта контроля, зависящей от интервала датчика, рис. 10а, 10б и 10в.

Хотя, при наклонном сканировании в тонких объектах, существует возможность, что плоская несплошность может не попасть вертикально в волну (рис. 11а), чувствительность процесса намного лучше, особенно при предварительном подборе угла сканирования и частоты волны.

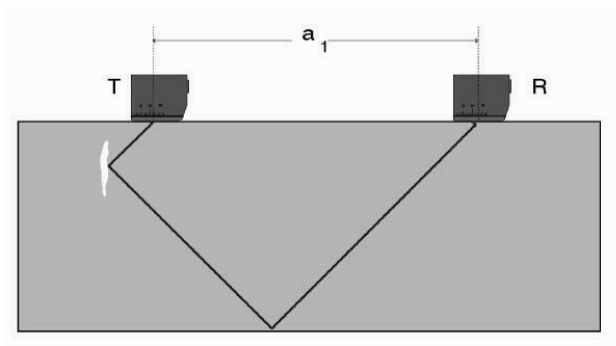


Рис. 10а Тандемный контроль в верхней зоне

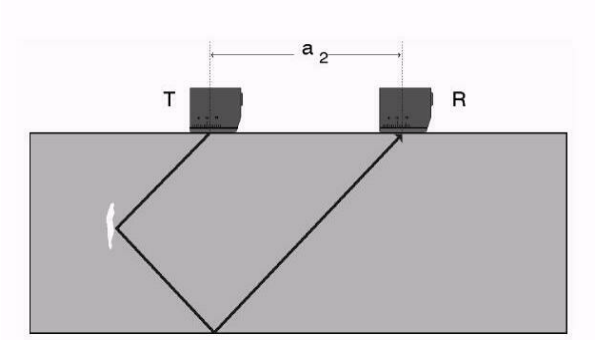


Рис. 10б Тандемный контроль в центральной зоне

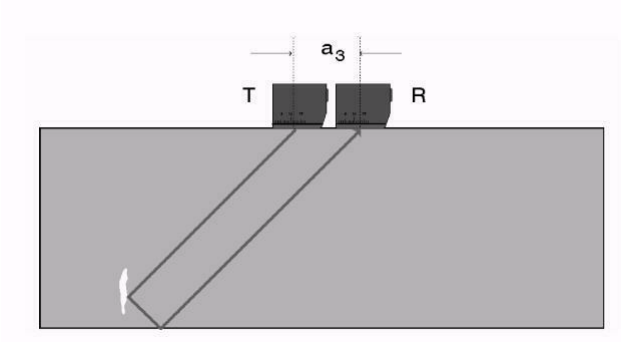


Рис. 10в Тандемный контроль в нижней зоне

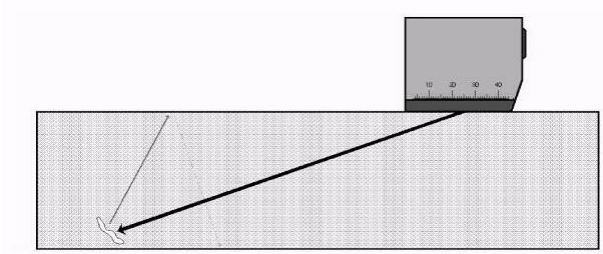


Рис. 11а Сканирование под углом 70° - неудачный выбор угла

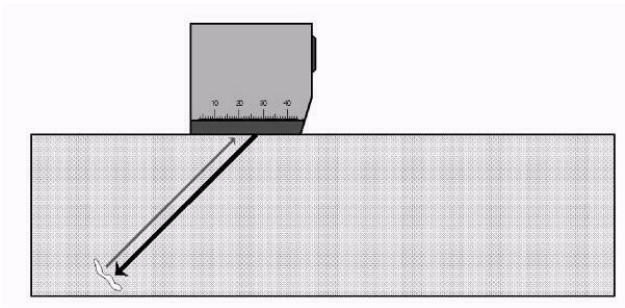


Рис. 11б Сканирование под углом 45° - правильный подбор угла.

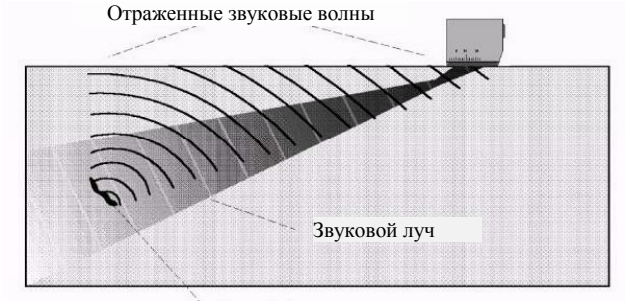


Рис. 11в Сканирование под углом 70° с частотой 2МГц; обнаружение с помощью большого расхождения звукового луча.

Обычно подобный метод применяют для контроля сварных швов толщиной до 30мм.

Без сомнения, возможность обнаружения несплошностей, которые вертикально не попадают в луч - меньше. Однако, подобные трудности обычно компенсируются дополнительным контролем с другим углом падения (рис. 11б), или с помощью использования датчика с пониженной частотой (рис. 11в). Типичную процедуру контроля можно найти в соответствующей литературе по контролю сварных швов.

4. Методика контроля и техническое обеспечение.

4.1 Ультразвуковой дефектоскоп

Прежде, чем перейти к дальнейшим задачам контроля и их решениям, необходимо в общих чертах ознакомиться с принципами работы ультразвуковой техники. Для примера, выбран упрощенный до примитива алгоритм работы аналогового дефектоскопа. Современная цифровая техника, конечно же, работает по-другому, однако принцип передачи и приема ультразвуковых колебаний остается неизменным.

Основываясь на том, что уже было сказано относительно местоположения несплошностей, мы должны передать короткие звуковые импульсы в контролируемый объект, чтобы измерить время прохождения звукового импульса от преобразователя до отражающей поверхности и назад. Это возможно только тогда, когда имеется четко определенное стартовое время и конечное время. Если скорость звука в объекте контроля известна, тогда, используя простые вычисления, можно определить расстояние до отражающей поверхности и таким образом точное положение несплошности в объекте контроля, рис. 12.

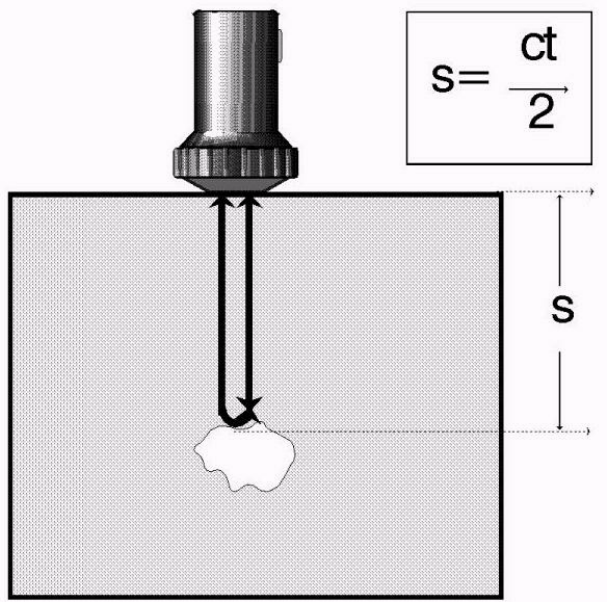


Рис. 12 Принцип измерения времени и пути импульса

Звуковые отражения в слышимом диапазоне называются **эхом**. Таким образом, возникло и имя метода, который применяется в большинстве областей контроля материалов с помощью ультразвука - **Импульсный Эхо Метод** (рис. 13)

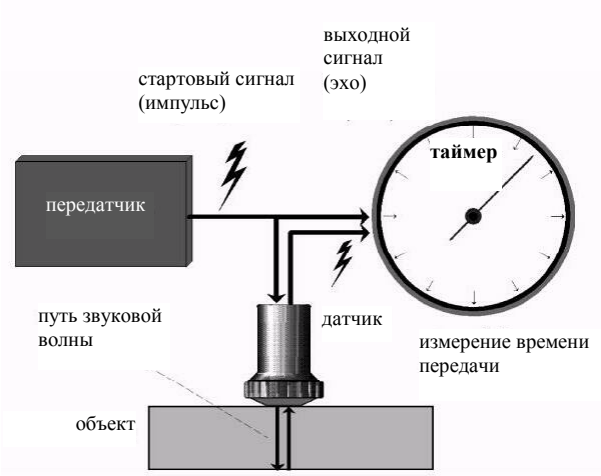


Рис. 13 Блок диаграмма импульсного эхо-метода

Измерение времени начинается с подачей электрического импульса передачи - **импульса возбуждения.** Это очень короткий электрический разряд, вызывающий звуковой импульс в пьезоэлементе преобразователя. Звуковой импульс проходит через материал и при отражении от несплошности или противоположной поверхности материала возвращается назад к преобразователю. Полученные колебания преобразуются в электрический импульс, останавливающий измерение времени. Расстояние до отражающей поверхности можно тогда рассчитать по следующей формуле:

$$s = \frac{ct}{2}$$, где

s - путь, звукового импульса [мм];
c - скорость звука в материале [км/с];
t - время прохождения импульса [с].

Если теперь время прохождения и амплитуду импульса отобразить в графическом виде, получится упрощенная модель универсального **Ультразвукового Дефектоскопа.**

Чтобы оценить параметры визуальных эхо - сигналов на экране расположена сетка. Регулируемая шкала с горизонтальными рисками называется **шкалой дисплея,** Рис. 14.

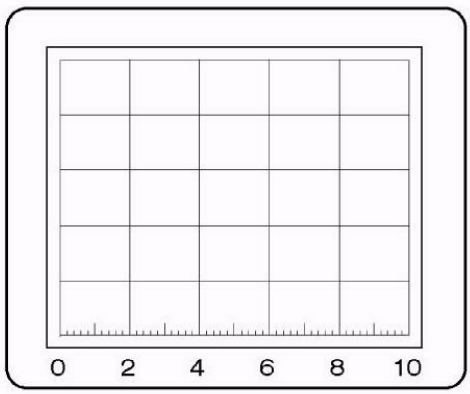


Рис. 14 Шкала дисплея

Используя шкалу, оператор может измерить параметры отраженного сигнала на экране. Как это делается? Как уже упоминалось, электрический импульс возбуждает звуковой импульс в преобразователе. В тоже время этот импульс напряжения подается на вход усилителя, и максимальная амплитуда определяет **вертикальное отклонение развертки** дисплея - данный импульс называют зондирующим, рис. 15а.

С данным зондирующим импульсом, горизонтальная развертка начинается в левом нижнем углу экрана синхронно с началом звуковых колебаний в объекте контроля, и движется вдоль базовой линии вправо с постоянной скоростью, рис.15б.

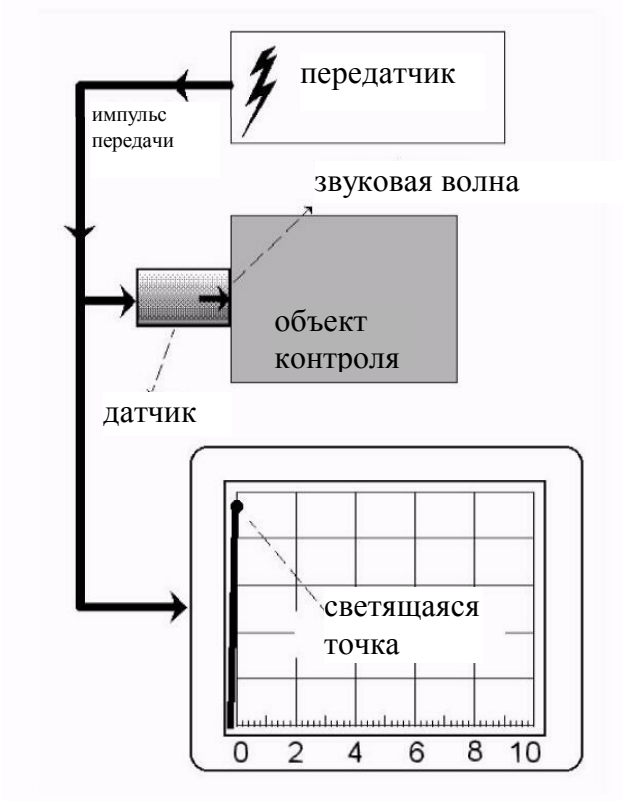


Рис. 15а Зондирующий импульс = начало

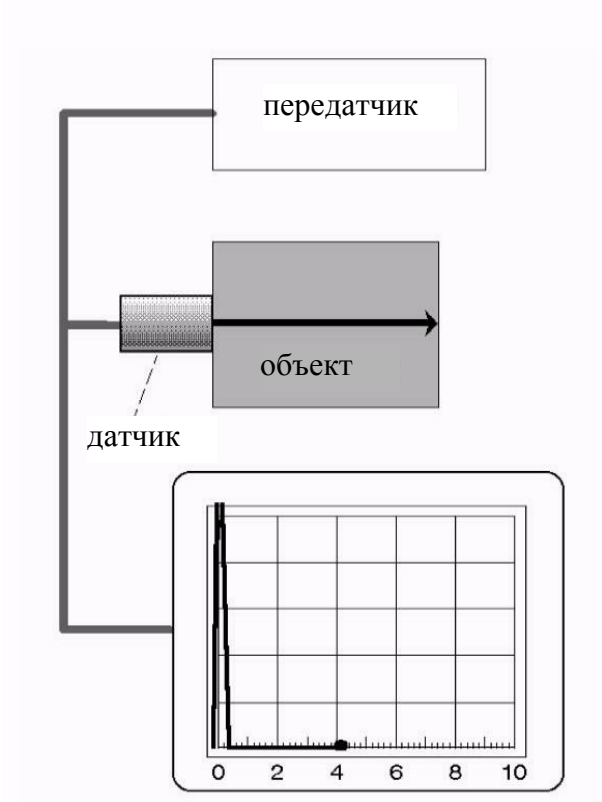


Рис. 15в Точка луча после 4-х делений шкалы

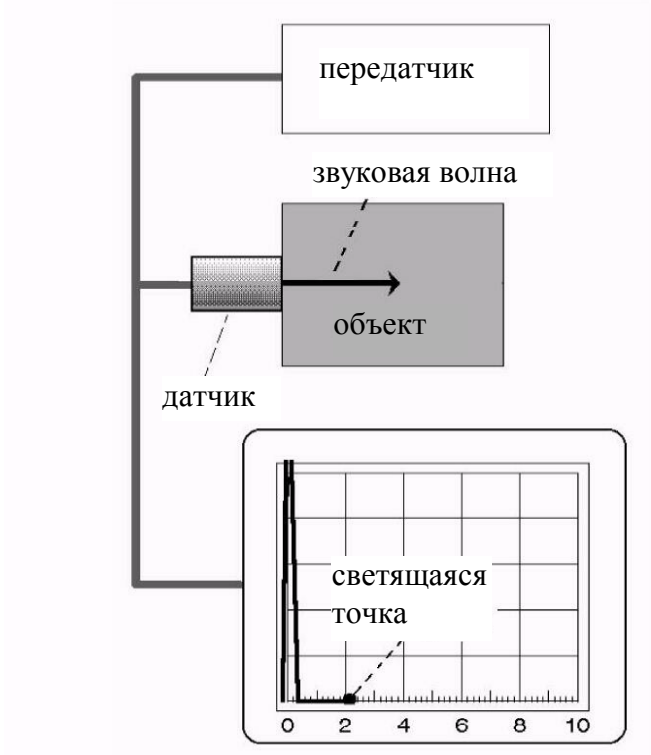


Рис. 15б После 10 мкс

Скорость импульса зависит от материала объекта контроля (скорость звука - это константа материала). **Скорость развертки** дисплея прибора может изменяться в широких пределах.

Таким образом, скорость развертки может быть точно согласована со скоростью звука. В нашем примере электронный луч достигает 4-го деления шкалы, когда импульс отражается от противоположной грани объекта, тогда ему, разумеется, необходимо некоторое время чтобы вернуться, т.е. точка на экране будет на 8м делении шкалы (рис. 16).

Часть звукового импульса, прошедшая через объект контроля и вернувшаяся к преобразователю, генерирует в кристалле (пьезопластине) небольшой электрический сигнал, который, после усиления, определяет вертикальное отклонение точки луча - **эхо сигнал от донной поверхности** (рис. 17). Отклонение происходит быстро, т.к. звуковой импульс короткий, и поэтому, может возбудить лишь короткий импульс напряжения в кристалле преобразователя.

Электронный луч возвращается быстро назад на базовую линию и продолжает идти вправо, пока большая часть импульса отражается от поверхности и проходит по объекту второй раз.

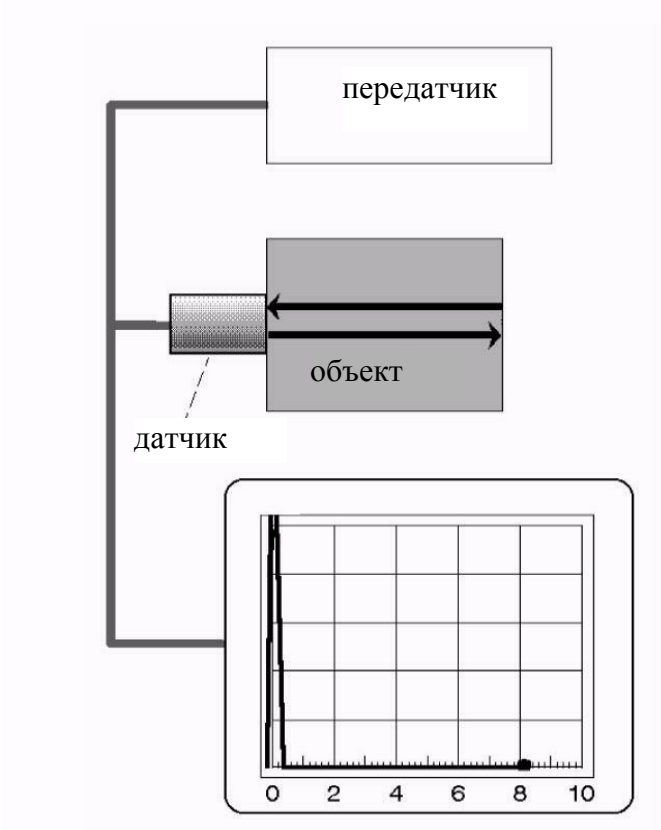


Рис. 16 Точка луча на 8 делении шкалы

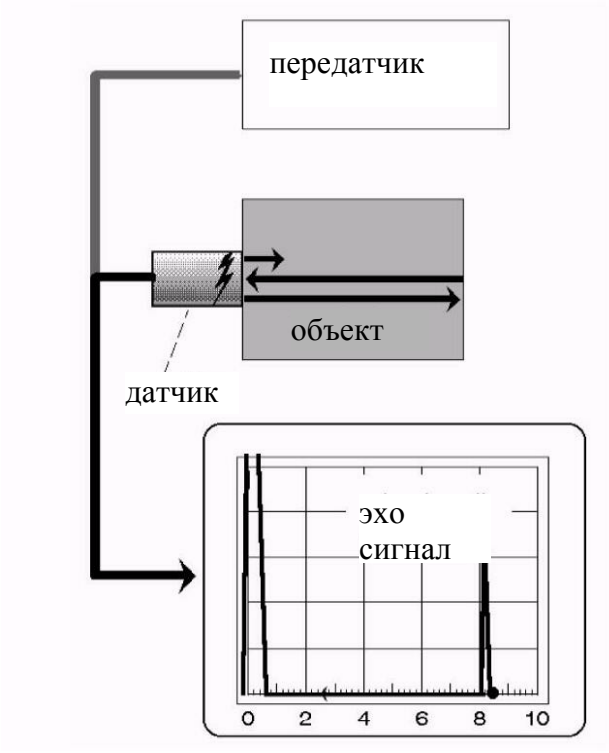


Рис. 17 Эхо сигнал на 8 делении шкалы

Индикация дисплея может быть выражена теперь в двух величинах:

1. Горизонтальная позиция -

Левый фланг эхо сигнала на 8 делении шкалы дисплея;

2. Вертикальная позиция -

70% высоты экрана.

В настоящее время это о многом нам не говорит, однако, позже мы увидим, что почти все необходимые результаты, которые мы получаем от ультразвукового контроля, основаны на этих двух показаниях. Давайте теперь рассмотрим процессы, происходящие в начальный момент времени: Зондирующий импульс начинается слева перед нулевой точкой шкалы. Возрастающий фронт импульса соответствует времени, когда электрический сигнал подается в кристалл и вызывает звуковые колебания. Однако, прежде, чем импульс пройдет через поверхность объекта контроля, он должен преодолеть **протектор** преобразователя (**задержку преобразователя**). Хотя он относительно невелик, тем не менее, на это требуется некий период времени (рис. 18а).

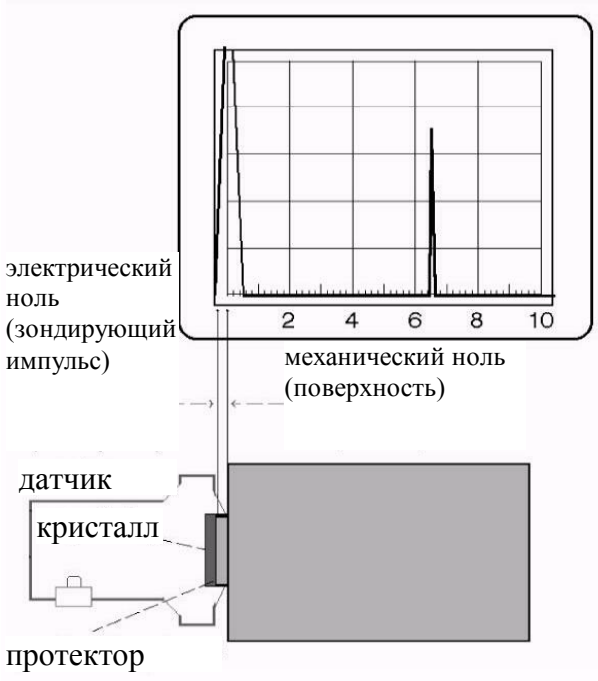


Рис. 19а Прямой преобразователь - задержка зондирующего импульса

В наклонных преобразователях звуковой импульс проходит гораздо больший путь задержки (например, сквозь призму из оргстекла) до передачи колебаний в объект контроля. В зависимости от типа преобразователя, задержка может быть так велика, что

зондирующий импульс не появляется на экране, рис. 18б.

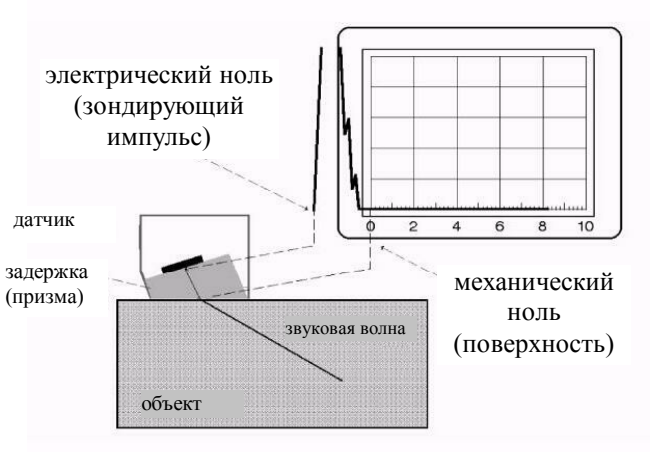


Рис. 18б Наклонный преобразователь - задержка зондирующего импульса

Мы уже ранее рассматривали эхо на 8м делении шкалы: если сигнал отражается от противоположной поверхности это - донное эхо. Теперь нетрудно догадаться, как будет выглядеть экран дисплея, в случае если внутри объекта контроля есть другой отражатель, например, разрыв материала:

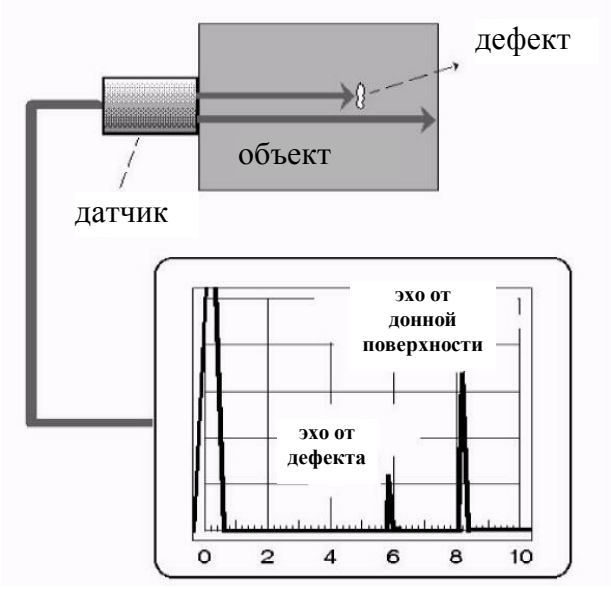


Рис. 19 Контроль объекта с несплошностью - эхо-сигнал от дефекта

между зондирующим импульсом и эхо-сигналом от граничной поверхности возникнет дополнительный эхо-сигнал (промежуточное эхо), вызванный частичным отражением звуковой волны от несплошности, Рис 19.

На рис 20а,б: промежуточное эхо ведет себя по отношению к донному эхо так же как и несплошность по отношению к противоположной поверхности объекта.

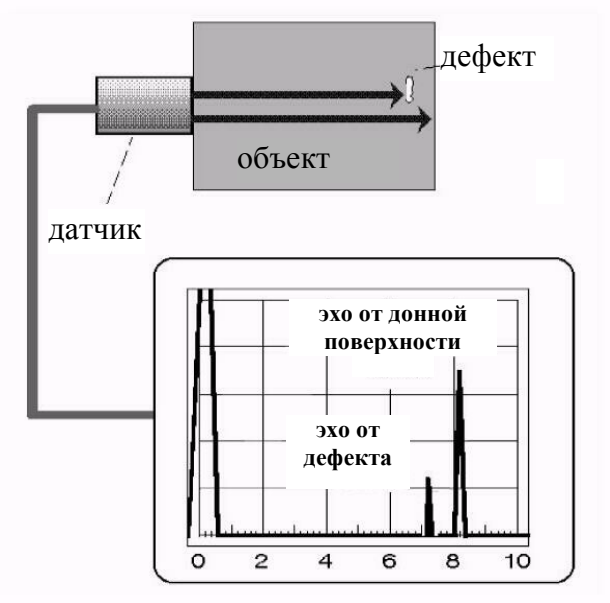


Рис. 20 а Несплошность рядом с противоположной стенкой объекта.

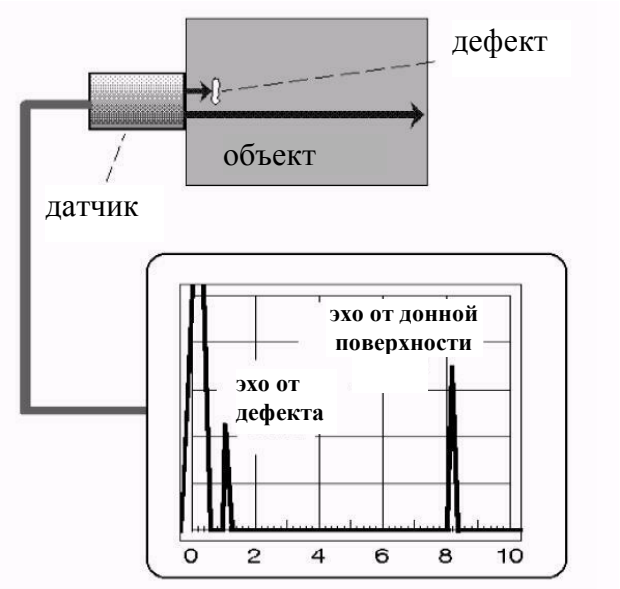


Рис. 20б Несплошность близко с поверхностью.

Метод определения расстояния до дефекта ранее описан - теперь встает проблема обнаружения несплошности.

4.2 Проблема обнаружения

Итак, что же делать, когда небольшая несплошность расположена очень близко к поверхности объекта контроля, т.е. прямо под преобразователем?

Поскольку промежуточное эхо находится теперь внутри зондирующего импульса, и поэтому перекрывается им на экране прибора мы его увидеть не можем (Рис. 21).

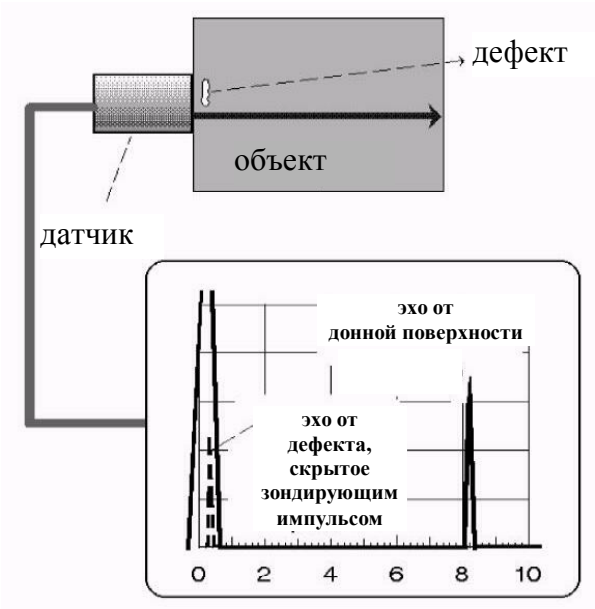


Рис. 21 Неопределяемая несплошность рядом с поверхностью

Ключом к решению данной проблемы, в случае, когда несплошность достаточно большая, является падение амплитуды импульса от донной поверхности, т.к. несплошность затеняет значительную часть звукового луча (Рис. 22). Если подобный дефект также достаточно ровный и расположен параллельно поверхности, тогда возникает более или менее сформированная последовательность эхо-сигналов вызванная многочисленными отражениями между поверхностью и дефектом, Рис.23.

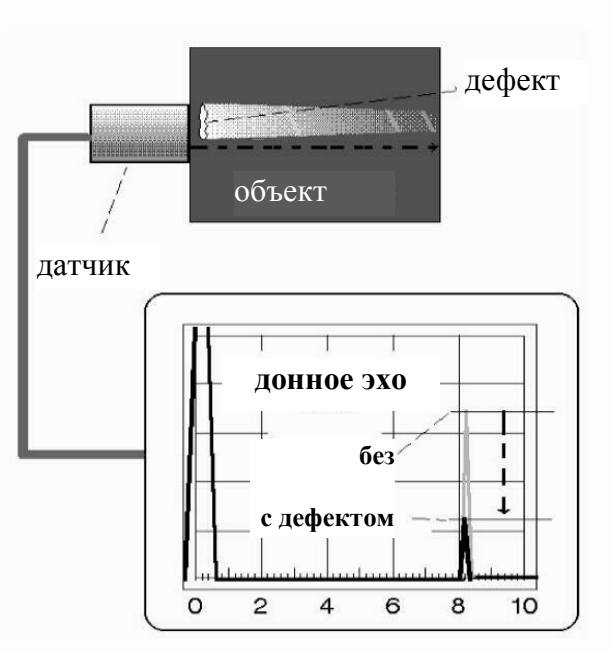


Рис. 22 Затенение донного эхо-сигнала большим близким к поверхности дефектом

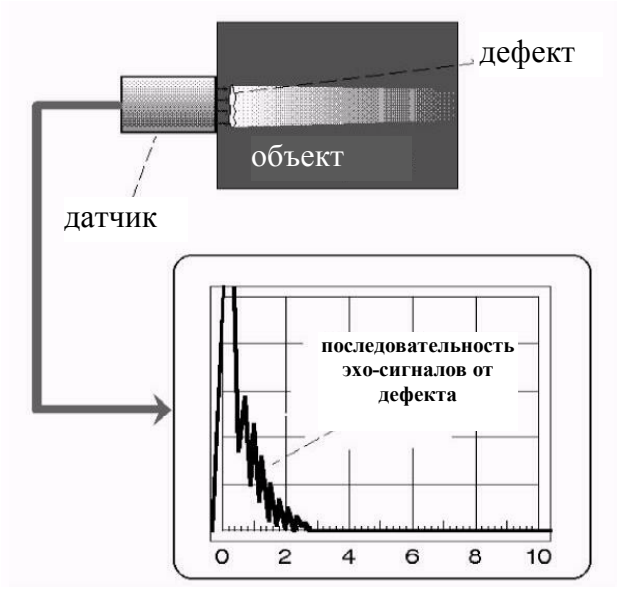


Рис. 23 Эхо последовательность от близкого к поверхности дефекта

В этом случае амплитуды эхо-сигналов тем меньше, чем больше расстояние. Чем больше плотность эхо-сигналов в направлении поверхности, тем больше эхо-сигналов из эхо - последовательности растворяется в зондирующем импульсе, это заставляет эхо становится еще более плотным. В таких случаях существует предел обнаружению.

Из всего вышесказанного мы видим, что наличие зондирующего импульса на экране не приветствуется, однако это техническая необходимость, ограничивающая возможность обнаружения дефектов, расположенных близко к поверхности. Дефекты в **мертвой зоне** (не-контролируемой области непосредственно около поверхности) не могут быть обнаружены, Рис. 24. Размер мертвой зоны зависит от преобразователя и прибора. Однако, он может быть сведен к минимуму соответствующим правильным их выбором.

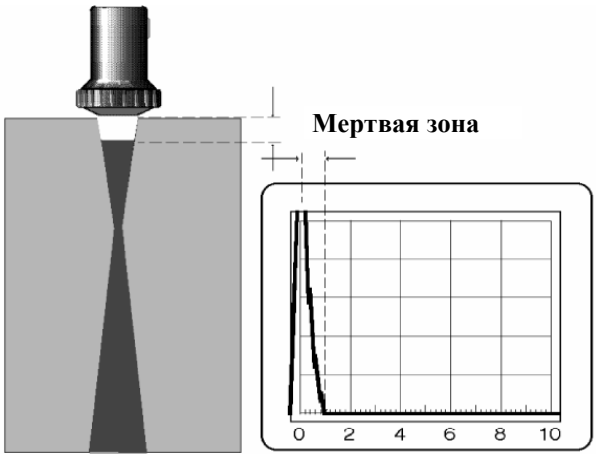


Рис. 24 Мертвая зона - дисплей, объект контроля

4.3 Преобразователь

Преобразователи, чьи лучи нормальны к поверхности, называют **прямыми преобразователями,** рис.25 и рис. 1а

Рис.25 Прямые преобразователи

Большинство стандартных прямых преобразователей передают и принимают **продольные волны** (**волны давления**). Колебания таких волн могут быть описаны с помощью сжатия и растяжения атомов, распространяющегося по материалу (газ, жидкость или твердое тело), рис. 26. Существует большой выбор таких преобразователей, различающихся размерами и излучаемыми частотами от 0.5 МГц до 25МГц.

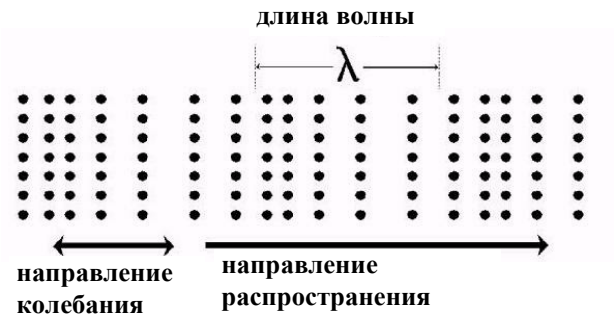


Рис. 26 Продольная волна

Многообразие выбора позволяет подобрать индивидуальное соответствие характеристик преобразователя каждой поставленной задаче, даже в сложных условиях контроля. Мы уже упомянули об одном неудобстве использования прямых преобразователей, которое при определенных условиях может быть решающим: плохое обнаружение близко расположенных к поверхности дефектов из-за ширины зондирующего импульса.

Преобразователи, чьи лучи выходят под углом к поверхности объекта, называют **наклонными преобразователями**, поскольку они передают и принимают звуковые волны под углом к поверхности объекта контроля, Рис. 1б и 27.

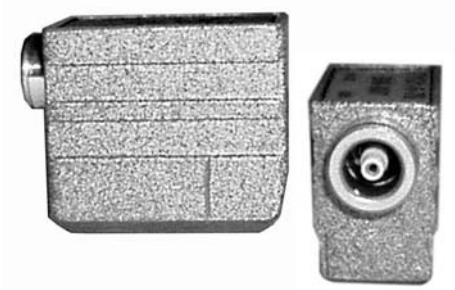


Рис. 27 Наклонные преобразователи

Большинство стандартных наклонных преобразователей передают и принимают, исходя из технических соображений, **поперечные волны (сдвиговые волны)**.

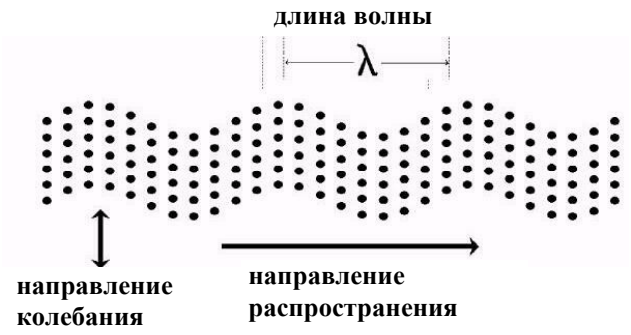


Рис. 28 Поперечные волны

При поперечных волнах атомы или молекулы колеблются вертикально к направлению распространения волны (рис. 28), в силу того, что возмущение достигается силой сдвига (перпендикулярной к силам распространения). Поперечные волны возникают только в твердых материалах и никогда в жидкостях или газах, т.к. эти вещества не обладают способностью передавать силы смещения.
Скорость распространения поперечных волн несколько ниже, чем у продольных волн в том же материале. Быстрого ответа на то, почему наклонные преобразователи не передают продольные волны, не существует. В этом случае требуется детальное рассмотрение.

4.4 Преломление и преобразование моды

Наклонные звуковые волны генерируются таким образом, чтобы они проникали под углом из преобразователя в объект контроля, рис.1б. Это легко достигается при приклеивании элемента на призму, которая обычно делается из оргстекла (плексигласа). Если продольная волна, под фиксированным углом падения (углом призмы), упадет на линию разделения плексиглас/сталь, то сначала волна разделится на отраженную и прошедшую волну, рис. 29а.

Отраженные волны подчиняются закону отражения (угол падения = углу отражения), а прошедшие волны - закону преломления (закону Снелла):

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c1}{c2}$$, где

α - угол падения;
β - угол преломления;
c1 - скорость звука в веществе 1;
c2 - скорость звука в веществе 2.

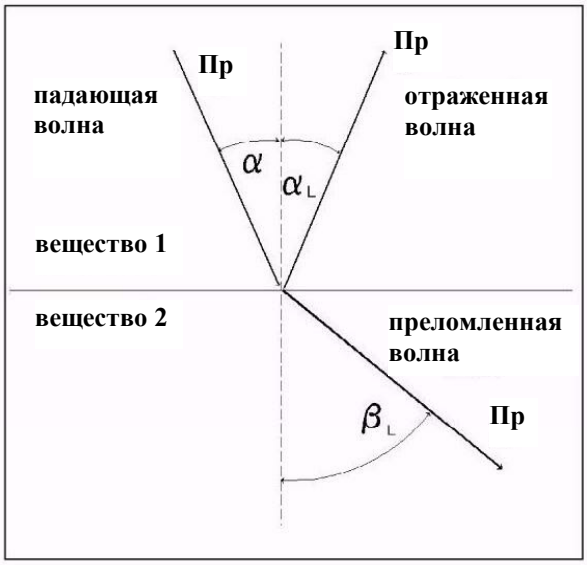


Рис. 29а Преломление и отражение при отсутствии поперечных волн

Кроме того, в точке падения луча, наблюдается появление и поперечных волн, Рис. 29б. Это явление наблюдается как при отражении, так и при преломлении. Благодаря тому факту, что поперечные волны распространяются с вдвое меньшей звуковой скоростью, чем продольные, другие направления распространения волн автоматически следуют закону преломления, т.е. с углами отражения и преломления.

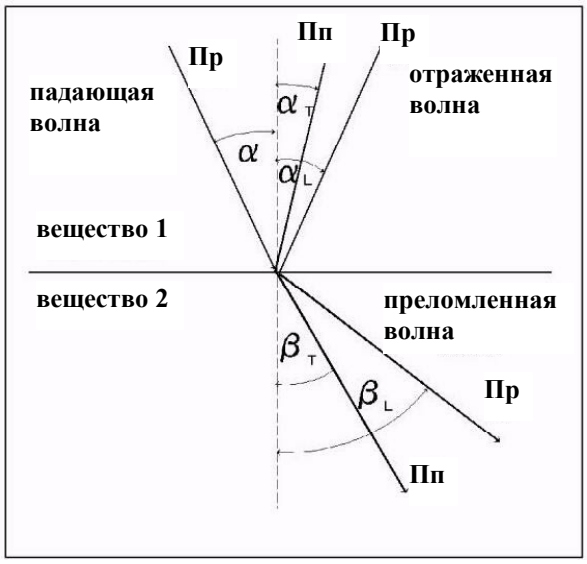
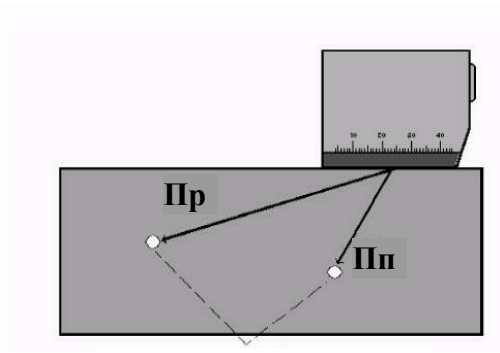


Рис. 29б Преломление и отражение с наличием поперечных волн

Если, при сканировании наклонным преобразователем, это явление будет неучтено, тогда расчет расположения и оценка несплошности во многих случаях невозможна. Обнаружение дефекта также становится под вопрос, т.к. одно эхо на дисплее ведет к двум различным местоположениям отражателя, в зависимости от того какие волны (продольные или поперечные) взять за основу, рис. 30.

Но где же тогда несплошность? Однозначный ответ может быть дан оператором, только когда один из типов волн не возникает. Это, несомненно, предварительное условие для универсального применения наклонных преобразователей.



возможное расположение дефекта

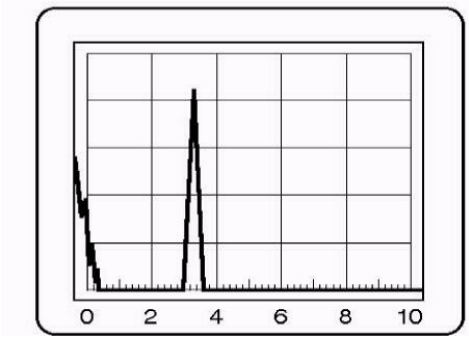


Рис. 30 Анализ: один эхо-сигнал - два возможных расположения

С дальнейшим увеличением угла падения луча на границу раздела оргстекло/сталь угол отражения также становится больше, и наконец, при угле падения 27.5° (**1-й критический угол**), продольная волна будет преломляться под углом 90°. Это означает, что она пойдет вдоль поверхности, пока поперечная волна будет передаваться в объект контроля, Рис. 31а.

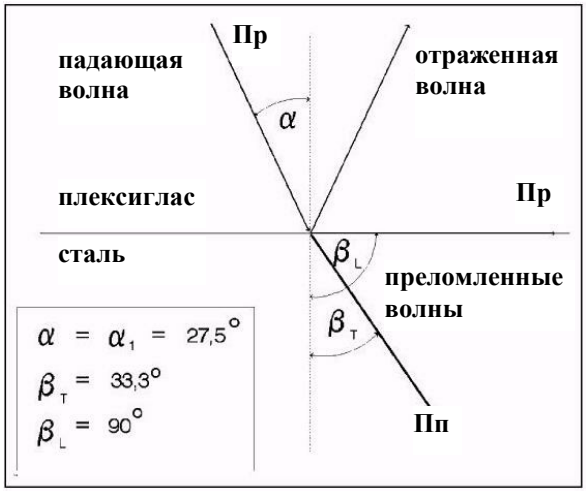


Рис. 31а Преломление: 1-й критический угол

Наше предварительное условие для однозначной оценки отраженного сигнала выполнено: теперь только **одна** звуковая волна проходит в объект контроля - это поперечная волна с углом преломления 33.3° (для границы оргстекло/сталь). С дальнейшим увеличеснием угла падения могут быть установлены различные углы преломления поперечной волны (**= угол луча**), например 45°, Рис. 31б. Наконец, при угле падения около 57° (**2-й критический угол**), поперечная волна, будет преломляться под углом 90° и распространяться вдоль поверхности объекта, т.е. тоже став **поверхностной волной,** Рис. 31в.

Это предел, за которым звуковые волны более не могут быть переданы в объект контроля. С данного момента начинается **полное отражение,** Рис. 31г.

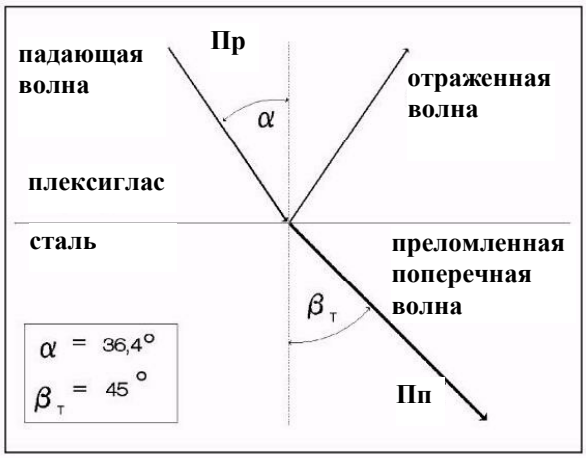


Рис. 31б Преломление: поперечная волна под углом 45°

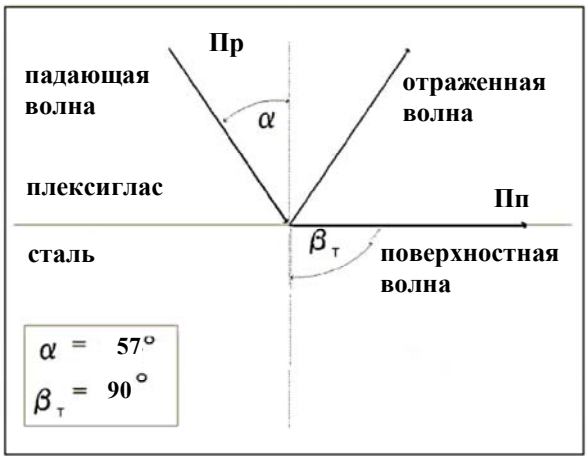


Рис. 31в Преломление: 2-й критический угол, поверхностная волна

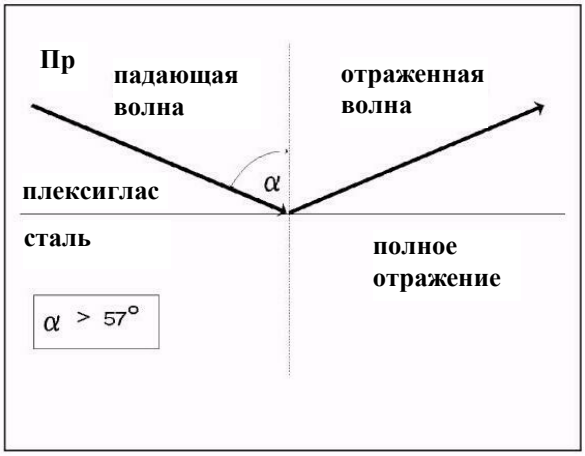


Рис. 31г Полное отражение

Зона в которой угол падения находится между 1-м и 2-м критическими углами (27.5° - 57°) дает нам анализируемую звуковую волну в объекте контроля (стальном), при угле преломления поперечной волны между 33.3° и 90°, рис.32.

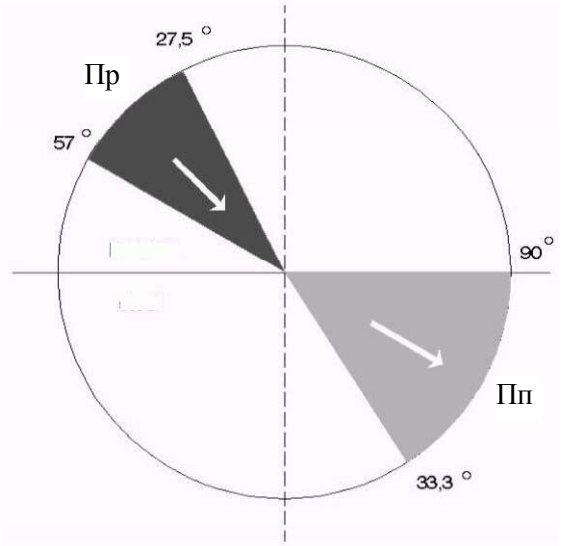


Рис. 32 Используемый диапазон для наклонных преобразователей и объекта контроля из стали.

4.5 Характеристики наклонных преобразователей

С учетом того, что контроль стальных изделий наиболее распространен, наклонные преобразователи конструируются так, чтобы оптимально подходить для контроля этого материала. Наиболее часто используются преобразователи с углами в 35°, 45°, 60°, 70°, 80° (за рубежом) и 40°, 50°, 65°, 70° (в России и странах СНГ) и 90° (поверхностные волны). В отношении частоты, наклонные преобразователи не имеют такого большого разнообразия как прямые. Это происходит, прежде всего, вследствие того, что высокочастотные поперечные волны в нелегированных мелкозернистых сталях имеют большое затухание. Когда звуковая энергия волн проходит через материал она настолько сильно поглощается и рассеивается, что даже относительно малые объекты не могут быть проконтролированы с достаточной чувствительностью.

Если дефект должен быть обнаружен на большой глубине от поверхности, тогда необходимо использовать преобразователи с большими размерами кристаллов и низкой частотой. Например, дефект размером 2мм в низколегированной мелкозернистой стали, при использовании преобразователя на 2 МГц с большим кристаллом, может быть обнаружен на расстоянии до 700мм.

Поскольку зондирующий импульс смещен далеко влево из-за введения задержки (призмы) - результат решения задачи контроля может быть более удачным, чем при использовании прямых преобразователей. Хотя, задний фронт зондирующего импульса может иногда все же перекрывать эхо от близко расположенных к поверхности дефектов. На рис. 33 показано обнаружении отверстия глубиной 1мм.

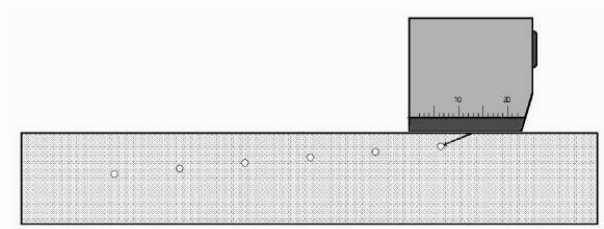
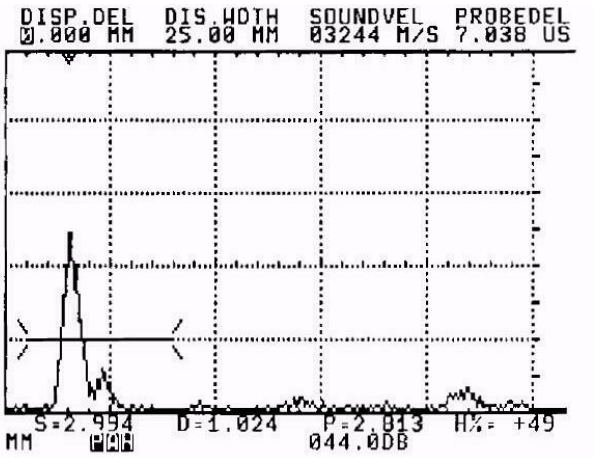


Рис. 33 Сканирование перпендикулярного отверстия d1мм и глубиной 1мм.



прибором выполнено в приемо-передающем режиме, т.е. один элемент соединен с передатчиком, а второй с принимающим усилителем. Зондирующий импульс смещен влево, из-за большой задержки, Рис.35.

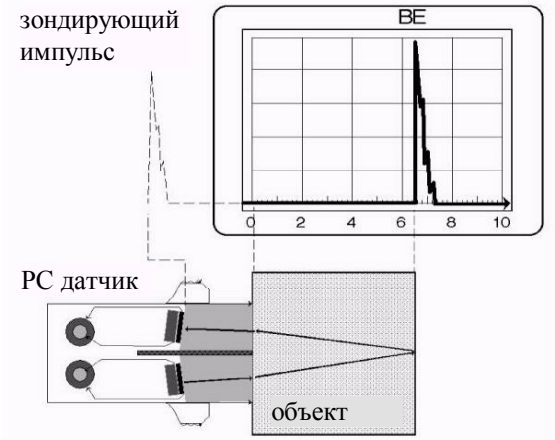


Рис. 35 Использование PC преобразователя - экран с донным эхо- сигналом.

4.6 Раздельно-совмещенный преобразователь

Если вы хотите получить хорошие результаты при использовании прямого преобразователя, то необходимо использовать раздельно-совмещенный преобразователь - **PC преобразователь,** Рис. 34.

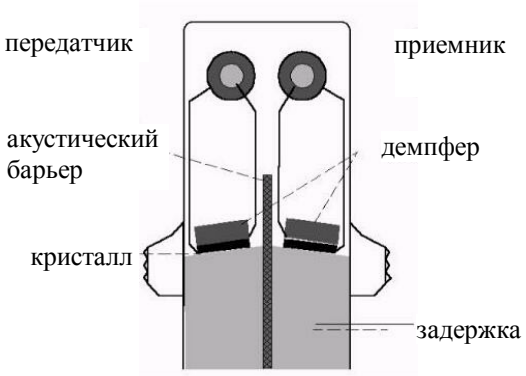


Рис. 34 PC преобразователь

Преобразователь содержит два электрически и акустически независимых пьезокристалла в едином корпусе. Кроме того, оба элемента используют большую задержку (призму из плексигласа) и слегка наклонены по отношению друг к другу. Соединение PC преобразователя с

Переотражения внутри периода задержки передатчика не мешают контролю, т.к. передатчик не имеет функции приема. Эхо выводится на экран только тогда, когда звуковой импульс предается от объекта на принимающую часть преобразователя.

Полное электрическое и акустическое разделение, по техническим причинам, невозможно. В частности, грубая поверхность объекта может быть причиной того, что определенные составляющие звука могут передаваться напрямую из передатчика в приемник. Они генерируют сигнал помехи на дисплее, называемый эхо-сигналом взаимных помех. Взаимные помехи перекрывают близкую к поверхности область объекта контроля, и вновь это снижает чувствительность контроля, особенно для малых дефектов. Однако, большинство взаимных помех столь малы и незначительны, что они могут быть вполне отделены от возможного эхо-сигнала от дефекта, Рис.36.

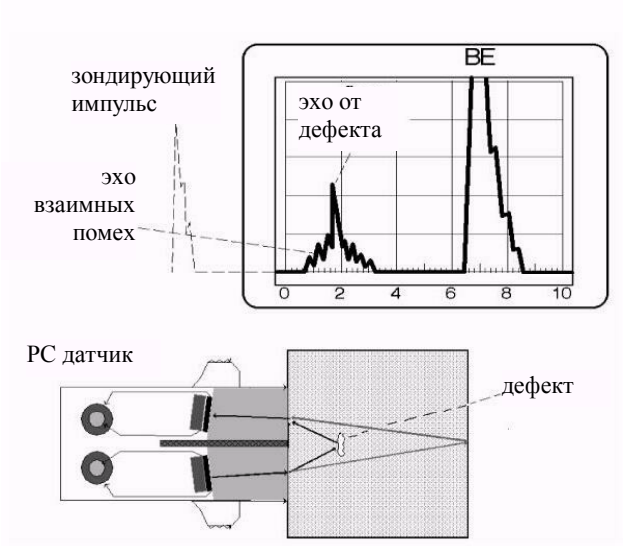


Рис. 36 PC преобразователь: эхо от дефекта и эхо от взаимных помех

В связи с этим, PC преобразователи идеально подходят для обнаружения близких к поверхности дефектов и измерения толщины тонких объектов контроля. Они гораздо менее чувствительны к плохому контакту с поверхностью объекта контроля, вызванному, например, большой шероховатостью или неровностью поверхности материала.

Данное их свойство является определяющим при использовании их в химической и энергетической промышленности: они идеально подходят для контроля всех типов труб и контейнеров, для определения неоднородностей в стенках труб, а также для измерения внутренней коррозии и остаточной толщины стенок труб.

Специальные высокотемпературные преобразователи способны измерять толщину стенок объекта контроля при температуре до 550°C, так что, установка может контролироваться во время ее работы.

5. Определение местоположения несплошности

5.1 Калибровка инструмента

Расположение несплошности может быть без труда определено по ее эхо-сигналу если инструмент правильно откалиброван. Калибровка означает проверку показаний прибора при контроле объекта с заранее известным параметром контроля. Например, для примитивного прибора со шкалой: нулевая точка шкалы соответствует поверхности контролируемого объекта, а 10-я градуировка шкалы - максимальному расстоянию, например 100 мм стали, 10мм алюминия, 25мм стекла и т.д. При калибровке учет материала имеет огромную роль, т.к. путь эхо-синала (s), рассчитывается исходя из времени (t) прохождения импульса и скорости звука (c) в данном материале - по следующей формуле:

$$s = \frac{c \cdot t}{2}$$,где

s = расстояние до отражающей поверхности [мм];
c = скорость звука [км/с];
t = время прохождения импульса [с].

Знание этой связи является очень важным для оператора: но не обязательным для процесса калибровки. *Правило гласит*: ***используйте кусок известного материала с известными размерами***.

При установке преобразователя на поверхность объекта с известной толщиной s на экране возникает последовательность эхо-сигналов, Рис.37. Толщина объекта соответствует пути, пройденному звуковой волной, например, для прямых преобразователей он пропорционален толщине объекта s , поэтому:

1-е эхо = s,
2-е эхо = 2s,
3-е эхо = 3s, и тд.

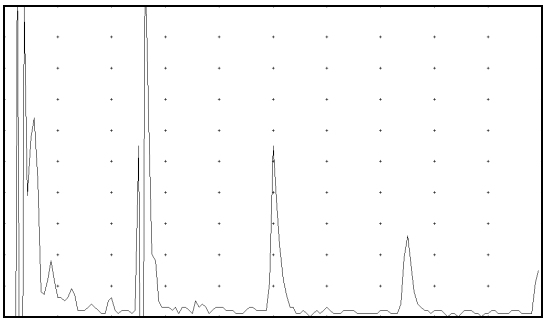


Рис. 37 Последовательность эхо-импульсов на экране дефектоскопа

Вышеупомянутый кусок материала используемый для калибровки называется **Образцом** или **Стандартным Образцом**, если он стандартизирован. Калибровку различных дефектоскопов в соответствии с их руководством по эксплуатации обычно проводят по российским (СО-1, СО-2 или СО-3 (СО-3Р)) или зарубежным (V1, V2, VW и пр) образцам.

5.2 Определение дефектов с наклонными преобразователями

Эхо-сигнал от несплошности на экране прибора не дает прямой информации о ее расположении в материале. Единственная, доступная для оценки информация - это положение сигнала на шкале, т.е. звуковой путь s - дистанция от точки входа звуковой волны в объект до неоднородности, Рис. 38

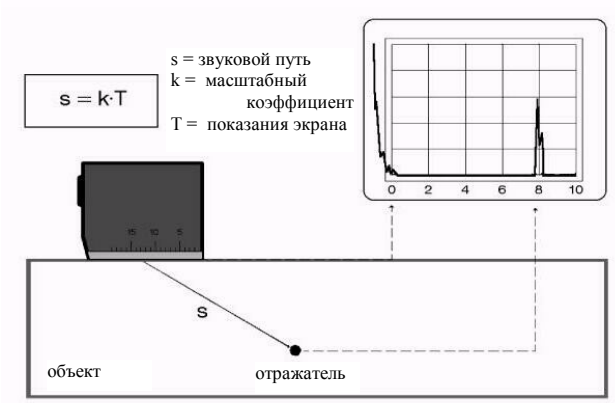


Рис. 53 Сканирование отражателя с использованием наклонного преобразователя

Математический расчет прямоугольного треугольника позволяет вычислить *поверхностное расстояние* и *глубину* отражателя, которые оба важны для ультразвукового контроля, Рис. 39а

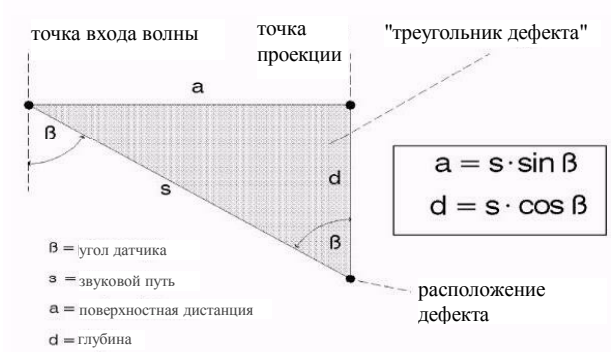


Рис. 39а Треугольник дефекта

Таким образом, мы имеем возможность отметить позицию дефекта на поверхности отмерив поверхностное расстояние от точки входа волны и узнать глубину дефекта.

По практическим соображениям, используется уменьшенное поверхностное расстояние, т.к. оно отмеряется от переднего края преобразователя. Разница в этих величинах соответствует **стреле** преобразователя, т.е. расстоянию от точки входа звуковой волны до края корпуса преобразователя, рис. 39б.

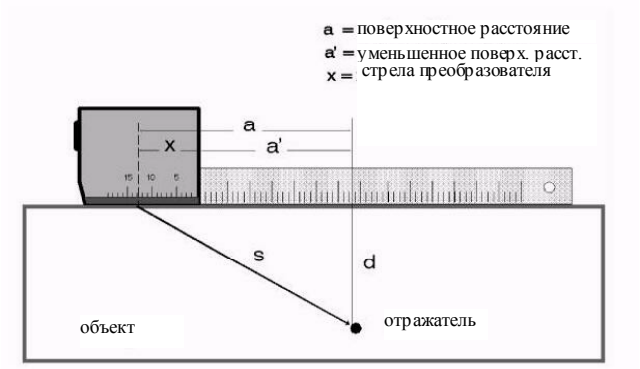


Рис. 39б Уменьшенное поверхностное расстояние и стрела.

С помощью ультразвукового прибора с цифровой обработкой сигнала подобные вычисления выполняются встроенным микропроцессором и немедленно высвечиваются на дисплее, так, что оператору нет необходимости выполнять вышеописанные вычисления, рис.40

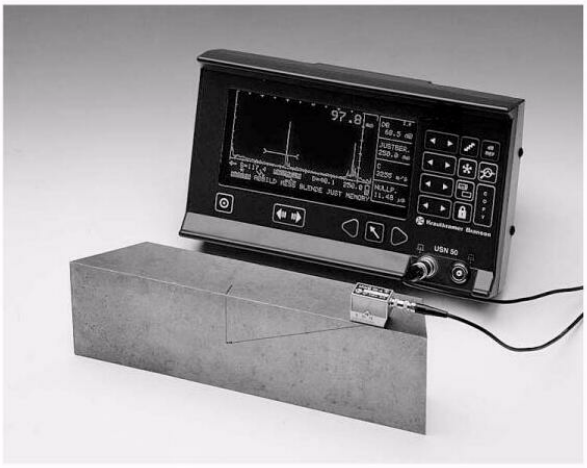


Рис.55 Прибор USN 50: обнаружение отверстия датчиком MWB 60-4E

Это особенно заметно при контроле сварных соединений, поскольку при вычислении глубины залегания дефекта должен быть принят во внимания дополнительный фактор, а именно: были ли звуковые волны отражены от противоположной стенки. Если дело обстоит именно так, тогда глубина залегания дефекта должна рассчитываться по специальной формуле, иначе она будет больше, чем толщина T объекта контроля.

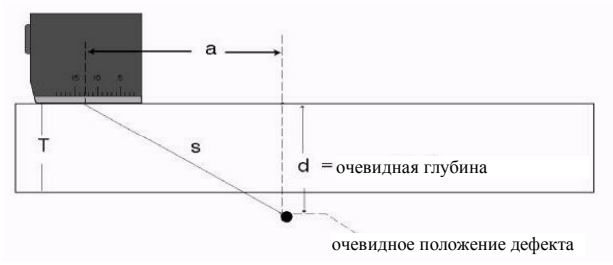


Рис. 41а Очевидная глубина

Оператор должен распознать пришел ли сигнал от противоположной стенки, и только тогда производить вычисление глубины залегания, рис. 41б.

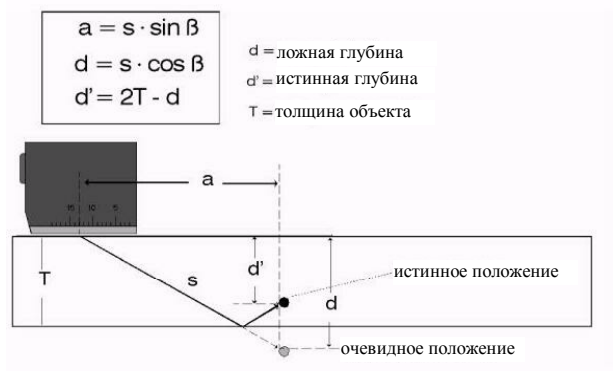


Рис. 41б Действительная глубина дефекта после отражения звука

6. Оценка несплошности

Влияние несплошности на рабочие характеристики изделия проще оценить когда ее размер (протяженность) известны. Желание оператора точно знать "истинный габарит отражателя" вполне понятно, так как ожидается что методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковой метод, дадут подобную информацию. Однако, учитывая, что на дисплее могут отражаться только эхо-сигналы, т.е. время и амплитуда части звуковой волны, вернувшейся от отражателя, зачастую очень трудно, а в некоторых случая и невозможно с достаточной надежностью узнать истинный размер отражателя. Фактически амплитуда эхо-сигнала играет решающую роль при оценке несплошности во время ручного ультразвукового контроля.

6.1 Метод сканирования

При ультразвуковой оценке возможно достаточно близко подойти к истинному размеру отражателя, если несплошность сравнима с диаметром звукового поля. Тогда она отражает всю энергию воздействия, Рис. 42.

С помощью сканирования границ несплошности может быть получена сравнительно надежная информация об ее протяженности. Оператор обычно наблюдает за высотой эхо-сигналов. Позиция преобразователя на поверхности объекта контроля, при которой уровень эхо снижается ровно наполовину, сигнализирует о том, что несплошность лишь наполовину охватывается звуковым лучом, Рис. 43а.

Это означает, что акустическая ось проходит точно по границе объекта. Позиция преобразователя отмечается и оператор определяет дальнейшие граничные точки, пока контур несплошности не сформируется объединением всех точек вместе, Рис. 43б.

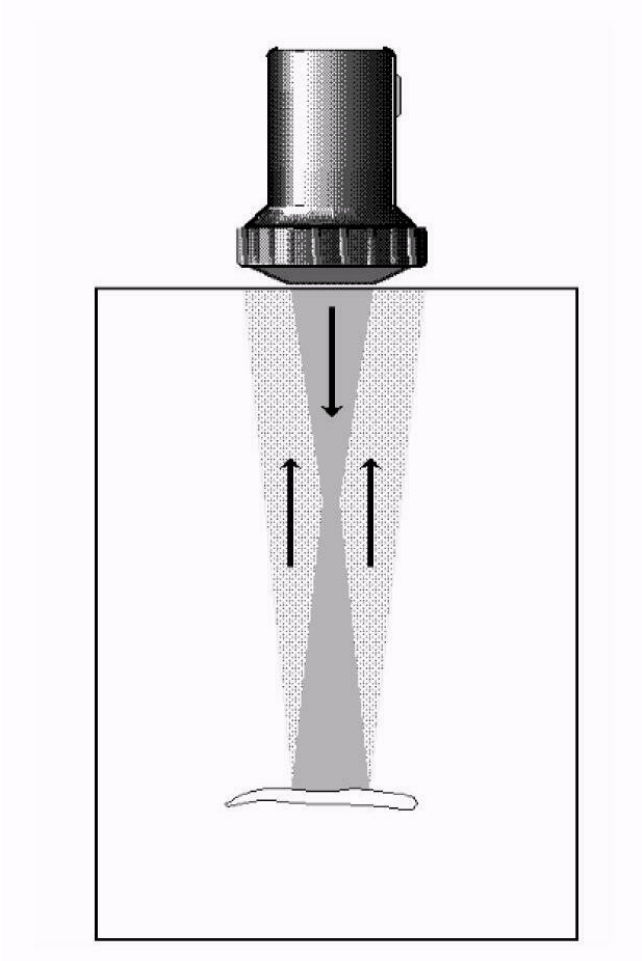


Рис. 42 Большое отражение в звуковом луче

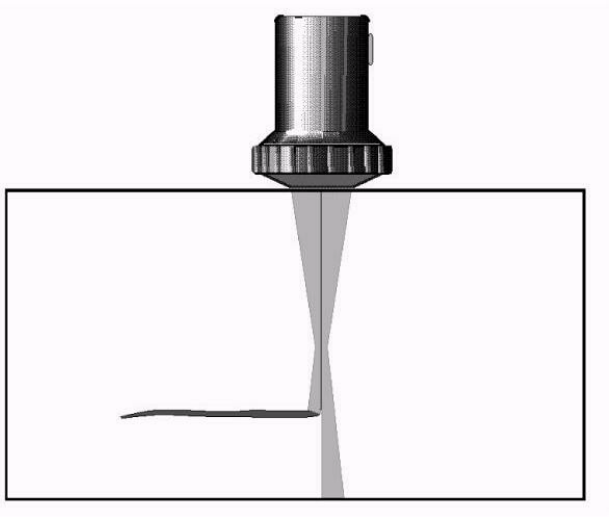


Рис. 43а Прямой преобразователь на границе отражателя

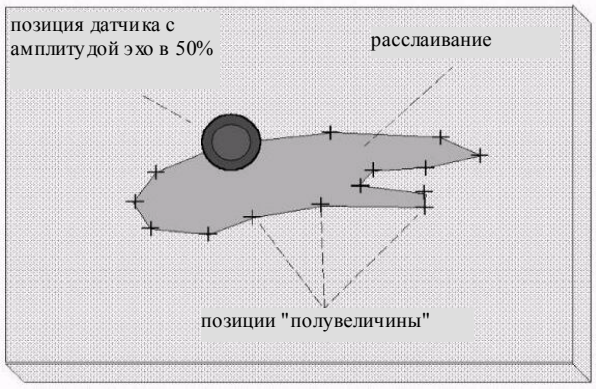


Рис. 43б Условный вид сверху на отражатель

Определение границ отражателя становится тем точнее, чем меньше диаметр звукового луча. Поэтому, при точном определении границ рефлектора, рекомендуется выбирать преобразователь с фокусным расстоянием равным расстоянию до отражателя. Наиболее подходят преобразователи с диаметром луча 1-3мм на глубине наибольшей чувствительности.

6.2 Оценка малых несплошностей: АРД метод

Отражатель, который полностью находится внутри звукового луча, рассматривается как малый. Если такой отражатель оценивать методом сканирования, тогда будет получен не его размер, а диаметр звукового луча. Поэтому метод сканирования в данном случае неприемлем. Ранее мы упоминали о том, что амплитуда эхо будет тем больше, чем большая область отражателя покрывается лучом. Данное наблюдение может быть использовано для оценки малых несплошностей - высота их эхо-сигнала возрастает с увеличением их площади, рис. 44.

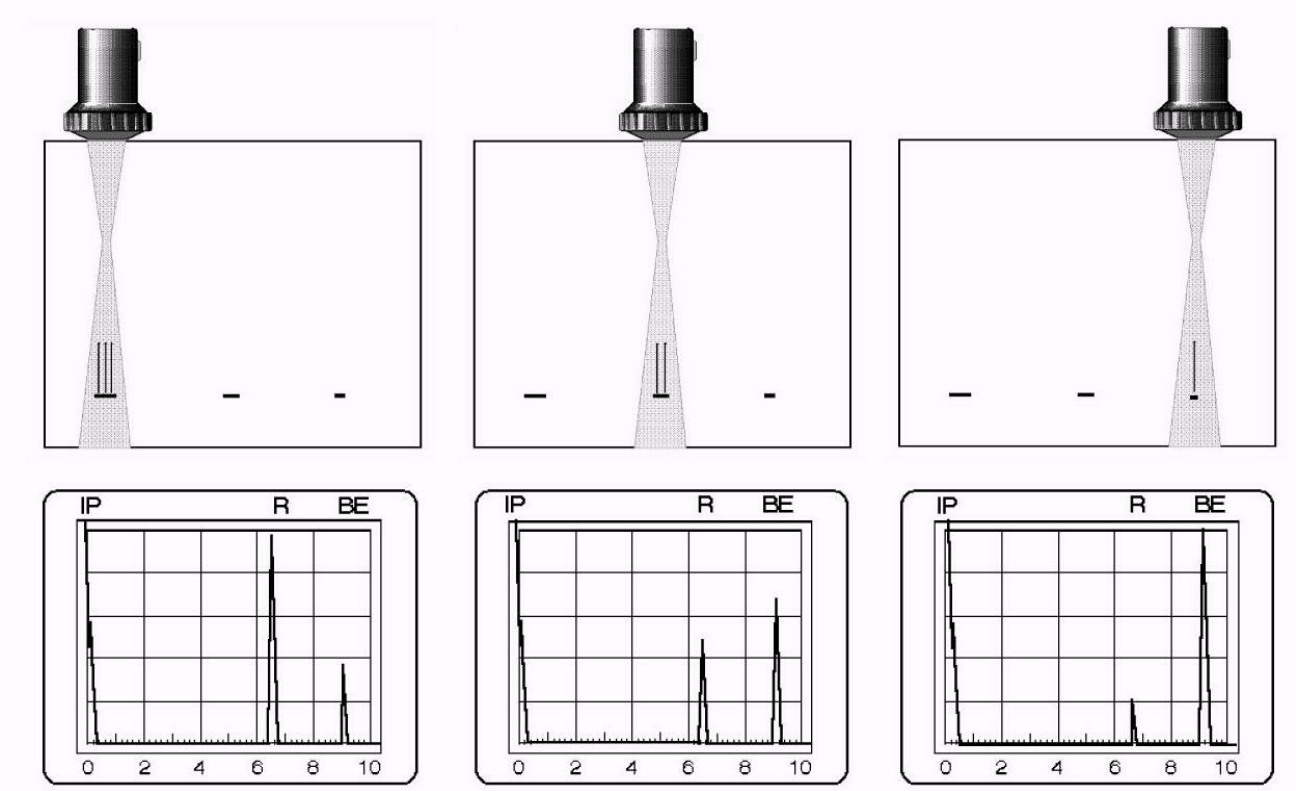


Рис. 59 Отражатели различной площади и их эхо-сигналы

В оптимальных условиях, т.е. когда отверстия имеют плоское дно и расположены на одинаковой глубине, выполняется следующий закон:

Высота эхо-сигнала пропорциональна площади отражателя
или
Высота эхо-сигнала пропорциональна квадрату диаметра

Например: отверстие с плоским дном с диаметром 2 мм имеет эхо-сигнал в 4 раза больше, чем такое же с диаметром 1 мм.

Однако, если сравнивать сигналы от отверстий на разной глубине, тогда необходимо учитывать дополнительную зависимость эхо от расстояния, рис. 45.

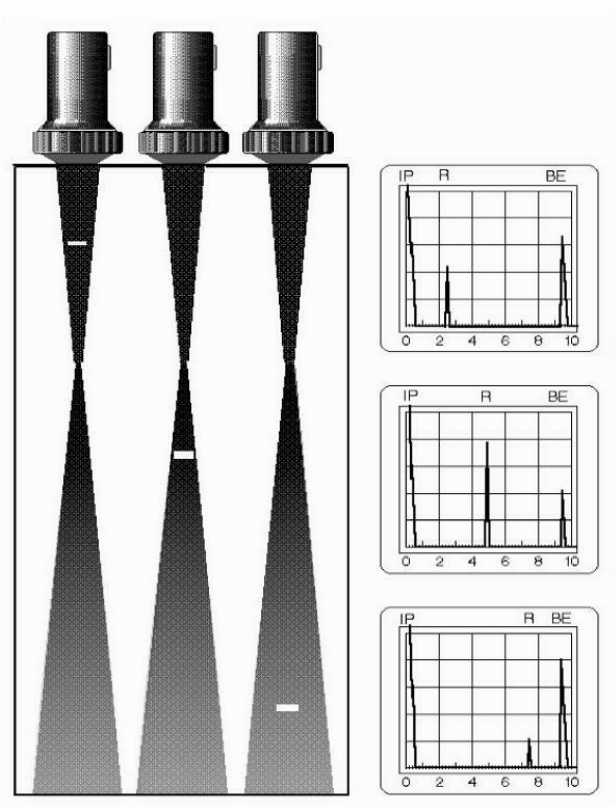


Рис. 45 Отражатели на различных глубинах и их эхо-сигналы

При точном контроле плоскодонных отверстий на различной глубине можно ввести простой закон, по крайней мере, в дальней зоне звукового луча:

Высота эхо-сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния до отражателя

Данное правило неприемлемо для ближней зоны звукового луча! В этом случае, практика показывает, что высота эхо в пределах фокуса достигает максимальной амплитуды и понижается вновь на меньших расстояниях, рис. 46.

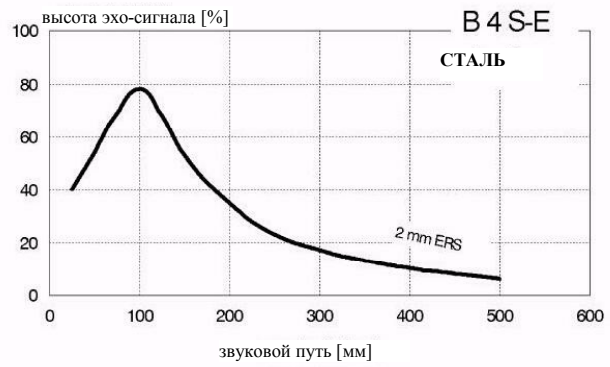


Рис. 46 Кривая зависимости амплитуды от дистанции с дисковым отражателем диаметром 2мм.

Если подобные кривые наложить на масштабные шкалы, тогда, имеется возможность сравнить эхо от неизвестных и известных отражателей, т.е. высоту эхо-сигнала от несплошности и от известного плоскодонного отражателя. Несплошность на рис. 47 отражает звуковые волны аналогично диску с диаметром 4мм.

Вследствие того, что мы можем оценить только звук, отраженный от несплошности, то, естественно, нельзя рассматривать диаметр 4мм как ее "истинный размер". Поэтому, мы относимся к нему, как к **эквиваленту отражателя** или как к **эквивалентному размеру отражателя.** Эквивалентный размер отражателя соответствует истинному размеру

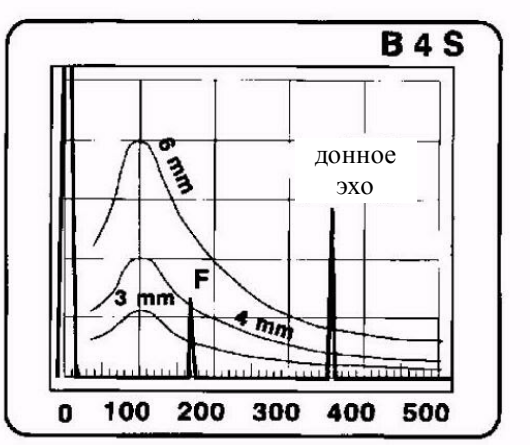


Рис. 47 Оценка несплошности (F) используя типовые кривые.

несплошности только в идеальном случае, т.е. когда несплошность круговая, и расположена строго перпендикулярно акустической оси.

На практике подобное никогда не встречается, т.е. истинный размер обычно больше, чем эквивалентный размер отражателя. Какого либо закона вывести здесь невозможно, поскольку высота эхо-сигнала зависит от характеристик дефекта, т.е. геометрии, ориентации по отношению к звуковому лучу, качества поверхности. Например, раковина (газовое включение в форме сферы) с диаметром 2мм. имеет эквивалентный размер отражателя 1 мм; наклонный плоский отражатель 5мм. длины дает, в зависимости от ориентации, эквивалентный размер «0» (не обнаружимый) или, возможно, «2».

Эта неуверенность в оценке, однако, компенсируется использованием других возможностей и методов ультразвукового контроля, для более подробного исследования обнаруженной несплошности. Опытный дефектоскопист может, без особых проблем, довольно точно давать информацию относительно несплошности, которую он обнаружил. Сканирование с различных направлений, при оценке формы эхо-сигнала и наблюдение за поведением дисплея при перемещении преобразователя (динамика эхо-сигнала) - вот только несколько методов, которые успешно могут применяться.

Хотя неуверенность в оценке параметров обнаруженной несплошности всегда присутствует, данный метод успешно применяется во многих странах благодаря тому, что основан на хорошо известных и доказанных законах звукового поля. Поэтому этот метод объективный - т.е. независимый от применяемого устройства и оператора.

Так называемые АРД шкалы (Амплитуда, Расстояние, (эквивалентный) Диаметр) для оценки отражателей могут быть получены от производителя преобразователей для различных их типов и диапазонов калибровки. Однако современная версия АРД шкалы требует некоторых пояснений, т.к. спроектирована при условии соответствия наиболее общим требованиям практического контроля: если назначение (а соответственно и предел разрушения) некоторого объекта известны, тогда ультразвуковой контроль может проводится сперва совместно с разрушающими методами контроля, дабы установить какой размер дефекта является критическим для работоспособности изделия. Естественно, также играют роль местоположение такого дефекта в изделии и частота его появления.

Если допустимый размер дефекта определен, тогда этот размер, помноженный на фактор безопасности, также, среди прочих, вносит свой вклад в итоговую оценку несплошности. Теперь для ультразвукового контроля больше будет важна соответствующая амплитудная кривая эхо-сигнала для данного размера, чем остальные факторы. Оператор сканирует объект контроля и должен отмечать лишь показания, превышающие данную **кривую регистрации**, рис. 48.

В результате - только одна кривая необходима для анализа. Учитывая тот факт, что в зависимости от назначения изделия, различается и **предел регистрации,** становится возможным разместить другой эквивалент размера отражателя на данной кривой. Данное совмещение показано в виде таблицы в правом верхнем углу шкалы: т.е. начиная с установок по умолчанию, **дополнительное усиление** берется из таблицы, и дает требуемое значение регистрации.
Если прибор откалиброван, тогда можно начинать контроль объекта.

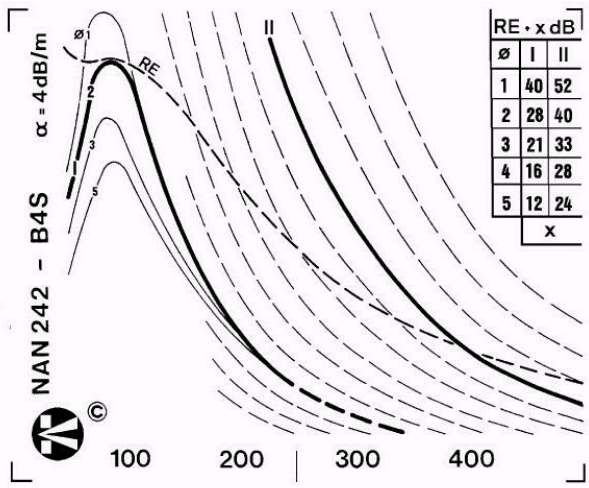


Рис. 48 АРД шкала для датчика B 4 S

Когда сигнал от объекта контроля превышает кривую регистрации, тогда результат должен быть записан и проанализирован. Дальнейшие действия зависят от вида дефекта: брак, ремонт либо дальнейший контроль для точной оценки несплошности (диагностика).

На рисунке 49 показан контроль кованной детали. Кривая регистрации соответствует эквивалентному размеру отражателя 3. Обнаруженная несплошность, на глубине 110мм, превышает кривую, значит все параметры отражателя должны быть записаны.

Рис. 49 Оценка несплошности с АРД шкалой

6.3 Затухание звуковых волн

В дополнение к законам, описывающим поведение плоскодонных отражателей внутри звукового луча преобразователя (**законы расстояния и размера**) должен быть учтен и другой эффект: **затухание звука**. Затухание в основном обусловлено структурой объекта контроля, однако также строго зависит от частоты и формы волн, излучаемых преобразователем. Когда все эти эффекты известны, они вполне могут быть учтены при оценке несплошности. Несмотря на это, оценка становится более сложной, отнимает больше времени и обеспечивает меньшую достоверность, при этом АРД шкалы должны были бы исполняться с громадной точностью.

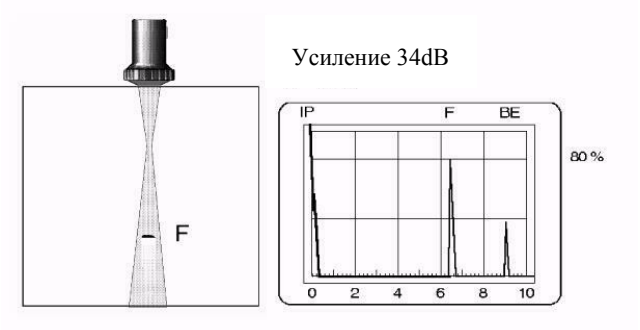


Рис. 50 Объект контроля с дефектом: эхо на 80% (эталонной высоте)

Используя такие же установки, сканируется отражатель в эталонном образце, который приблизительно находится на том же расстоянии, как и несплошность в объекте контроля, рис. 51.

6.4 Метод эталонных отражателей

Данная неопределенность в анализе дефекта может быть снижена при применении эталонных блоков, изготовленных из такого же как и объект контроля материала, и содержащих искусственные отражатели, чьи эхо-сигналы могут быть непосредственно сравнены с эхо-сигналами от несплошности в объекте. Применение **метода эталонных отражателей**, на практике, осуществляется двумя различными путями:

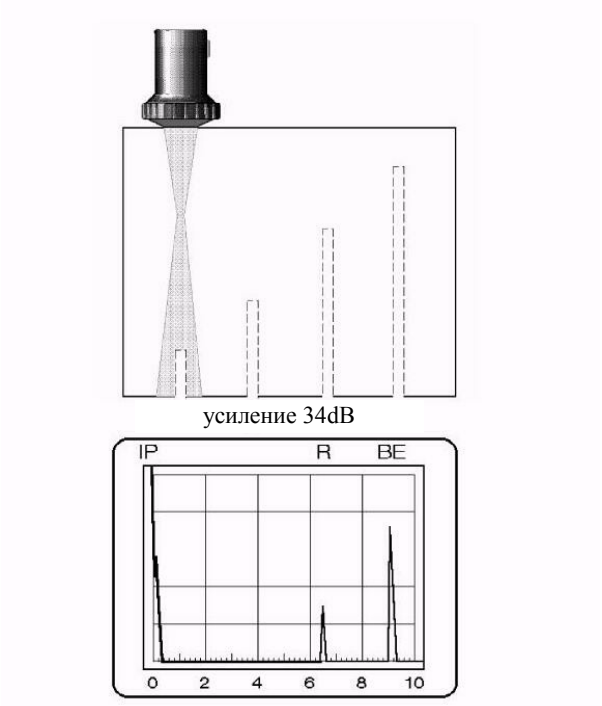


Рис. 51 Эталонный образец: эталонное эхо на 30%

6.4.1 Сравнение амплитуд эхо-сигналов

Объект контролируется с большой величиной усиления, при котором видны наименьшие определяемые отражатели. Индикация эхо-сигналов выражена в виде пиков, т.е. максимальная индикация достигается аккуратным передвижением преобразователя, и пики эхо-сигналов устанавливаются на определенную высоту регулировкой усиления, например, на 80% высоты экрана (*эталонная высота*), Рис. 50.

Количественным значением для оценки является изменение усиления прибора, которое необходимо для вывода сигнала на эталонную высоту, Рис. 52.

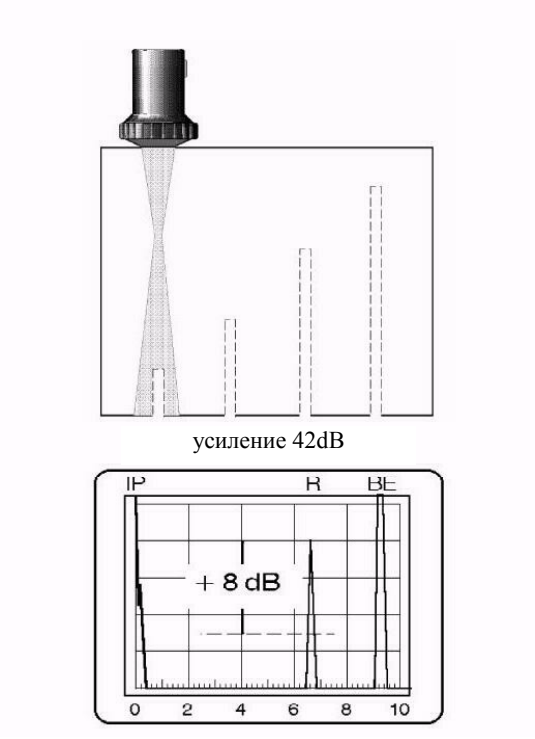


Рис. 52 Эталонный блок: эталонное эхо на эталонной высоте.

Результат: Эхо от несплошности на 8dB больше эталонного эхо-сигнала, т.к. усиление прибора было изменено с 34dB на 42dB.

Предел регистрации обычно соответствует высоте эхо от эталонного отражателя, чей размер должен быть определен, также как и АРД методом, перед контролем.

6.4.2 Кривая Амплитуда - Расстояния (АРК).

Все отражатели в эталонном образце сканируются перед контролем объекта, их максимальные высоты эхо-сигналов отмечаются на шкале и соединяются кривой, Рис. 53.

Такая кривая носит название **Дистанционно Амплитудной Кривой (DAC),** или **Кривой Амплитуда – Расстояние (АРК).** Когда появляется эхо-сигнал от несплошности, должна быть проведена оценка, превышает ли он АРК. В добавлении к этому производится изменение усиления, с целью определить, на сколько dB сигнал превышает кривую (или считываются цифровые показания, если дефектоскоп имеет функцию сравнения амплитуды эхо-сигнала относительно АРК). Избыточная высота эхо-сигнала является воспроизводимой мерой для оценки несплошности.

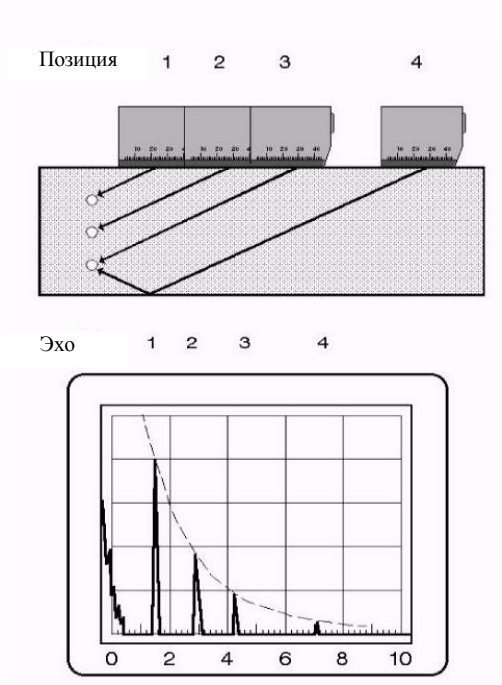


Рис. 53 Эталонный образец с отверстиями и полученные эхо-сигналы.

Преимущества данного метода перед методом эталонных отражателей следующие:

1. отсутствие необходимости сравнивать каждый эхо-сигнал с соответствующим эталонным, а сразу оценить по АРК.

2. нет необходимости перемещать эталонные образцы к месту контроля.

3. для определенных приложений записывать АРК нужно только один раз, т.к. она может быть сохранена в памяти.

Кривая записанная с отражателей в эталонном объекте, близком к объекту контроля содержит все влияющие факторы : затухание, расстояние, шероховатость, поэтому, соответствующие корректировки более не нужны.

В отношении результатов оценки, необходимо понимать, что ряд параметров несплошности (геометрия, ориентация и качество поверхности) не принимаются во внимание так же как и в АРД методе. Поэтому, результат оценки, с использованием метода эталонных отражателей, имеет такую же неопределенность, как и АРД метод.

Предпочтение какого-либо из этих двух методов является чисто субъективным. Соответствующие национальные технические требования контроля обычно оговаривают метод контроля, который нужно использовать, чтобы у оператора не было возможности решать это по собственному выбору. В случае, если такие установки жестко не определены, должна быть проанализирована конкретная ситуация, и решено какой метод предпочтительней использовать.

Однако, во многих случаях АРД метод может использоваться без всяких проблем, особенно если объект контроля изготовлен из низко легированной стали, имеет простую геометрию, малое затухание звука и приемлемое качество поверхности. Контроль должен проводится стандартным узкополосным преобразователем с частотами от 1МГц до 6МГц, для которого имеется АРД диаграмма или АРД шкала.

Новые микропроцессорные приборы обычно поддерживают программно контролируемую запись АРК и работу с функцией выравнивания амплитуды сигналов от одинаковых отражателей на разной глубине. Данные способ известен как **временная регулировка чувствительности (ВРЧ)**, Рис. 54.

Регистрационная кривая, соответственно, представляет из себя горизонтальную линию, так что, оценка несплошности может производится визуально и акустически используя контроль установленного порога (*сигнализацию дефектов*). В то же время для каждого эхо-сигнала, избыточная высота сигнала показывается в dB в добавление к данным для определения расположения несплошности.

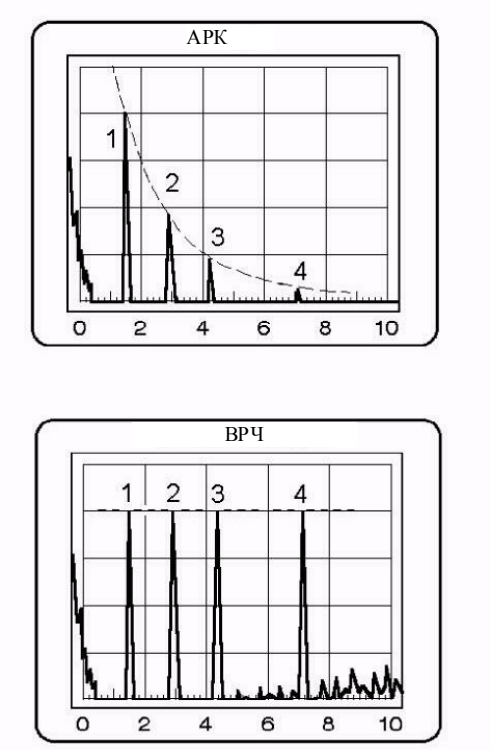


Рис. 54 АРК от эталонных эхо-сигналов (вверху) и временная регулировка чувствительности (внизу).

Естественно, записанные кривые, включая все параметры настройки прибора, могут быть запомнены в памяти. Это гарантирует, что любые последующие задачи контроля могут быть проведены с теми же настройками. При использовании памяти настроек, для оператора доступны все данные, необходимые для проведения контроля в любое время.

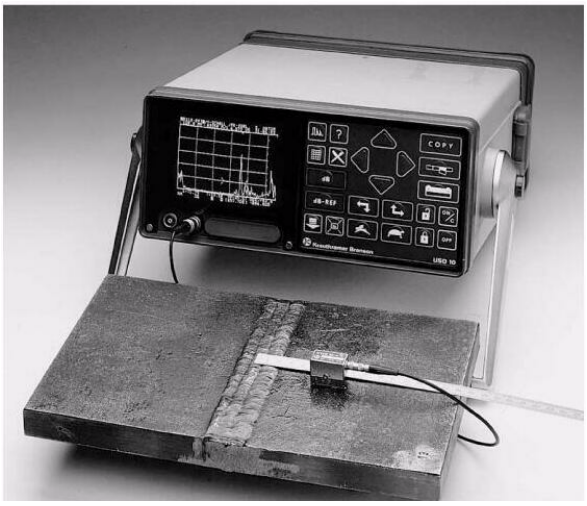


Рис. 55а Контроль сварного шва с помощью USD 10