

INTRODUCTION
TO **PHASED ARRAY** ULTRASONIC
TECHNOLOGY APPLICATIONS



ADVANCED PRACTICAL NDT SERIES

R/D
TECH

**Введение
в технологию применения
ультразвуковых
фазированных решеток**

Важные замечания от переводчика

Данный перевод является некоммерческим, добровольным проектом. Он выполнен на основании энтузиазма и личного интереса к данной теме. Цель размещения этой книги в свободном доступе на сайте defectoscopia.narod.ru та же самая, что и цель всего этого интернет-проекта – возможность получения широкими массами полезной, но труднодоступной информации.

К сожалению популярных публикаций по теме фазированных решеток на русском языке нет (либо есть, но опять же настолько редкие, что обнаружить мне их не удалось). Это дает основания надеяться, что три недели моей жизни, потраченные на подготовку данного перевода, были прожиты не зря.

Важная вещь, которая была обнаружена в ходе перевода состоит в том, что местами зарубежные понятия и термины (а иногда и подходы) существенно отличаются от отечественных. Чтобы не сложилось впечатления, что переводчик напереводил какой-то ерунды, во многих местах приведены специальные примечания переводчика (*прим. пер.*) мелким курсивным шрифтом.

Надеюсь, что существование этого перевода не нарушает авторских прав фирм Olympus и R/D Tech. Вопрос сложный.

Оригинальная книга содержала вступления и заключения, а также списки литературы, иллюстраций и таблиц. Они не несут существенной информации, поэтому в данный некоммерческий перевод я их не включал (дополнительной работы много, а толку мало).

Со своей стороны я приветствую свободное распространение данного перевода при условии сохранения целостности файла.

Это первый опыт перевода зарубежной литературы по дефектоскопии. Поэтому в случаях обнаружения спорных моментов или ошибок в переводе, прошу присылать исправления, дополнения и пожелания на любой из адресов электронной почты ayo@list.ru или defectoscopia@yandex.ru

Реука С.В.
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», кафедра ЭУТ

1. Основные понятия технологии фазированных решеток ультразвуковых

- 1.1 Основные принципы
- 1.2 Законы задержек, или фокальные законы
- 1.3 Основные компоненты системы фазированных решеток
- 1.4 Основы сканирования и получения изображений
- 1.5 Ссылки к главе 1

Данная глава рассказывает о принципах ультразвука, понятии фокальных законов и приборах с фазированными решетками.

1.1 Основные принципы

Ультразвуковые волны – это механические колебания, возбуждаемые в упругой среде пьезоэлектрическим преобразователем под действием электрического напряжения. Типичные частоты ультразвуковой волны лежат в диапазоне от 0,1 МГц до 50 МГц. В промышленности чаще всего применяются частоты от 0,5 МГц до 15 МГц.

При ультразвуковом контроле обычно используются одноэлементные преобразователи, создающие расходящееся звуковое поле. Ультразвуковой пучок распространяется вдоль акустической оси с небольшим расхождением. Расхождение луча помогает обнаруживать и измерять размеры дефектов, расположенных под углом к лучу.

Представим, что пьезоэлемент разрезан на множество идентичных элементов, ширина каждого из которых многократно меньше его длины ($e \ll W$). Каждый из этих элементов может рассматриваться как источник цилиндрической волны. Волновые фронты от множества узких пьезоэлементов будут интерферировать, создавая суммарный волновой фронт.

Эти волновые фронты могут быть задержаны во времени и синхронизированы по фазе и амплитуде таким образом, чтобы создавать *сфокусированный* и *управляемый* ультразвуковой луч.

Главная особенность технологии ультразвуковых фазированных решеток – управляемые компьютером амплитуда и фаза импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов в многоэлементном преобразователе. Возбуждение пьезоэлементов может осуществляться таким образом, чтобы была возможность управлять параметрами ультразвукового луча, например углом, фокусным расстоянием, размером фокусного пятна посредством компьютерной программы. Это позволяет обнаруживать дефекты, различно ориентированные относительно акустической оси. Простой одноэлементный преобразователь с высокой вероятностью может пропустить дефекты, расположенные под большим углом к акустической оси преобразователя, или в стороне от ультразвукового луча.

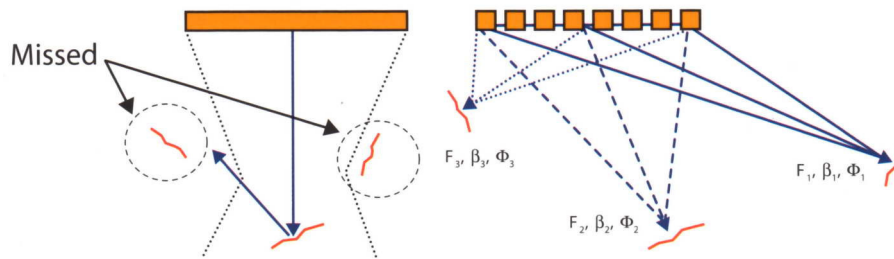


Рис.1.1. Обнаружение различно ориентированных дефектов одноэлементным (слева) и многоэлементным преобразователем (справа). Луч от преобразователя типа «фазированная решетка» может быть направлен под различными углами и сфокусирован, обеспечивая обнаружение различно расположенных дефектов.

Для того, чтобы создать луч под требуемым углом и требуемой фокусировкой, отдельные элементы возбуждаются в несколько отличающиеся моменты времени. Как показано на рис. 1.2, эхо-сигнал от определенной точки приходит на отдельные элементы преобразователя в различные моменты времени, которые возможно рассчитать. Эхо-сигналы на каждом элементе задерживаются по времени, затем суммируются. Их сумма отражается на А-скане, который отражает усиленный эхо-сигнал от требуемой фокальной точки и ослабленный – от всех остальных точек на пути луча.

- При излучении (emitting) генератор импульсов синхронизации (acquisition unit) посылает синхроимпульс на блок фазовых задержек (phased array unit). Последний генерирует импульс высокого напряжения заданной длительности и с заданной задержкой, определенной фокальным законом. На каждый элемент решетки поступает один задержанный импульс. Сумма волн, излученных каждым элементом представляет собой луч, распространяющийся под определенным углом и сфокусированный на определенном расстоянии. Этот луч отражается от дефекта.
- При приеме (receiving) сигнал принимается каждым элементом решетки, затем задерживается во времени в соответствии с заданным фокальным законом. Задержанные импульсы суммируются и формируют единый импульс, который поступает в устройства приемного тракта (acquisition unit).

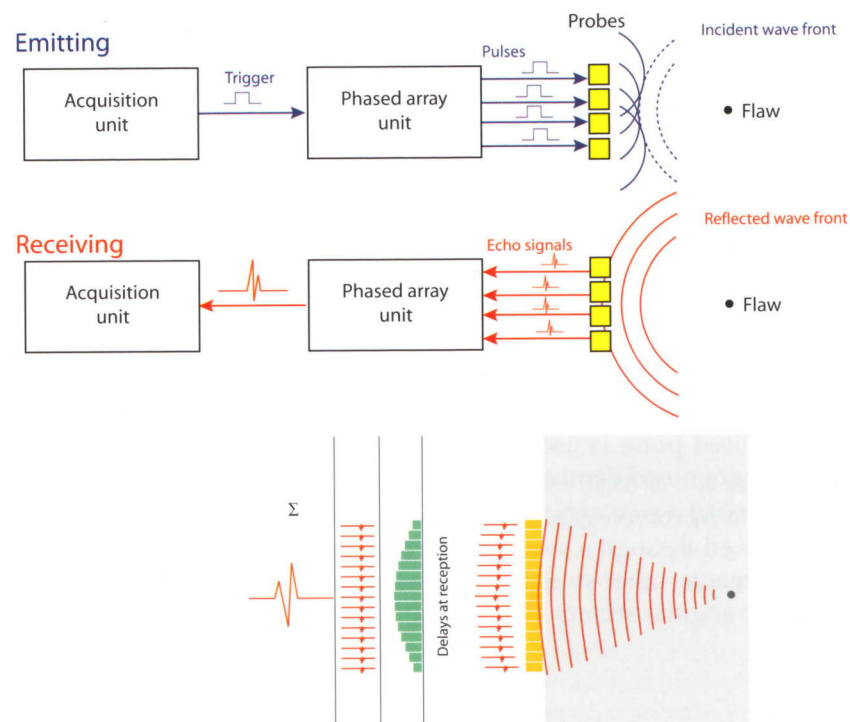


Рис. 1.2. Схема формирования луча и временных задержек при излучении и приеме.

Принцип фокусировки луча для прямого и наклонного ввода показан на рис. 1.3.

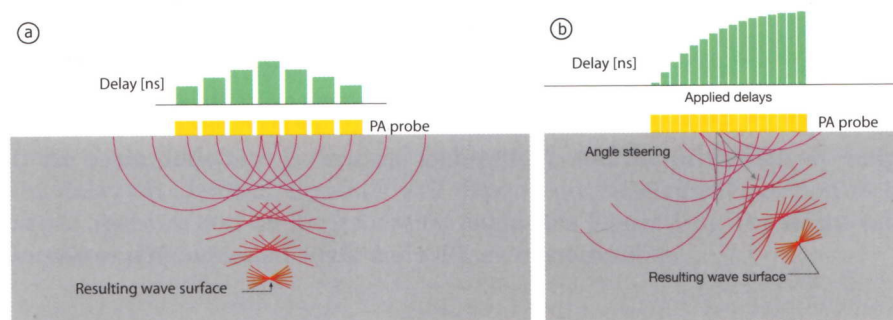


Рис. 1.3. Принцип фокусировки луча для а) прямого и б) наклонного ввода

Величина временной задержки (delay) на элементах фазированной решетки (PA probe) зависит от величины апертуры, типа волны, требуемого угла и глубины фокусировки.

Существует три основных способа управления лучом (подробнее см. гл.3-4):

- *Электронное сканирование*: один фокальный закон переключается в пределах группы элементов (см. рис. 1.4); сканирование выполняется с постоянным углом и вдоль длинной стороны решетки. Этот процесс эквивалентен механическому перемещению обычного одноэлементного преобразователя, выполняемого, например, с целью записи профиля донной поверхности.
- *Динамическая фокусировка по глубине* (вдоль акустической оси): сканирование выполняется посредством изменения фокусного расстояния. На практике для излучения используется один и тот же импульс, а в режиме

приема решетка перефокусируется последовательно на различные значения глубины (рис. 1.5)

- **Секторное сканирование** (также называемое азимутальное, или угловое сканирование): излучение производится одной и той же группой элементов с сохранением одного и того же фокусного расстояния, таким образом, но последовательно под различными углами. Диапазон углов и шаг изменения угла могут быть различными.

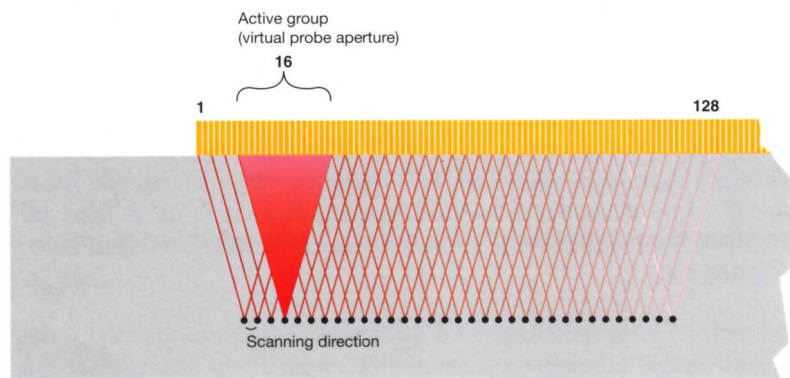


Рис. 1.4. Электронное сканирование прямым лучом (активная апертура 16 элементов)

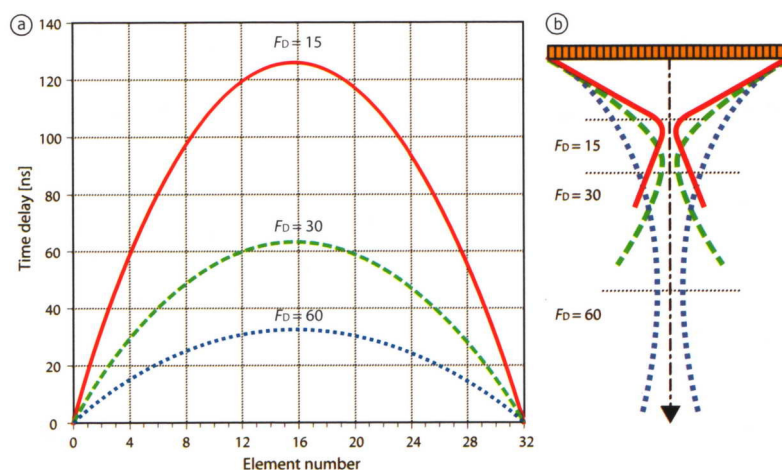


Рис. 1.5. Величины временных задержек и принцип сканирования по глубине для 32-элементной линейной решетки, фокусирующей пучок продольных волн на глубинах 15, 30 и 60 мм.

1.2 Законы задержки, или фокальные законы

Фокальные законы для фазированной решетки в отсутствие призмы (находящегося в непосредственном контакте с объектом контроля), рассчитанной на излучение продольных волн, имеют форму параболы. Величина задержки возрастает от края решетки к ее центру. Если фокусное расстояние увеличивается в два раза, то величины задержек должны быть уменьшены в два раза (см. рис. 1.5). С увеличением ширины элементов величина необходимой задержки также возрастает по линейному закону (см. рис. 1.6).

Фазированная решетка, установленная на призму, требует фокальных законов иной формы (см. рис. 1.6). Другие типы фазированных решеток (двумерные, или конические, например) требуют сложного расчета фокальных законов (см. гл. 3, 5).

Если осуществляется секторное сканирование преобразователем без призмы, то задержка на каждом элементе определяется расположением элемента в решетке и требуемым углом ввода луча (см. рис. 1.8). Значение времени задержки увеличивается с увеличением угла и номера элемента.

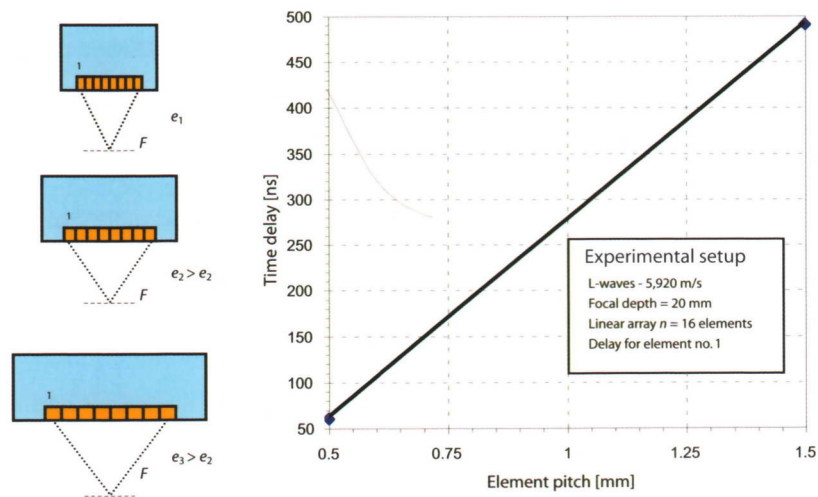


Рис. 1.6. Зависимость временной задержки от шага решетки при одной и той же фокальной глубине

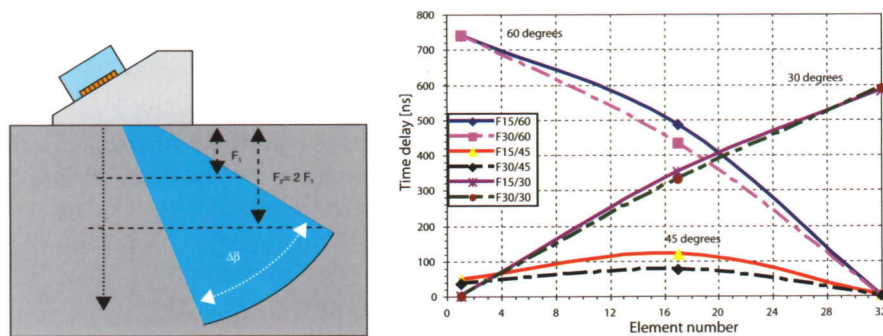


Рис. 1.7. Пример зависимости величины задержек от угла ввода и номера элемента для фазированной решетки, установленной на призме из оргстекла с углом 37° ($H_1 = 5$ мм)

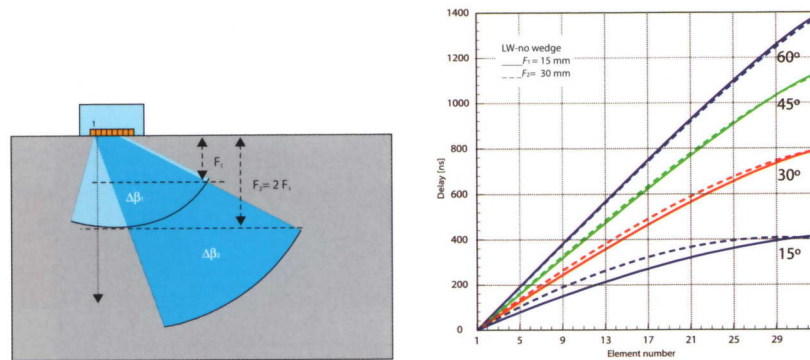


Рис. 1.8. Пример зависимости величины задержек от угла ввода, номера элемента и фокусного расстояния при отсутствии призмы (продольные волны, углы ввода в сталь 15° – 60°)

Если фазированная решетка установлена на призму, значения задержек зависят от номера элемента и требуемого угла ввода.

Фокальный закон имеет форму параболы для угла, рассчитанного по закону Снеллиуса (45° на рис. 1.7). Для углов меньших, чем рассчитанный, величина задержки на элементах увеличивается от задней к передней части решетки. Для углов, больших рассчитанного, задержка должна быть больше в задней части решетки, потому что импульс, излучаемый передними элементами должен пройти большее расстояние в призме, поэтому передние элементы должны возбуждаться раньше.

Во всех случаях рассчитанные величины задержек должны точно соблюдаться. Минимальное приращение величины задержки задает максимальную частоту элементов, которую допустимо использовать, как n/f .

1.3 Основные компоненты системы для работы с фазированными решетками

Основные блоки, требующиеся для построения простейшей системы для работы с фазированными решетками приведены на рис. 1.9. На схеме обозначены: компьютер с программой TomoView, специальный дефектоскоп TomoScan III PA, блок управления сканером MCDU-02 (верхний ряд), контролируемый образец, преобразователь-фазированная решетка, сканер (нижний ряд).

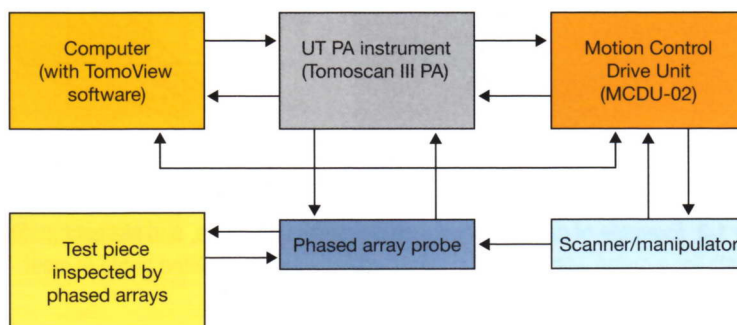


Рис. 1.9. Основные компоненты системы для работы с фазированными решетками и их взаимосвязи

1.4 Основы сканирования и получения изображений

При механическом сканировании сбор данных осуществляется при помощи датчиков координат. Затем данные представляются в удобном для анализа виде.

Фазированные решетки обычно используют массив сгруппированных А-сканов (который представляет собой В-скан, см. гл. 4), полученных под разными углами, с использованием множества фокальных законов.

Информация, полученная и записанная из одного положения фазированной решетки в виде большого числа А-сканов, представляется в реальном времени в виде *секторного S-скана*, или в виде *электронного В-скана* (см. гл. 4).

Как S-сканы, так и В-сканы представляют собой изображение, содержащее информацию о прозвучиваемом материале и несплошностях, находящихся на пути ультразвука по всем направлениям, по которым осуществляется электронное сканирование (см. рис. 1.10).

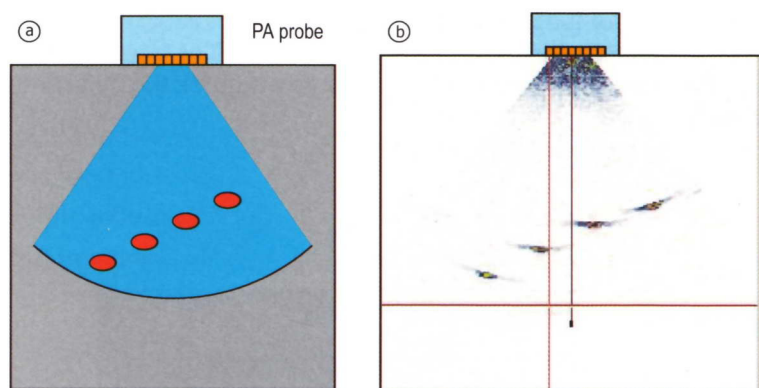


Рис. 1.10. Обнаружение 4 боковых цилиндрических отверстий:
а) принцип секторного сканирования; б) вид S-скана в диапазоне углов $\pm 30^\circ$

Отражение результатов прозвучивание в виде двумерного сечения объекта контроля, называемое «скорректированный S-скан» дает прямое представление о результатах контроля. S-скан дает следующие преимущества:

- Вывод изображения во время сканирования
- Истинное представление о глубине
- Двумерное представление контролируемого объема

Еще лучшие изображения возможно получить, комбинируя линейное и секторное сканирование. Подобная комбинация методов дает хорошо распознаваемые образы дефектов. Рис. 1.11 показывает примеры обнаружения различных искусственных дефектов и отличия в их образах на В-скане.

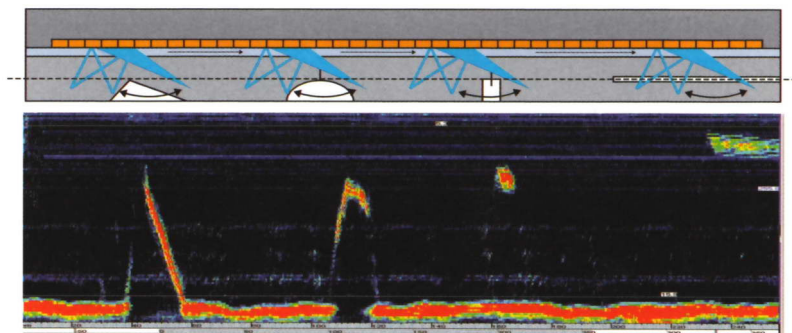


Рис. 1.11. Изображения искусственных дефектов при комбинированном сканировании: дефекты и схема озвучивания (сверху), изображения на В-скане (снизу)

Комбинация сканов, полученных продольными и поперечными волнами может быть весьма полезна для обнаружения и измерения размеров дефектов при возможности малых перемещений преобразователя (см. рис. 1.12). В этом случае активная часть апертуры преобразователя может перемещаться для получения оптимальных углов озвучивания.

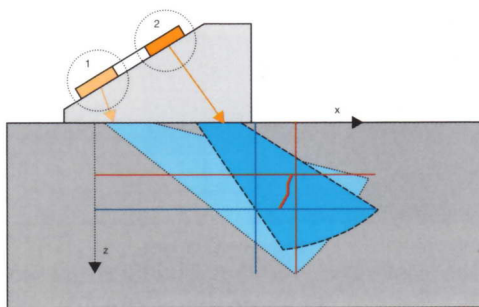


Рис. 1.12. Обнаружение произвольно ориентированного дефекта при помощи комбинации секторных сканов продольной (1) и поперечной (2) волнами.

Цилиндрически, эллиптически и сферически сфокусированные звуковые пучки обеспечивают лучшее отношение сигнал-шум. Рис. 1.13 показывает возможность разрешения группы отверстий с помощью цилиндрически сфокусированного луча.

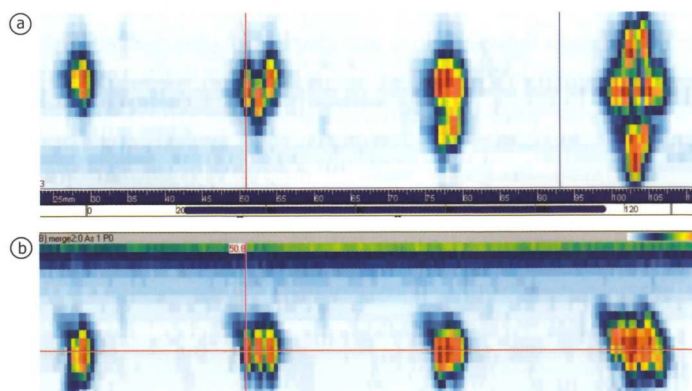


Рис. 1.13. Разрешение группы отверстий:
а) вид в плане (С-скан) б) вид в боковом разрезе (В-скан)

Наряду с электронным сканированием может выполняться перемещение преобразователя, после чего данные объединены в единое изображение (см. рис. 1.14). Данная возможность дает следующие преимущества:

- высокая информативность изображения;
- облегченное определение координат дефектов;
- получение изображения дефекта с разных ракурсов.

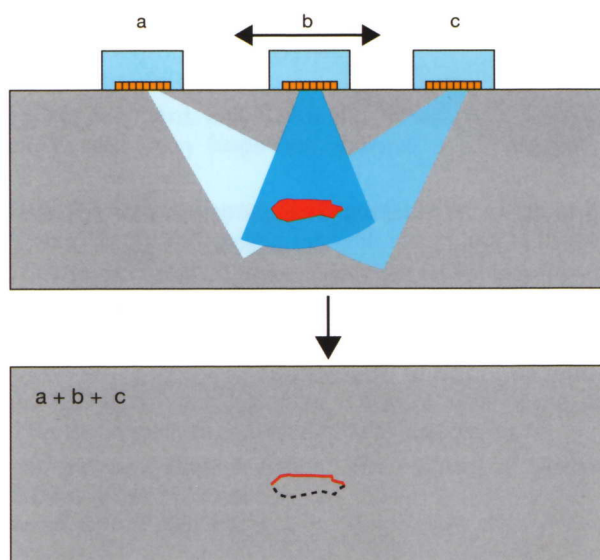


Рис. 1.14. Различные направления озвучивания и объединенное изображение

Рис. 1.15 поясняет методику получения объемного изображения с помощью комбинации секторного электронного сканирования в одной плоскости и механического перемещения преобразователя в другой плоскости. Каждое положение преобразователя представляет собой «срез» дефекта в плоскости качания луча. Данные «срезы» можно сравнить с металлографическими срезами при определении реальных размеров и формы дефекта.

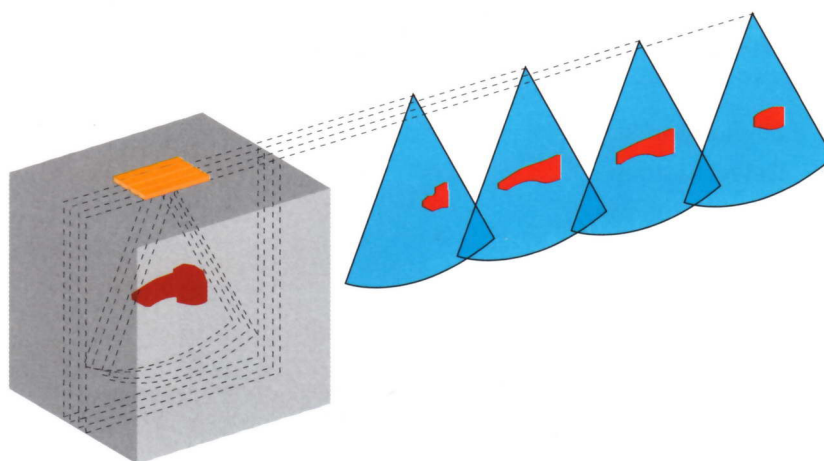


Рис. 1-15. Объединение отдельных S-сканов в объемное ультразвуковое изображение

Более детальное изложение концепций, упомянутых в данной главе можно изучить по литературе 1 – 9.

2. Основные формулы и справочные данные

- 2.1 Физика ультразвука – основные понятия
 - 2.2 Скорости звука и длины волн
 - 2.3 Формулы для расчета звукового давления
 - 2.4 Влияние температуры
 - 2.5 Круглые преобразователи
 - 2.6 Расхождение луча
 - 2.7 Прямоугольные преобразователи
 - 2.8 Сфокусированные звуковые поля
 - 2.9 Частотные и временные характеристики
 - 2.10 Классификация преобразователей по ширине спектра (демпфированию)
 - 2.11 Взаимодействие ультразвукового луча с объектом контроля и отражателями
 - 2.12 Затухание
 - 2.13 Определение размеров дефектов с использованием дифракции и преобразования моды
 - 2.14 Контроль изделий с неплоской поверхностью
 - 2.15 Измерение протяженности малых дефектов
 - 2.16 Надежность ультразвукового контроля
-

В данной главе приводится краткий обзор основных формул, используемых в традиционном ультразвуковом контроле и специальных способах определения размеров дефектов. Приведенные графики и таблицы полезны и при использовании фазированных решеток – для определения необходимых фокальных законов, распознавания сигналов при преобразовании моды, изменения амплитуды в зависимости от угла ввода, лучевой и фронтальной разрешающей способности, параметров ультразвукового луча.

2.1 Физика ультразвука. Обозначения и понятия.

Ультразвуковая волна характеризуется следующими параметрами:

- Отклонение частиц среды от положения равновесия
 - Частота
 - Скорость звука (см. табл. 2.1)
 - Длина волны
 - Угловая скорость
 - Акустический импеданс
 - Интенсивность акустической энергии
 - Относительная амплитуда, выраженная в дБ
 - Звуковое давление
 - Коэффициент затухания
-

Примечание переводчика: понимается, скорость звука, акустический импеданс и коэффициент затухания не являются характеристикой звуковой волны – это характеристики материала

В твердой среде возможна генерация следующих типов волн:

- продольная (волна растяжения-сжатия);
- поперечная (волна сдвига);
- «ползущая» (creeping/head wave) – природа этой волны объяснена в п.2.13.4;
- поверхностная (волна Релея);
- волна Лэмба (волна в ограниченной среде);
- краевая (дифрагированная).

Продольная волна – единственная, которая может распространяться в жидкостях и газах.

В отличие от жидкостей и газов, твердые среды могут проводить волны различных типов. Наиболее важными являются продольная и поперечная волны. В продольной волне направление движения частиц совпадает с направлением распространения волны. В поперечной волне частицы движутся перпендикулярно направлению ее распространения. Остальные перечисленные типы волн являются комбинациями двух основных типов, например, волны Лэмба, распространяющиеся в пластинах. Дифрагированные волны могут быть либо продольными, либо поперечными (см. раздел 2.13).

Формулы для расчета скорости распространения продольной, поперечной и поперечной волн следующие:

$$v_L = \left[\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)} \right]^{0.5} \quad (2.1)$$

$$v_T = \left[\frac{E}{2\rho(1+\mu)} \right]^{0.5} \quad (2.2)$$

$$v_S = \left[\frac{(0.87 + 1.12\mu)}{(1+\mu)} \right] v_T \quad (2.3)$$

где

E: модуль Юнга [Н/м²]

μ: коэффициент Пуассона [(E – 2G)/2G]

ρ: плотность [кг/м³]

Скорость поверхностной (Релеевской) волны составляет приблизительно 0,92 скорости поперечной волны.

2.2 Скорости звука и длины волн

Скорости звука и акустические импедансы часто встречающихся материалов приведены в таблице 2-1.

Табл. 2-1. Скорости звука и импедансы для часто применяемых материалов при температуре 20°C

Material	Mass density	Velocity (LW)	Velocity (SW)	Acoustic impedance
	kg/m ³	m/s	m/s	10 ⁶ kg/m ² s
Liquid couplant / wedge material				
Water (20°C)	1,000	1,480	-	1.48
Heavy water	1,104	1,400	-	1.55
Glycerin (Hamikleer®)	1,260	1,920	-	2.42
Motor oil	870	1,740	-	1.51
Acrylic resin	1,180	2,730	1,430	3.22
Lucite®	1,180	2,680	1,260	3.16
Plexiglas®	1,270	2,730	-	3.51
Polystyrene (Rexolite®)	1,056	2,340	-	2.47

Material	Mass density	Velocity (LW)	Velocity (SW)	Acoustic impedance
	kg/m ³	m/s	m/s	10 ⁶ kg/m ² s
Component material				
Aluminum	2,700	6,320	3,130	17.06
Brass	8,560	4,280	2,030	36.64
Copper	8,930	4,660	2,260	41.61
Gold	19,320	3,240	1,200	62.60
Inconel®	8,500	5,820	3,020	49.47
Iron cast–slow	6,950	3,500	2,200	25
Iron cast–fast	7,350	5,600	3,200	40
Monel®	8,830	5,350	2,720	47.24
Steel 1020	7,710	5,890	3,240	45.41
Steel, austenitic	7,910	5,740	3,090	45.40
Titanium	4,500	6,070	3,110	27.32
Tungsten	19,250	5,180	2,870	99.72
Zircaloy™	6,500	4,686	2,360	30.46

Source: ASNT, Nondestructive Testing Handbook, 2nd edition, vol. 7, Ultrasonic Testing (Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 1991), p. 836–839.

Длины волн для часто используемых материалов призмы, контактных жидкостей и контролируемых материалов приведены в табл. 2-2.

Табл.2.2. Длины волн в часто применяемых контактных жидкостях, материалах призмы и контролируемых промышленных объектах при 20°C

Frequency (MHz)	Wavelength (mm)	
	Longitudinal waves	Shear waves
Water		
1	1.5	-
2	0.75	-
4	0.4	-
5	0.3	-
10	0.15	-
Glycerin (Hamikleer®)		
1	1.9	-
2	0.95	-
4	0.48	-
5	0.38	-
10	0.19	-
Plexiglas®		
1	2.7	-
2	1.35	-
4	0.75	-
5	0.54	-
10	0.27	-

2.3. Формулы для расчета звукового давления

Знание звукового давления важно при моделировании процедуры контроля. В следующем разделе рассказывается о способах его вычисления.

Волновой фронт (поверхность равной фазы) может иметь сферическую или цилиндрическую форму (рис. 2.1).

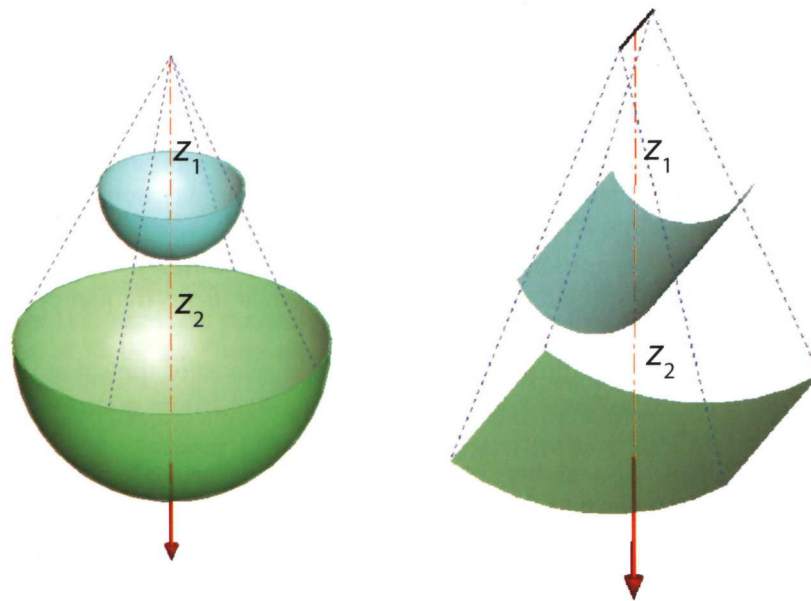


Рис. 2-1. Распространение сферической (от точечного источника) или цилиндрической (от линейного источника) волны.

Звуковое давление в определенной точке сферической волны зависит от пройденного расстояния по следующему закону:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{\text{spherical waves}} = \frac{z_2}{z_1} \quad (2.4)$$

Звуковое давление в цилиндрической волне является следующей функцией расстояния:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{\text{cylindrical waves}} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{0.5} \quad (2.5)$$

Для ультразвуковой волны характерны следующие явления:

- *Отражение.* Звуковая энергия отражается от границы двух сред с различными скоростями звука и плотностями, при этом угол отраженной волны равен углу волны падающей.
- *Преломление.* Изменение направления распространения звуковой волны при переходе через границу раздела сред с различными скоростями звука.
- *Затухание.* Уменьшение амплитуды или интенсивности в результате вязкого поглощения (в любых материалах) и рассеяния (в поликристаллических материалах). Подробнее см. раздел 2.12.
- *Дисперсия.* Звуковые волны различной частоты могут распространяться с различными скоростями.
- *Интерференция.* Суперпозиция двух или более волн одной частоты может привести к появлению нового волнового фронта.
- *Дифракция.* Способность волн рассеиваться на границах малых дефектов (например, на концах трещин).
- *Поляризация.* Направление колебаний частиц в волне, относительно направления распространения энергии волны.
- *Трансформация.* Преобразование типа колебаний (моды).

Основные возможные сочетания продольных и поперечных отраженных и преломленных волн приведены на рис. 2.2. В твердых средах возможно существование продольных и поперечных волн (а также других мод).

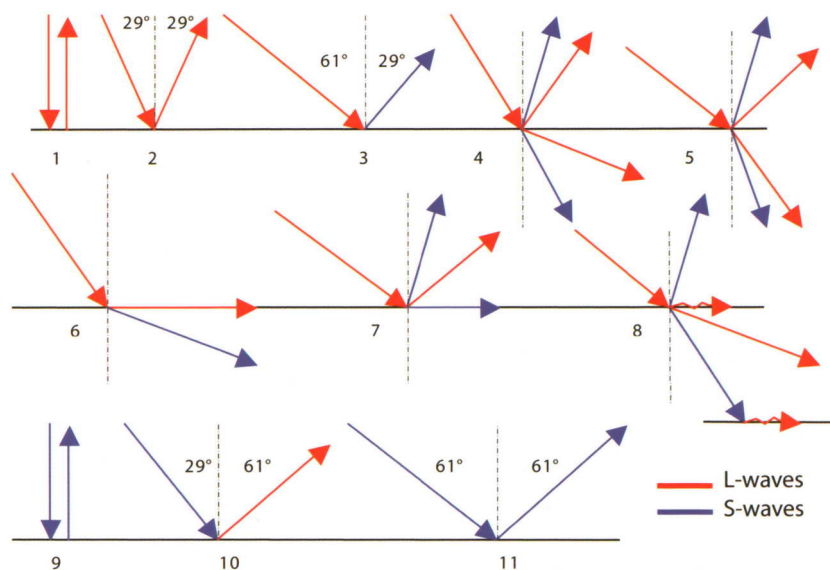


Рис. 2.2. Возможные варианты отражения и преломления продольных и поперечных волн в стали при различных граничных средах. Красная линия – продольные волны, синяя – поперечные. 1) прямое падение продольной волны на границу с воздухом; 2) наклонное падение продольной волны под углом 29° на границу с воздухом; 3) наклонное падение продольной волны под углом 61° на границу с воздухом; 4) падение продольной волны из пластмассы на границу со сталью; 5) падение продольной волны из стали на границу с пластмассой; 6) падение продольной волны под 1 критическим углом; 7) под 2 критическим углом; 8) возбуждение «ползущих» волн; 9) нормальное падение поперечной волны на границу с воздухом; 10) то же под углом 29°; 11) то же под углом 61°

Коэффициент отражения по амплитуде вычисляется по следующей формуле:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.6)$$

Коэффициент прохождения по амплитуде вычисляется следующим образом:

$$T = \frac{2Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.7)$$

Влияние слоя контактной смазки на прохождение вычисляется по формуле:

$$T_{\text{couplant}} = \frac{(4Z_1/Z_3)}{[(Z_1/Z_3 + 1)^2 \cos^2 \theta + (Z_1/Z_2 + Z_2/Z_3) \sin^2 \theta]} \quad (2.8)$$

где:

$$\theta = 2\pi t_{\text{смазки}} / \lambda_{\text{смазки}}$$

T_{couplant} – коэффициент прохождения через смазку

Z_1 – импеданс материала призмы

Z_2 – импеданс образца

Z_3 – импеданс смазки

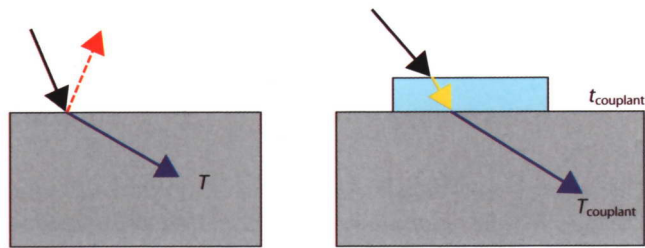


Рис. 2.3. Коэффициенты отражения и прохождения для иммерсионного (слева) и контактного с учетом смазки (справа) способов ввода колебаний.

Предпочтительная толщина слоя смазки составляет меньше половины длины волны, в идеале – несколько микрон. Если толщина смазки составляет $\lambda/4$, то потеря по амплитуде составляет 5 дБ.

Отношение амплитуд в децибелах (дБ) поясняется на рис. 2.4.

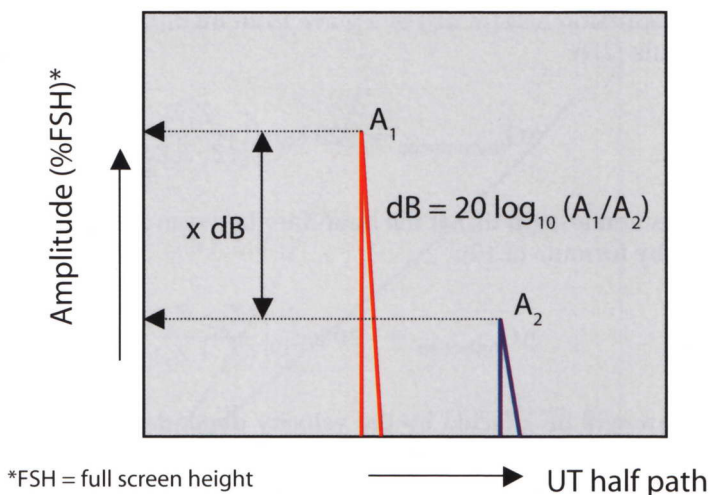


Рис. 2.4. Отношение амплитуд двух сигналов.

$$\Delta A = 20 \log_{10} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)$$

Соотношение амплитуд можно определять в дБ или в % от высоты экрана (FSH) дефектоскопа. Взаимосвязь этих способов характеризуется графиком на рис. 2.5.

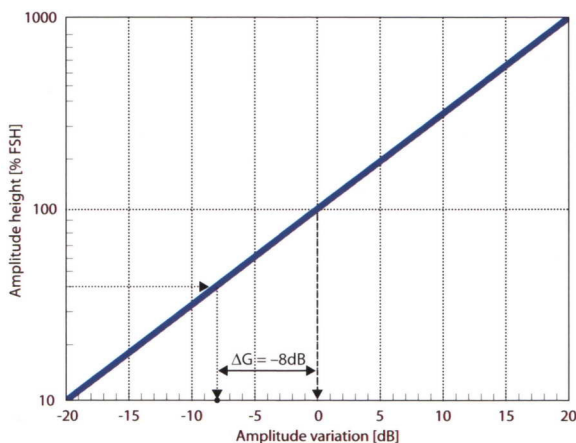


Рис. 2.5. График связи между отношениями амплитуд, выраженными в дБ или в % высоты экрана.

Например, если сигнал от трещины составляет 40% от опорного уровня (который, например, выбран 100% экрана), тогда отличие сигнала от трещины от опорного уровня составляет -8 дБ.

Потеря амплитуды в децибелах при переходе звуковых колебаний из среды 1 в среду 2 определяется по формуле:

$$\Delta G_{\text{transmission}} = -20 \log_{10} \left[\frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \right] \quad (2.9)$$

Амплитуда волны, отраженной от границы раздела сред определяется в децибелах по формуле:

$$\Delta G_{\text{reflection}} = -20 \log_{10} \left[\frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_1 + Z_2)} \right] \quad (2.10)$$

На преломление звука сильное влияние может оказывать температура сред, т.к. от температуры зависят скорости звука в обеих граничащих средах.

Графики на рис. 2.6 – 2.9 показывают типичные связи углов падения и преломления, однако их необходимо уточнять путем расчета по закону Снеллиуса с использованием скоростей звука, измеренных при определенной температуре. Чем больше угол падения, тем сильнее влияет температура на угол преломления. Зависимости скорости звука от температуры показаны на рис. 2.10 – 2.13. Их необходимо учитывать при обнаружении и определении размеров дефектов.

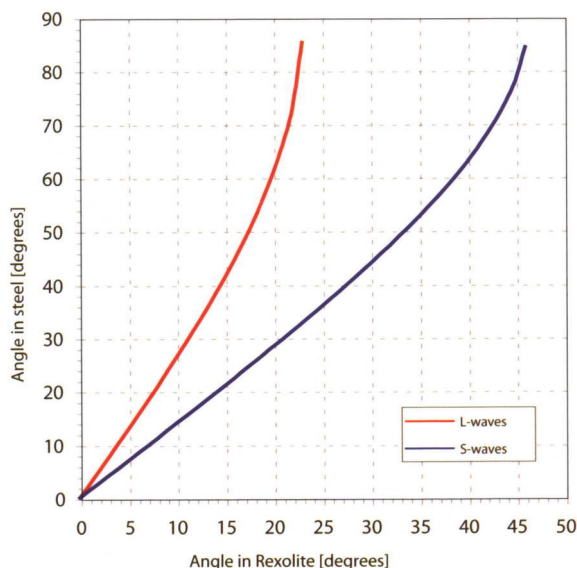


Рис. 2.6. График закона Снеллиуса для призмы из рексолита на стали

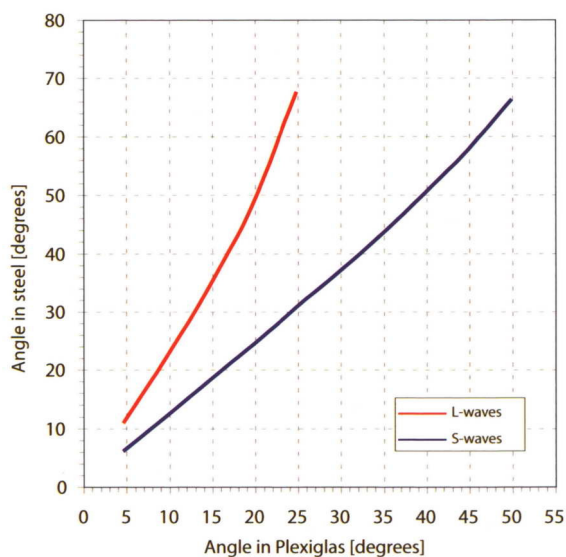


Рис.2.7 График закона Снеллиуса для призмы из плексигласа на стали

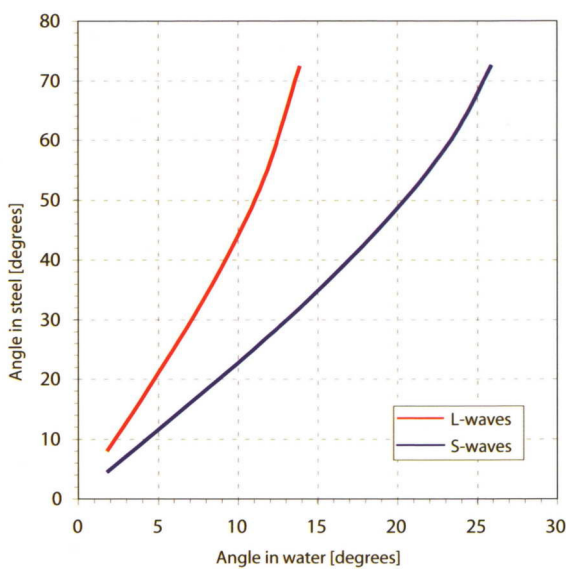


Рис. 2.8 График закона Снеллиуса для иммерсионного ввода в сталь

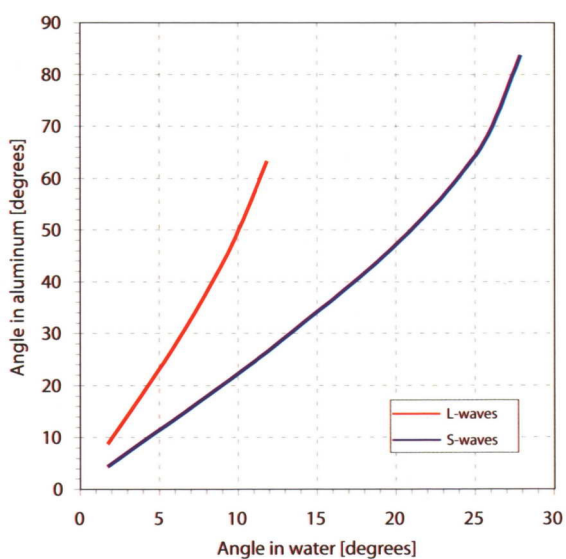


Рис. 2.9 График закон Снеллиуса для иммерсионного ввода в алюминий

Графики на рис. 2.10 – 2.13 показывают типичное влияние температуры на скорость звука. Эти данные полезно учитывать в тех задачах, где температура существенно влияет на точную калибровку аппаратуры. Соответствующие углы можно рассчитать по закону Снеллиуса.

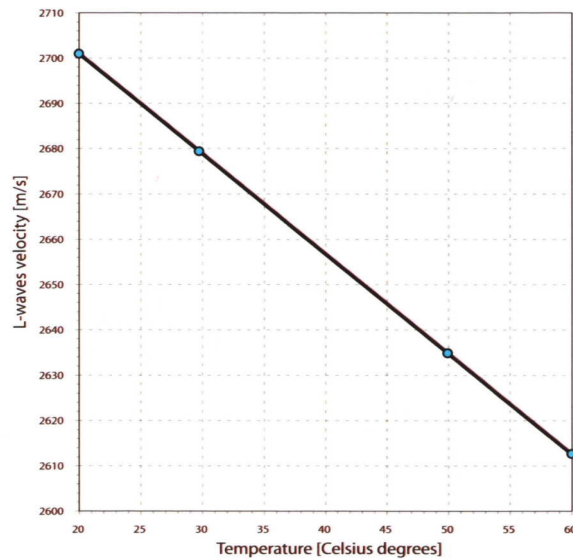


Рис. 2.10. Зависимость скорости звука в призме из плексигласа от температуры

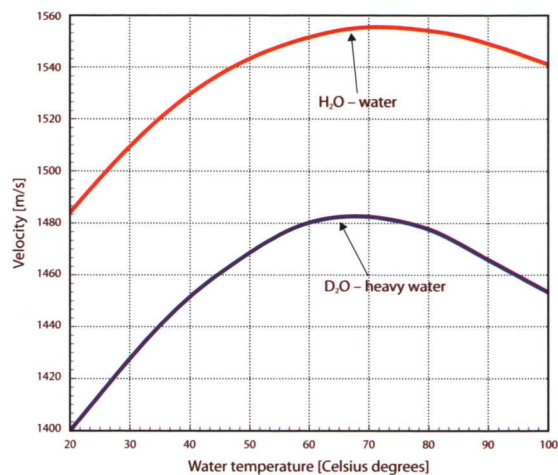


Рис. 2.11 Зависимость скорости звука в воде от температуры

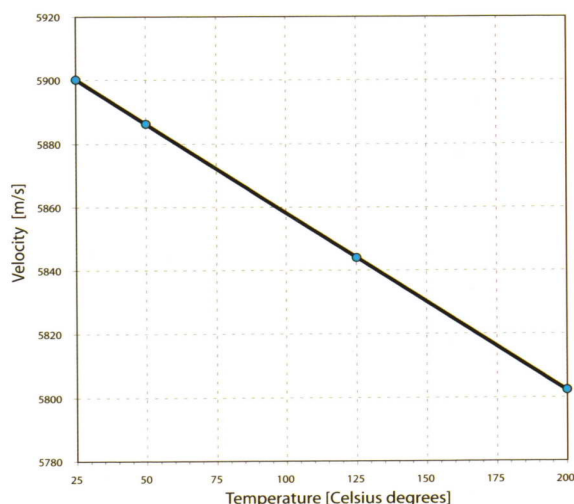


Рис. 2.12 Зависимость скорости продольных волн в стали от температуры

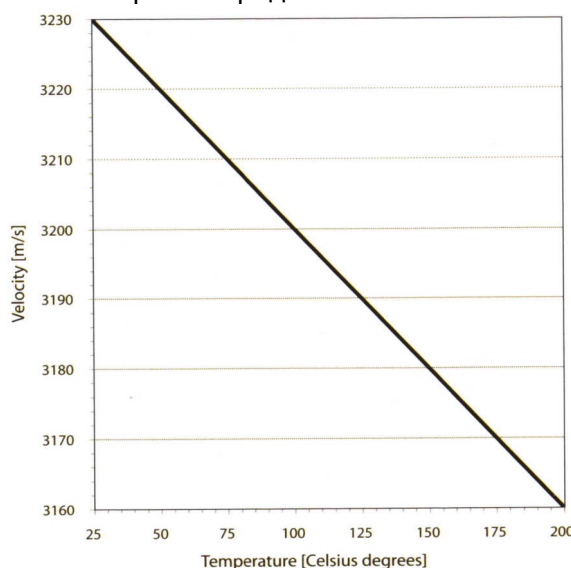


Рис. 2.13 Зависимость скорости поперечных волн в стали от температуры

2.4. Влияние эффектов, связанных с температурой

Как было указано ранее, в определенном диапазоне углов падения влияние температуры может быть существенным. Следующий пример показывает, как можно рассчитать действительные углы преломления.

Пример: линейная фазированная решетка используется для контроля сварного шва. Преобразователь погружен в воду при температуре 60°C. Диапазон «качания» ультразвукового луча настроен от 30° до 60°, причем настройка проводилась при температуре 20°C. Какой действительный диапазон углов реализуется при температуре иммерсионной жидкости 60°C?

Решение: используя скорректированные значения скорости (по рис. 2.11 для воды и по рис. 2.13 для поперечных волн в стали), по закону Снеллиуса вычисляем, что при 60°C диапазон углов составит от 28,4° до 54,4°.

2.5. Круглые преобразователи

Звуковое давление, создаваемое в среде круглым преобразователем, изменяется как вдоль акустической оси преобразователя, так и в перпендикулярном ей направлении. Соотношение диаметра преобразователя и длины волны определяет положение максимумов и минимумов звукового давления, степень расхождения луча и его диаметр. При распространении в среде, однородной по свойствам, не содержащей дефектов, звуковое поле преобразователя принято разделять на 3 области (рис. 2.14):

1. Ближняя зона – $0 < z < N_0$
2. Переходная зона – $N_0 < z < 3N_0$
3. Дальняя зона – $z > 3N_0$

где $N_0 = \frac{(D_{\text{probe}}^2 - \lambda^2)}{4\lambda}$ - протяженность ближней зоны, размер которой зависит от частоты преобразователя и скорости звука в среде. Для преобразователей, для которых $D_{\text{пр}}/\lambda > 10$, ближняя зона приблизительно оценивается по формуле

$$N_0 = \frac{D_{\text{probe}}^2 f}{4v} \quad (2.11)$$

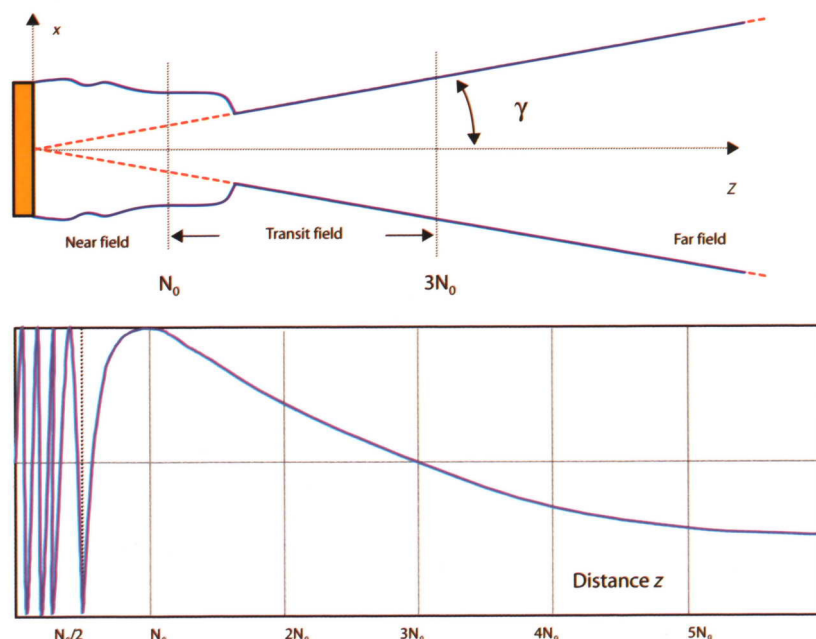


Рис. 2.14. Звуковое поле круглого преобразователя в сечении плоскостью (сверху) и изменение звукового давления на оси преобразователя (снизу). Рисунок относится к случаю монохроматического (непрерывного) возбуждения преобразователя.

Если преобразователь возбуждается немонахроматически (коротким импульсом), зависимость звукового давления от расстояния будет иной (рис. 2.15).

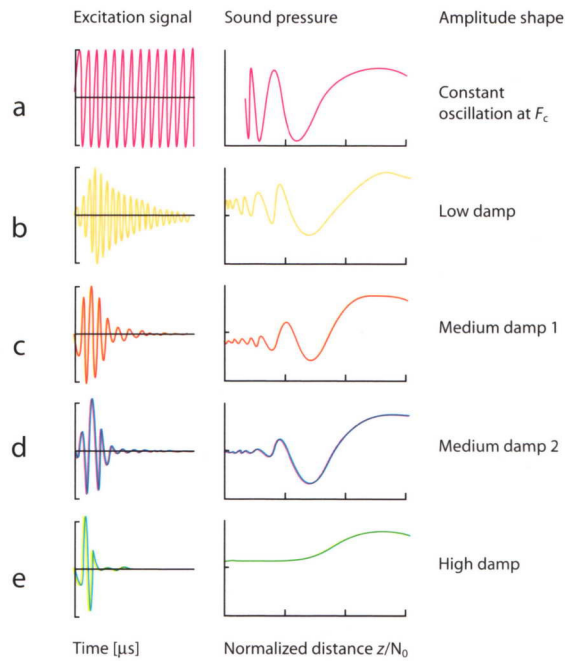


Рис. 2.15. Зависимость звукового давления от формы и длительности импульса возбуждения для плоского круглого преобразователя.

Зависимость звукового давления на оси преобразователя вычисляется по формуле:

$$P(z) = P_0 2 \sin \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{D_{\text{probe}}}{2} \right)^2 + z^2} - z \right] \right\} \quad (2.12)$$

где P_0 – звуковое давление на поверхности преобразователя ($z = 0$).

Звуковое давление в дальней зоне приближенно описывается формулой:

$$P(z) \approx \frac{P_0 \pi D_{\text{probe}}^2}{4 \lambda z} = \frac{P_0 S_{\text{probe}}}{\lambda z} \quad (2.13)$$

где S_{probe} – площадь поверхности преобразователя.

Эквивалентная протяженность ближней зоны для различных материалов вычисляется по формуле (формула верна для контактного случая без учета слоя смазки):

$$N_{02} = \frac{N_{01} v_1}{v_2} \quad (2.14)$$

Эффективная протяженность ближней зоны (рис. 2.16) вычисляется по формуле:

$$N_{\text{eff}} = N_0 \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \right)^2 \quad (2.15)$$

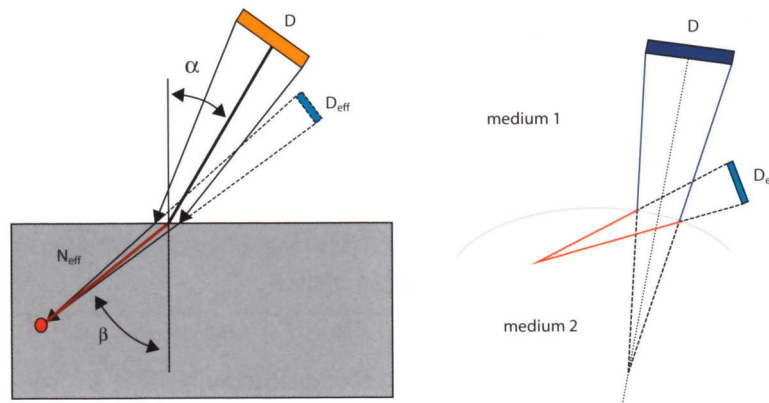


Рис. 2.16. Эффективный диаметр преобразователя и эффективная протяженность ближней зоны, рассчитываемые через преломление на плоских или искривленных поверхностях.

Рис. 2.16 показывает, что протяженность ближней зоны уменьшается при вводе ультразвуковых колебаний под углом, вследствие уменьшения эффективного размера преобразователя. Для продольных волн эффективная величина ближней зоны может быть определена по графику на рис. 2.17.

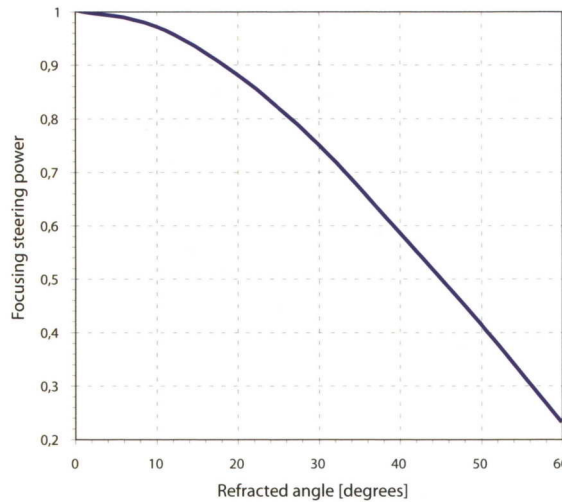


Рис. 2.17. Зависимость эффективной протяженности ближней зоны от угла преломления: продольные волны, преломленные под углом от 0° до 60°.

Протяженности ближней зоны для часто используемых преобразователей представлены в таблице 2.3.

Табл.2.3. Протяженности ближней зоны для круглых преобразователей.

Frequency (MHz)	Crystal diameter (mm)					
	5	6	10	12	20	24
Water; LW; $v = 1.5 \text{ mm}/\mu\text{s}$						
1	4.2	6	17	24	68	96
2	8.4	12	34	48	136	192
4	17	24	68	96	272	384
5	21	30	85	120	340	480
10	42	60	170	240	680	920
Steel; LW; $v = 5.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$						
1	1	1.5	4	6	16	24
2	2	3	8	12	32	48
4	4	6	16	24	64	96
5	5	7	20	30	80	120
10	10	15	40	60	160	240
Steel; SW; $v = 3.2 \text{ mm}/\mu\text{s}$						
1	2	3	8	12	32	48
2	4	6	16	24	64	96
4	8	12	32	48	128	192
5	10	15	40	60	160	240
10	20	30	80	120	320	480

Frequency (MHz)	Crystal diameter (mm)					
	5	6	10	12	20	24
Copper; LW; $v = 4.7 \text{ mm}/\mu\text{s}$						
1	1.3	2	5	8	20	32
2	2.6	4	10	16	40	64
4	5	8	20	32	80	128
5	6.5	10	26	40	104	160
10	13	20	52	80	208	320
Aluminum; LW; $v = 6.3 \text{ mm}/\mu\text{s}$						
1	1	1.4	4	6	16	24
2	2	3	8	12	32	48
4	4	6	16	24	64	96
5	5	7	20	30	80	120
10	10	14	40	60	160	240

Для круглых преобразователей звуковое давление в направлении поперек оси преобразователя определяется диаграммой направленности, которая вычисляется в соответствии с формулой (верна только для дальней зоны):

$$P(z, \gamma) = \frac{2P_z J_1(X)}{X} \quad (2.16)$$

где

$J_1(x)$ – функция Бесселя 1 порядка

$x = \pi(D/\lambda)\sin\gamma$

γ - угол (направление), под которым вычисляется звуковое давление

Пространственное изображение распределения звукового давления приведено в различных сечениях на рис. 2.18.

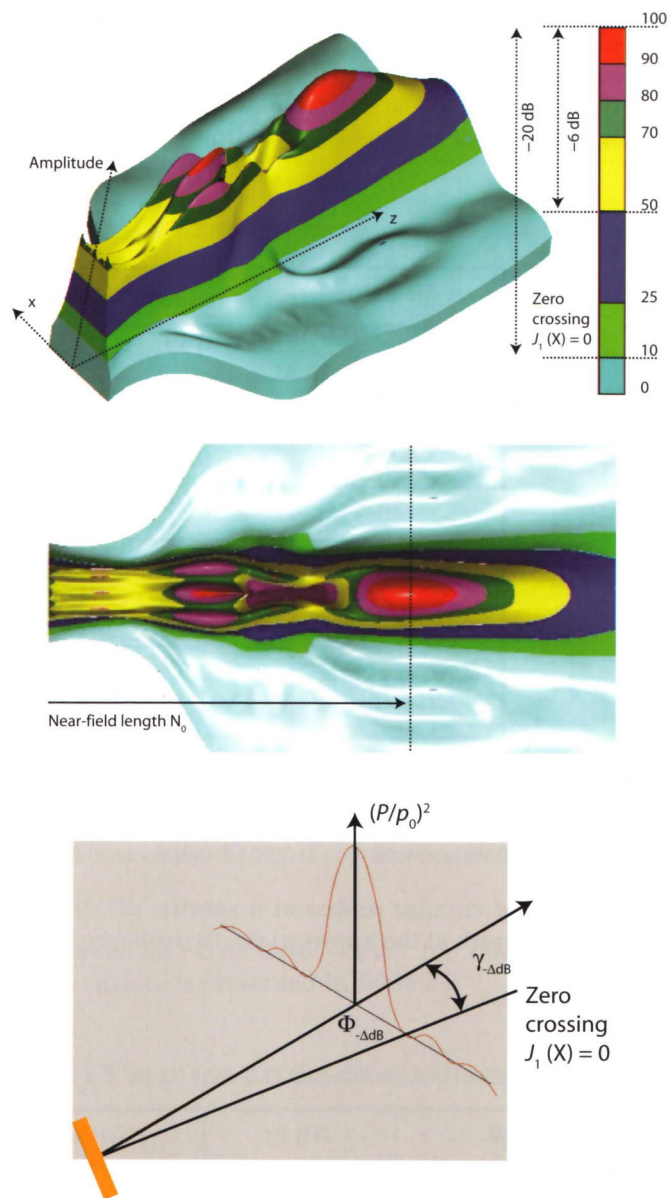


Рис. 2.18. Изометрическое (сверху), изображение в плане (посередине), и поперечное сечение (снизу) звукового давления в ближней зоне круглого преобразователя.

2.6. Расхождение звукового луча

Прим. пер.: в отечественной литературе отсутствует единая терминология относительно углов, характеризующих расхождение звукового луча. В оригинальном тексте данной книги авторы также используют различные термины. В переводе принят термин «угол раскрытия» (основного лепестка диаграммы направленности) – угол между акустической осью и направлением излучения или приема по заданному уровню относительно максимума. Данное понятие относится к режиму излучения. Если речь идет о режиме излучения-приема, это уточняется в тексте.

Удвоенное значение угла раскрытия основного лепестка диаграммы направленности называется «ширина основного лепестка диаграммы направленности».

Принятая терминология соответствует книге Е.Ф.Кретова.

Угол раскрытия в дальней зоне зависит от диаметра преобразователя и его частоты. Значения угла для характерных уровней отсчета (в дБ) приведены в табл.2-4.

Табл. 2.4. Углы раскрытия основного лепестка диаграммы направленности

Δ dB value	$k_{\text{free field}}$
-1.5	0.37
-3	0.51
-6	0.70
-10	0.87
-12	0.93
-24	1.09
Zero crossing ($J_1 = 0$)	1.22

Величина угла раскрытия в режиме излучения связана с таковой в режиме излучения-приема следующей формулой:

$$\gamma_{(2\Delta \text{ dB}) \text{ pulse-echo}} = \gamma_{(\Delta \text{ dB}) \text{ free field}} \quad (2.17)$$

Диаметр луча для круглых преобразователей по определенному уровню в дБ может быть непосредственно измерен, как показано на рис. 2.19.

Формулы для расчета угла раскрытия по уровням -6 дБ и -20 дБ для круглого и прямоугольного преобразователей приведены в табл. 2.5.

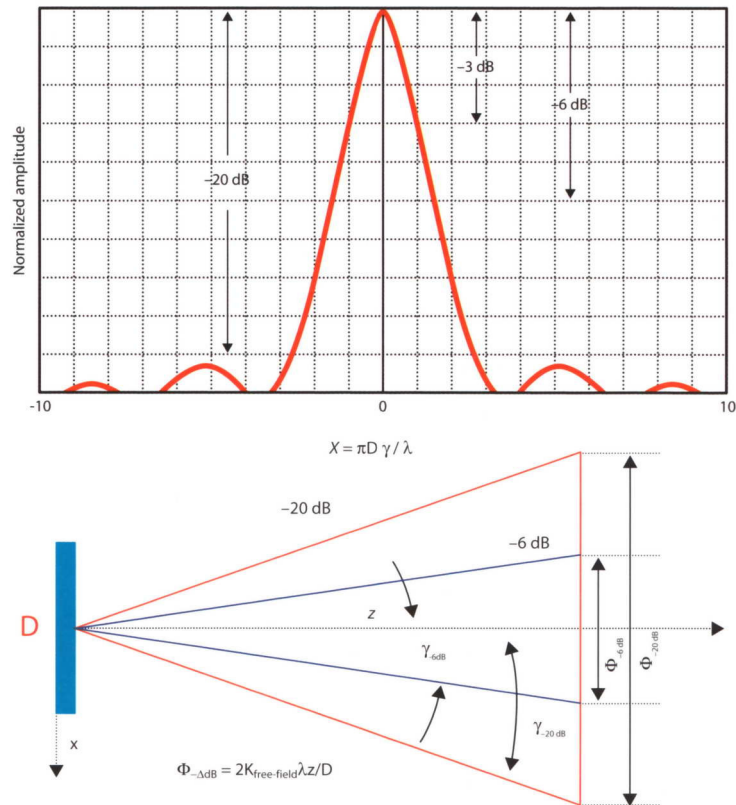


Рис. 2.19. Уровни амплитуды по которым измеряется угол раскрытия (сверху) и зависимость диаметра луча от расстояния и уровня измерения в дБ.

Табл. 2.5. Углы раскрытия для круглого и прямоугольного преобразователей

Probe	Δ dB	Beam spread
Disc-shaped	-6 dB	$\gamma_{-6 \text{ dB}} = \arcsin\left(\frac{0.51\lambda}{D}\right)$
	-20 dB	$\gamma_{-20 \text{ dB}} = \arcsin\left(\frac{0.87\lambda}{D}\right)$
Probe	Δ dB	Beam spread
Rectangular-shaped	-6 dB	$\lambda_{-6 \text{ dB}} = \arcsin\left(\frac{0.44\lambda}{D}\right)$
	-20 dB	$\lambda_{-20 \text{ dB}} = \arcsin\left(\frac{0.74\lambda}{D}\right)$

Прим. пер.: путем сопоставления формул, приведенных в табл. 2.5 с аналогичными в отечественной литературе было установлено, что они наиболее вероятно характеризуют угол раскрытия (а не ширину) основного лепестка диаграммы направленности в режиме излучения-приема. Из оригинального текста книги это неясно. Поскольку результаты сопоставления не вполне определенные (имеется небольшое отличие численных коэффициентов), переводчик рекомендует все же использовать соответствующие формулы из отечественной литературы.

Значения ширины основного лепестка в градусах по уровню -6 дБ в стали приведены на графиках на рис. 2.20.

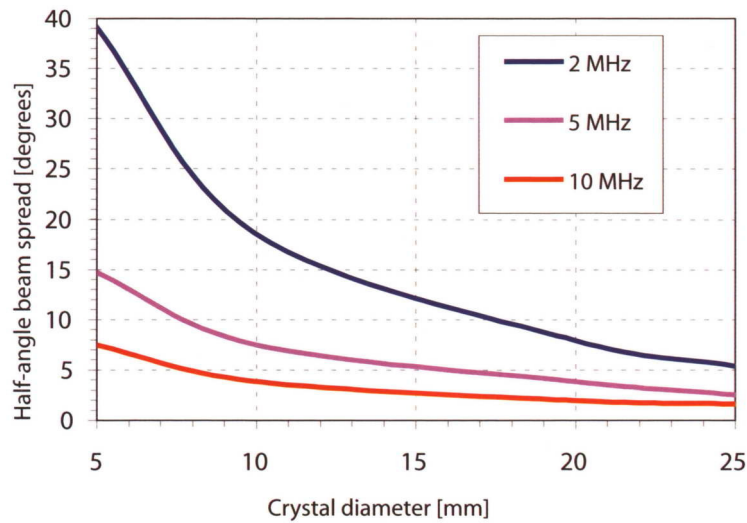


Рис. 2.20. Значения ширины основного лепестка, измеренные по уровню -6 дБ для продольных волн в стали

Прим. пер.: здесь в оригинальном тексте имеется ошибка. По вертикальной оси графика указано «half-angle» (что соответствует понятию «угол раскрытия»), что неверно. Следует читать «ширина основного лепестка».

То есть числа по вертикальной оси отражают не угол γ , а угол 2γ

2.7 Прямоугольные преобразователи

Пьезоэлектрические элементы могут быть изготовлены прямоугольной формы с некоторым отношением ширины и длины (W/L). В этом случае звуковой луч становится несимметричным, в дальней зоне его сечение приобретает эллиптическую форму (рис. 2.21). Форма его зависит от соотношения W/L и определяется по формуле:

$$p_{\text{rectangular}} = p_0 \left(\frac{\sin X_1}{X_1} \right) \left(\frac{\sin X_2}{X_2} \right) \quad (2.18)$$

где:

$$X_1 = \pi(L/\lambda) \sin \gamma_{\text{length}}$$

$$X_2 = \pi(W/\lambda) \sin \gamma_{\text{width}}$$

L_{crystal} – длина пьезоэлемента

W_{crystal} – ширина пьезоэлемента

γ_{length} - угол раскрытия в направлении длинной стороны пьезоэлемента (плоскости xz)

$$\gamma_{\text{length}} = \frac{k_{\Delta \text{ dB}} \lambda}{L_{\text{crystal}}} \quad (2.19)$$

γ_{width} - угол раскрытия луча в направлении короткой стороны пьезоэлемента (плоскости yz)

$$\gamma_{\text{width}} = \frac{k_{\Delta \text{ dB}} \lambda}{W_{\text{crystal}}} \quad (2.20)$$

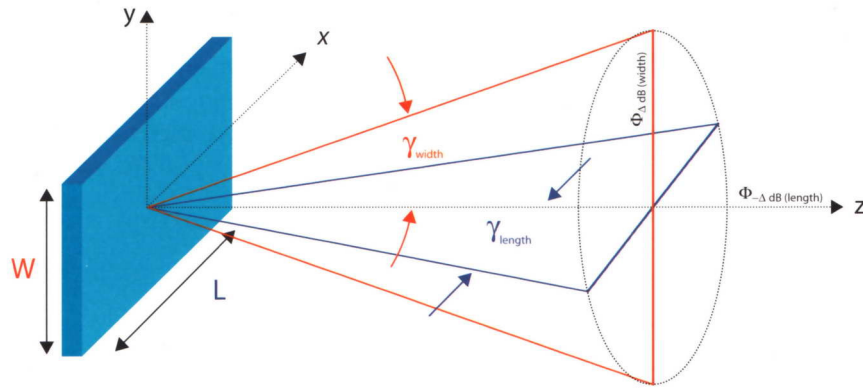


Рис. 2.21. Расхождение луча от прямоугольного пьезоэлемента

Большой угол раскрытия луча наблюдается в направлении, соответствующем меньшей стороне (ширине W) пьезоэлемента.

Для прямоугольного пьезоэлемента угол раскрытия луча в режиме излучения определяется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \gamma_{(-6 \text{ dB})L} &= \arcsin(0.44\lambda/L_{\text{crystal}}) \\ \gamma_{(-6 \text{ dB})W} &= \arcsin(0.44\lambda/W_{\text{crystal}}) \\ \gamma_{(-20 \text{ dB})L} &= \arcsin(0.74\lambda/L_{\text{crystal}}) \\ \gamma_{(-20 \text{ dB})W} &= \arcsin(0.74\lambda/W_{\text{crystal}}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Максимальное давление и наибольшая протяженность ближней зоны достигается преобразователем квадратной формы ($L = W$). Протяженность ближней зоны вычисляется по формуле:

$$N_{\text{rectangular}} = \frac{k_{\square} L_{\text{probe}}^2 f}{4v} \quad (2.22)$$

где :

k_{\square} – коэффициент связи размера ближней зоны (см. рис. 2.22)

L_{probe} – длина преобразователя

W_{probe} – ширина преобразователя

f – частота

v – скорость звука

Эффективная протяженность ближней зоны меньше, если пьезоэлемент установлен на призму, и вычисляется по формуле:

$$N_{\text{effective-rectangular on wedge}} = \frac{k_{\square} (L_{\text{probe}} \cos \beta / \cos \alpha)^2 f}{4v} - \frac{L_{\text{wedge}} v_{\text{test piece}}}{v_{\text{wedge}}} \quad (2.23)$$

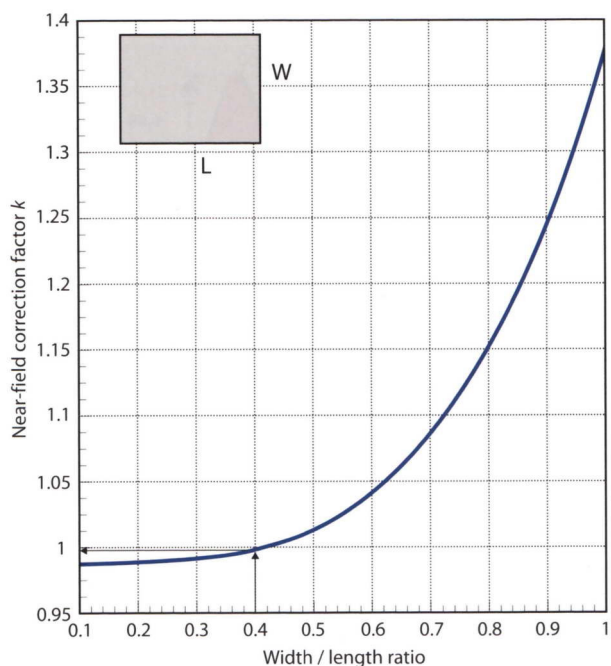


Рис. 2.22. Значения коэффициента связи размера ближней зоны для прямоугольного преобразователя

2.8. Сфокусированные звуковые поля

Прим. пер.: в данном переводе приняты следующие понятия, часто используемые в отечественной литературе:

- фокусное расстояние (*focal depth*) – расстояние от поверхности преобразователя до точки фокуса

- фокальная зона (*depth of field*) – область в луче фокусирующего преобразователя вдоль акустической оси, в которой амплитуда колебаний превышает определенную часть (0,5) ее значения в точке фокуса

Расхождение луча в дальней зоне (зоне Фраунгофера) и флуктуации давления в ближней зоне (зоне Френеля) отрицательно сказываются на фронтальной разрешающей способности при ультразвуковом контроле. Она определяется шириной ультразвукового луча (рис. 2.23)

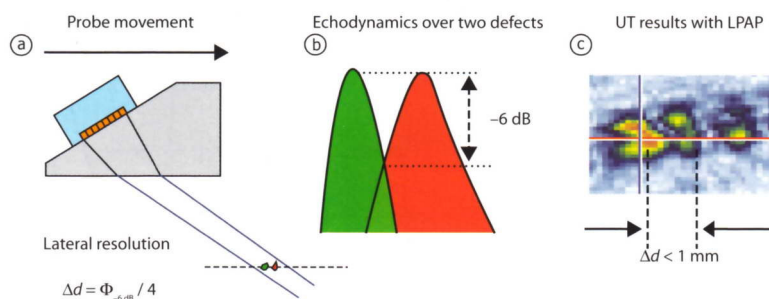


Рис. 2.23. Разрешение двух близко расположенных дефектов:
 а) перемещение преобразователя; б) динамика эхо-сигналов от дефектов;
 в) изображение этих дефектов, измеренное расстояние между ними менее 1 мм.

$$\Delta d = \frac{\Phi_{-6 \text{ dB}}}{4} \quad (2.24)$$

Формула 2.24 характеризует максимальное значение разрешающей способности в связи с шириной ультразвукового луча. Поскольку на различных глубинах ширина звукового луча различна, разрешающая способность также будет тем хуже, чем глубже находятся отражатели. Если задача контроля требует постоянной разрешающей способности на различных глубинах, тогда ширина ультразвукового луча должна быть не зависящей от пути, пройденном ультразвуковым лучом. Кроме того, может потребоваться улучшенная чувствительность и разрешающая способность в ближней зоне пьезоэлемента. Решением указанных задач может стать управляемая фокусировка луча. Сфокусированный луч имеет меньший диаметр, чем естественный фокус преобразователя (на границе ближней зоны). Фокусировка луча позволяет собрать всю его энергию в заданной узкой области. Фокусировка может достигаться посредством искривленных пьезоэлементов, применением акустических зеркал, фазированных решеток и вогнуто-выпуклых линз (см. рис. 2.24)

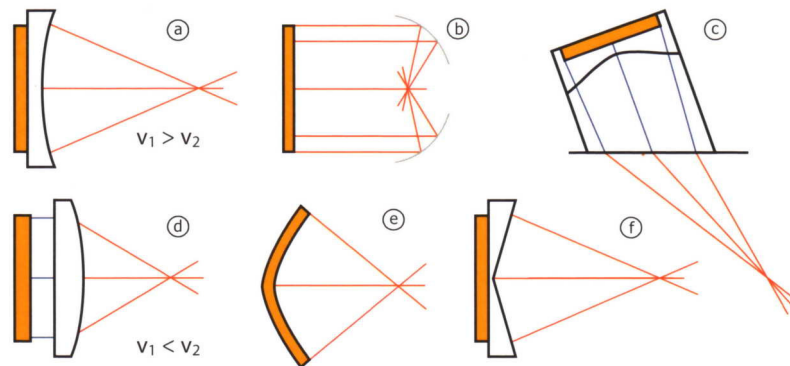


Рис. 2.24. Примеры фокусировки ультразвукового луча а) вогнутая линза; б) вогнутое зеркало в воде; в) призма в сочетании с вогнутой линзой; д) выпуклая линза; е) искривленный пьезоэлемент; ф) коническая линза.

Теория сфокусированных лучей изложена в литературе по ссылкам 14-16 и 20-23. Общие положения теории изложены ниже.

- Геометрическим способом ультразвуковой луч может быть сфокусирован только для расстояний $z < N_0$
- Сфокусированный луч характеризуется приведенным фокусным расстоянием:

$$S_{ac} = \frac{F_{ac}}{N_0} \quad (2.25)$$

где $0 < S_{ac} < 1$ и $F_{ac} < N_0$, и F_{ac} – действительное фокусное расстояние.

- Фокусное расстояние линзы в оптическом приближении определяется по формуле:

$$F_{opt} = \frac{R}{1 - (v_{test\ piece} / v_{lens})} \quad (2.26)$$

где R – радиус кривизны поверхности призмы

- Приведенное фокусное расстояние в оптическом приближении определяется формулой:

$$S_{opt} = \frac{F_{opt}}{N_0} \quad (2.27)$$

- На любом расстоянии вдоль акустической оси $F_{ac} < F_{opt}$
- Сфокусированные лучи классифицируются на:
 - а) сильно сфокусированные – $0,1 < S_{ac} < 0,33$
 - б) средне сфокусированные – $0,33 < S_{ac} < 0,67$
 - в) слабо сфокусированные – $0,67 < S_{ac} < 1$
- Большинство промышленных задач имеют дело с лучами, сфокусированными с $S_{ac} < 0,6$
- Звуковое давление пьезоэлемента со сферически вогнутой поверхностью определяется формулой:

$$P(z, R, D, \lambda) = \frac{2P_0}{(1 - z/z_0) \sin \{ [(z-h)^2 + (D^2/4)]^{0.5} - (z - hv_2/v_1) \}} \quad (2.28)$$

где

$$h = R - \left(R^2 - \frac{D^2}{4} \right)^{0.5} ; \quad z_0 = \frac{\{ h^2 [1 - (v_2/v_1)^2] + z^2 \}}{2h[1 - (v_2/v_1)]}$$

- Соотношение между S_{ac} и S_{opt} определяется формулой

$$S_{opt} = \frac{(S_{ac} - 0.635S_{ac}^2 + 0.2128S_{ac}^3)}{(1 - S_{ac})} \quad (2.29)$$

- Соотношение между S_{ac} и S_{opt} приведено на рис. 2.25.
- Характеристики сфокусированного луча приведены на на рис. 2.26.

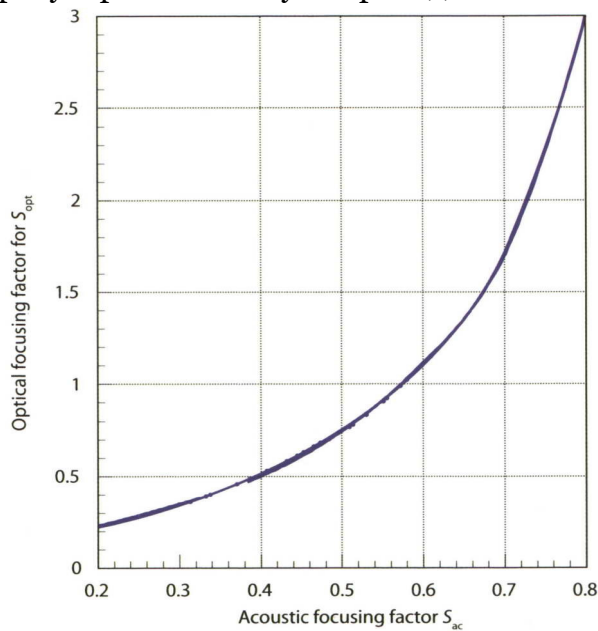


Рис. 2.25. Зависимость S_{opt} от S_{ac} для $0,2 < F_{ac}/N_0 < 0,8$

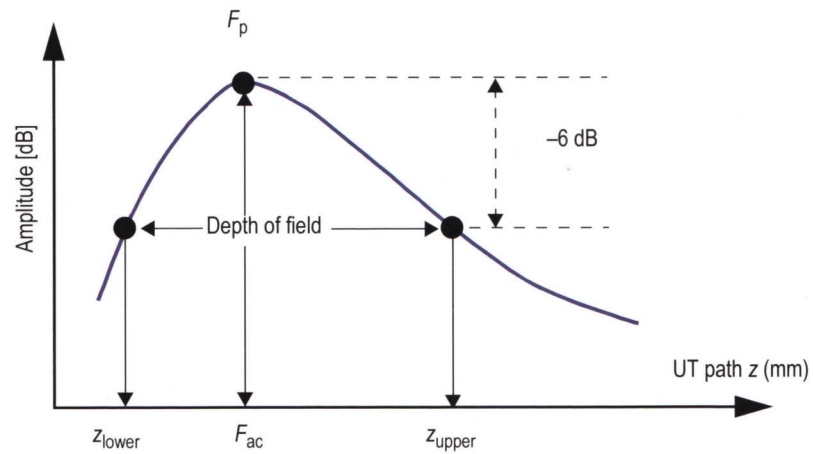


Рис. 2.26. Определение фокусного расстояния и фокальной зоны.

Размер фокальной зоны зависит от S_{ac} , в соответствии с формулами выше (см. также рис. 2.27)

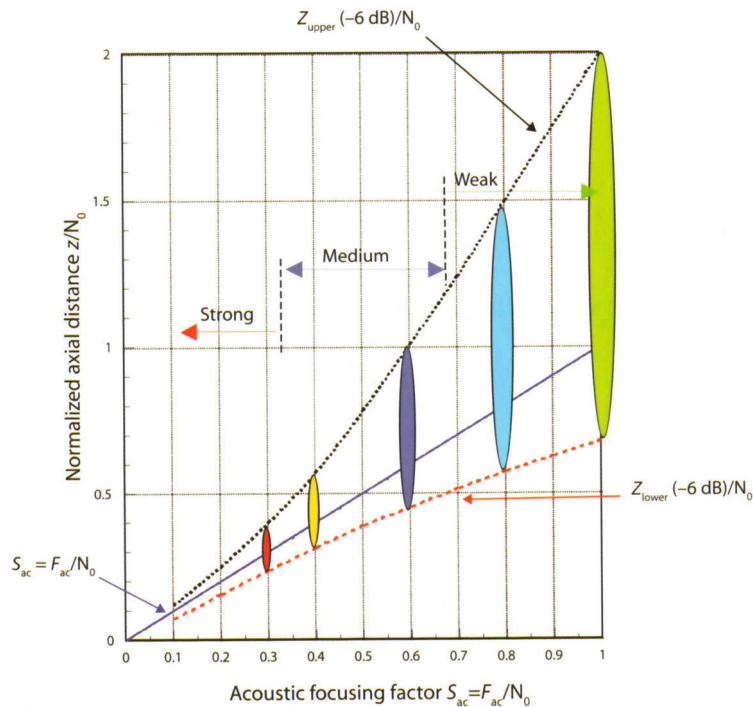


Рис. 2.27. Зависимость размера фокальной зоны от приведенного фокусного расстояния

В случае $S_{ac} < 0,6$ фокальная зона рассчитывается по формуле:

$$L_{-6 \text{ dB}} = 7\lambda \left(\frac{F_{ac}}{D_{probe}} \right)^2 \quad (2.30)$$

Диаметр луча по уровню -6 дБ – по формуле:

$$\Phi_{-6 \text{ dB}} = \frac{S_{ac} D_{probe}}{4} \quad \text{or} \quad \frac{\lambda F_{ac}}{D_{probe}} \quad (2.31)$$

Эти формулы подкрепляют следующие утверждения:

- чем выше частота преобразователя при неизменном диаметре, тем более узкий луч он формирует;
- чем меньше S_{ac} , тем меньше глубина фокуса;
- чем меньше S_{ac} , тем меньше диаметр луча;
- неизменное значение фронтальной разрешающей способности в большом диапазоне глубин может быть достигнуто только с использованием преобразователей с различными S_{ac} . Это неудобство отсутствует при использовании фазированных решеток с применением технологии DDF (динамическая фокусировка по глубине).

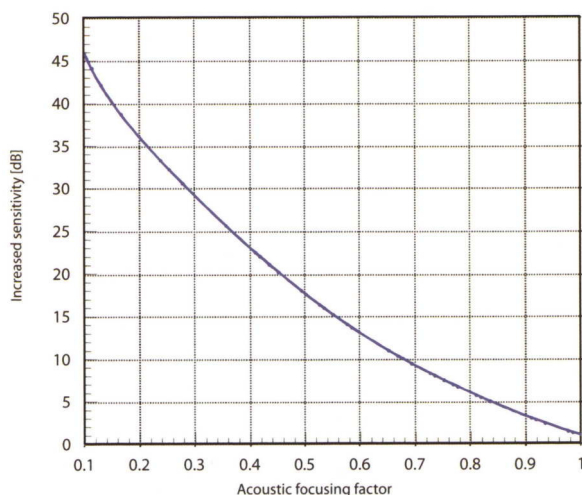


Рис. 2.28. Увеличение чувствительности при использовании концентрических фазированных решеток (сферическая фокусировка) при соотношении $D/\lambda = 15$ при обнаружении мелких дефектов (менее 1 мм) в титановых заготовках

2.9 Частотные и временные характеристики

Сигнал, излученный, отраженный и принятый, представленный в форме радиоимпульса позволяет измерить его временные характеристики (рис. 2.29):

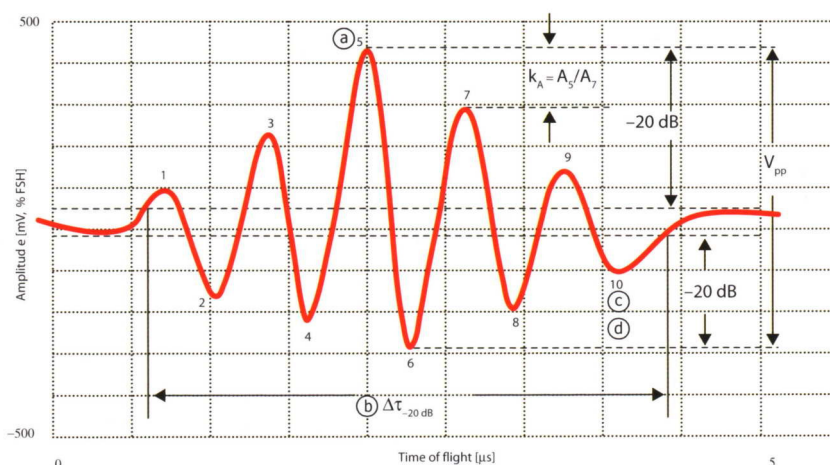


Рис. 2.29. Характеристики радиоимпульса: а) размах импульса $V_{pp} = 700$ мВ; б) длительность импульса по уровню -20 дБ; в) количество пиков в сигнале, 10 штук; г) количество периодов в сигнале, 5 штук; д) показатель затухания импульса, $k_A = 1,4$

а) Размах импульса — максимальное напряжение между наибольшими положительным и отрицательным полупериодами радиоимпульса

- b) Длительность импульса – показывает продолжительность его по заданному уровню (например – 20 дБ) с учетом положительной и отрицательной частей импульса
- c) Количество пиков в сигнале – число полупериодов, которые превосходят заданный уровень (например – 20 дБ) в положительной и отрицательной частях сигнала
- d) Количество периодов в сигнале – равно количеству пиков, разделенному на 2
- e) Показатель затухания – соотношение между максимальным полупериодом и следующим полупериодом той же полярности

Временная форма радиоимпульса преобразуется посредством быстрого преобразования Фурье в частотную характеристику сигнала (формула 2.32, рис. 2.30). Частотная характеристика (ЧХ) определяется следующими точками:

- Частота максимума ЧХ f_{peak} – частота, на которой частотная характеристика сигнала имеет максимальное значение
- Нижняя частота ЧХ $f_{L-6\text{dB}}$ – частота слева от частоты максимума, на которой спектральная характеристика уменьшается до -6 дБ от максимального значения
- Верхняя частота ЧХ $f_{U-6\text{dB}}$ – частота справа от частоты максимума, на которой спектральная характеристика уменьшается до -6 дБ от максимального значения
- Средняя частота ЧХ f_c – частота, полученная арифметическим или геометрическим усреднением нижней и верхней частот:

$$f_c = \frac{(f_{L-6\text{dB}} + f_{U-6\text{dB}})}{2} \text{ or } f_c = (f_{L-6\text{dB}} \cdot f_{U-6\text{dB}})^{0.5} \quad (2.32)$$

Прим. пер.: строго говоря, значения средней частоты, определенные этими двумя способами, будут отличаться тем сильнее, чем больше ширина спектра. Какой способ предпочтителен, и почему, в тексте не указывается. Также не указывается, как соотносится значение средней частоты с частотой максимума ЧХ.

- Ширина спектра – диапазон частот от верхней до нижней частот характеристики. Может измеряться в мегагерцах, или в процентах от средней частоты:

$$BW_{\text{rel}}[\%] = 100\% \cdot \frac{(f_{U-6\text{dB}} - f_{L-6\text{dB}})}{f_c} \quad (2.33)$$

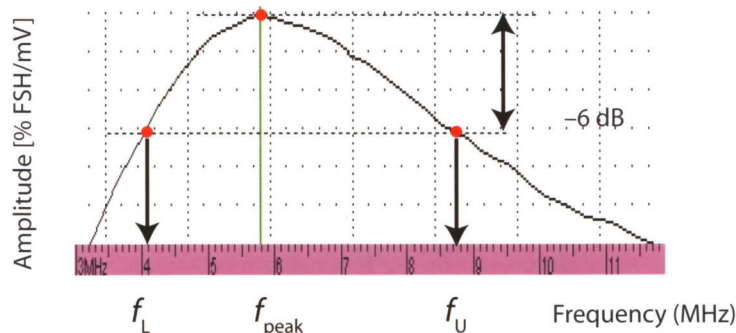


Рис. 2.30. Спектр преобразователя на номинальную частоту 5 МГц. Средняя (среднеарифметическая) частота 5,2 МГц, ширина спектра 54%.

Прим. пер.: шкала частот на рисунке неверна. Расчет по формулам дает иные значения, нежели указаны в подписи к рисунку.

2.10. Классификация преобразователей по ширине спектра (степени демпфирования)

Ширина спектра качественно связана с длительностью импульса (см. рис.2.31).

- Узкий спектр (15% ... 30%) – наиболее подходит для поиска дефектов
- Спектр средней ширины (32% ... 75%) – для поиска и определения размеров
- Широкий спектр (76% ... 110%) – наиболее подходит для определения размеров

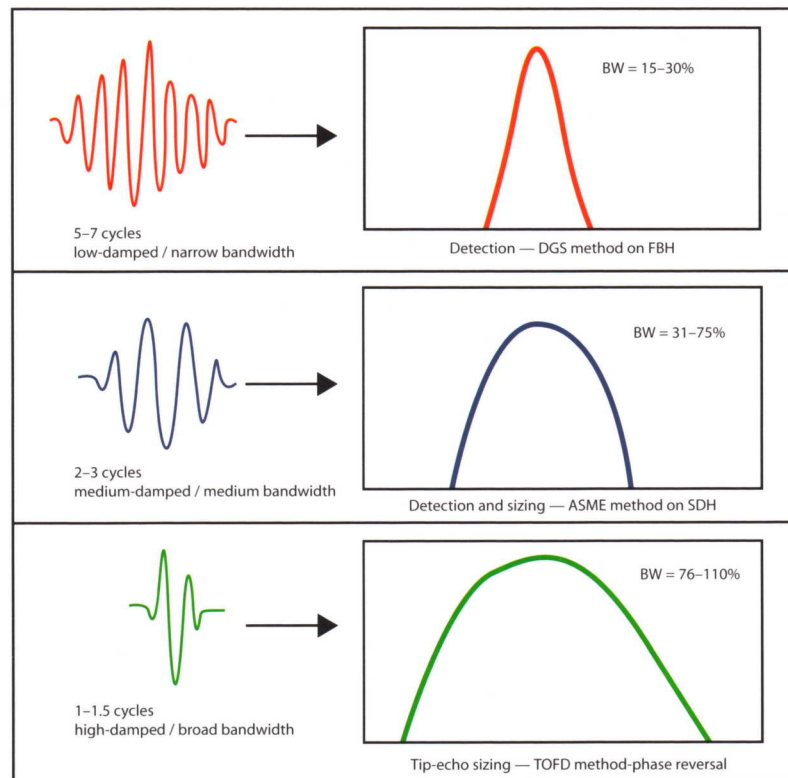


Рис. 2.31. Связь формы импульса с шириной спектра

Форма и длительность импульса непосредственно влияет на лучевую разрешающую способность – минимальное расстояние между двумя дефектами, расположенными на акустической оси преобразователя, при котором они выявляются раздельно.

Фазированные решетки обычно изготавливаются с применением пьезокомпозитных элементов, что обеспечивает большую энергию импульса и большую ширину спектра (малую длительность сигналов), поэтому они обеспечивают хорошую лучевую разрешающую способность.

Лучевая разрешающая способность вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta z = \frac{v_{\text{test piece}}[\text{mm}/\mu\text{s}] \cdot \Delta\tau_{-20\text{ dB}}[\mu\text{s}]}{2} \quad (2.34)$$

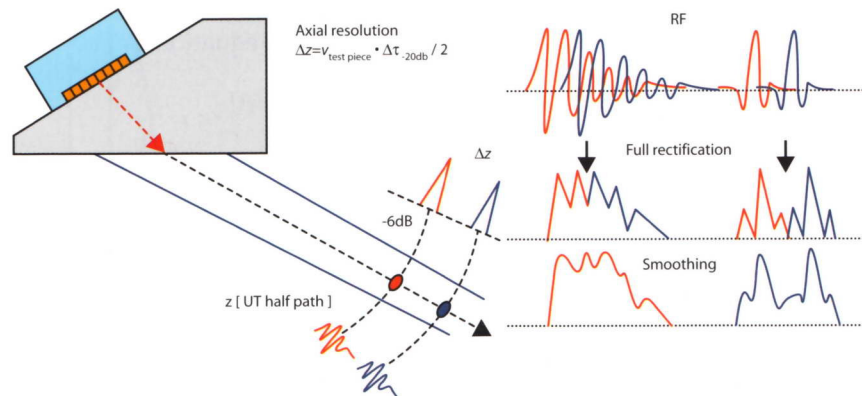


Рис. 2.32. Лучевая разрешающая способность: принцип отдельного выявления дефектов (слева); пример плохого и хорошего разрешения сигналов от дефектов (справа)

Дополнительная информация может быть найдена в литературе по ссылкам 14-18, 42, 46, 50-52, 54-57, 59 и 105.

2.11 Взаимодействие ультразвукового луча с испытательным образцом и отражателями

Независимо от того, выполняется контроль контактным или иммерсионным способом, с применением одноэлементного преобразователя или фазированной решетки, вводится понятие *область возможного обнаружения дефектов*. Область обнаружения дефектов – это область, где возможно обнаружение заданного вида дефектов при достаточном усилении и превышении сигналов над шумом не менее чем на 6 дБ.

Область обнаружения дефектов ограничена следующими сигналами (кривые на рис. 2.33)

- а) *донный эхо-сигнал BW* – определяет максимальный сигнал, который может быть получен с определенной глубины;
- б) *приповерхностное разрешение NSR* (или мертвая зона, что то же самое) – определяет минимальное расстояние, на котором может находиться дефект заданного размера от поверхности ввода ультразвуковых колебаний, и при этом еще уверенно обнаруживаться.
- в) *кривая ослабления (ATTN)*: точка *резерв усиления* ($G_{reserve}$) является максимальным усилением (gain), которое может обеспечить прибор. Начиная с этой точки оно уменьшается вследствие затухания в образце. Это ослабление определяется формулой:

$$\Delta G_{attenuation} = 2\alpha_{UT_{path}} [dB]$$

- г) *уровень шумов Noise* и *полезное усиление* G_{useful} – при подключении преобразователя к дефектоскопу и установке его на образец уровень шумов увеличивается; этот шум имеет стохастический характер с учетом вклада в призме, пьезоэлементе, кабеле, контактной смазке и структурного шума в образце. Закон его изменения повторяет закон изменения донного сигнала, но его начальной точкой является «полезное усиление» G_{useful} .

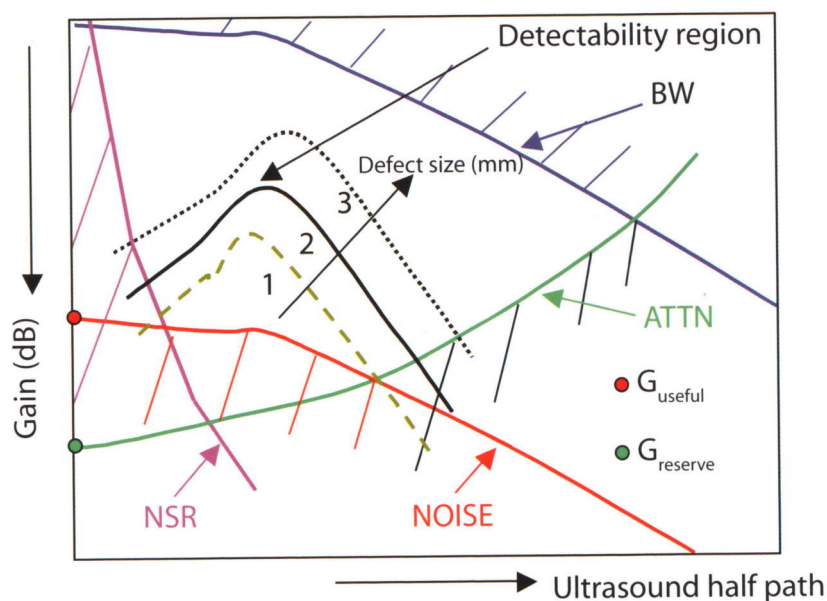


Рис. 2.33. Определение области возможного обнаружения дефектов

За пределами области обнаружения дефектов дефекты обнаружить невозможно вследствие влияния мертвой зоны, уровня шумов, слишком сильного ослабления сигнала, или близости дефектов к донной поверхности.

Идеальный дисковый отражатель (плоскодонное отверстие, FBH), расположенное перпендикулярно лучу на акустической оси, дает амплитуду отраженного сигнала, которую можно определить по формуле:

$$P_{\text{FBH}} = \frac{P_{0 \text{ probe}} (\pi D_{\text{FBH}} D_{\text{probe}})^2}{16 \lambda^2 z^2} \quad (2.35)$$

При использовании нормированных единиц:

$$\frac{z}{N_0} = D \text{ [Distance]} , \quad \frac{H_{\text{reflector}}}{H_{\text{probe}}} = G \text{ [amplifier Gain]}$$

$$\frac{D_{\text{FBH}}}{D_{\text{probe}}} = S \text{ [reflector normalized Size]}$$

Прим. пер.: установление взаимосвязи между расстоянием до дефекта (Distance), амплитудой сигнала или усилением тракта (Gain) и размером дефекта (Size) называется в данной книге «DGS-method». По сути понятие DGS близко к отечественному понятию APD-диаграммы.

Построение графиков DGS для дальнейшей зоны преобразователя определяет следующие простые правила:

- увеличение расстояния в 2 раза приводит к уменьшению амплитуды на 12 дБ;
- увеличение диаметра отражателя в 2 раза приводит к увеличению амплитуды на 12 дБ.

Настройка чувствительности зависит от размера опорного отражателя и соотношения сигнал-шум. Соотношение сигнал-шум (signal-to-noise, SNR) – это

разница в дБ между амплитудами опорного отражателя и средней амплитудой шумов в конкретной точке развертки дефектоскопа. Оно оценивается для конкретных условий контроля – преобразователя, типа смазки, материала, настройки прибора и расстояния (формула 2.36 и рис.2.34).

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{Ampl_{target}}{Ampl_{noise}} \right) \quad (2.36)$$

Для практических задач отношение сигнал-шум должно составлять не менее 10 дБ (3:1).

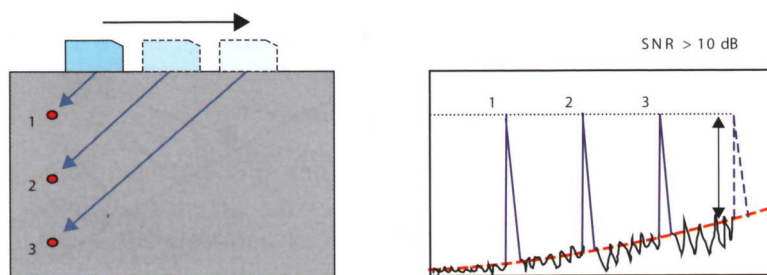


Рис. 2.34. Оценка отношения сигнал-шум для отражателей на разной глубине.

Отражатели, наиболее часто применяемые для настройки чувствительности приведены на рис. 2.35. Формулы для расчета сигнала от этих отражателей в дальней зоне приведены в табл. 2.6.

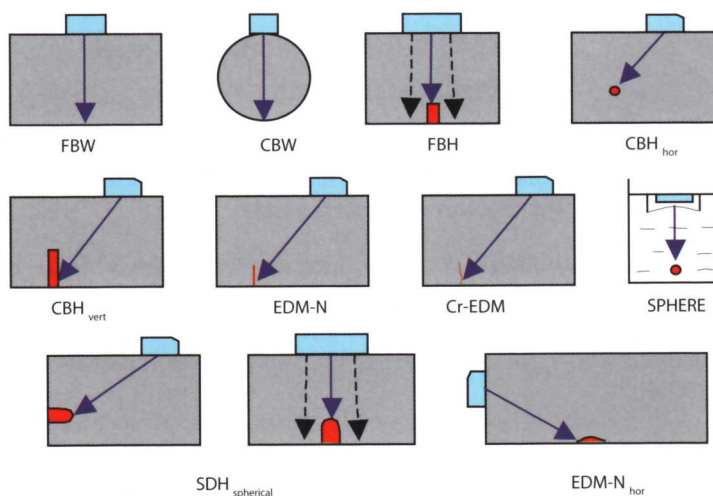


Рис. 2.35. Часто применяемые в ультразвуковом контроле искусственные дефекты (слева направо, затем сверху вниз): донная поверхность (FBW), вогнутая цилиндрическая поверхность (CBW), плоскдонное отверстие (FBH), боковое цилиндрическое отверстие (SDH_{hor}), угловой цилиндрический отражатель (SDH_{vert}), пропил (EDM-N), трещина (EDM-Cr), сферический отражатель (sphere), отверстие со сферическим дном (SBH)

Прим. пер.: в оригинальном тексте имеются опечатки в подписях к рисункам. В дальнейшем тексте перевода следует часто встречающиеся аббревиатуры понимать следующим образом:

FBH = flat-bottomed hole – плоскдонное отверстие
 SDH = side-drilled hole – боковое цилиндрическое отверстие
 SBH = spherical-bottomed hole – отверстие со сферическим дном

Следующая формула, связывающая размеры плоскодонного отверстия (FBH) и бокового цилиндрического отверстия (SDH) может быть использована для взаимного пересчета их амплитуд при $z > 1,5 \text{ No}$.

$$D_{\text{FBH}} = (0.2\lambda^2 z D_{\text{SDH}})^{0.25} \quad (2.37)$$

Аналогично размер плоскодонного отверстия (FBH) можно пересчитать в размер отверстия со сферическим дном (sphere):

$$D_{\text{FBH}} = 0.56(\lambda D_{\text{sphere}})^{0.5} \quad (2.38)$$

Табл. 2.6. Расчет эхо-сигналов от искусственных отражателей

Reflector type	Reflectivity law (far field)
FBW (counter-bore)	$\lambda^{-1} U_{\text{path}}^{-1}$
SDH (lack of penetration)	$\sqrt{1/2} D_{\text{SDH}}^{0.5} \lambda^{-1} U_{\text{path}}^{-1.5}$
FBH normal (smooth crack)	$D_{\text{FBH}}^2 \lambda^{-2} U_{\text{path}}^{-2}$
Edge from misoriented crack ¹²	$K_{(\epsilon)} \lambda^{-1.5} U_{\text{path}}^{-1.5} \left(\frac{0.5a}{a - U_{\text{path}} \cos \epsilon} \right)^{0.5}$
Elliptical EDM notch –normal	$H_{\text{notch}} \lambda^{-1.5} U_{\text{path}}^{-1.5}$
Small sphere (porosity)	$D_{\text{sphere}} \lambda^{-1} U_{\text{path}}^{-2}$

где:

U_{path} – глубина залегания отражателя

λ – длина волны

D – диаметр отражателя соответственно индексу

H_{notch} – глубина пропила

a – радиус кривизны края трещины

$K_{(\epsilon)}$ – коэффициент дифракции

ϵ – угол между падающим лучом и поверхностью трещины

Рис. 2.36 показывает зависимость амплитуды сигнала от размера отражателя для различных типов: сфера (sphere), плоскодонное отверстие (FBH), боковое цилиндрическое отверстие (SDH), пропил при обнаружении поперечными (Notch T), продольными (Notch L), и «ползущими» (creeper) волнами.

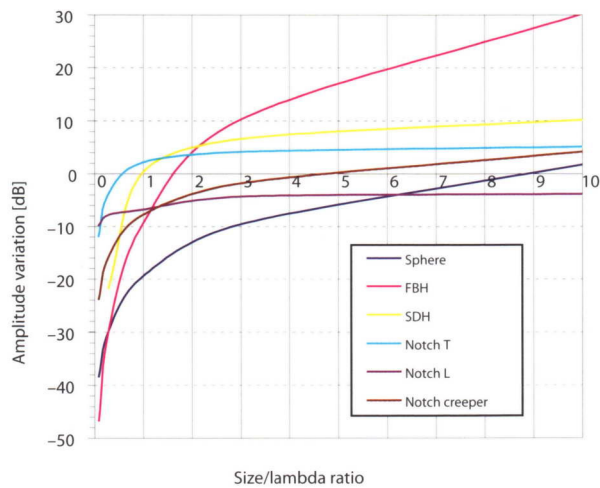


Рис. 2.36. Зависимость амплитуды от волнового размера отражателя для: сферы, плоскостного отверстия (FBH), бокового отверстия (SDH), пропила (поперечные волны), пропила (продольные волны), пропила («ползущие» волны).

2.12 Затухание

Затухание ультразвуковых волн вызвано поглощением и рассеянием. Оно зависит от частоты, размера зерна материала, типа волны и степени анизотропии.

$$\text{Затухание} = (\text{показатель поглощения}) \cdot f + (\text{показатель рассеяния}) \cdot f^4 \quad (2.39)$$

Тип рассеяния зависит от соотношения длины волны и размера зерна материала:

- размер зерна меньше длины волны – релеевское рассеяние;
- размер зерна сопоставим с длиной волны – стохастическое рассеяние;
- размер зерна больше длины волны – диффузное рассеяние.

При контроле крупнозернистых материалов частоту следует выбирать такую, чтобы длина волны как минимум в 6 раз превышала бы размер зерна материала:

$$\lambda_{\min} > 6\Phi_{\text{grain}} \quad (2.40)$$

Зависимость ослабления от частоты для часто применяемых материалов приведено на рис. 2.37 – 2.39.

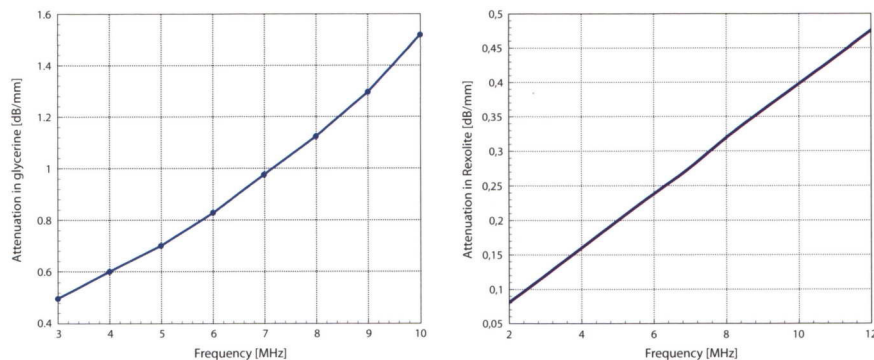


Рис. 2.37. Частотная зависимость затухания в глицерине и рексолите

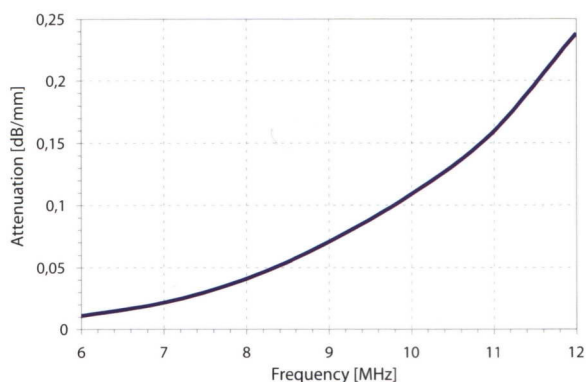


Рис. 2.38. Частотная зависимость затухания продольных волн в хромомолибденовой (2.25) стали

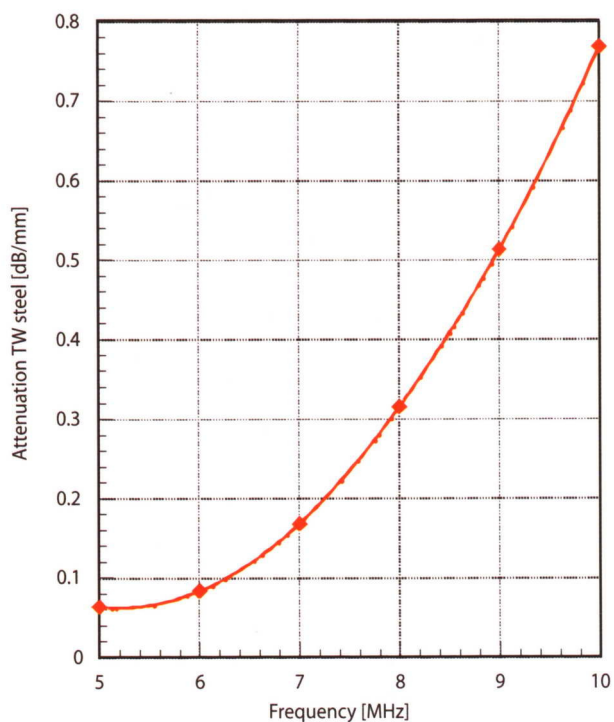


Рис. 2.39. Частотная зависимость затухания поперечных волн в углеродистой стали

2.13. Технологии определения размеров дефектов с применением явлений дифракции и преобразования моды

2.13.1 TOFD (дифракционно-временной метод)

Прим. пер.: метод TOFD, описанный здесь полностью соответствует методу, который известен в России как «дифракционно-временной метод». Иногда в отечественной литературе можно также встретить понятие «времяпролетный метод», что является переводом на русский язык аббревиатуры TOFD (time-of-flight-diffraction). В данном переводе наиболее часто используется оригинальная аббревиатура.

Технология TOFD в настоящее время становится стандартом в энергетической и нефтехимической отраслях промышленности. TOFD может выполняться преобразователями на фазированных решетках; она использует два преобразователя, работающих в раздельном режиме. Основное отличие применений TOFD в энергетике и нефтехимии состоит в том, что в энергетике используют TOFD с растровым сканированием (то есть осуществляется как продольное, так и поперечное перемещение пары преобразователей), а в нефтехимии – только с линейным сканированием (только вдоль шва). TOFD с растровым сканированием собирает больше информации и дает более точные результаты, а с линейным – обеспечивает большее быстродействие. В энергетике большая часть валиков усиления на сварных швах удаляется, что делает возможным растровое сканирование.

При TOFD фиксируют и записывают сигналы рассеянные на краях дефектов. Собранные данные отображают на экране как черно-белый В-скан. Возможны и усложненные варианты этой базовой схемы.

При TOFD используют волны четырех типов:

- *продольная подповерхностная волна (lateral wave)*. Подповерхностные продольные волны, распространяющиеся вдоль поверхности по кратчайшему пути от излучающего преобразователя к приемному.
- *донный сигнал*. Продольная волна, отразившаяся зеркально от донной поверхности.
- *отраженный сигнал*. Продольная волна, отраженная зеркально плоским дефектом.
- *дифрагированный сигнал*. Волна со сферическим фронтом, рассеянная на краю дефекта. При этом генерируются как продольные, так и поперечные волны, но в методе TOFD обычно используют продольные.

Прим. пер.: разница между понятиями «lateral wave» и упоминавшейся ранее «creeping wave» неясна. Косвенно их свойства указывают на то, что обе эти волны продольные и распространяются вдоль поверхности почти горизонтально. Представляется наиболее вероятным, что оба типа волн близки по смыслу к отечественному термину «головная волна». При этом понятие «lateral» авторы данной книги используют только при работе с методом TOFD, а понятие «creeping» - во всех остальных случаях.

Если это мнение переводчика ошибочно, большая просьба разъяснить истинное положение дел.

Метод TOFD основан на следующих основных принципах:

- два преобразователя продольных волн включены по раздельной схеме;
- преобразователи сильно демпфированы (длительность импульса 1,5 периода, ширина спектра более 90%), и имеют высокую частоту (более 6 МГц);
- достаточно большой угол расхождения луча, чтобы одновременно создавать головные волны и донный сигнал, таким образом озвучивается сразу все сечение сварного шва;
- преобразователи расположены симметрично относительно центральной оси сварного шва;
- для сварных швов толщиной более 75 мм используют двойные пары преобразователей для TOFD;

- время пробега в призмах, скорость звука в материале шва, время пробега головной волны и донного сигнала, толщина сварного шва должны быть известны;
- сигналы от верхнего и нижнего концов трещины имеют противоположные фазы (см. рис. 2.40);
- анализируя сигналы, связанные с преобразованием моды, возможно получить дополнительную информацию о дефекте;
- усиление должно быть достаточным, чтобы была возможность отображать сигналы дифрагированные на краях трещины. Эти сигналы обычно на 20 ... 30 дБ слабее, чем сигнал от бокового цилиндрического отверстия диаметром 3 мм, расположенного на той же глубине;
- максимальная амплитуда дифрагированных сигналов достигается под углом около 70°;
- предпочтительно использование продольных волн по причине, что они приходят первыми, а также потому, что они испытывают значительно меньшее затухание;
- сканирование выполняется линейное, вдоль сварного шва, преобразователи остаются симметрично расположены относительно средней линии шва.

Предполагая, что дефект расположен посередине между преобразователями, его высоту (h) и глубину залегания верхнего края (d) можно рассчитать по следующим формулам:

$$T_{\text{lat. wave}} = \frac{PCS}{v_L} = \frac{2S}{v_L} \quad (2.41)$$

$$T_{\text{upper tip}} = \frac{2(S^2 + d^2)^{0.5}}{v_L} \quad (2.42)$$

$$T_{\text{lower tip}} = \frac{2[S^2 + (d + h)^2]^{0.5}}{v_L} \quad (2.43)$$

$$T_{\text{backwall}} = \frac{2(S^2 + t^2)^{0.5}}{v_L} \quad (2.44)$$

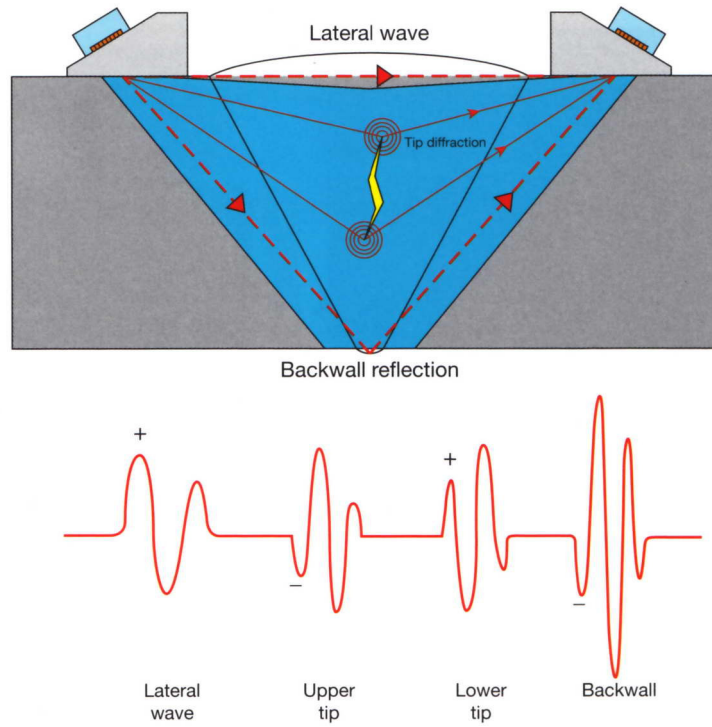


Рис.2.40. Принцип метода TOFD и полярность наблюдаемых сигналов.

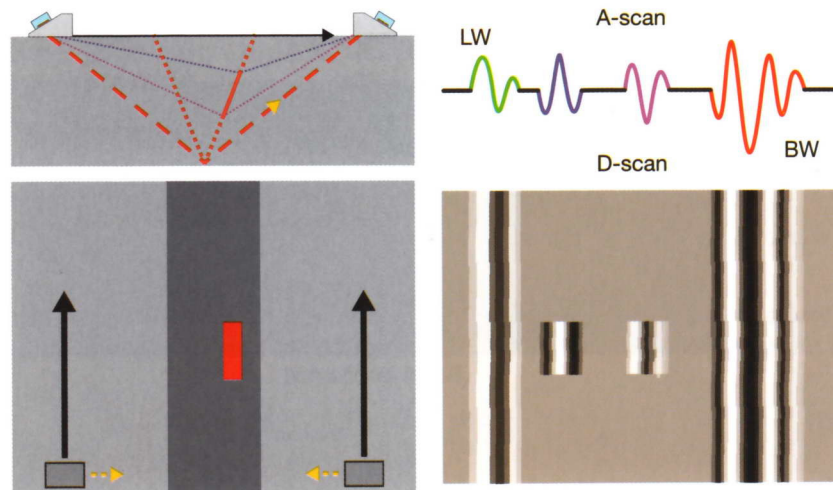


Рис. 2.41. Обнаружение непровара на D-скане, полученном по методу TOFD. Амплитуды и фазы сигналов отображаются на скане градациями серого цвета.

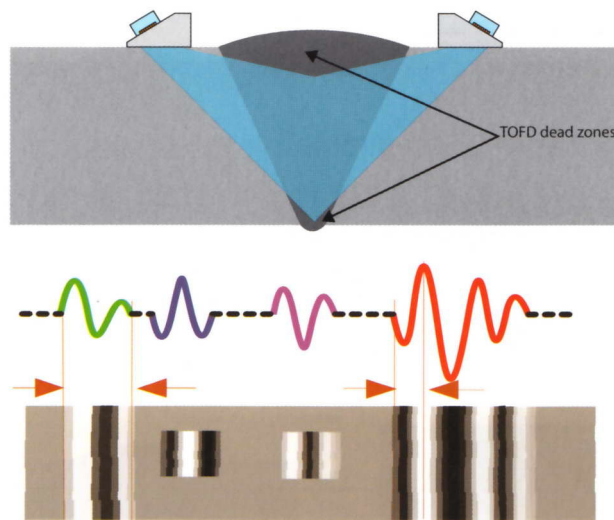


Рис. 2.42. Мертвые зоны метода TOFD. Размер мертвых зон зависит от частоты, расстояния между преобразователями, толщины материала и скорости звука. Если дефект расположен не посередине между преобразователями, могут возникать ошибки.

Ограничения метода TOFD

- существуют мертвые зоны вблизи наружной и донной поверхностей, которые связаны с тем, что сигнал продольной подповерхностной волны и донный сигнал маскируют возможные сигналы от дефектов;
- положение дефекта относительно преобразователей влияет на время прихода сигнала, поэтому если дефект расположен не посередине между преобразователями, могут возникать ошибки определения его размеров. Положение дефекта в шве необходимо уточнять дополнительно посредством перемещения пары преобразователей поперек шва;
- интерпретация образов дефектов на изображении требует серьезной подготовки и опыта работы;
- сварные швы толщиной более 75 мм требуют многопроходного сканирования с применением различных пар преобразователей;
- низкое соотношение сигнал-шум;
- сигналы чувствительны к крупнозернистой структуре материала;
- особенности геометрии и акустического контакта могут препятствовать распространению продольной подповерхностной волны;
- амплитуда сигнала не является информативным признаком размера дефекта.

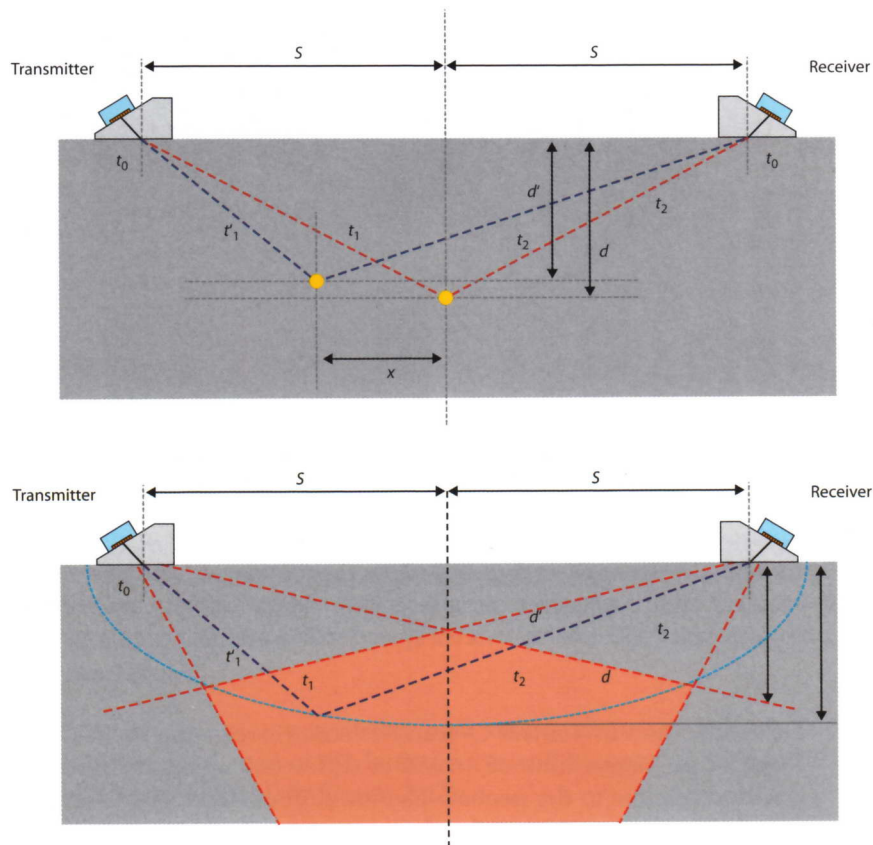
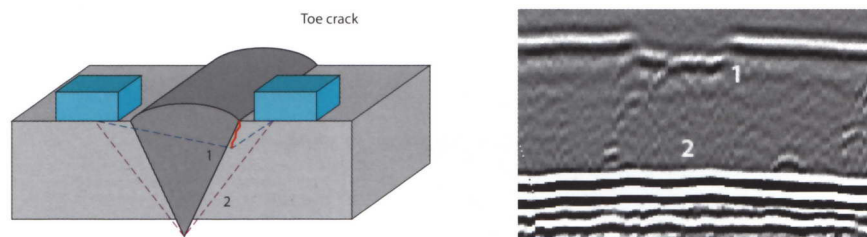


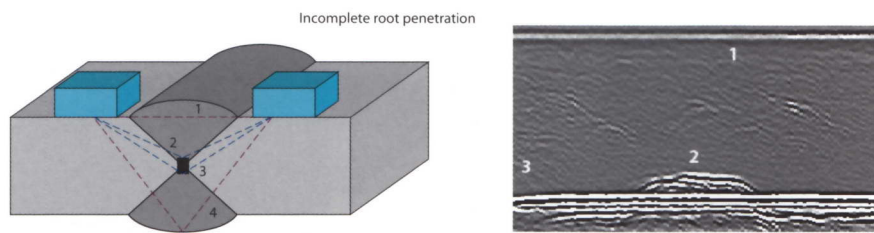
Рис. 2.43. Ошибки в определении положения отражателя вызванные несимметричным расположением преобразователей относительно отражателя

Несмотря на перечисленные ограничения, TOFD является наиболее точным ультразвуковым методом для определения размеров трещин, по протяженности и по высоте. TOFD принят как средство обеспечения качества сварных швов сосудов под давлением в ASME Code Case 2235.

Для повышения достоверности, фирма R/D Tech предложила использовать комбинацию TOFD и эхо-импульсного методов, с возможностью распознавания изображений в реальном времени. Рисунки 2.44 а – б показывают типичные дефекты с их соответствующими TOFD-образами.

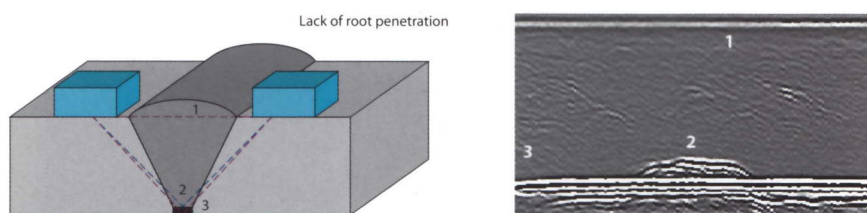


а) Головная волна прерывается, а становится виден сигнал от нижнего края трещины. Это трещина, выходящая на поверхность, ее высоту можно измерить.

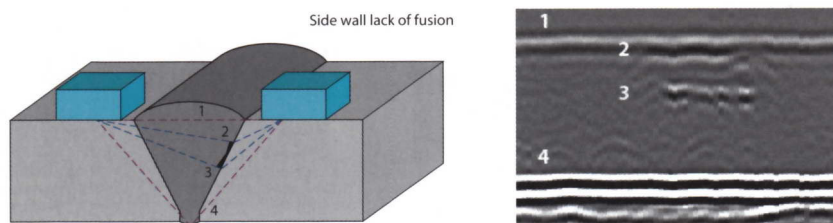


б) Непровар в середине шва с X-образной разделкой

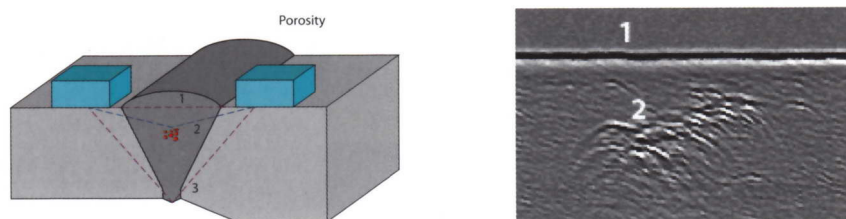
Прим. пер.: в оригинальном тексте здесь ошибка. В варианте б) для непровара в X-образной разделке вставлено неправильное изображение образа дефекта



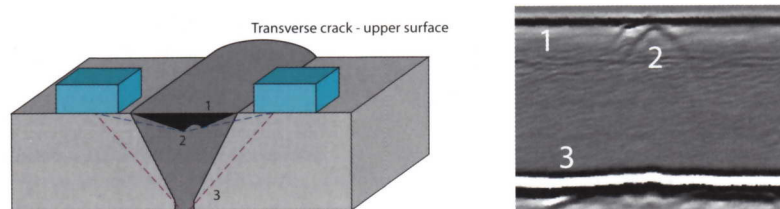
с) Непровар в корне шва. На фоне сигнала от донной поверхности добавляется сигнал от верхней части непровара.



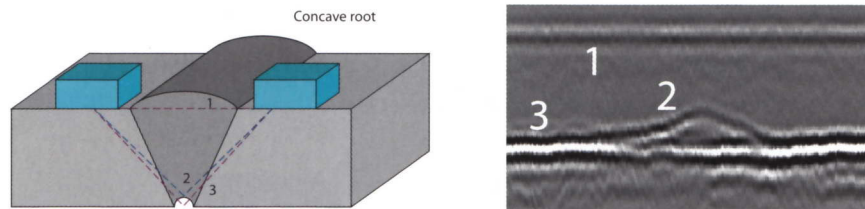
д) Непровар по разделке шва. Видны сигналы головной волны, донный, а также дифрагированные сигналы на обоих концах дефекта.



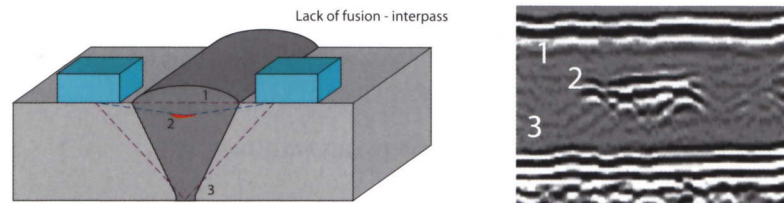
е) Пористость на изображении выглядит как серия образов гиперболической формы. Скопление пор трудно анализировать, но легко опознать.



ф) Поперечная трещина на изображении выглядит как одиночный точечный дефект.



g) Вогнутость корня шва прерывает донный сигнал и дает сигнал от верхней точки.



h) Горизонтальный непровар выглядит на TOFD-изображении как одиночный сигнал большой амплитуды, но совершенно не виден по эхо-импульсному методу.

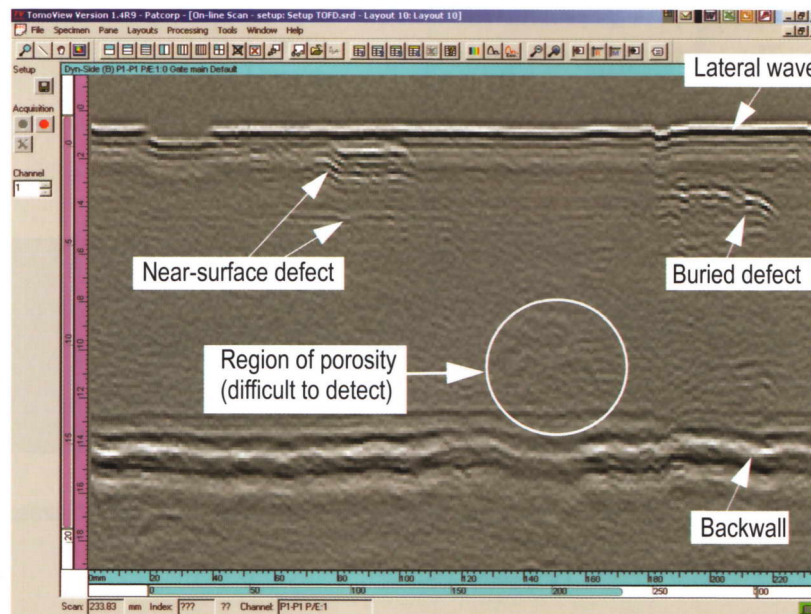


Рис. 2.44. Изображения дефектов на TOFD

Достоинства метода TOFD

- однопроходное линейное сканирование;
- получение сканов в реальном времени;
- высокоточное измерение размеров;
- высокая разрешающая способность;
- точное определение местоположения дефекта;
- простое документирование результатов контроля.

2.13.2 RATT (метод относительного времени прихода)

RATT (relative arrival time technique) – метод определения размеров дефектов, основанный на данных о времени прихода сигналов. Данные об амплитуде

сигналов не используются. Этот метод иногда еще называется SPOT (satellite pulse observation time technique).

RATT (см. рис. 2.45) имеет следующие особенности:

- обнаруживаются дефекты, меньшего размера, чем сечение ультразвукового луча;
- в методе используются два сигнала – от вершины трещины и от ее корня, выходящего на донную поверхность образца;
- оба сигнала получают из одного положения преобразователя под одним углом;
- высота трещины вычисляется через разность времени прихода сигналов следующим образом:

$$h_{\text{crack}} = \frac{\Delta UT_{\text{RATT}}}{\cos \beta} = \frac{UT_2 - UT_1}{\cos \beta} \quad (2.45)$$

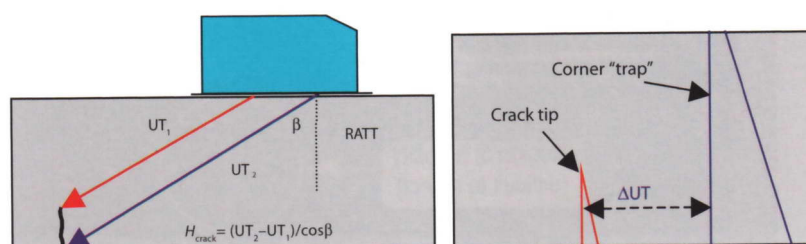


Рис. 2.45. Измерение высоты трещины по методу RATT

Если ширина ультразвукового луча достаточно велика, то сигнал от вершины трещины возможно получить дважды (в одной и той же позиции преобразователя) – прямым лучом и однократно отраженным (рис. 2.46). Радиопульсы при этом имеют противоположные фазы в соответствии с рисунком.

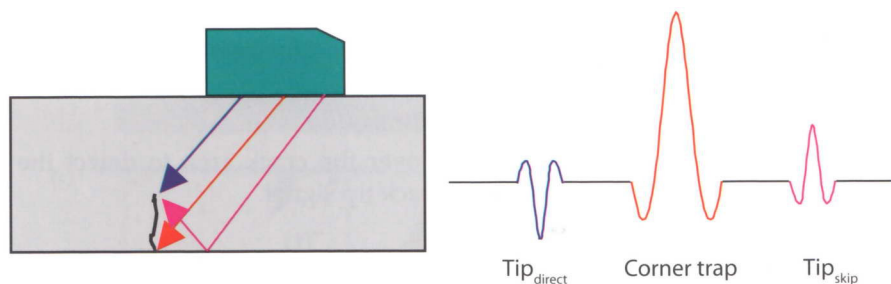


Рис. 2.46. Сигналы от трещины, полученные прямым и отраженным лучами.

Показатель высоты трещины в зависимости от угла озвучивания приведен на рис. 2.47. При увеличении угла ΔUT уменьшается, следовательно снижается точность определения размера. Наилучшее разделение информативных сигналов достигается при использовании малых углов ввода, например 30° или 35° .

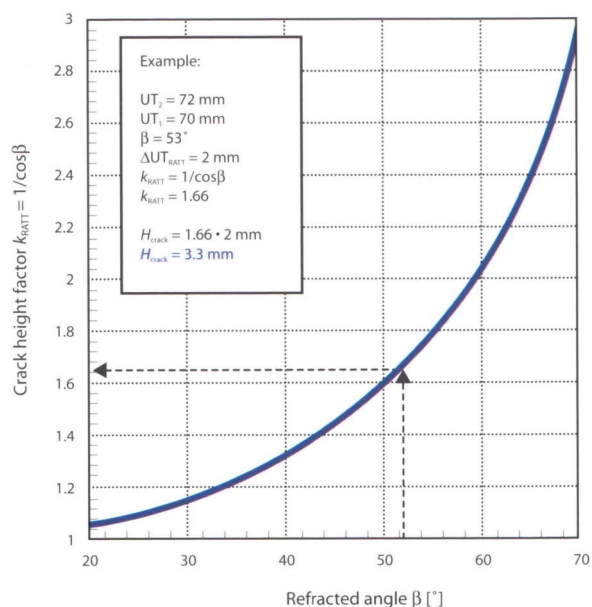


Рис. 2.47. Показатель высоты трещины в методе RATT

2.13.3 ААТТ (метод абсолютного времени прихода)

Метод ААТТ (absolute arrival time technique) также называется (pulse arrival time technique). Суть метода изображена на рис. 2.48.

Метод имеет следующие особенности:

- высота трещины может быть больше ширины звукового луча;
- для оптимального определения времени прихода сигналов можно использовать преобразователи с разными углами и устанавливать их в разные положения, эти изменения учитываются методом;
- преобразователь вручную перемещается над областью трещины, при этом последовательно обнаруживаются сигналы от корня трещины и от ее вершины.

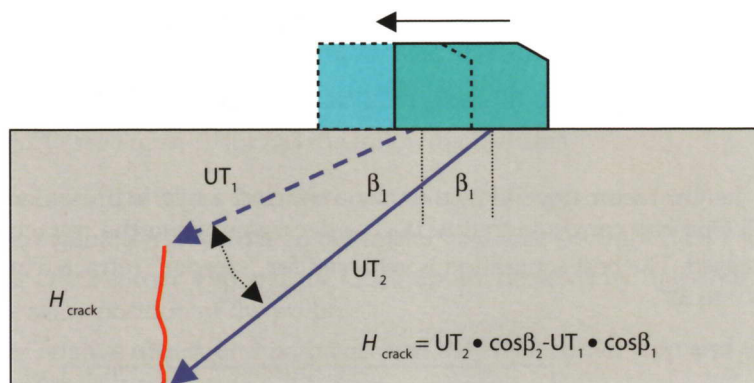


Рис. 2.48. Измерение высоты трещины по методу ААТТ

При использовании фазированной решетки этот метод можно реализовать с использованием S-скана, определяя высоту трещины по изображению как разницу в расположении сигналов от корня и вершины трещины (рис. 2.49). Подобные результаты можно получить на В-скане или растровым сканированием.

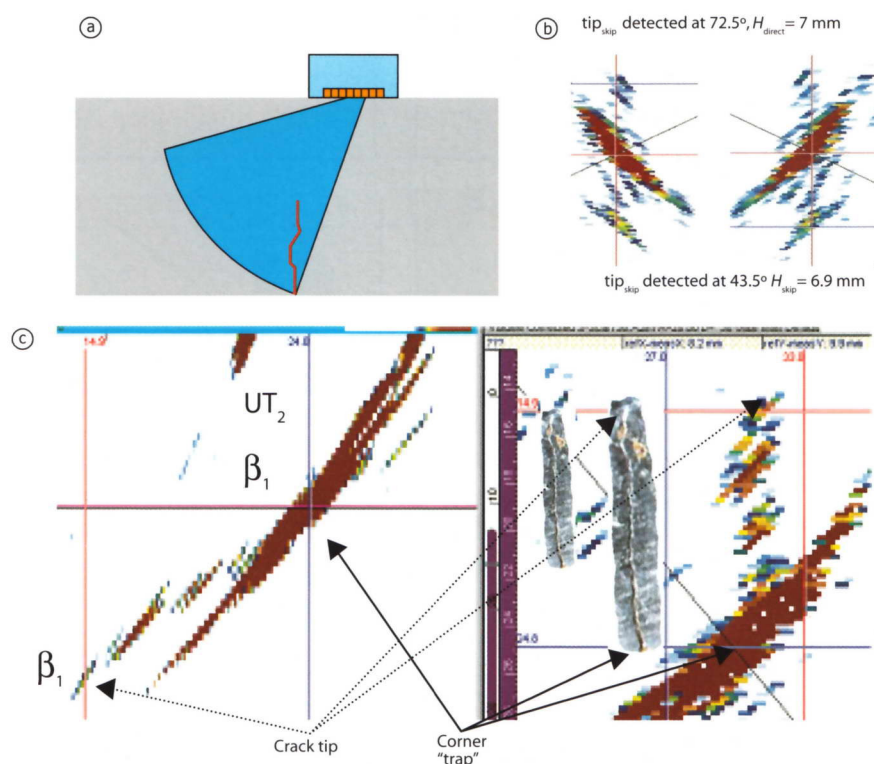


Рис. 2.49. Пример измерения высоты усталостной трещины по методу ААТ с применением S-скана: а) принцип озвучивания; б) образы трещины высотой 7 мм; в) образы трещины высотой около 10 мм

Возможность измерения высоты трещины по сигналу дифракции на ее вершине зависит от толщины образца, частоты фазированной решетки, демпфирования и ширины спектра, а также свойств материала.

Более детально этот метод можно изучить в литературе по ссылкам 14-19, 62, 64, 68 и 108.

2.13.4. Методы, использующие трансформированные моды

Возможные методы обнаружения дефектов, связанные с преобразованием типов колебаний (мод) представлены на рис. 2.50 – 2.52. На рисунках синими линиями представлены поперечные волны, красными – продольные.

«Ползущие» волны являются наиболее часто применяемыми для поиска дефектов, выходящих на наружную поверхность. Кроме возможно обнаружение дефектов, распространяющихся от внутренней поверхности. Это возможно потому, что преобразователь «ползущих» волн создает в изделии множество волн (рис. 2.53):

- «ползущая» волна на поверхности ввода;
- поперечная волна под углом 34° ;
- вторичные поперечные волны, отходящие от «ползущей» под третьим критическим углом (31°);
- продольные волны под углом 70° ;
- «ползущие» волны на внутренней поверхности, возбуждаемые вторичными поперечными под углом 31° .

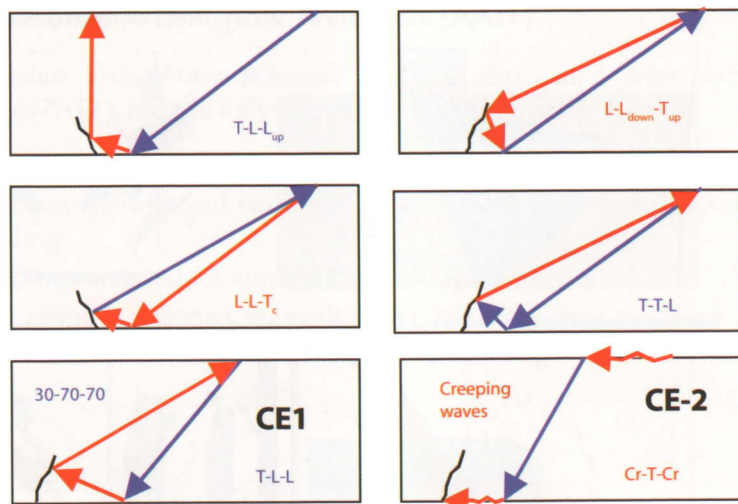


Рис. 2.50. Обнаружение трещин, выходящих на внутреннюю поверхность с использованием преобразования мод

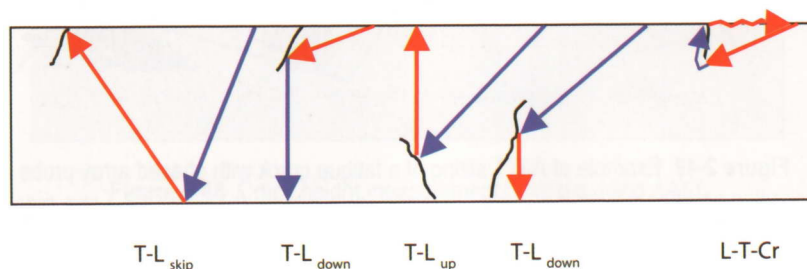


Рис. 2.51. Обнаружение трещин, выходящих на наружную поверхность с использованием преобразования мод

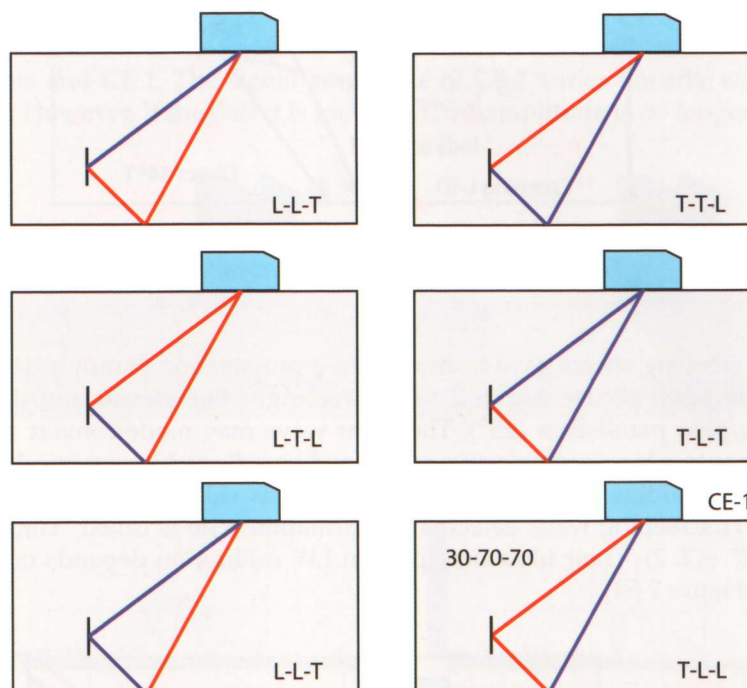


Рис. 2.52. Обнаружения «висящих» трещин с использованием преобразования мод.

«Ползущие» волны распространяются на небольшое расстояние (от 2 мм до 13 мм). Распространение возможно по глубине от 2 до 3 длин волн и зависит от параллельности наружной в внутренней поверхности (непараллельность должна

быть не более 5°). Поперечная волна может возбуждать на противоположной поверхности продольную волну под углом 70° , которая затем отражается от вертикально ориентированной трещины также как продольная волна. Прием этой волны называют «collateral echo №1» (CE 1) – схема образования этого сигнала приведена на рис. 2.52 (нижняя правая схема). Эхо-сигнал, полученный непосредственно «ползущей» волной называют «collateral echo №2» (CE 2). Протяженность пути, походимого этими сигналами зависит от толщины изделия (рис. 2.54).

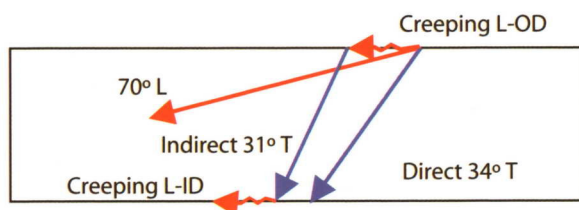


Рис. 2.53. Типы волн, генерируемые преобразователем «ползущей» волны

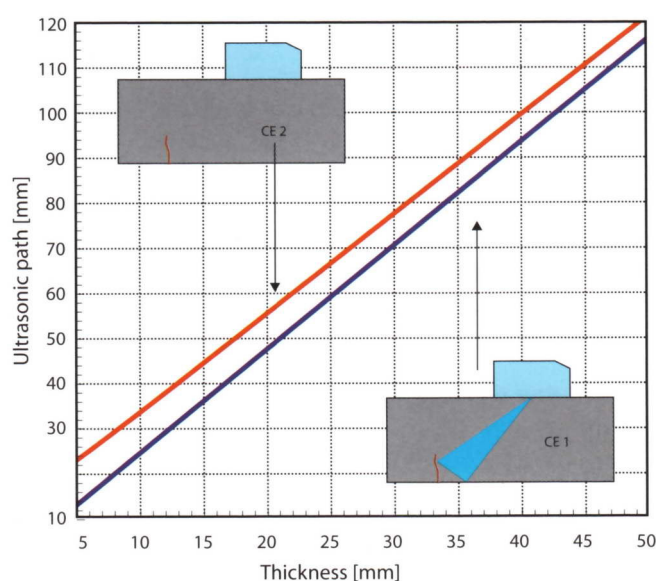


Рис. 2.54. Зависимость пути сигнала от толщины для CE 1 (30-70-70) и для CE 2 (сигнал от «ползущей» волны)

Комбинация способов обнаружения продольной волной и «ползущей» волной достигается при углах от 55° до 62° (см. рис. 2.55). Измерение размеров дефектов основано на получении двух сигналов продольной волны (LL), а высота нижнего края трещины над донной поверхностью оценивается по соотношению сигналов CE 1 и CE 2. Вертикальный дефект имеющий зазор над донной поверхностью более 4 мм будет давать только сигналы LL и сигнал CE 1. При этом сигнал CE 1 очень сильно зависит от высоты трещины, за исключением случаев, когда дефект сильно искривлен или наклонен.

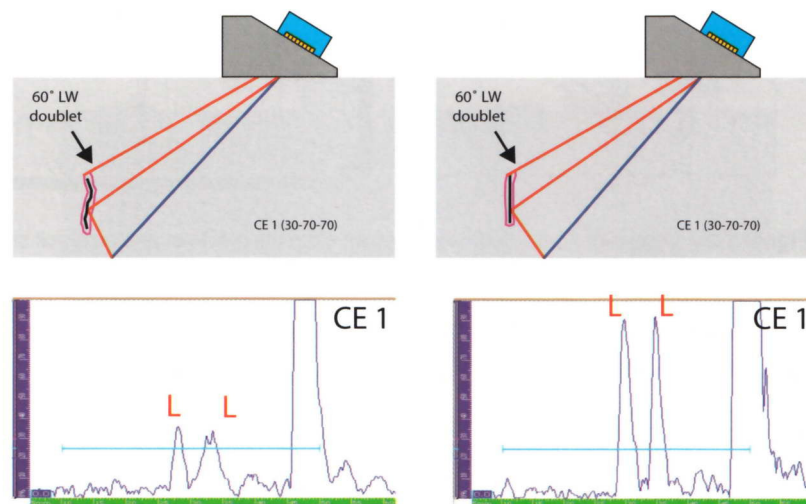


Рис. 2.55. Обнаружение, подтверждение и измерение размера усталостной трещины двойной прольной волной LL и сигналом CE 1 (30-70-70) для преобразователя продольных волн на 60°. Высота дефекта 11 мм, высота над донной поверхностью 5 мм.

Еще одним методом измерения размеров трещин является дельта-метод (рис. 2.56). При этом используется комбинация из наклонного преобразователя поперечных волн на 60° и прямого преобразователя продольных волн.

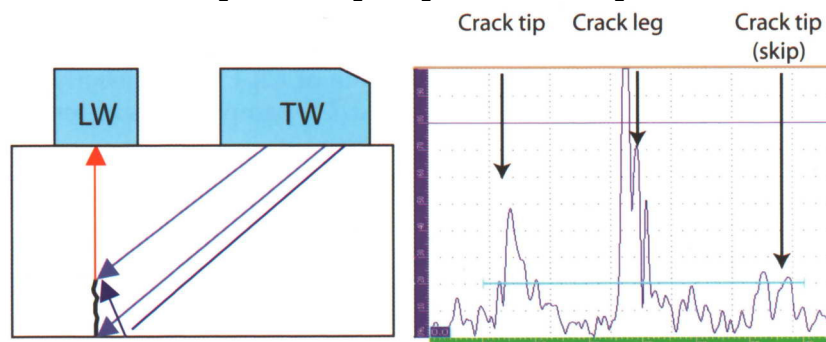


Рис. 2.56. Принцип дельта-метода и пример получаемых сигналов: дифракция на вершине, дифракция на корне и вторая дифракция на вершине.

Высота трещины рассчитывается по формуле:

$$\text{TOF}_{\Delta 60} = \frac{(t - h_{\text{crack}})}{v_T[(1/\cos\beta) + (v_T/v_L)]} \quad (2.46)$$

Вследствие расхождения луча, вершина трещины обнаруживается прямым лучом и переотраженным от дна. Для стали высота трещины рассчитывается по формуле:

$$h_{\Delta 60T} = t - 0.8 \text{ CRT}_{\text{TW}} \quad (2.47)$$

где CRT_{TW} – время прихода сигнала поперечной волны.

2.13.5. Применение раздельной схемы включения преобразователей (тандем)

Описанные методы могут быть реализованы с помощью раздельных излучателя и приемника в различных зонах по глубине. Фазированные решетки являются

идеальным инструментом для этой задачи, т.к. они способны создавать и принимать продольные и поперечные волны под различными углами, необходимыми в методах, использующих преобразование мод (см. рис. 2.57).

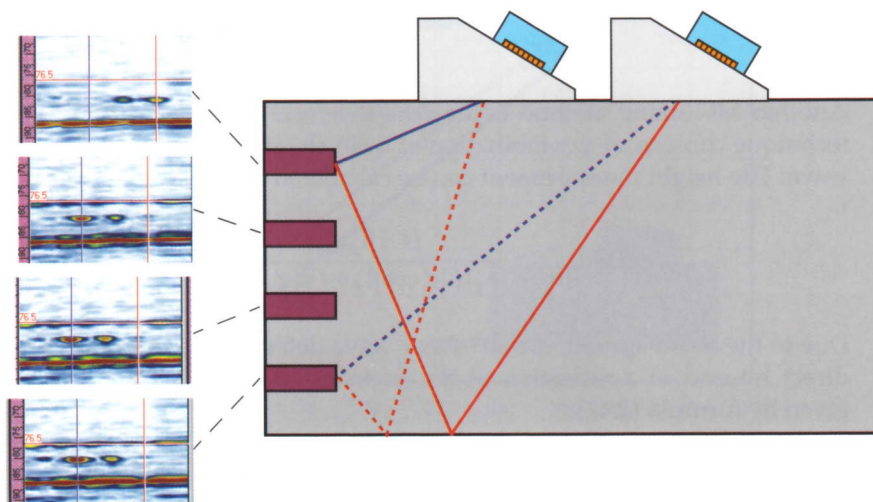


Рис. 2.57. Обнаружение плоскдонных отверстий в образце толщиной 100 мм. Красные линии – продольные волны, синие – поперечные.

Методы с преобразованием моды очень полезны при контроле толстых сварных швов с малой шириной самого шва. Наиболее распространенный дефект в них – непровар по боковой стенке (рис 2.58). Видно, что при использовании раздельно включенных фазированных решеток не требуется физическое перемещение преобразователей, достаточно электронного сканирования.

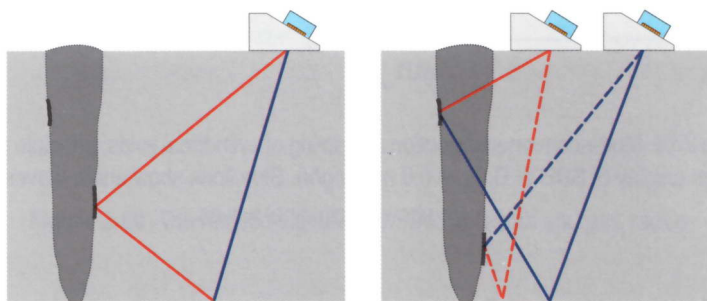


Рис. 2.58. Обнаружение вертикального непровара в узком сварном шве совмещенным преобразователем (слева) и двумя раздельными (справа).

2.13.6. Метод с использованием импульса-спутника

Еще один метод с использованием преобразования мод состоит в измерении размера округлых дефектов с помощью импульса-спутника (рис. 2.59).

$$\Delta t_{\text{void}} = \left[\left(\frac{\pi}{2v_T} \right) + \left(\frac{1}{v_S} \right) \right] D_{\text{void}} \quad (2.48)$$

где:

Δt_{void} – время между сигналами волн Т-Т и Т-S-T

D_{void} – диаметр округлого дефекта (поры, раковины)

v_T – скорость поперечной волны

v_s – скорость поверхностной (Релеевской) волны

Для стали справедлива упрощенная формула

$$D_{\text{void}} = 0.7\Delta UT_{\text{path}}$$

в которой путь ультразвукового луча настроен на половину пробега поперечной волны.

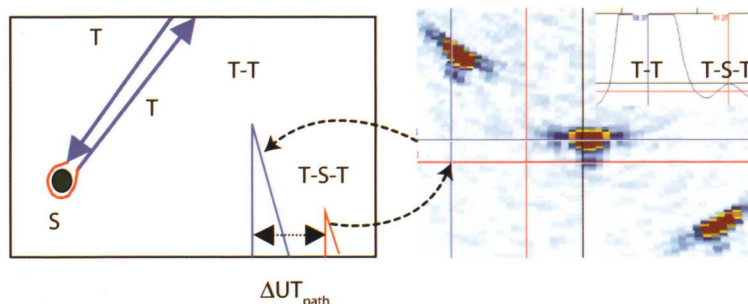


Рис. 2.59. Обнаружение и измерение округлых полостей с использованием преобразования моды: принцип (слева); В-скан бокового цилиндрического отверстия диаметром 0,6 мм (справа). Синие линии – поперечные волны, красная линия – релеевская волна, огибающая отверстие.

2.14. Контроль круглых деталей

Вычисление фокальных законов может быть неточным вследствие кривизны поверхности и изменения толщины контактной смазки под призмой. Скорость звука в смазке приблизительно в 4 раза меньше, чем в контролируемом металле, поэтому рассчитанные законы фокусировки могут искажаться. Желательна притирка рабочей поверхности призмы к кривизне поверхности ввода ультразвука, при этом необходимо пересчитать фокальный закон с учетом внесенной кривизны. Разрешается не производить притирку призмы к изделию, если выполняется следующее условие:

$$R_{\text{part}} > \frac{L_{\text{wedge}}^2}{4} \quad (2.49)$$

Практически величина зазора между призмой и изделием не должна превышать 0,5 мм (рис. 2.60). Для искривленных поверхностей контактная смазка может вытекать из-под призмы, поэтому зазор 0,5 мм является практическим минимальным значением, когда жидкость удерживается в нем.

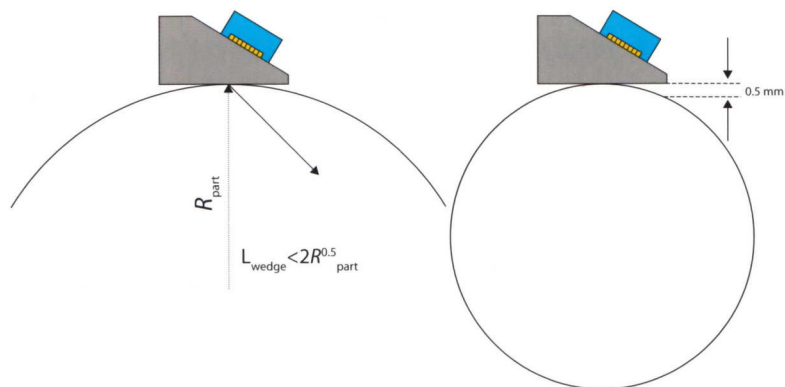


Рис. 2.60. Соотношение между длиной призмы и радиусом детали.

Путь ультразвукового луча и угол отражения от внутренней поверхности изменяются при контроле продольного сварного шва (рис. 2.61).

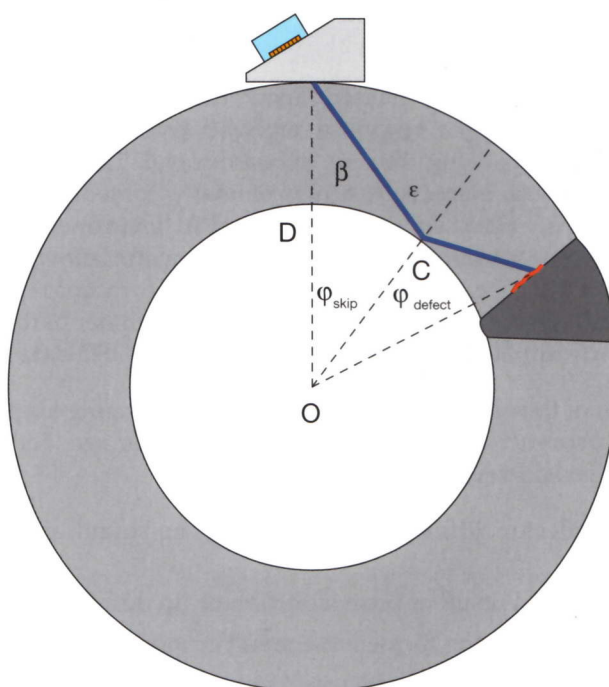


Рис. 2.61. Ультразвуковой контроль продольного сварного шва трубы

Максимальный угол ввода рассчитывается по формуле:

$$\beta_{\max} = \sin^{-1}\left(1 - \frac{t}{2D}\right) \quad (2.50)$$

Угол отражения от внутренней поверхности может быть определен по существующим номограммам или по формуле:

$$\sin \epsilon = \left[\frac{1}{(1 - 2t/D)} \right] \sin \beta \quad (2.51)$$

$$\varphi = \pi - (\beta + \epsilon) \quad (2.52)$$

Глубина залегания дефекта

$$h_{\text{defect}} = OB - 0.5(D - 2t) \quad (2.53)$$

где OB – расстояние от центра трубы до верхнего края дефекта.

2.15. Измерение размеров небольших дефектов

Изображения, получаемые с помощью фазированных решеток представляют собой результат преобразования множества А-сканов, полученных в точках траектории перемещения преобразователя (или луча). Прибор сопоставляет значения амплитуды сигнала с определенной цветовой палитрой, при этом каждая точка А-скана, имеющая определенную амплитуду заменяется точкой определенного цвета. Данная концепция широко используется в различных системах, как например, системы, реализующие TOFD, где амплитуда кодируется градациями серого цвета, от белого (максимальная положительная) до черного (максимальная отрицательная амплитуда).

Поэтому измерение размера дефекта является по сути измерением расстояния между точками с различной амплитудой сигнала посредством перемещения измерительного курсора на изображении. Следует учитывать следующие аспекты:

- является ли дефект диффузно или зеркально отражающим?
- является ли образ на изображении результатом отражения или диффракции?
- сформировано ли изображение в результате отражения волны, или ее трансформации?
- какова ширина сфокусированного луча, которым получено изображение?
- использована ли технология динамической фокусировки по глубине, или нет?

Это неполный список вопросов, решения которых могут повлиять на решение об оценке дефекта. В любом случае, большинство этих вопросов возникают и при использовании традиционного анализа А-сканов, но фазированные решетки предлагают существенно более гибкие средства и более воспроизводимые результаты, чем простой А-скан по следующим причинам:

- сфокусированные лучи могут быть существенно более узкими, чем традиционные расходящиеся лучи, соответственно обеспечивают большую точность определения размеров дефектов;
- изображение, полученное с помощью фазированных решеток, содержат в себе множество А-сканов, записанных во всех точках контроля, соответственно этот объем информации предстает перед оператором как целостное изображение;
- акустический контакт при электронном сканировании лучше, чем при механическом сканировании обычным преобразователем;
- запись всего множества А-сканов позволяет впоследствии просмотреть любой из них для более точного принятия решения о размерах дефектов, а также для фильтрации и иной обработки изображений.

Рис. 2.62 показывает изображения боковых цилиндрических отверстий диаметром 2 мм, условные размеры которых оцениваются по различному уровню амплитуды.

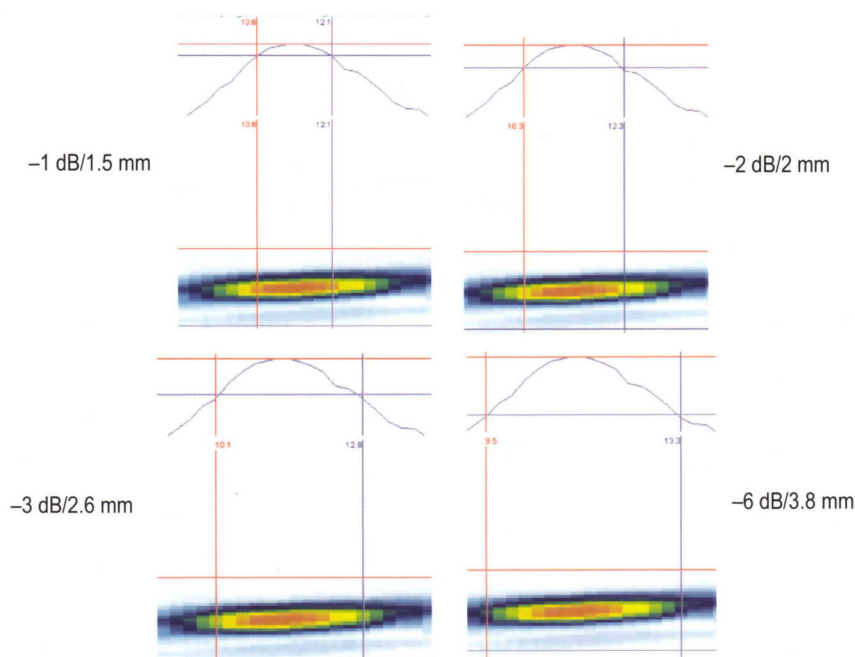


Рис. 2.62. Определение ширины боковых цилиндрических отверстий диаметром 2 мм по различным уровням амплитуды

2.16. Достоверность ультразвукового контроля

Минимальный размер дефекта, надежно обнаруживаемого ультразвуковым способом зависит от множества факторов, включая уровень шума, частоту преобразователя, качество поверхности ввода и размер самого дефекта:

- $D_{\min} > \lambda/4$
- $h_{\min} > 3R_t$

Слой контактной смазки должен иметь толщину от нескольких микрон до $\lambda/2$. Если толщина смазки уменьшается до $\lambda/4$, то амплитуды всех сигналов возрастают на величину от 6 до 10 дБ.

Источники ошибок при определении размеров дефектов сведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7. Примеры источников ошибок: по результатам 6-летней экспериментальной программы в течение 1980-х годов проведенной в CEGV.

Описание ошибки	Значение/причины
Систематическая недооценка	Систематическая; 2-3 мм. Зависит от типа дефекта, характеристик преобразователя, и т.д. Например, возникает при определении границ дефекта по высокому порогу, в то время как использование порога -6 дБ редко приводит к ошибкам в оценке размера.
Настройка глубиномера	Случайная или систематическая; около 1 мм
Угол ввода и точка выхода	Случайная; 1° по углу, 1 мм по точке выхода
Положение преобразователя	Случайная: 2 мм при ручном, 1 мм при автоматизированном сканировании
Ошибка при определении координат и размеров по экрану прибора	Случайная; около 1 мм
Ширина луча	Случайная; 1°

Больше информации о достоверности ультразвукового контроля можно получить в литературе по ссылкам 65, 68, 69, 114-121. Для фазированных решеток ошибки, связанные с определением точки выхода, угла ввода и толщиной слоя смазки – минимальны; наиболее частые ошибки – настройка глубиномера и ошибки считывания размеров/координат по экрану прибора.

3. Формулы для расчета преобразователей и звуковых полей

Данная глава описывает основные аспекты преобразователей и фазированных решеток, используемых для ультразвукового контроля.

3.1 Пьезокомпозитные материалы

Характеристики часто применяемых в ультразвуковом контроле материалов приведены в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Основные свойства часто применяемых пьезоматериалов.

Symbol / Unit	Quartz	BaTiO ₃	PbNb ₂ O ₆	PZT-4	PZT-5A	PVF2
d ₃₃ (pC/N)	2.3	190	85	289	400	20
g ₃₃ 10 ⁻³ Vm/N	57	12.6	42.5	26.1	26.5	190
d ₃₃ g ₃₃ 10 ⁻¹⁵ N/m	133	2394	3612	7542	10,600	3,800
k _t	0.095	0.38	0.32	0.51	0.49	0.1
k	5	1700	225	1300	1700	11
Z (10 ⁶ Rayl)	15.2	25.9	20	30	29	4
Mechanical Q	2,500		24	500	80	3-10

Максимальное количество звуковой энергии переходит в акустическую нагрузку тогда, когда акустические импедансы преобразователя и нагрузки совпадают. Некоторые задачи требуют иммерсионного ввода, а некоторые – непосредственного контакта преобразователя и образца. Большинство задач контроля сварных швов требуют наклонного ввода звукового луча, для этого фазированная решетка устанавливается на призму. Согласование импедансов призмы и решетки или образца и решетки может достигаться при помощи специальных согласующих слоев или электрически. Основные сведения о согласовании импедансов приведены в следующем разделе.

3.1.1. Согласующие слои и требования к кабелю

Основные требования при выборе согласующего слоя и кабеля следующие:

- оптимизация передачи механической энергии колебаний;
- влияние на длительность звукового импульса;
- защита пьезоэлемента с целью обеспечения износостойкости преобразователя;
- толщина слоя должна быть $\lambda/4$.

Максимальная электрическая эффективность достигается когда преобразователь согласован с электрическими импедансами генератора и усилителя. Для расчета этих процессов с учетом всех шагов электроакустического преобразования сигналов существует модель KLM (см. литературу по ссылке 6).

Подходящий кабель характеризуется следующими свойствами:

- минимальная потеря амплитуды при необходимой длине кабеля;
- минимальный импеданс – в идеале 50 Ом;
- отсутствие или минимальность отражений сигнала в кабеле;
- устойчивость кабеля к многократным изгибам, сдавливанию, скручиванию, и т.п. нагрузкам;
- водонепроницаемость.

Высокое значение $d_{33}g_{33}$ свидетельствует о хорошей энергии излучения-приема. Низкая механическая добротность Q означает, что преобразователь имеет широкую полосу пропускания частот и обеспечивает хорошую лучевую разрешающую способность. Демпфер, приклеенный к тыльной стороне преобразователя способствует расширению полосы пропускания.

3.1.2. Материал демпфера

Основные требования к материалу демпфера следующие

- высокое затухание ультразвуковых колебаний на частоте преобразователя (достаточное, чтобы отсутствовали отражения ультразвука от тыльной стороны демпфера);
- высокий импеданс, близкий к импедансу пьезоэлемента, способствующий уменьшению длительности излучаемых импульсов (демпфирование).

3.2 Пьезокомпозитные материалы

Пьезокомпозиты были разработаны в середине 1980-х годов в США с целью улучшения разрешающей способности медицинских ультразвуковых приборов.

Пьезокомпозиты, используемые для ультразвуковых преобразователей имеют связность 1-3. Композитная пьезопластина изготавливается из одинаково расположенных пьезоэлектрических стержней, включенных в эпоксидную основу (матрицу), как показано на рис. 3-1. Таким образом элементарные пьезоэлементы имеют одну степень свободы (совершают колебания только по высоте), в то время как матрица имеет 3 степени свободы. Например, керамика PZT в сочетании с различными полимерными материалами имеет большее значение $d_{33}g_{33}$, чем чистая керамика PZT (см. табл. 3.2).

Прим. пер.: качественно пьезокерамика марки PZT (plumbum zirconate-titanate) близка к отечественной ЦТС, однако маркировка модификаций у отечественных и зарубежных производителей не совпадает

Табл. 3.2. Значения $d_{33}g_{33}$ для различных сочетаний PZT с полимерными матрицами

1-3 PZT – полимер	$d_{33}g_{33}$ (10-15 N/m)
PZT и силиконовая резина	190,400
PZT и эпоксидный компаунд Spurs	46,950
PZT и полиуретан	73,100
PZT и эпоксидный компаунд REN	23,500

Свойства композитных пьезоэлементов могут быть рассчитаны по теории сред Смита или по методу конечных элементов.

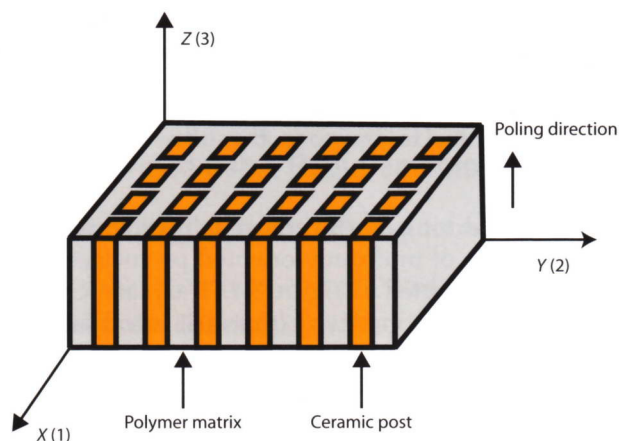


Рис. 3.1. Композитный пьезоэлемент связности 1-3 в соответствии с теорией Смита

Предполагая, что свойства элемента одинаковы в направлениях $X(1)$ и $Y(2)$, пьезокомпозитный элемент обладает следующими особенностями:

- электромеханически возбуждается толщинная мода колебаний;
- скорость распространения колебаний по толщине элемента на рис. 3.2;
- эффективный характеристический импеданс для толщинной моды колебаний приведен на рис. 3.3.

Пьезокомпозитные элементы позволяют получить следующие преимущества:

- очень низкая акустическая связь элементов решетки – от -34 до -40 дБ;
- низкая добротность элементов (рис. 3.4);
- хорошее электромеханическое согласование;
- лучшая чувствительность и меньшая мертвая зона по сравнению с обычными преобразователями из цельной керамики PZT;
- простая технология производства асферически сфокусированных фазированных решеток со сложным профилем поверхности;
- стабильность свойств в широком диапазоне температур;
- легко изменить скорость звука, импеданс и электромеханические коэффициенты путем изменения объемной доли пьезокерамики в конечном композите;
- можно получить хорошее акустическое согласование с различными материалами от воды до стали;
- не требует дополнительных согласующих слоев;
- стоимость изготовления не выше, чем для изготовления соответствующих систем из множества преобразователей;
- особые свойства можно получить, создавая неравномерное распределение керамической фазы по площади композитного элемента.

Больше информации относительно пьезокомпозитных материалов можно найти в литературе по ссылкам 3 - 13 и 31.

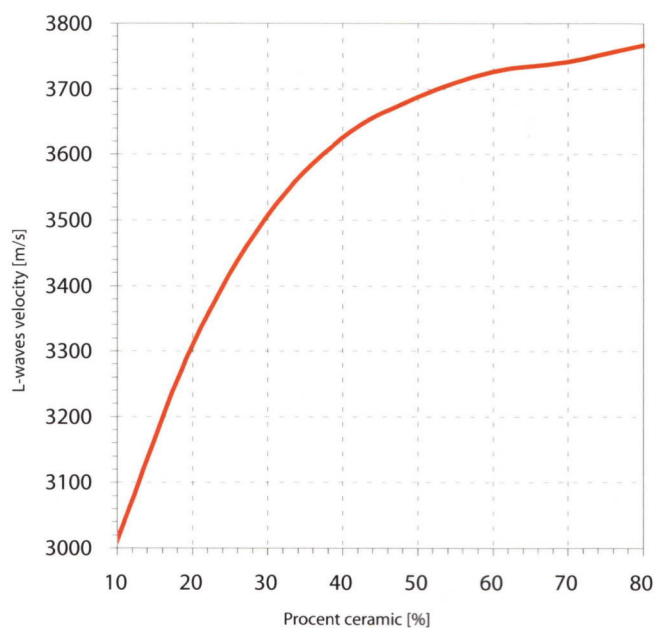


Рис. 3.2. Зависимость скорости продольных волн от объемной доли керамической фазы

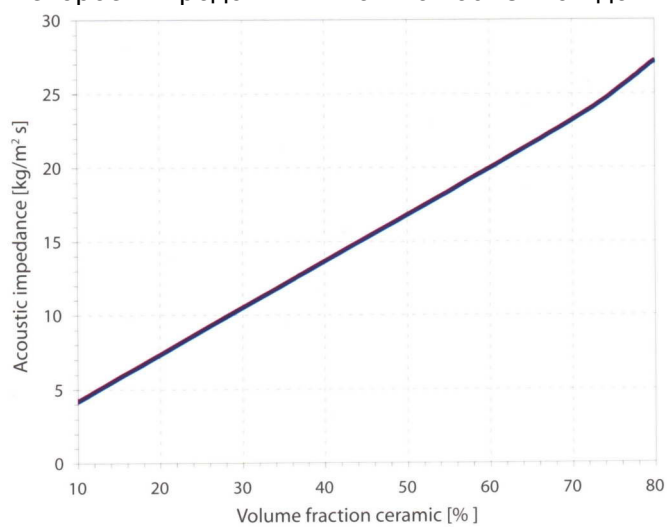


Рис. 3.3. Зависимость акустического импеданса от объемной доли керамической фазы

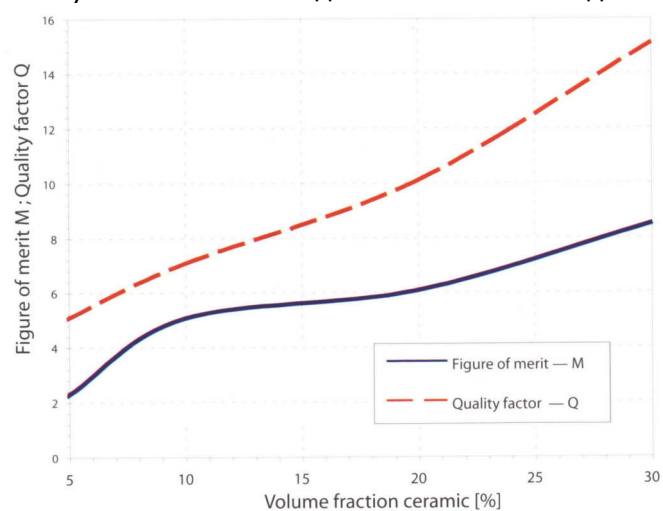


Рис. 3.4. Показатель качества M (синяя кривая) и добротность Q (красная кривая) пьезокомпозитного стержня толщиной 0,45 мм в зависимости от доли керамической фазы

3.3 Типы преобразователей на фазированных решетках

Фазированные решетки, используемые в промышленности и типы обеспечиваемой ими фокусировки перечислены в таблице 3.3 и представлены на рис. 3.5 – 3.9.

Другие возможные типы фазированных решеток представлены на рис. 3.10 – 3.13

Тип	Управление лучом	Форма фронта луча	Рисунок
Концентрическая	По глубине	Сферическая	рис. 3.5
Одномерная линейная плоская	По глубине, углу	Эллиптическая	рис. 3.6
Двумерная матрица	По глубине, телесному углу	Эллиптическая	рис. 3.7
Полуторамерная матрица	По глубине, небольшому телесному углу	Эллиптическая	рис. 3.8
Двумерная концентрическая	По глубине, телесному углу	Сферическая	рис. 3.9

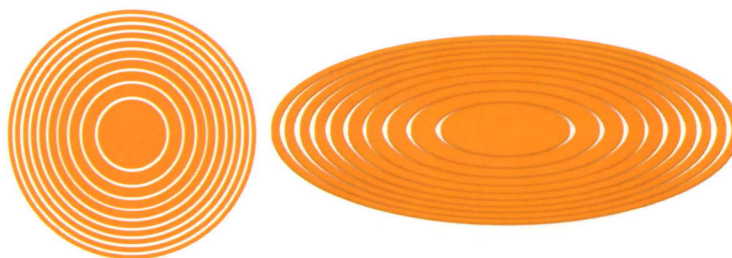


Рис. 3.5 Концентрическая фазированная решетка с равными по площади элементами



Рис. 3.6 Одномерная фазированная решетка

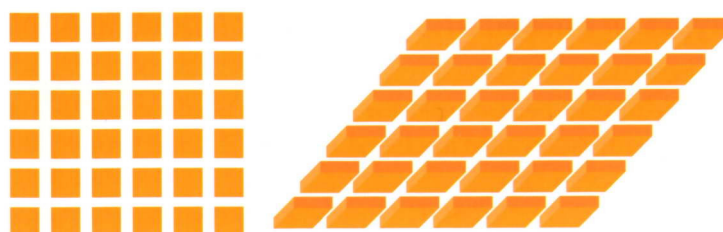


Рис. 3.7. Двумерная фазированная матрица

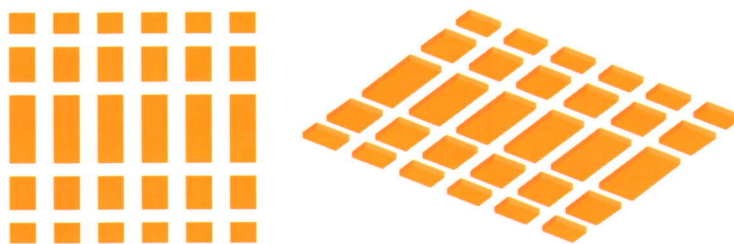


Рис. 3.8 Полуторамерная фазированная матрица

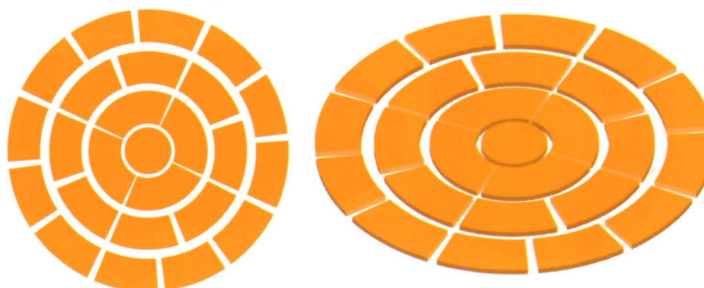


Рис. 3.9 Двумерная концентрическая матрица

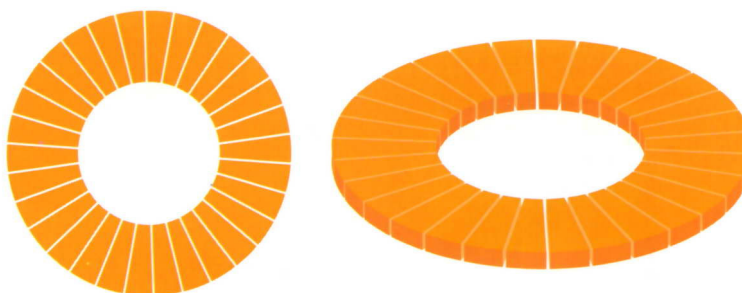


Рис. 3.10 Одномерный круглый преобразователь «ромашка»

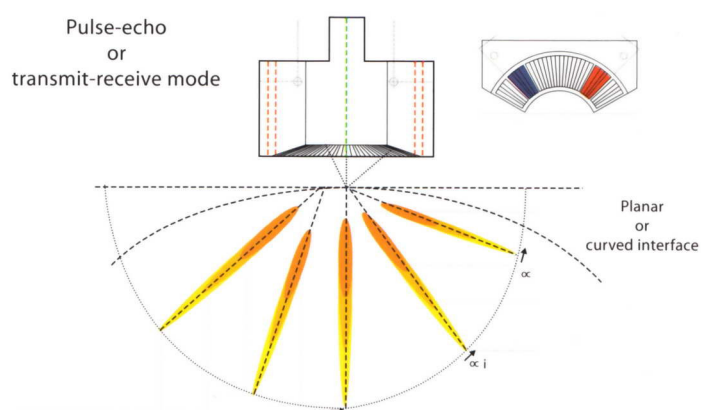
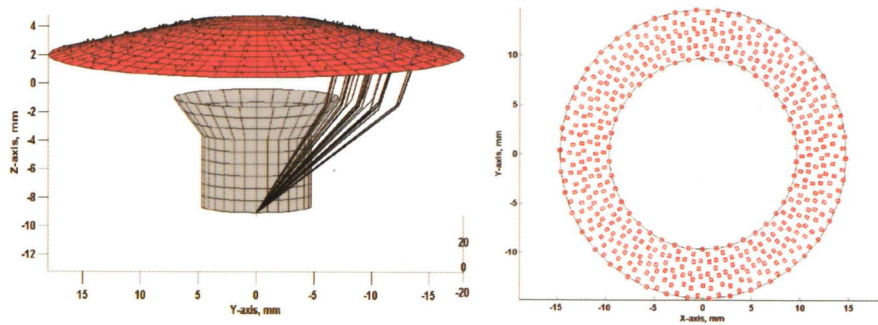


Рис. 3.11 Преобразователь для контроля труб малого диаметра. Показаны типичные углы ввода луча. Патент R/D Tech US №2004/0016299AL.



Courtesy of Lockheed Martin AS and USAF, USA

Рис. 3.12. Двумерная коническая матрица (патент 10-209, 298)

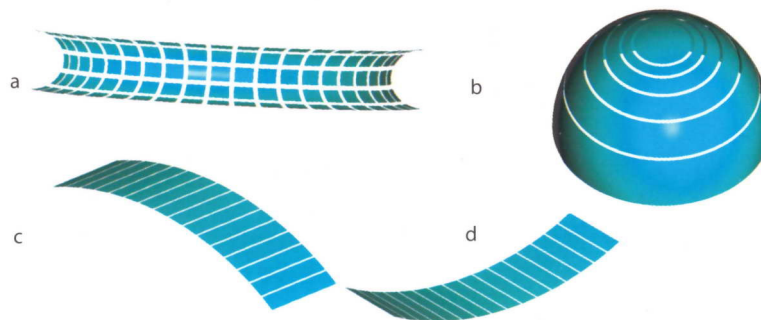


Рис. 3.13 Механически сфокусированные решетки: а) тороидальная; б) концентрическая вогнутая; с) линейная вогнутая; д) линейная выпуклая

Примеры сфокусированных звуковых полей для распространенных типов решеток приведены на рис. 3.14 – 3.16.

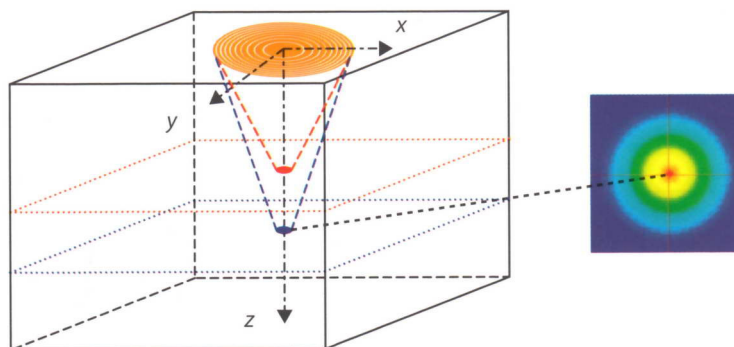


Рис. 3.14. Одномерная сферическая фокусировка по глубине и поперечное сечение звукового поля концентрической фазированной решетки.

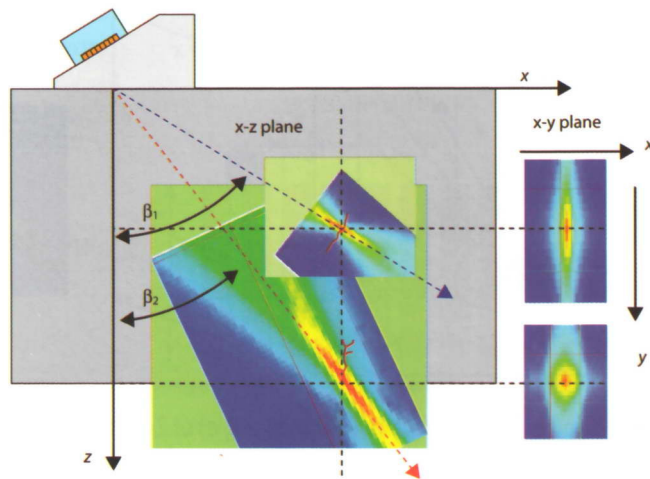


Рис. 3.15. Двумерная цилиндрическая фокусировка по глубине и углу с помощью линейной одномерной фазированной решетки, установленной на призму. Приведены примеры фокусировки для обнаружения дефектов на донной поверхности и в средней части толщины образца

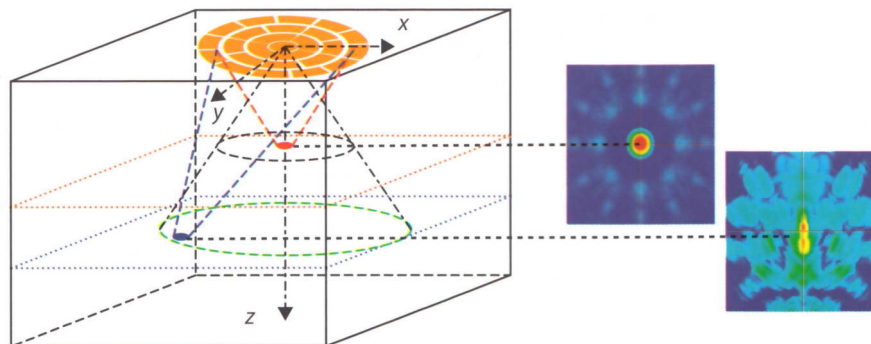


Рис. 3.16. Сферическая/эллиптическая фокусировка в трех измерениях с использованием двумерной концентрической матрицы. Приведены примеры расчета звукового поля в двух точках, расположенных на разном расстоянии под разными углами

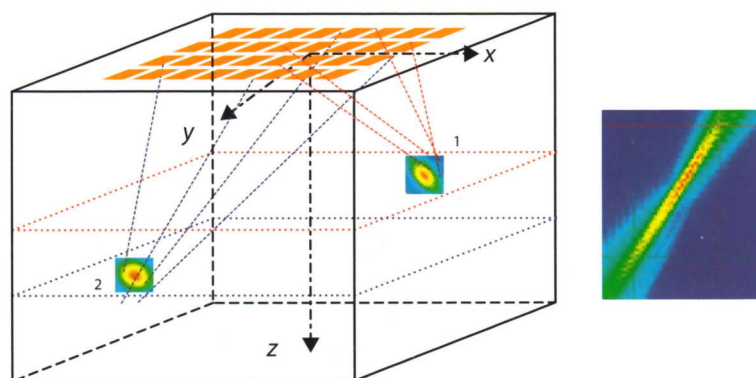


Рис. 3.17. Эллиптическая фокусировка прямоугольной двумерной матрицей.

3.4 Линейные решетки

Линейные решетки наиболее часто применяются на практике. Их основные преимущества следующие:

- простая конструкция;
- простое изготовление;
- простой расчет и моделирование;
- простое применение с призмами, в контактном и иммерсионном вариантах;
- сравнительно низкая стоимость;
- универсальность.

3.4.1. Активная апертура

Активной апертурой называется общая длина решетки. Апертура рассчитывается по следующей формуле:

$$A = n \cdot e + g \cdot (n - 1) \quad (3.1)$$

где:

A – активная апертура

g – зазор между ближайшими элементами

e – ширина одного элемента (как правило $e < \lambda/2$)

n – количество элементов

λ – длина волны в акустической нагрузке

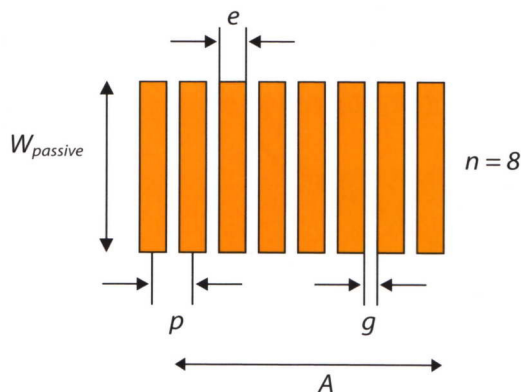


Рис. 3.18. Активная (A) и пассивная (W) апертуры фазированной решетки

3.4.2. Эффективная активная апертура

Эффективной активной апертурой A_{eff} называется проекция активной апертуры на плоскость, перпендикулярную преломленным лучам (рис. 3.19)

$$A_{eff} = \frac{A \cdot \cos \beta_R}{\cos \alpha_I} \quad (3.2)$$

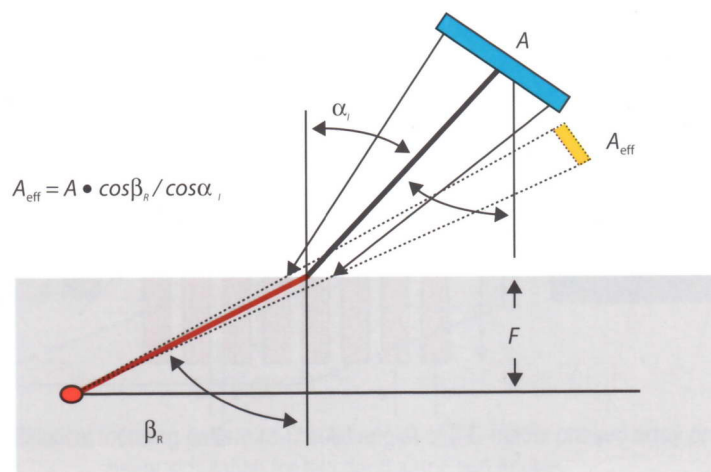


Рис. 3.19 Понятие эффективной активной апертуры

3.4.3. Минимальная активная апертура

Минимальная активная апертура A_{\min} – это минимально необходимая активная апертура чтобы получить достаточную фокусировку под максимальным преломленным углом.

$$A_{\min} = 2 \left[\frac{F(v_R^2 - v_l^2 \cdot \sin^2 \beta_R)}{f \cdot v_R \cdot \cos^2 \beta_R} \right]^{0.5} \quad (3.3)$$

где:

v_l – скорость звука в первой среде (призма, иммерсионная жидкость)

v_R – скорость звука в контролируемом образце

f – частота ультразвука

F – фокусная глубина для максимального угла преломления

β_R – максимальный угол преломления в испытуемом образце

3.4.4. Пассивная апертура

Пассивная апертура W – это длина одного элемента решетки (рис. 3.18) или ширина всей решетки. Оптимальная величина пассивной апертуры определяется частотой и требуемым диапазоном фокусных расстояний:

$$W = 1.4[\lambda(F_{\min} + F_{\max})]^{0.5} \quad (3.4)$$

Ее влияние на фокусное расстояние (или протяженность ближней зоны) рассчитывается для несфокусированного преобразователя по формуле:

$$N_0 = \frac{(A^2 + W^2)(0.78 - 0.27W/A)}{\pi\lambda} \quad (3.5)$$

На практике допустимо использовать приближенное значение по формуле:

$$N_0 \approx \frac{0.25A^2}{\lambda} \quad (3.6)$$

Пассивная апертура влияет на чувствительность и на точность определения размеров дефектов. Для линейной решетки максимальная эффективность достигается при $W = A$.

Также пассивная апертура влияет на ширину луча и распределение акустического давления (рис. 3.20). Чаще всего фазированные решетки изготавливают с соотношением $W/p > 10$ и $W = (0,7 \dots 1,0)A$.

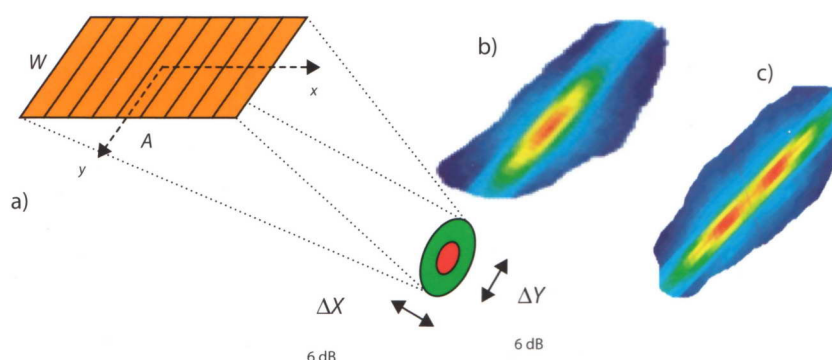


Рис. 3.20. Влияние пассивной апертуры на ширину и форму луча: а) характерные размеры луча; б) форма луча при $W = 10$ мм; в) форма луча при $W = 8$ мм, поперечная волна, 5 МГц, $p = 1$ мм, $n = 32$, $F = 50$ мм в стали

3.4.5. Шаг решетки (шаг размещения элементов)

Шаг решетки p – это расстояние между центрами соседних элементов решетки.

$$p = e + g$$

3.4.6. Величина зазора

Величина зазора g – это ширина акустической изоляции между соседними элементами решетки.

3.4.7. Ширина элемента

Ширина элемента e – это ширина одного пьезоэлемента фазированной решетки. Главное правило состоит в том, что $p < 0,67 \lambda$ во избежание образования дополнительных лепестков диаграммы направленности (см. раздел 3.4.23). При этом ширина элемента должна быть $e < \lambda/2$.

Новые разработанные приборы (см. ссылку 10) и PipeWIZARD показывают, что шаг размещения элементов p может быть и больше длины волны, но при этом возможность управления лучом становится ограниченной.

3.4.8 Максимальный размер элемента

Максимальный размер элемента e_{\max} – это допустимая максимальная ширина отдельного элемента, которая определяется максимальным углом отклонения луча при электронном управлении.

$$e_{\max} = \frac{0.514 \cdot \lambda}{\sin \alpha_{R_{\max}}} \quad (3.7)$$

3.4.9. Диапазон углов «качания» луча

Диапазон углов «качания» луча (α_s) – это разность максимального и минимального угла преломления луча в образце (см. $\Delta\beta$ на рис. 3.21).

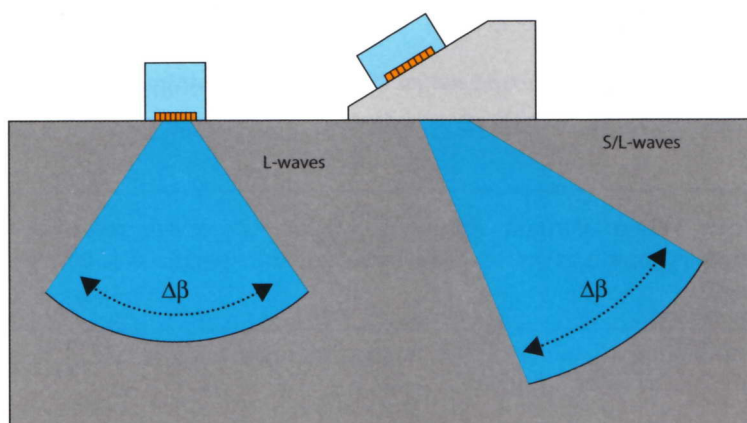


Рис. 3.21. Определение диапазона углов «качания» луча для прямого ввода продольных волн и наклонного ввода поперечных волн

3.4.10 Фокусировка при «качании» луча

Фокусировка при «качании» луча ($F(\beta_R)/F_0$, где β_R – угол ввода) это зависимость фокусного расстояния от угла ввода при «качании» луча (рис. 3.22)

$$\frac{F(\beta_R)}{F_0} = \left(\frac{\cos \beta_R}{\cos \alpha_0} \right)^2 \quad (3.8)$$

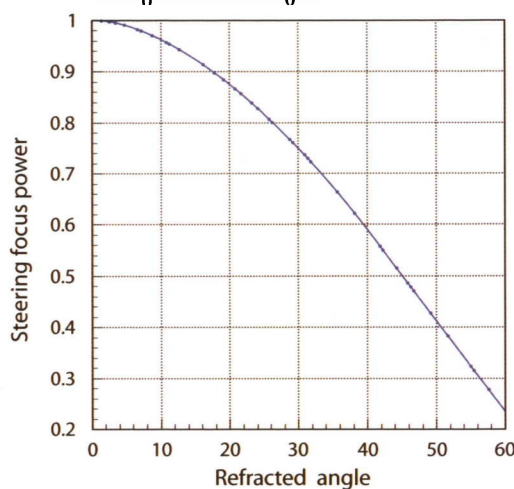


Рис. 3.22. Зависимость фокусного расстояния при качании луча от угла ввода

3.4.11. Компенсация усиления

Пример законов *компенсации усиления* в зависимости от диапазона качания луча приведена на рис. 3.23.

При использовании преломляющей призмы опорным значением угла является угол, рассчитанный по закону Снеллиуса для конкретного материала призмы и ее угла.

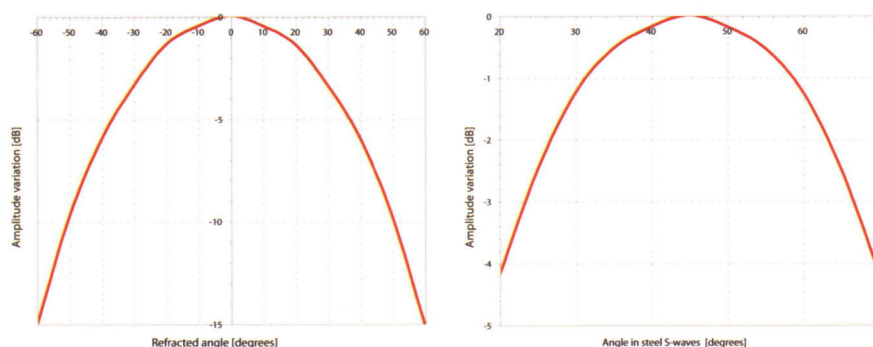


Рис. 3.23. Зависимость амплитуды от угла «качания» луча для продольных волн в стали (от -60° до $+60^\circ$) и поперечных волн в диапазоне «качания» от 20° до 70° с центральным лучом под углом 45° .

Сечение луча, который при прямом вводе является круглым, при больших углах преломления становится эллиптическим. Размеры луча определяются его активной и пассивной апертурами, как показано ниже.

3.4.12. Длина луча

Длина луча ($\Delta Y_{-6\text{dB}}$) – это протяженность луча на С-скане на определенной глубине z , в плоскости перпендикулярной поверхности ввода ультразвуковых колебаний, измеренная параллельно пассивной апертуре преобразователя (рис. 3.20)

$$\Delta Y_{-6\text{ dB}} \approx \frac{0.884 U T_{\text{path}} \lambda}{W_{\text{passive}}} \quad (3.9)$$

3.4.13. Ширина луча

Ширина луча ($\Delta X_{-6\text{dB}}$) – это протяженность луча на С-скане на определенной глубине z , в плоскости ввода ультразвуковых колебаний, измеренная параллельно активной апертуре преобразователя.

$$\Delta X_{-6\text{ dB}} \approx \frac{0.884 U T_{\text{path}} \lambda}{A \cos \beta} \quad (3.10)$$

Соотношения 3.9 и 3.10 верны для расстояний *не равных* фокусному ($U T_{\text{path}} \neq F$). Максимальная погрешность расчета по данным формулам – от 15% до 30%.

Ширина луча может быть измерена по динамике эхо-сигналов от боковых цилиндрических отверстий. Длина луча по динамике сигналов от плоскодонных отверстий (рис. 3.24).

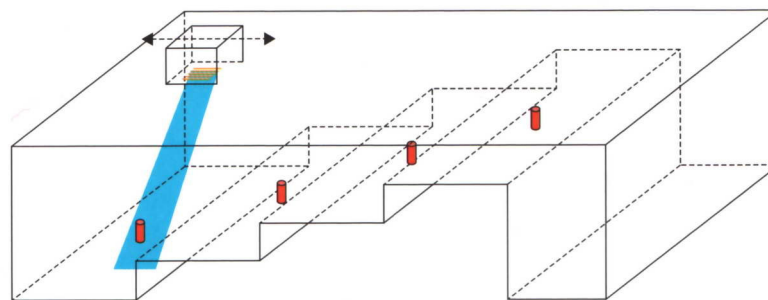


Рис. 3.24. Определение длины луча по плоскодонным отверстиям в ступенчатом образце

Ширину луча важно знать для измерения высоты дефектов и для обнаружения дефектов малых размеров (рис. 2.45 или 2.48). Ширина луча зависит от фокусного расстояния и от угла ввода (рис.3.25).

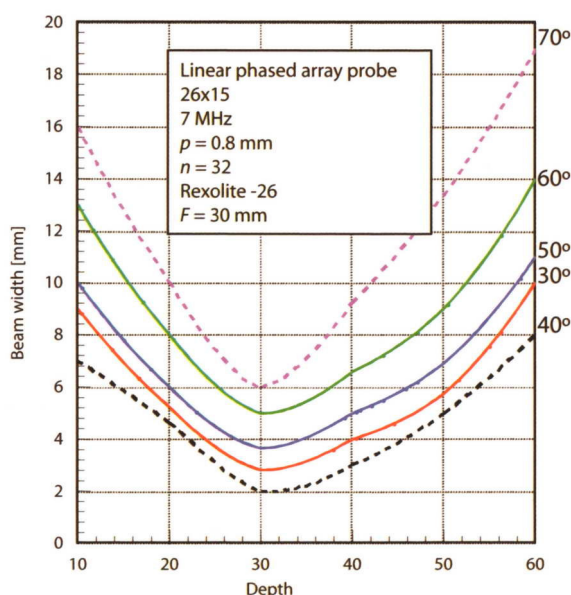


Рис. 3.25. Зависимость ширины луча от угла ввода и глубины.

3.4.14 Фокусное расстояние

Фокусное расстояние – это расстояние, измеренное вдоль акустической оси преобразователя от его поверхности до точки максимальной амплитуды сигнала (рис. 2.24).

Выделяют 4 типа фокусировки в зависимости от того, по какой траектории перемещается точка фокуса при электронном сканировании (рис. 3.26):

- по оси z (фокусировка по вертикали);
- по оси x (на постоянной глубине, по горизонтали);
- по заданному расстоянию (в плоскости xz, по радиус-вектору);
- по специальной траектории в плоскости xz.

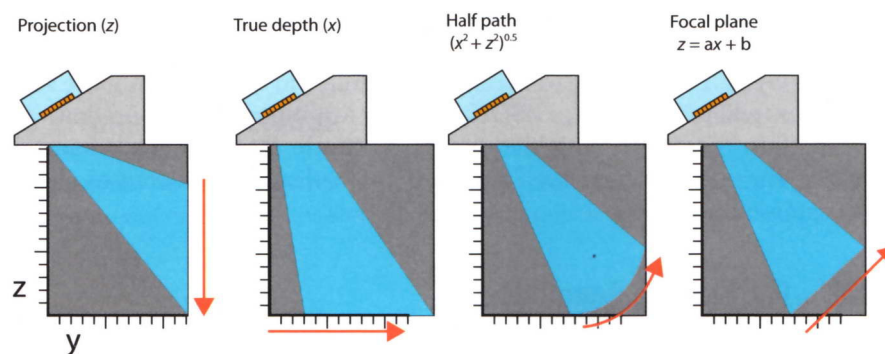


Рис. 3.26. Виды фокусировки линейной решетки

3.4.15 Протяженность фокальной зоны

Протяженность фокальной зоны ($L_{-6\text{дБ}}$) – это размер зоны вокруг точки фокуса, измеренной вдоль акустической оси преобразователя по уровню амплитуды -6 дБ от максимального значения (в точке фокуса).

3.4.16 Диапазон фокусных расстояний

Диапазон фокусных расстояний или глубин – диапазон значений расстояний или глубин, в которых оказывается фокус ультразвукового луча при электронном сканировании. При формировании шага сканирования ключевым является порог равный -6 дБ от максимума, как показано на рис. 3.27.

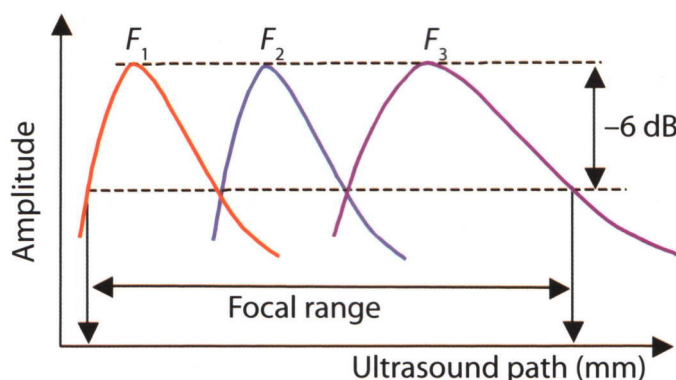


Рис. 3.27. Определение шага изменения фокусных расстояний по уровню -6 дБ

3.4.17 Приповерхностная мертвая зона

Приповерхностная мертвая зона (приповерхностное разрешение) – это минимальное расстояние от поверхности ввода, на котором отражатель заданного типа и размера дает эхо-сигнал, уверенно обнаруживаемый на фоне заднего фронта зондирующего импульса. Считается, что уверенное раздельное выявление двух сигналов достигается в том случае, если они разделяются «провалом» высотой не менее -6 дБ от уровня меньшего из этих сигналов (см. рис. 3.28).

3.4.18 Придонная мертвая зона

Придонная мертвая зона (придонное разрешение) – это минимальное расстояние от донной поверхности, на котором находится отражатель заданного типа и размера, уверенно выявляемый на фоне эхо-сигнала от донной поверхности.

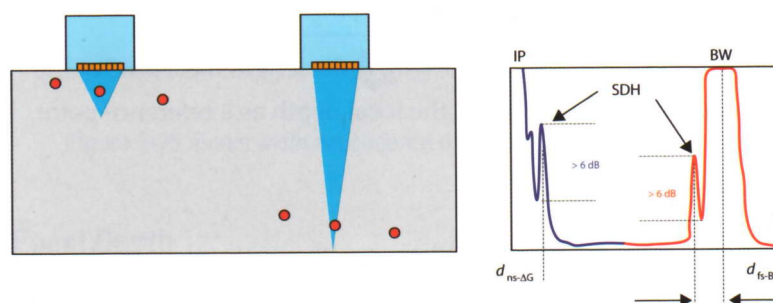


Рис. 3.28. К понятию приповерхностной и придонной мертвых зон

3.4.19 Фронтальная и лучевая разрешающая способность

Фронтальная разрешающая способность определяется при перемещении преобразователя, а лучевая разрешающая способность – при неподвижном преобразователе. Уменьшение ширины луча вызывает улучшение фронтальной р.с., а уменьшение длительности импульса вызывает улучшение лучевой р.с.

Лучевая разрешающая способность:

$$\Delta d = \frac{\Delta X_{-6 \text{ dB}}}{4}$$

Фронтальная разрешающая способность:

$$\Delta z = \frac{v_{\text{test piece}} \Delta \tau_{-20 \text{ dB}}}{2}$$

где $\Delta \tau_{-20 \text{ dB}}$ – длительность импульса, измеренная по уровню -20 дБ от максимального значения.

3.4.20 Угловая разрешающая способность

Угловая разрешающая способность – это минимальный угол между двумя А-сканами, полученными под двумя направлениями (углами), при котором два дефекта, расположенные на одной глубине выявляются на изображении отдельно (см. рис. 3.29).

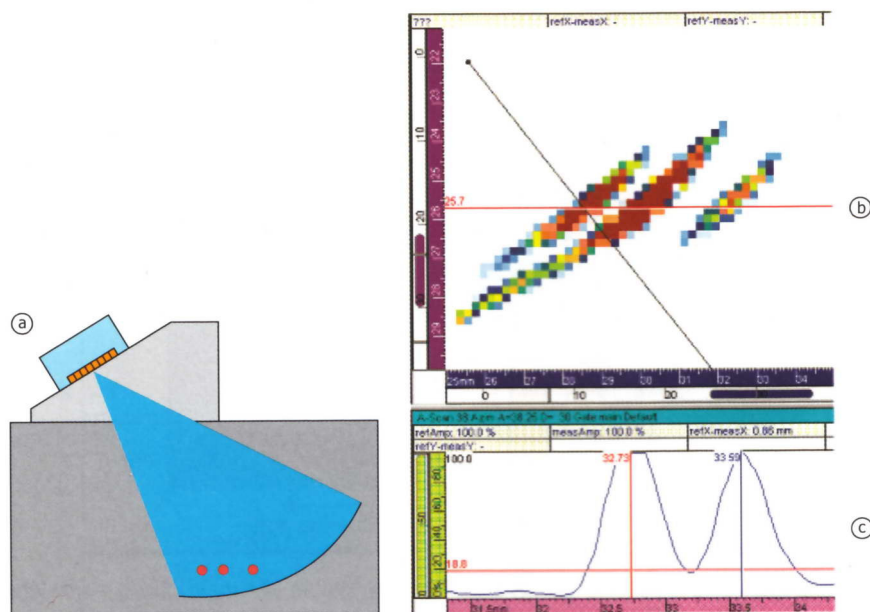


Рис. 3.29. Угловое разрешение трех боковых цилиндрических отверстий диаметром 0,5 мм, разделенные промежутками 0,8 мм и 1,2 мм. Отверстия расположены на глубине 25,7 мм: а) схема озвучивания; б) изображение с фокусировкой по постоянной глубине; в) динамика изменения эхо-сигнала по углу.

3.4.21 Основной лепесток диаграммы направленности

Основной лепесток – это луч акустического давления распространяющийся под заданным углом.

Прим. пер.: данное определение, приведенное в оригинальном тексте является весьма вольным и не вполне корректным. Более правильным является определение, приводимое в отечественной литературе: «Область диаграммы направленности, включающая ее максимум и ограниченная ближайшими к нему нулями или достаточно глубокими минимумами».

3.4.22 Боковые лепестки диаграммы направленности

Боковые лепестки возникают под небольшими углами с основным лепестком и являются результатом «утечки» звуковой энергии с элементов решетки.

Прим. пер.: поскольку в оригинальном тексте не приведено прямое определение боковых лепестков, считаю нужным его привести из отечественной литературы: «Области диаграммы направленности, прилегающие к локальным максимумам и лежащие за пределами основного лепестка». Механизм возникновения боковых лепестков фазированной решетки в сущности тот же, что и для лепестков диаграммы направленности цельной пьезоэлектрической пластины или акустической антенны.

3.4.23 Дополнительные лепестки диаграммы направленности

Дополнительные лепестки возникают за счет синфазного сложения сигналов от различных элементов в направлениях, отличных от направления основного лепестка.

Прим. пер.: явление возникновения «дополнительных» лепестков (grating lobes) является специфическим для фазированных решеток. Я использовал термин «дополнительные» лепестки, однако в отечественной литературе возможны другие, более удачные термины, на данный момент неизвестные переводчику.

Направления дополнительных лепестков вычисляются по формуле:

$$\beta_{\text{grating}} = \sin^{-1}(m\lambda/p) \quad (3.11)$$
$$m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

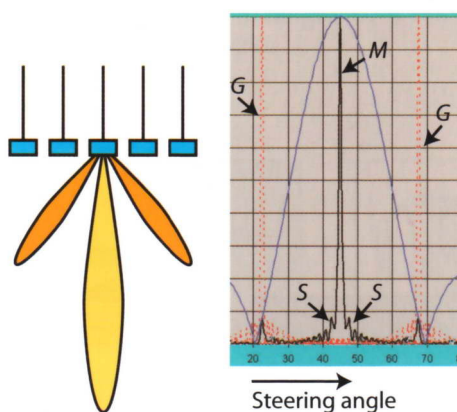


Рис. 3.30. Диаграмма направленности для фазированной решетки:
M – основной лепесток (желтый на рисунке), S – боковые лепестки (не показаны),
G – дополнительные лепестки (оранжевые на рисунке)

Оптимизация конструкции преобразователя заключается в следующем:

- минимизация ширины основного лепестка;
- подавление боковых лепестков;
- полное устранение дополнительных лепестков.

3.4.24 Модуляция напряжения по апертуре решетки

Модуляция напряжения по апертуре решетки – это управляемое компьютером специальное возбуждение элементов решетки, состоящее в том, что на крайние элементы подается возбуждающий сигнал меньшей амплитуды, чем на средние элементы; данный прием позволяет снизить амплитуду боковых лепестков.

Например в приборе Tomoscan FOCUS эта модуляция выполняется на стадии приема. При излучении напряжение на всех элементах одинаково, а при приеме к различным элементам применяется различное усиление. Эти значения усиления возможно настроить вручную по любому желаемому закону.

3.4.25 Амплитуда дополнительных лепестков

Амплитуда дополнительных лепестков зависит от шага размещения элементов решетки, количества элементов, частоты, ширины полосы пропускания (рис. 3.31 и 3.32).

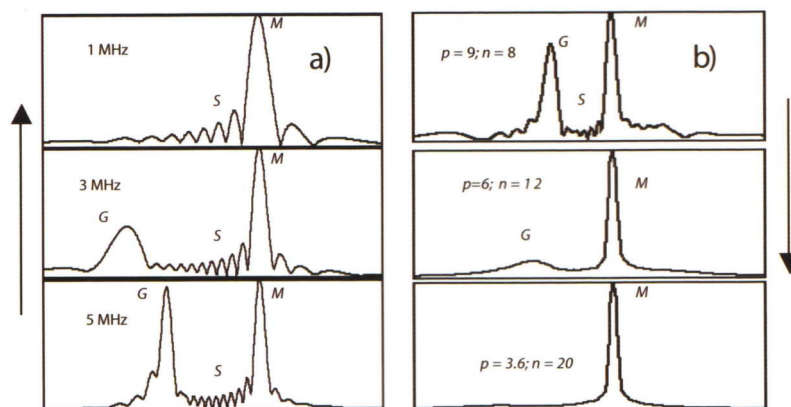


Рис. 3.31. Зависимость амплитуды дополнительных лепестков от: а) частоты; б) шага решетки и количества элементов (при одной и той же апертура 72 мм)

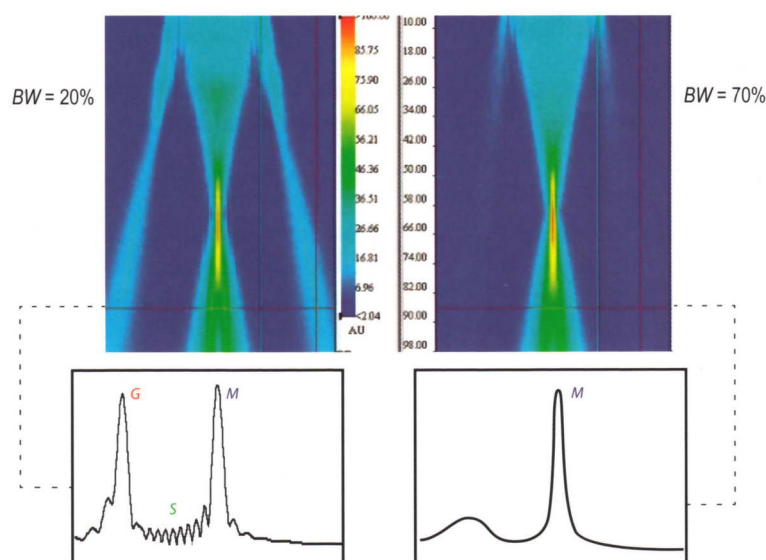


Рис. 3.32. Влияние степени демпфирования (ширины полосы пропускания) на дополнительные лепестки для преобразователя частотой 1 МГц, сфокусированного на глубину 60 мм.

Для уменьшения дополнительных лепестков следует:

- уменьшить частоту;
- уменьшить шаг решетки;
- увеличить полосу пропускания (более сильное демпфирование);
- уменьшить угол «качания» (добавить призму);
- разделить элементы на более мелкие части;
- использовать неодинаковые зазоры между элементами (нерегулярное размещение элементов решетки устраняет синфазное сложение волн, ведущее к возникновению дополнительных лепестков).

3.5 Динамическая фокусировка по глубине

Динамическая фокусировка по глубине (DDF) – это программируемое управление в реальном времени величинами задержки, коэффициента усиления и амплитудами импульсов возбуждения для каждого элемента (рис. 3.33). При этом излучение производится слабосфокусированным импульсом, а в режиме приема последовательно производится сильная фокусировка на различных глубинах. Иными словами, DDF динамически изменяет фокусное расстояние по мере того, как отраженные сигналы возвращаются на преобразователь. Таким образом при DDF существенно увеличивается протяженность фокальной зоны.

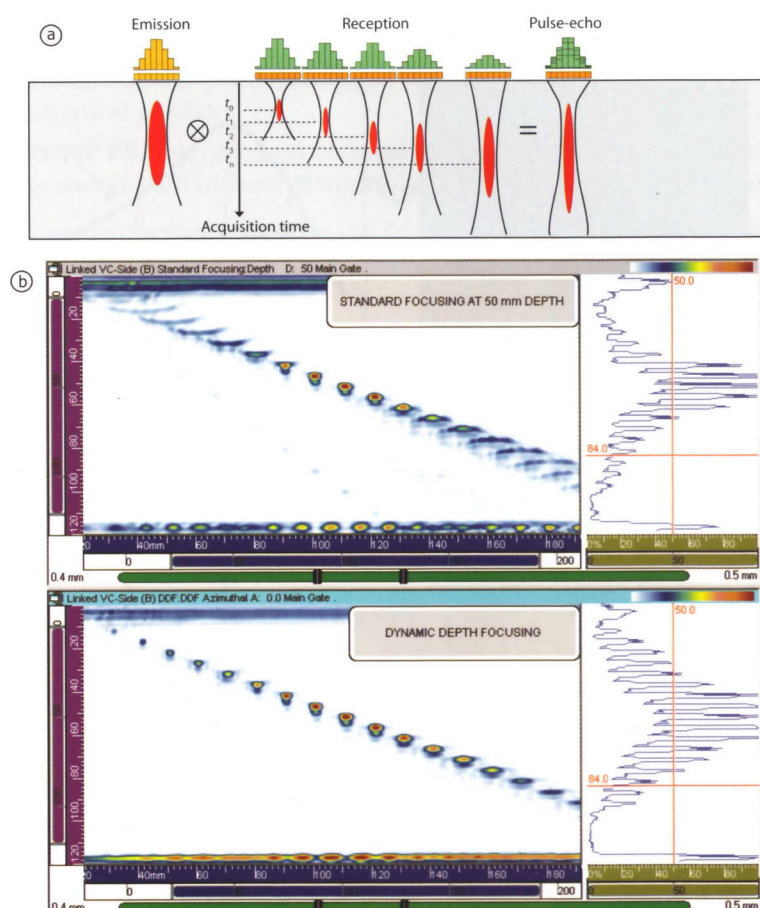


Рис. 3.33. Динамическая фокусировка по глубине (DDF):
а) принцип DDF; б) сравнение изображений, полученных для обычного метода фокусировки (сверху) и DDF. Видно, что два первых приповерхностных отражателя обнаруживаются при DDF и практически не видны при обычной фокусировке.

3.5.1. Расхождение луча при DDF

Расхождение луча при DDF $\Delta X_{-6\text{дБ}}(\text{SDH})$ – это ширина луча, измеренная по динамике эхо-сигнала от боковых цилиндрических отверстий при включенном режиме DDF.

Как показывает рис. 3.34, алгоритм DDF обеспечивает более узкий ультразвуковой луч в широком диапазоне глубин залегания отражателей, по сравнению со стандартной фокусировкой.

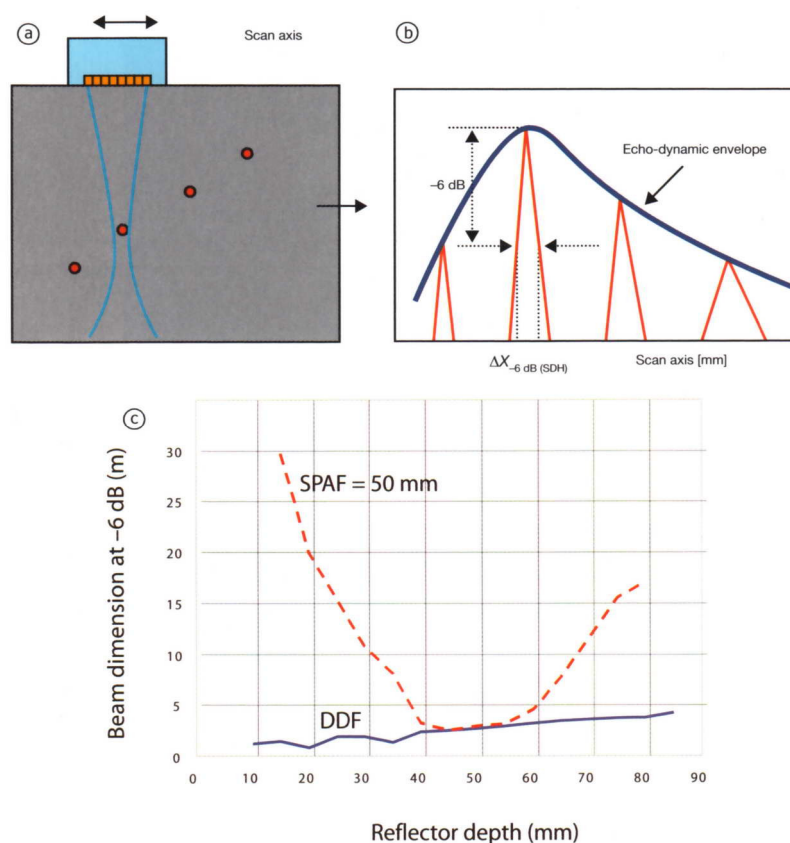


Рис. 3.34. Ширина луча: а) принцип измерения; б) динамика эхо-сигнала и его огибающая; в) сравнение ширины луча для стандартной фокусировки на глубине 50 мм (SPAF) и для фокусировки по методу DDF

3.5.2. Преимущества DDF

- Как показывает практический опыт, протяженность фокальной зоны при DDF приблизительно в 4 раза превосходит таковую при стандартной фокусировке;
- ширина фокусного пятна при DDF такая же или меньше по размерам, чем при стандартной фокусировке;
- использование DDF дает очень слабо расходящиеся лучи. Удастся получить углы раскрытия основного лепестка около $0,3^\circ$ для линейной решетки и $0,14^\circ$ для двумерной решетки;
- DDF не требует специальных преобразователей: она реализуется теми же фазированными решетками, которые реализуют стандартные (статические) алгоритмы фокусировки;
- DDF обеспечивает меньшую мертвую зону, чем SPAF;
- DDF способствует уменьшению размера файлов дефектограмм, т.к. для каждого положения преобразователя записывается только один А-скан;
- можно использовать большую частоту следования импульсов, т.к. один А-скан перекрывает весь путь ультразвукового импульса вместо использования множества импульсов от отдельных преобразователей.

Эти особенности делают DDF незаменимым в ряде задач (см. раздел 5 «Применения»).

3.6. Использование фазированной решетки с призмой

Чаще всего линейные решетки используются с призмами. Важные аспекты такого использования рассмотрены в следующих разделах.

3.6.1. Задержка в призме

Задержка в призме (D_w) – это время прохождения импульса через призму под заданным углом (имеется в виду суммарное время прохождения туда и обратно). Схема расчета задержки приведена на рис. 3.35. Порядок расчета следующий.

Прим. пер.: считаю полезным привести определение соответствующего термина по ГОСТ 26266-90 «Время распространения звука в призме – время задержки сигнала от момента подачи электрического импульса на ПЭП до момента появления акустического сигнала в точке ввода».

- 1) найти по закону Снеллиуса необходимый угол призмы через требуемый угол ввода:

$$\alpha_i = \sin^{-1}\left(\frac{v_{\text{wedge}} \sin \beta_R}{v_{\text{test piece}}}\right)$$

- 2) Найти высоту призмы в точке, соответствующей середине фазированной решетки (мнимая точка излучения):

$$E_h = (L_1 + L_2) \cdot \sin \omega = [H_1 + p/2 \cdot (n - 1)] \cdot \sin \omega \quad (3.12)$$

- 3) Найти путь ультразвукового луча в призме:

$$P_{\text{wedge}} = \frac{E_h}{\cos \alpha_i}$$

- 4) Найти величину задержки в призме:

$$D_{\text{wedge}} = \frac{2 \cdot P}{v_w} \quad (3.13)$$

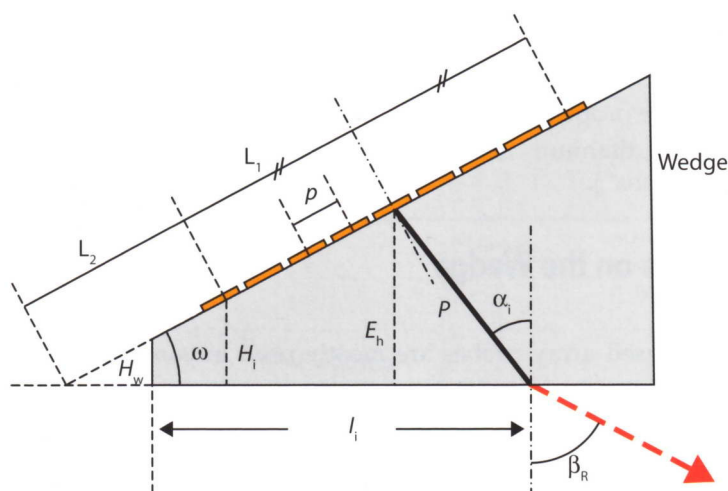


Рис. 3.35. Схема расчета задержки в призме и точки выхода луча

3.6.2. Точка выхода луча и величина стрелы

Стрела – это расстояние от задней кромки призмы до точки выхода ультразвукового луча (рис. 3.35).

Прим.пер.:

1) Отечественные ГОСТ 26266-90 и ГОСТ 14782-86 используют разные термины для обозначения одного и того же понятия «точка ввода» или «точка выхода». В данном переводе использован второй термин, как более распространенный в литературе.

2) В этой главе авторы рассчитывают именно расстояние от ЗАДНЕЙ кромки призмы. Однако в переводе использован отечественный термин «стрела». В зарубежной литературе термин «index point» может иметь два значения (расстояние либо от передней, либо от задней грани призмы), и какое из них используется, должно быть ясно из контекста.

Следует понимать, что для получения стрелы в привычном нам понимании следует вычесть полученное ниже значение I_i из полной длины призмы.

$$I_i = (L_1 + L_2) \cdot \cos \omega - H_w \cdot \tan \omega + P \cdot \sin \alpha_i \quad (3.14)$$

где:

ω – угол призмы

H_i – высота призмы в точке, соответствующей середине первого элемента решетки;

H_w – высота заднего среза призмы;

P – путь ультразвукового луча в призме (при однократном прохождении);

α_i – угол наклона призмы;

β_R – угол ввода;

E_h – высота призмы в точке, соответствующей середине фазированной решетки (то есть мнимой точки излучения);

p – шаг решетки;

L_1 – расстояние от середины первого элемента решетки до мнимой точки излучения;

L_2 – расстояние от мнимой точки излучения до воображаемого пересечения наклонной плоскости призмы с ее рабочей поверхностью;

I_i – величина стрелы;

v_R – скорость ультразвуковых колебаний в контролируемом образце;

v_w – скорость ультразвуковых колебаний в призме.

3.6.3 Смещение точки выхода

Смещение точки выхода ($\Delta l(\alpha_i)$) – изменение ее положения в зависимости от угла луча в призме (рис. 3.36).

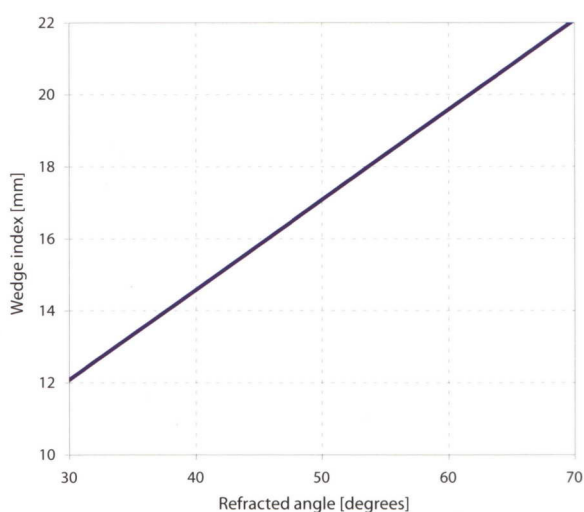


Рис. 3.36. Пример графика смещения точки выхода от угла ввода для линейной фазированной решетки. Программное обеспечение TomoView компенсирует это смещение.

3.7. Отклонение луча в призме

В данном разделе описываются возможные варианты отклонения луча при использовании фазированной решетки, возникающие вследствие управления лучом.

3.7.1. Азимутальное отклонение

Азимутальное (секторное) отклонение связано с «качанием» луча по длине призмы (рис. 3.37) при изменении угла его распространения в вертикальной плоскости (рис. 3.38.a). При этом пассивная апертура решетки параллельна ширине призмы.

3.7.2. Поперечное отклонение

Поперечное отклонение связано с «качанием» луча по ширине призмы (рис.3.37), в горизонтально-наклонной плоскости (рис. 3.38, b). Качание осуществляется из стороны в сторону при постоянном угле ввода, определяемом углом призмы.

3.7.3. Наклонное азимутальное отклонение

Наклонное отклонение луча по азимуту похоже по сути на «качание» луча по длине призмы, однако осуществляется не в вертикальной плоскости, а несколько

отклонено от вертикального направления под углом, заданным наклоном грани призмы (рис. 3.38 с).

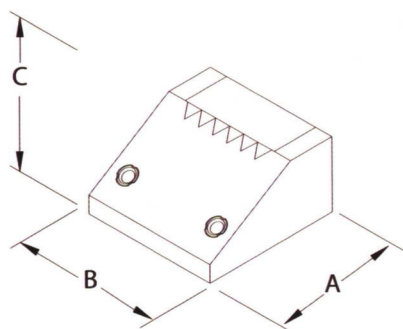


Рис. 3.37. Размеры призмы: А – длина; В – ширина; С – высота

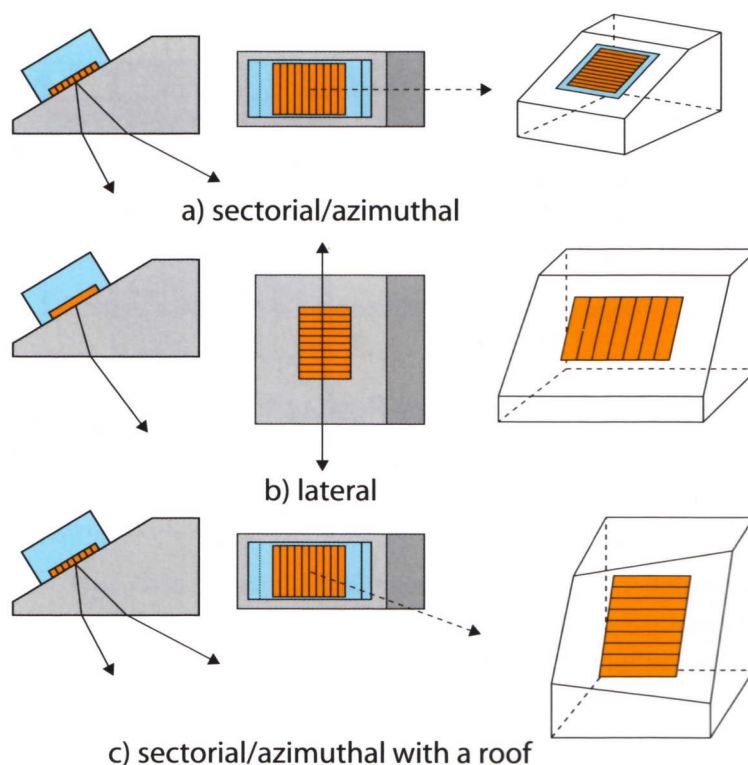


Рис. 3.38. Отклонение луча в призме:
а) по азимуту (сектору); б) поперечное; в) по азимуту в наклонной плоскости

3.7.4 Отступ активной апертуры

Отступ активной апертуры - это расстояние между серединой первого элемента решетки и кромкой призмы в направлении, соответствующем активной апертуре преобразователя (рис. 3.39).

3.7.5 Отступ пассивной апертуры

Отступ пассивной апертуры – это расстояние между серединой первого элемента решетки и кромкой призмы в направлении, соответствующем пассивной апертуре преобразователя (рис. 3.39).

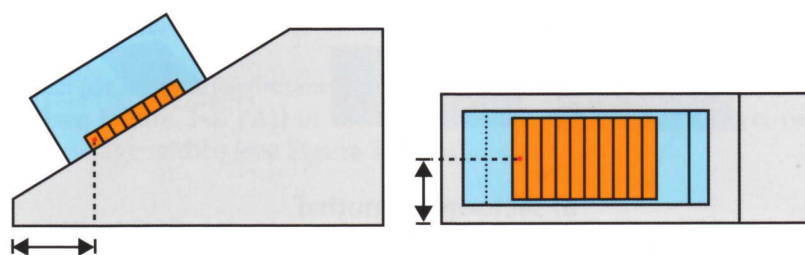


Рис. 3.39. Понятие отступов активной (слева) и пассивной (справа) апертур

3.8. Двумерные (матричные) фазированные решетки

Двумерные фазированные решетки используются как в совмещенном, так и в раздельном режиме работы. Основные преимущества матричных решеток следующие:

- возможность электронного управления фокусом в трех измерениях;
- возможность фокусировки по линейным, сферическим и эллиптическим поверхностям;
- возможность фокусировки на различных глубинах при разных углах отклонения в разных плоскостях.

Основные элементы двумерного матричного преобразователя перечислены на рис. 3.40.

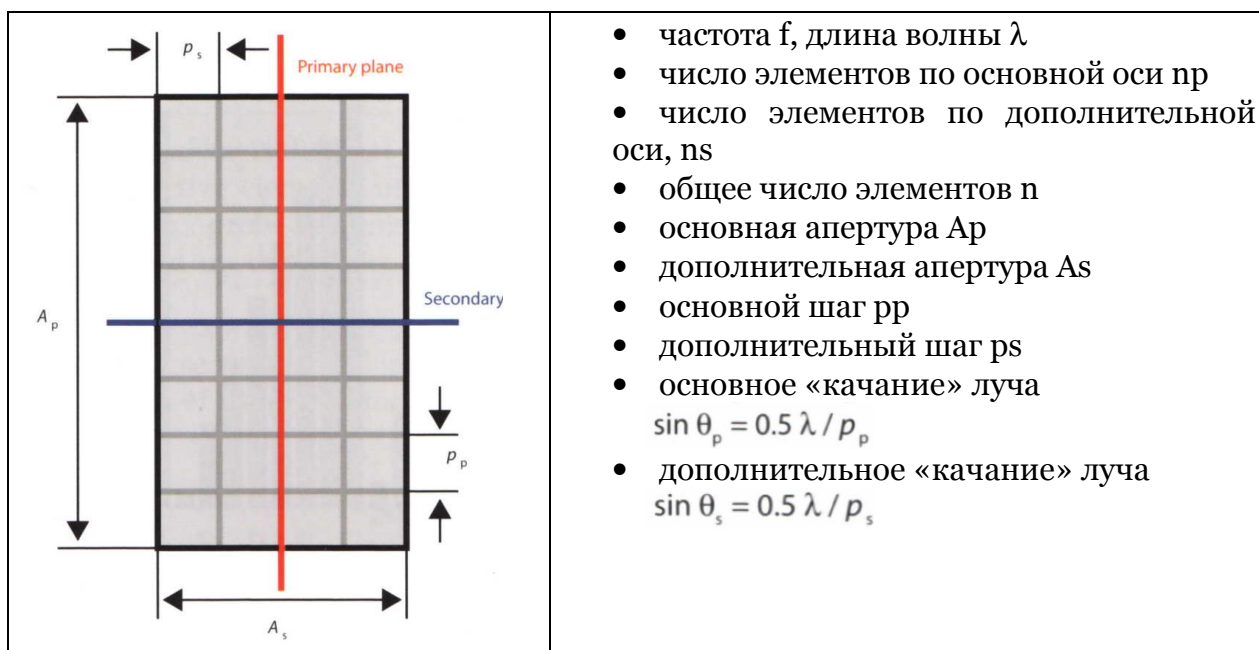


Рис. 3.40. Двумерная фазированная решетка и ее основные характеристики

Результат моделирования двумерной решетки на цилиндрической детали представлен на рис. 3.41.

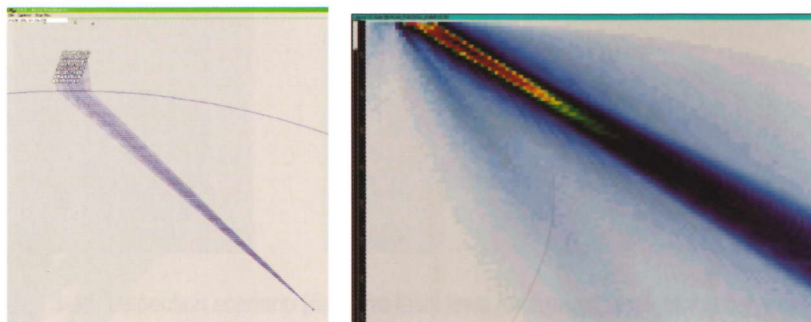


Рис. 3.41. Моделирование луча от двумерной решетки на цилиндрической детали: слева – ход лучей от элементов, справа – профиль звукового давления

На рис. 3.42 в качестве примера приведены значения акустических задержек на элементах решетки размером 4 x 8 элементов при наклоне 15° и угле ввода 45° (продольные волны в стали), с фокусным расстоянием 50 мм.

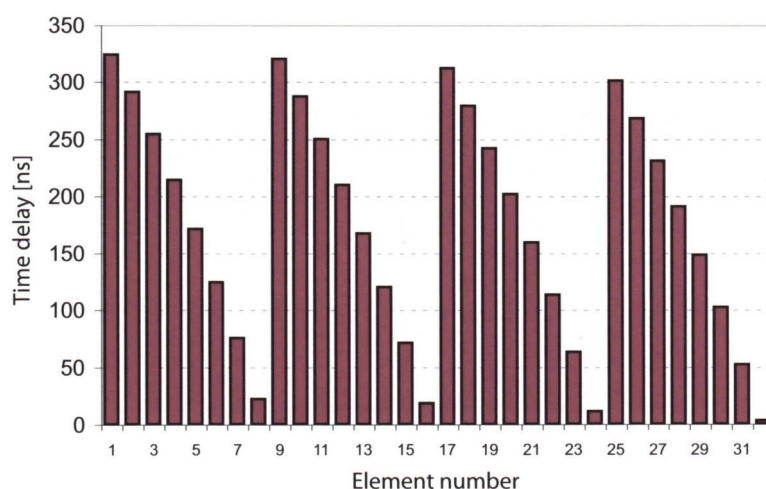


Рис. 3.42. Значения задержек для элементов двумерной решетки размером 4 x 8 элементов в совмещенном режиме работы.

На рис. 3.43 приведен пример размещения двумерных решеток для работы в раздельно-совмещенном режиме. Более подробно эти режимы работы будут рассмотрены в главе 4.

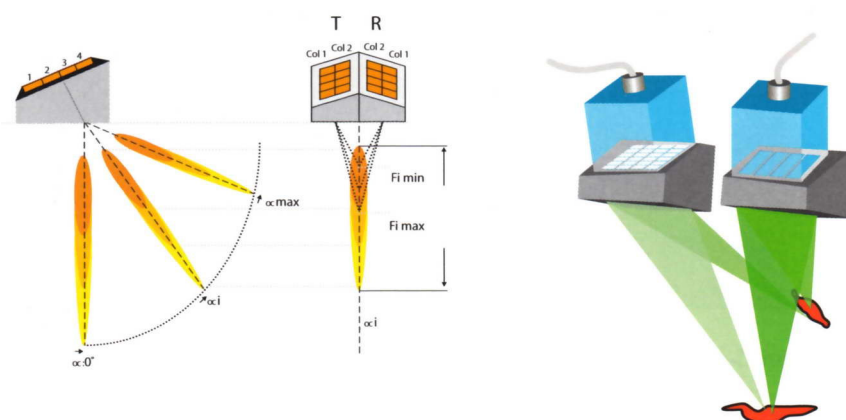


Рис. 3.43. Примеры раздельно-совмещенного размещения двумерных фазированных решеток на призмах с наклонной гранью: размер 4 x 2 (слева) или 6 x 4 (справа)

3.9. Расчет фокальных законов

Расчет фокальных законов производится специальной программой-калькулятором, которая рассчитывает величину временной задержки для каждого элемента решетки. При расчете учитываются направления отклонения луча от нормали, характеристики решетки, параметры призмы, свойства материала контролируемого образца. На основании расчета генератор прибора выработывает последовательность импульсов возбуждения.

На рис. 3.44 приведен пример процесса программирования фокального закона для управления концентрической круглой решеткой, помещенной в воде на расстоянии 20 мм над поверхностью контролируемой металлической плиты, которая прозвучивается по глубине от 10 мм до 100 мм.

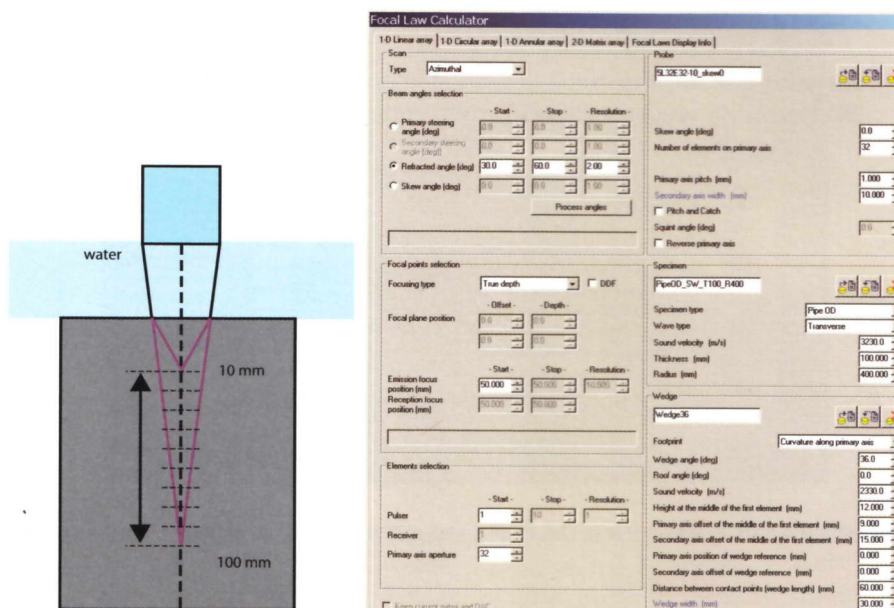


Рис. 3.44. Схема контроля и расчет фокальных законов для круглой концентрической фазированной решетки

Профиль звукового луча решетки для расстояний от 15 до 50 мм представлен на рис. 3.45.

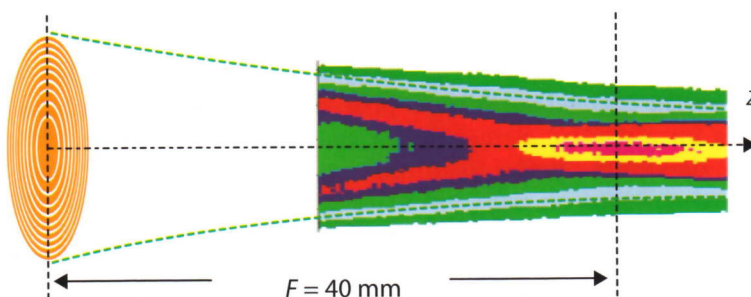


Рис. 3.45. Профиль звукового давления круглой концентрической фазированной решетки на расстояниях от 15 до 50 мм в стали (диаметр луча 1 мм на фокусном расстоянии 40 мм).

На рис. 3.46 представлен пример расчета фокального закона для двумерной решетки, установленной на призму из рексолита с углом 28° и углом наклона 10° .

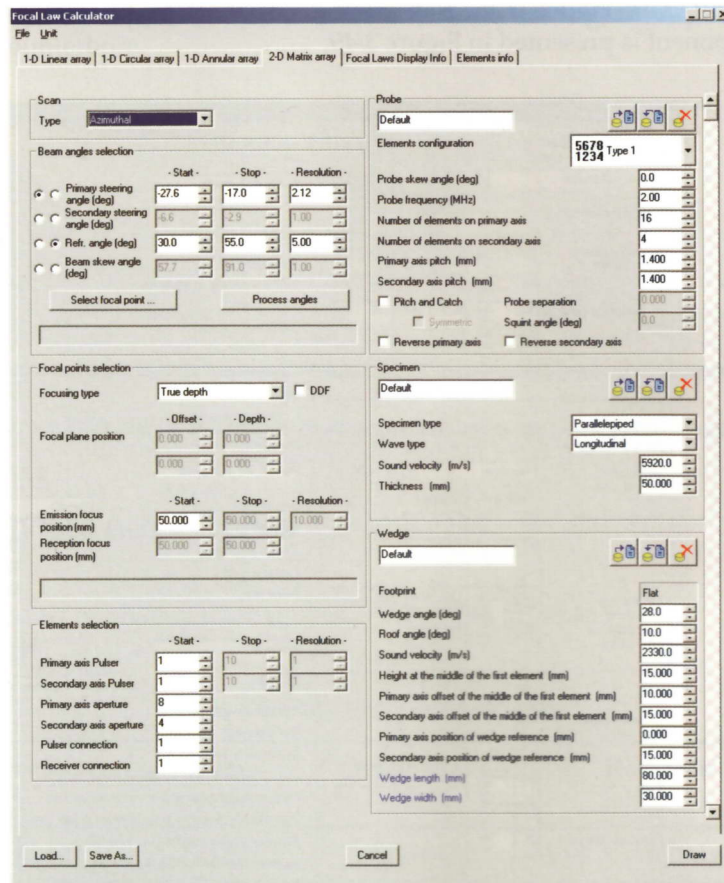


Рис. 3.46. Расчет фокального закона для двумерной матрицы размером 16 x 4 элементов

$f_c = 5 \text{ MHz}$
 $n = 16$
 $A = \sim 32 \text{ mm}$
 $W = 1.4 \text{ mm}$
 Rexolite® wedge (80 mm x 30 mm);
 $\omega = 33^\circ$
 $F = 50 \text{ mm}$

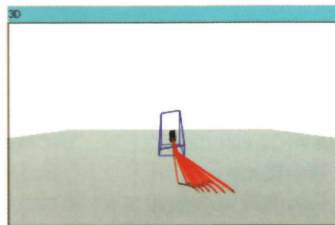


Рис. 3.47. Характеристики фазированной решетки и визуализация процесса контроля для углов качания луча от 30° до 60° с шагом 2° и фокусным расстоянием 50 мм.

Другой пример вычисления фокальных законов для линейной решетки при контроле трубы представлен на рис. 3.48, а на рис. 3.49 представлен ход лучей в изделии.

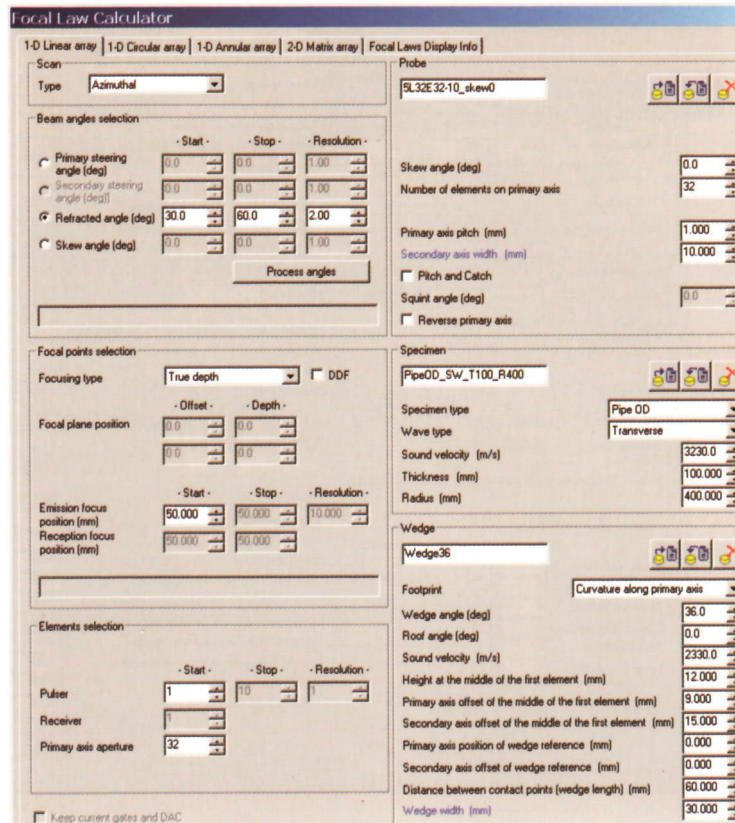


Рис. 3.48. Расчет фокальных законов для контроля трубы линейной решеткой

$f_c = 5 \text{ MHz}$
 $n = 32$
 $A = \sim 32 \text{ mm}$
 $W = 10 \text{ mm}$
 Rexolite® wedge (60 mm × 30 mm);
 $\omega = 36^\circ$
 $F = 50 \text{ mm}$

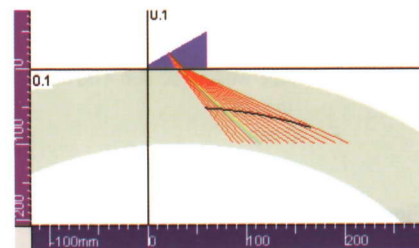


Рис. 3.49. Характеристики линейной фазированной решетки и визуализация процесса контроля для углов качания луча от 30° до 60° с шагом 2° и фокусным расстоянием 50 мм.

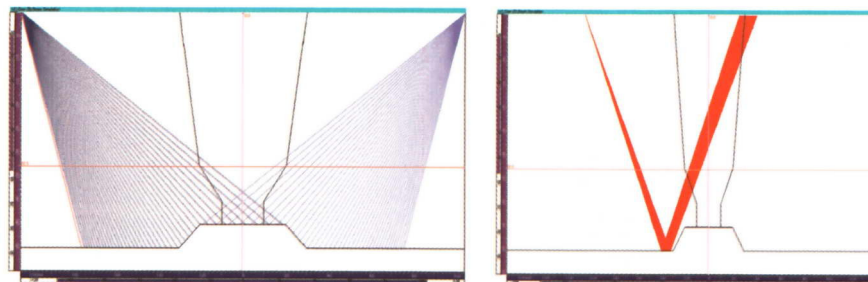


Рис. 3.50. Моделирование контроля сварного шва труб с использованием лучевой картины и S-скана.

3.10 Стандартные преобразователи типа фазированных решеток

Типы стандартных универсальных фазированных решеток приведены в табл. 3.4.

Табл. 3.4. Классификация решеток

тип	управление лучом	форма луча	примечания
линейная	А, Л, DDF	цилиндрическая	общего назначения
круглая плоская	А, Л, DDF	цилиндрическая, эллиптическая	для труб и цилиндрических деталей
концентрическая	Г, DDF	сферическая	контроль поволоков
двумерная матрица	А, Л, DDF	эллиптическая	контроль сварных швов
двумерная концентрическая	А, DDF	сферическая, эллиптическая	специальные задачи в авиации, сложные изделия

А – азимутальное, Л – линейное, Г – по глубине, DDF – возможность динамической фокусировки по глубине

3.11 Прочие характеристики фазированных решеток

3.11.1 Чувствительность

Чувствительность – это соотношение выходного и входного сигналов при определенной настройке аппаратуры.

$$S_e = 20 \log_{10}(V_{out}/V_{in}) [dB]$$

3.11.2 Импеданс

Импеданс измеряется на средней (резонансной) частоте. Он может быть рассчитан по модели KLM.

3.11.3 Взаимодействие элементов решетки

Взаимосвязь элементов решетки характеризуется амплитудой сигнала, возникающего на одном элементе решетки во время возбуждения соседнего элемента. Приемлемое на практике значение составляет от -30 до -40 дБ.

3.12 Программа моделирования фазированных решеток (PASS)

Программное обеспечение PASS (phased array simulation software) разработано в Лаборатории акустики Парижского Университета. Оно используется для визуализации конструкции преобразователя, расчета фокальных законов и параметров луча, программирования параметров преобразователя и схем прозвучивания. Результаты расчетов, сохраненные в файлах формата *.mnr могут быть прочитаны в программе TomoView фирмы R/D Tech.

Пример моделирования фокальной области для концентрического преобразователя представлен на рис. 3.51.

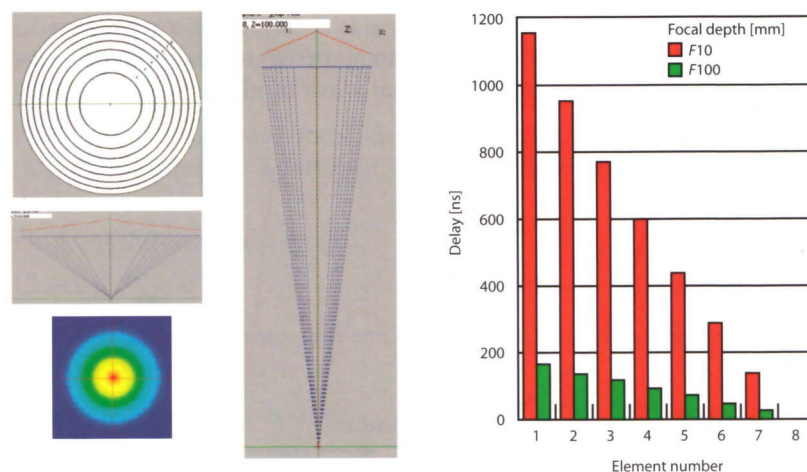


Рис. 3.51. Пример моделирования в программе PASS концентрического преобразователя, имеющего 8 колец (зон Френеля), который фокусируется последовательно на расстояниях от 10 до 100 мм. Приведены значения задержек для двух расстояний – 10 и 100 мм.

3.13 Конструкция преобразователя

Преобразователь для определенной задачи должен иметь специфическую конструкцию, учитывающую следующие аспекты:

- компактные размеры, прочный корпус, стойкость к ударам, акустическую изоляцию;
- способность создавать звуковой луч в необходимом диапазоне углов при отсутствии дополнительных лепестков;
- возможность управления лучом в диапазоне от 0° до 70° для линейных решеток на продольных волнах, или от 28° до 85° на поперечных волнах (при работе с призмой);
- широкую полосу пропускания (не менее 75%), так чтобы длительность импульса составляла, желательно, 1,5 периода колебаний (рис. 3.52);
- возможность использования методов с преобразованием моды и работы по схеме «тандем»;
- минимальное различие элементов решетки по чувствительности (менее ±2 дБ);
- минимальное различие средней чувствительности по преобразователям одного типа (менее ±3 дБ);
- водонепроницаемый корпус и кабель;

- преобразователи для применения в атомной энергетике должны быть устойчивы к воздействию радиоактивных излучений до 106 R/h;
- иметь маркировку, однозначно отличающую данный тип преобразователя от других;
- по возможности широкий круг задач, которые можно решать данным преобразователем.

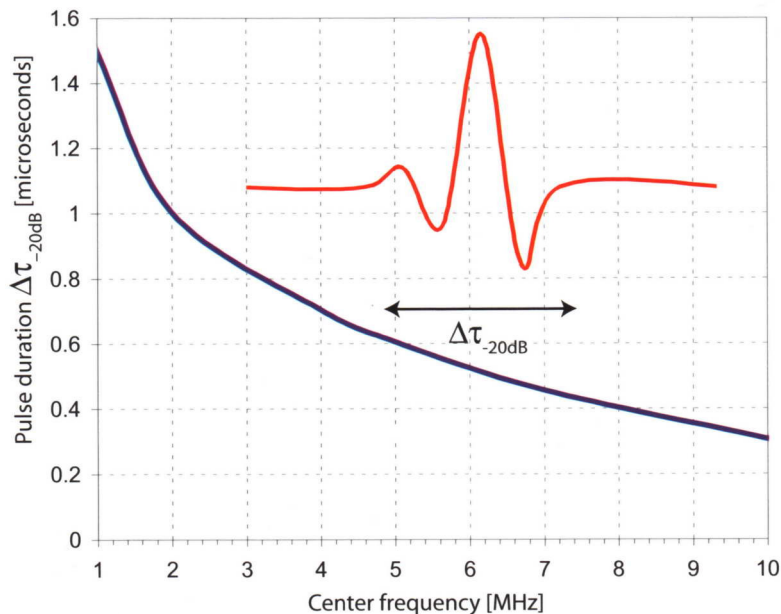


Рис. 3.52. Рекомендованная форма и длительность сигнала, излучаемого и принимаемого фазированной решеткой

3.13.1. Физические аспекты

Данный раздел содержит определенные аспекты, которые следует учитывать при разработке преобразователей, однако не является универсальной методикой создания преобразователя.

- 1) Если контролируемый материал изотропный, следует убедиться в том, что частота $f_{\max} = v/6D$ (где v – скорость звука в образце, а D – средний размер зерна материала); это позволит избежать чрезмерного затухания и образования повышенных структурных шумов материала.
- 2) Определить необходимый диапазон углов качания луча. Призма должна обеспечивать преломление под средним углом из диапазона. Это позволит использовать элементы решетки размещенные с максимальным шагом.
- 3) Рассчитать угол, под которым образуются дополнительные лепестки диаграммы направленности, и устранить эти лепестки путем выбора шага решетки $p < \lambda/2$.
- 4) Определить, могут ли дополнительные лепестки диаграммы направленности вызывать ложные индикации (помехи).
- 5) Проверить, не превосходит ли шаг решетки длины волны при использовании призмы, выбрать высокую частоту ($f > 6$ МГц) и обеспечить широкую полосу пропускания (не менее 85%).

- 6) Определить оптимальное фокусное расстояние для максимального угла ввода (т.е. для минимальной эффективной апертуры). Это значение определяет реальную апертуру решетки.
- 7) Рассчитать протяженность ближней зоны.
- 8) Проверить, не выполняется ли $F_{\max} < N_0$.
- 9) Определить максимальное и минимальное фокусное расстояние. Оно определяет пассивную апертуру.
- 10) Проверить, выполняются ли условия: $A > W$ и $W > 8p$.
- 11) Определить количество элементов: $n = A/p$.
- 12) Определить ширину полосы пропускания и длительность импульса $\Delta\tau_{-20\text{дБ}}$, длину кабеля, величину связи элементов, а также специфические особенности преобразователя как целого.
- 13) Пользуясь моделью KLM определить: влияние длины кабеля, электрический импеданс, чувствительность.
- 14) Определить потери амплитуды сигнала на шероховатости контактной поверхности (рис. 3.53) и донной поверхности (рис. 3.54).
- 15) Определить потери амплитуды сигнала вследствие затухания в призме и материале образца (используя графики из раздела 2.12).
- 16) Оценить резерв усиления и величину мертвой зоны для заданного отражателя (по худшему случаю).
- 17) Начертить кривые, ограничивающие зону возможного обнаружения дефектов для начального и конечного углов ввода.
- 18) Если отношение сигнал-шум менее 10 дБ, предпринять следующие меры: увеличить или уменьшить частоту, увеличить апертуру преобразователя, выполнить предварительную фокусировку преобразователя.
- 19) Повторно проделать пп. 1-16. Если отношение сигнал-шум превышает 10 дБ, определить ширину луча.
- 20) Оценить лучевую и фронтальную разрешающую способность.
- 21) Запустить программу моделирования для подтверждения результатов.

На конструкцию могут также повлиять геометрические ограничения или особые условия работы: радиация, подводная работа, давление, температура, влажность.

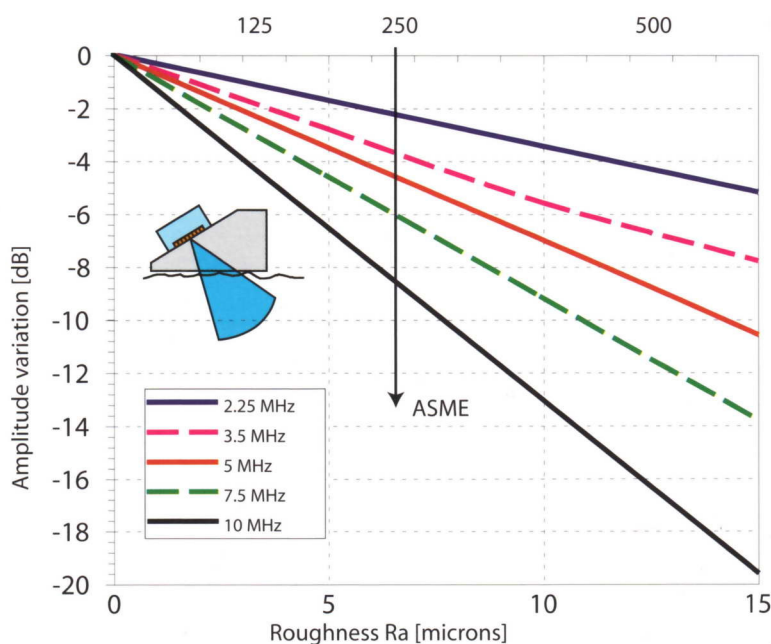


Рис. 3.53. Падение чувствительности, связанное с шероховатостью поверхности ввода. Контактная смазка – глицерин. Отражатель – боковое отверстие диаметром 2 мм.

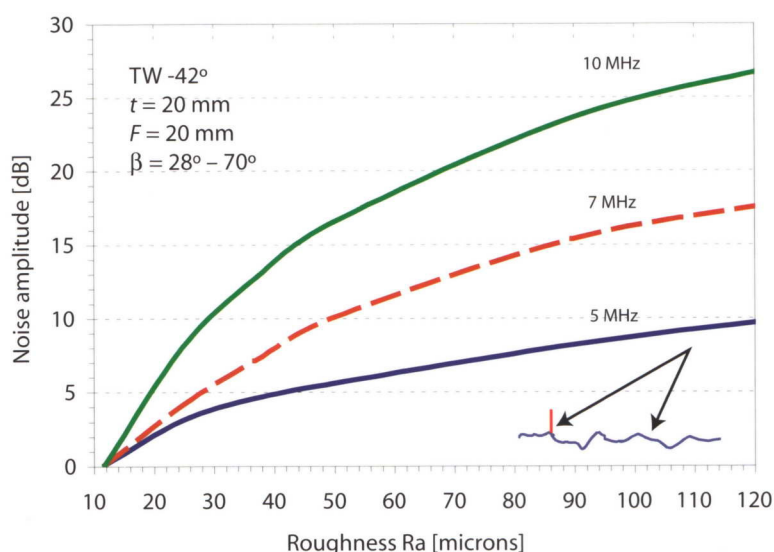


Рис. 3.54. Увеличение уровня шума, связанное с шероховатостью донной поверхности. Смазка – глицерин. Отражатель – пропилен размером 12 x 1,5 мм.

3.13.2. Практические указания

Помимо аспектов физического характера, перечисленных выше, при проектировании следует учитывать следующие особенности практического значения.

- габариты корпуса;
- ориентация кабеля (сверху, сбоку, спереди или сзади);
- нанесение отметки позиции определенного элемента решетки (первого, последнего или среднего);
- нанесение обозначения преобразователя и серийного номера (см. рис. 3.60);
- тип кабеля и разъема;
- параметры совместимых призм;
- диапазон рабочих температур;
- согласование акустических импедансов;
- допуски на основные параметры (частота, полоса пропускания, длительность импульса, импеданс, чувствительность, взаимодействие элементов) для отдельных элементов и преобразователя как целого;
- аппаратура и методики для проверки параметров преобразователей.

Таким образом, создание преобразователя является более сложной задачей, чем кажется на первый взгляд; в случае нестандартных задач консультация со специалистами совершенно необходима.

3.14 Особенности ультразвуковой аппаратуры

Порядок работы с аппаратурой включает в себя три этапа:

- настройка аппаратуры;
- сбор данных;
- анализ данных.

Примеры настраиваемых параметров в TomoView 2.2 приведены в табл.3.5.

Табл. 3.5. Основные параметры аппаратуры для работы с фазированной решеткой

Генератор зондирующих импульсов	<ul style="list-style-type: none"> • Напряжение • Ширина импульса • Фильтрация • Детектирование • Сглаживание
Общие	<ul style="list-style-type: none"> • Усиление/канал • Фокальный закон • Общее усиление • Начало развертки • Длительность развертки • Начало и длительность строба • Единицы измерения
Оцифровка данных	<ul style="list-style-type: none"> • Степень дискретизации • Усреднение • Частота записи PRF • Сжатие данных

3.14.1 Ширина импульса возбуждения

Ширина импульса возбуждения – это длительность высоковольтного импульса прямоугольной формы, который подается на элементы преобразователя в режиме излучения. Ширина импульса устанавливается в соответствии со следующей формулой, где f_c – средняя частота:

$$PW_{\text{pulser}} \times f_c = 500 \quad (3.15)$$

Также ее можно определить по номограмме на рис. 3.55.

Сначала следует определить действительное значение средней частоты преобразователя в контролируемом образце в условиях, близких к реальным. Для этого можно использовать функцию быстрого преобразования Фурье, или отобразить сигнал в недетектированной форме, затем посчитать количество периодов N в сигнале и время TOF, которое они занимают. Затем среднюю частоту вычислить по формуле:

$$F_c = \text{TOF}/N$$

Прим.пер.: в данной книге понятие частоты не совпадает с отечественной терминологией. По ГОСТ 26266-90 частота, которая определяется таким образом называется «эффективная». Частота, которая определяется по максимуму спектра (преобразования Фурье от временной формы сигнала) называется «частота максимума преобразования». Частота, которую отечественные специалисты называют «средняя» определяется как та частота в спектре сигнала, которая разделяет площадь под графиком спектра на две равные части. Авторы данной книги не делают различия между этими понятиями несмотря на то, что значение этих трех частот для одного и того же преобразователя могут существенно отличаться.

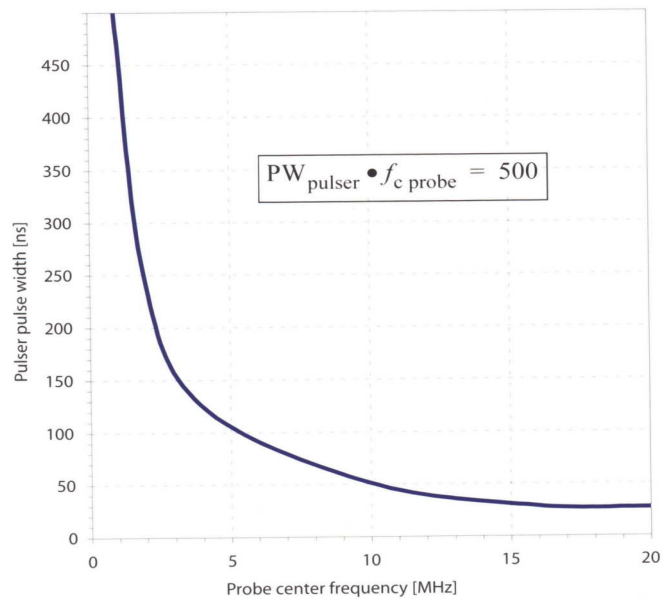


Рис. 3.55. Длительность необходимого импульса возбуждения в зависимости от частоты преобразователя

3.14.2 Частотные фильтры

Частотные фильтры выбираются в соответствии с частотой преобразователя. Эта опция доступна, например, в приборе OmniScan. Точный подбор фильтра осуществляется исходя из ширины луча, затухания ультразвуковых колебаний и пути ультразвукового луча. Наилучший способ – это попробовать несколько близких фильтров, и выяснить, с каким из них достигается хорошее изображение.

3.14.3 Сглаживание

Сглаживание – электронная опция, создающая огибающую детектированного сигнала таким образом, чтобы улучшить изображение при минимальной ошибке в амплитуде сигналов (обычно 2 ... 5% - см. рис. 3.56). Кроме того, сглаживание сигналов позволяет снизить частоту дискретизации.

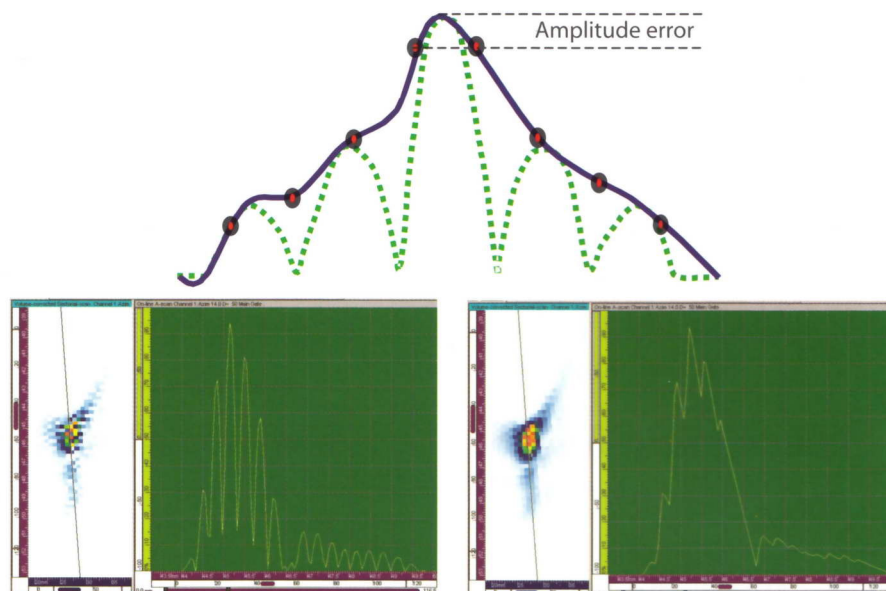


Рис. 3.56. Сглаживание детектированного сигнала по огибающей

3.14.4 Частота дискретизации (оцифровки)

Частота дискретизации – это количество точек в А-скане, амплитуда в которых записывается прибором в единицу времени (рис. 3.57). Она должна превосходить среднюю частоту преобразователя не менее чем в 3 раза. Чтобы снизить ошибку по максимальной амплитуде сигнала до величины 1%, частота оцифровки должна превосходить среднюю частоту преобразователя в 10 раз.

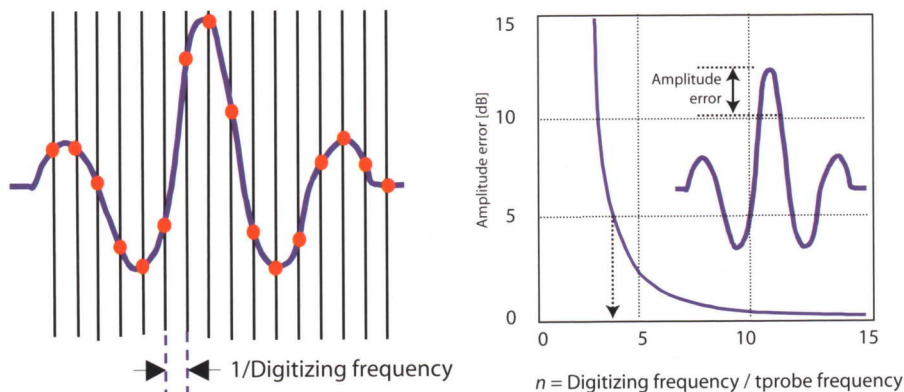


Рис. 3.57. Частота оцифровки: принцип формирования выборки (слева); номограмма связи частоты оцифровки с максимальной ошибкой по амплитуде (справа)

3.14.5 Усреднение

Усреднение – это количество А-сканов, записываемых при каждом положении преобразователя с последующим их усреднением и формированием «среднего» А-скана для данной точки. Усреднение увеличивает соотношение сигнал-шум (SNR) благодаря взаимоподавлению случайных шумов на разных А-сканах:

$$SNR_{\text{после усреднения}} = n^{0,5} \cdot SNR_{\text{до усреднения}}$$

Включение усреднения уменьшает скорость контроля.

3.14.6 Сжатие данных

Сжатие данных – это уменьшение объема записанных данных, основанное на расположении точек и амплитуде (рис. 3.58). Сжатие уменьшает размер файлов данных без существенного влияния на обнаружение дефектов.

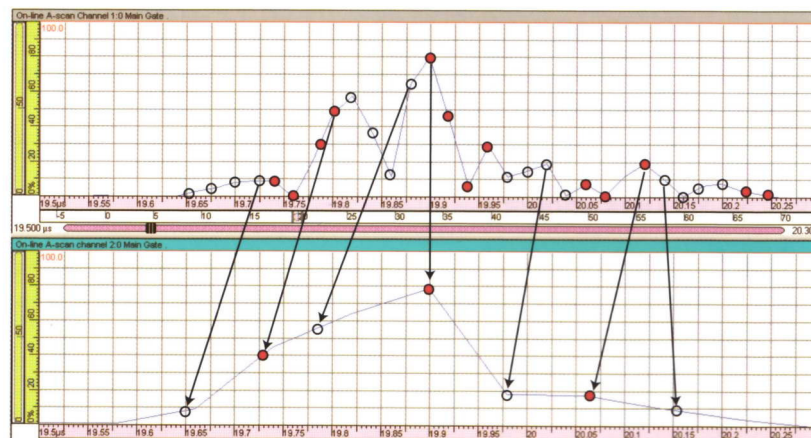


Рис. 3.58. Сжатие данных А-скана с коэффициентом 4:1.

3.14.7 Частота следования импульсов возбуждения (PRF)

Частота следования импульсов – это количество циклов излучения-приема, произведенных в единицу времени. Ее значение зависит от режима усреднения, времени получения одного А-скана, времени обработки, и других параметров. Обычно выбирают максимально возможную частоту следования, проверяя при этом то, чтобы в зоне контроля не наблюдалось «фантомов».

3.14.8 Частота регистрации

Частота регистрации – это количество полных А-сканов, записанных в единицу времени. Ее максимальное значение зависит от следующих факторов:

- диапазон контроля;
- частота дискретизации;
- режим сжатия данных;
- частота следования импульсов;
- режим усреднения;

Чем выше частота регистрации, тем быстрее производится контроль. Частота регистрации обычно ниже, чем частота следования импульсов возбуждения.

3.14.9 Разрядность записи данных: 12 бит и 8 бит

Оцифровка является важной частью цепочки преобразований сигнала в ходе его обработки, и непосредственно влияет на размер файла данных и соотношение сигнал-шум. Данные, оцифрованные с разрядностью 12 бит обеспечивают лучшее разрешение и отношение сигнал-шум. Однако, размер файла увеличивается.

3.14.10 Файл настроек

Файл настроек включает схему контроля и фокальные законы. Основные параметры перечислены в табл. 3.6 и табл. 3.7.

Табл. 3.6. Данные о схеме контроля

Схема контроля	<ul style="list-style-type: none">• Тип• Начало• Конец• Разрешение• Синхронизация (внешняя, внутренняя)• Скорость сканирования• Единицы измерения• Предусстановки
Кодирующее устройство	<ul style="list-style-type: none">• Название• Тип• Разрешение• Инверсия• Калибровка

Примечание:

$$\frac{\text{скорость сканирования (мм/сек)}}{\text{разрешение по направлению сканирования (мм)}} < \text{частота регистрации (сканов/сек)}$$

Табл. 3.7. Параметры фокальных законов и преобразователя

Фокальные законы (каналы)	<ul style="list-style-type: none">• Тип электронного сканирования• Активная апертура• Фокусное расстояние• Начальный угол• Конечный угол• Шаг изменения угла• Динамическая фокусировка по глубине• Тип преобразователя• Угол отклонения луча• Число элементов решетки• Шаг решетки• Образец• Тип волны• Скорость звука в образце• Угол призмы• Угол скоса призмы• Скорость звука в призме• Высота первого элемента• Отступ (активный и пассивный)• Количество каналов
Преобразователь	<ul style="list-style-type: none">• Тип волны• Скорость звука

- | | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Задержка в преобразователе • Отступ (активный и пассивный) • Ориентация звукового луча |
|--|--|

3.14.11 Размер файла данных

Размер файла данных вычисляется по формуле:

$$\text{File size} = \sum_{n \text{ channels}} \left(K_S \times D_{SS} \times FL \times \frac{\text{Scan length}}{\text{Scan resolution}} \times \frac{\text{Index length}}{\text{Index resolution}} \right)$$

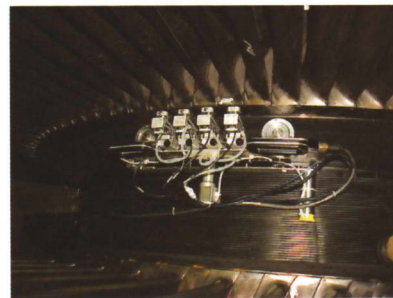
где:

K_S – количество точек регистрации (протяженность А-скана);

D_{SS} – размер одной точки регистрации (1 для 8 бит, 2 для 12 бит);

FL – количество фокальных законов на канал.

Оптимизации контроля можно достичь различными способами, такими как сканер с несколькими преобразователями и с использованием блока коммутаторов (рис. 3.59).



Courtesy of Ontario Power Generation Inc., Canada

Рис. 3.59. Блок коммутаторов 4:1 со сканером на 4 преобразователя.

3.15 Идентификация преобразователя

Минимальный набор данных для однозначной идентификации преобразователя следующий (рис. 3.60):

- частота;
- тип решетки (линейная, коаксиальная, матричная и т.д.);
- количество элементов;
- размер активной апертуры;
- размер пассивной апертуры;
- шаг решетки;
- серийный номер.

Дополнительные, желательные сведения:

- положение первого элемента;
- угол призмы;
- скорость звука в призме, материал;
- угол наклона призмы.

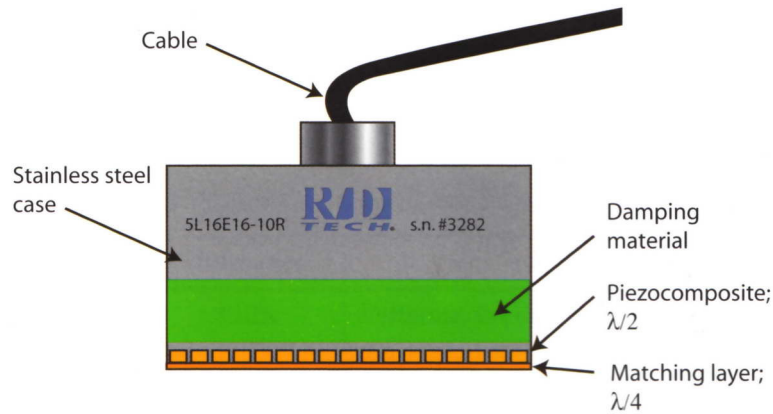


Рис. 3.60. Пример идентификации преобразователя с фазированной решеткой

Различные виды преобразователей с фазированной решеткой представлены на рис. 3.61.



Рис. 3.61. Преобразователи с фазированной решеткой фирмы R/D Tech

3.16 Поверка преобразователя и периодическая проверка

С тем, чтобы обеспечить повторяемость результатов контроля фазированными решетками и взаимозаменяемость аппаратуры (замену преобразователя без перенастройки прибора), фазированные решетки должны проходить поверку (*characterization*) и периодическую проверку (*checking*) основных параметров.

3.16.1 Поверка преобразователя

Поверка преобразователя – это измерение основных параметров преобразователя для того, чтобы установить действительные их значения для последующего использования в процессе контроля.

Характеристики, подлежащие измерению:

- угол ввода;
- точка выхода/стрела;
- задержка в призме;
- соотношение сигнал-шум;
- фокусное расстояние;

- протяженность фокальной зоны;
- расхождение луча;
- мертвая зона;
- фронтальная разрешающая способность;
- лучевая разрешающая способность;
- средняя частота;
- длительность импульса;
- ширина полосы пропускания;
- положение и амплитуда боковых лепестков диаграммы направленности;
- положение и амплитуда дополнительных лепестков направленности;
- скорость звука в тестовом образце;
- взаимодействие элементов решетки;
- количество неработающих элементов;
- электрическая разводка проводников по элементам;
- механическое состояние преобразователя;
- качество разъема;
- разброс чувствительности по элементам;
- электрический импеданс.

Методы поверки перечисленных параметров и значения допусков сильно зависят от целевого назначения преобразователя. Дополнительные сведения по этой теме могут быть найдены в литературе по ссылкам 25, 39-41, 44,45, 47-49, 51, 53, 54, 57.

3.16.2 Допуски на значения параметров

В таблице 3.8 собраны значения допусков на основные параметры, которые являются достаточными для большинства практических задач.

Табл. 3.8. Практические значения допусков на параметры преобразователя

Параметр	Допуск	Примечания
Средняя частота	$\pm 10\%$	Зависит от метода измерения
Полоса пропускания	$\pm 20\%$	Зависит от аппаратуры
Длительность импульса	$\pm 20\%$	Зависит от аппаратуры
Угол преломления	$\pm 2\%$	
Фокусное расстояние	$\pm 30\%$	Зависит от метода измерения
Импеданс	$\pm 30\%$	Зависит от аппаратуры
Чувствительность элементов	± 2 дБ	Крайние элементы могут иметь большую чувствительность
Взаимодействие элементов	$- 40$ дБ ± 10 дБ	Зависит от позиции элемента в решетке и от угла ввода

Изменение чувствительности, которое может быть вызвано совокупным действием данных факторов (по худшему случаю) составляет ± 5 дБ.

Следует помнить, что технология контроля фазированной решеткой связана с получением изображения, распознаванием образов дефектов, совместным использованием эхо-метода и дифракционных методов. Если прибор с преобразователем настроены на конкретную задачу (тип отражателя, диапазон контроля, уровень амплитуды сигнала, отношение сигнал-шум, метод определения размеров), воспроизводимость результатов должна оцениваться через параметры дефекта, а не по опорному значению усиления от преобразователя к преобразователю. Случайные и систематические факторы могут влиять на опорное значение усиления в пределах ± 6 дБ.

Более жесткие допуски на параметры преобразователя могут привести к резкому возрастанию его цены без существенного улучшения возможностей по выявлению и измерению размеров дефектов.

3.16.3 Призмы с притертой поверхностью

В данном разделе описываются аспекты проверки преобразователя в сочетании с притертой призмой для продольного или поперечного сканирования.

Направленность и точка выхода (стрела) может быть определена на образце в виде половины цилиндра (рис. 3.62). Отношение сигнал-шум, угол ввода, скорость звука определяются на образцах с боковыми цилиндрическими отверстиями.

Общая задержка складывается из:

- электронной задержки (приблизительно от 1,6 мкс до 2 мкс);
- задержка по фокальному закону (зависит от угла);
- задержка в призме (оценивается по стандартным образцам);
- время, потребное на получение А-скана, связанное с прохождением луча через контролируемое изделие (TOF – time of flight).

Табл. 3.9. Эквивалентные дистанции (однократное прохождение луча) для различных материалов

Material	TOF delay (μ s)						
	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	2.0	3.0
	Ultrasound half path (mm)						
Water	0.15	0.2	0.3	0.4	0.74	1.5	2.2
Plexiglas®	0.3	0.4	0.6	0.7	1.36	2.7	4
Rexolite®	0.23	0.4	0.5	0.6	1.15	2.3	3.5
Steel – LW	0.6	0.9	1.2	1.5	3.0	6.0	9.0
Steel – TW	0.3	0.5	0.6	0.8	1.6	3.2	4.8
Zircaloy™ – TW	0.23	0.4	0.5	0.6	1.2	2.4	3.6
Inconel® – LW	0.6	0.9	1.2	1.5	2.9	5.8	8.7
Inconel® – TW	0.3	0.5	0.6	0.8	1.5	3.0	4.5
Aluminum – LW	0.6	0.9	1.2	1.6	3.1	6.2	9.3
Aluminum – TW	0.3	0.5	0.6	0.8	1.6	3.2	4.8

Приведенные значения полезны для точной настройки, которая производится средствами программного обеспечения. В настройку чувствительности включена компенсация усиления по различным углам ввода. См. гл. 4 и 5 для более подробной информации.

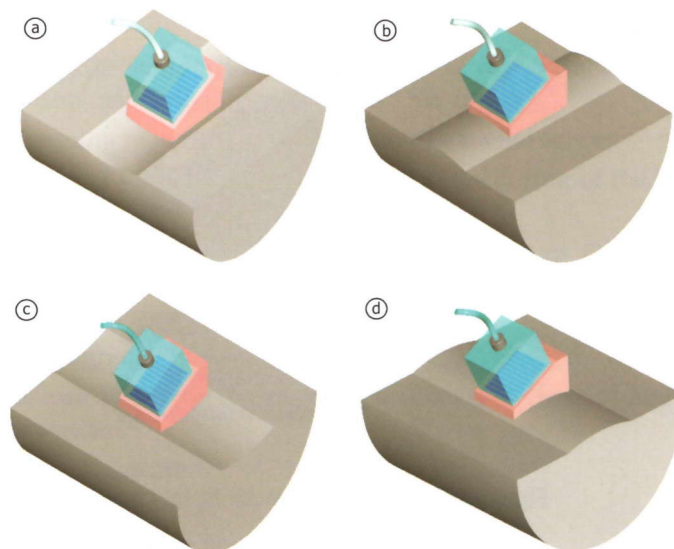


Рис. 3.62. Измерение угла ввода и точки выхода при использовании притертой призмы на специальном образце

3.17 Преобразователи R/D Tech для прибора OmniScan

Фирма R/D Tech производит линейные фазированные решетки для прибора OmniScan в соответствии с техническими условиями, приведенными в Каталоге Ультразвуковых Фазированных Решеток (доступен по запросу в R/D Tech). Данные преобразователи имеют специальный разъем (рис. 3.63).



Рис. 3.63. Разъем преобразователей R/D Tech для прибора OmniScan

Преимущества данного разъема следующие:

- обеспечивает автоматическую калибровку и распознавание преобразователей;
- не имеет ломающихся или изгибающихся контактов;
- брызгозащищенное исполнение;
- хорошее электрическое экранирование;
- компактные размеры;
- улучшенное отношение сигнал-шум.

Преобразователи и призмы к ним (рис. 3.64) могут распознаваться прибором.

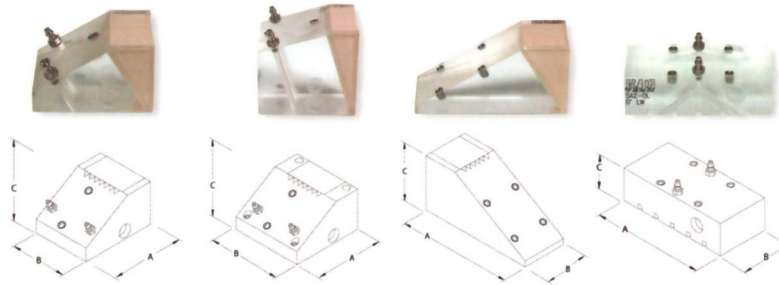


Рис. 3.64. Сменные призмы для наклонных фазированных решеток

Преимущества:

- доступны для стандартных углов ввода 0° , 45° и 60° в стали и предназначены для контроля «качающимся» лучом от 30° до 70° продольными и поперечными волнами;
- новый демпфирующий материал для поглощения переотражений в призме;
- надежное крепление преобразователя к призме производится при помощи резьбовых боксов из нержавеющей стали;
- возможна доработка призм под крепление в автоматизированных системах сканирования;
- притирка призм под любой профиль контролируемой поверхности.

Некоторые типы преобразователей приведены на рис. 3-65.

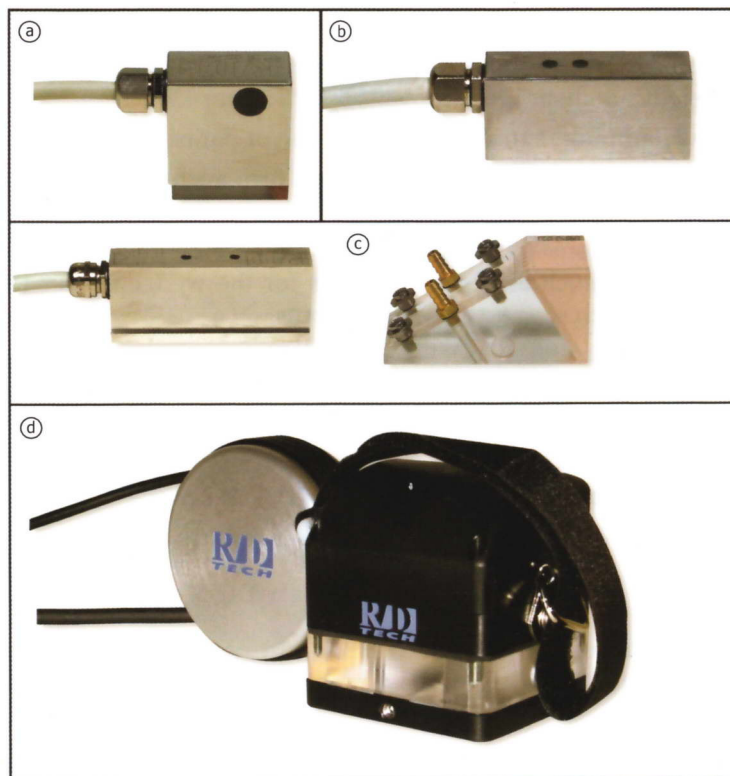


Рис. 3.65. Различные линейные преобразователи R/D Tech:

- а) наклонный преобразователь с фазированной решеткой в корпусе;
- б) прямой преобразователь продольных волн с износоустойчивым протектором;
- с) прямой преобразователь и сменная призма; д) преобразователь с водяной призмой

4. Типы сканирования и представление информации

4.1 Виды сканирования

Надежное обнаружение и определение размеров дефекта в большой степени определяется схемой сканирования.

Сканирование может быть:

- *автоматическое*: преобразователь перемещается посредством электронно-механического устройства;
- *полуавтоматическое*: преобразователь перемещается вручную, однако перемещение преобразователя записывается датчиком координаты;
- *ручное*: преобразователь перемещается вручную, а данные считываются прибором через заданные интервалы времени.

Интервалы записи сканов могут задаваться внутренним таймером (запись по времени) или внешним сигналом от датчика координаты.

Приборы R/D Tech предлагают следующие типы сканирования:

- Tomoscan III, Tomoscan FOCUS: автоматическое, полуавтоматическое, ручное;
- Omniscan PA: автоматическое, полуавтоматическое, ручное;
- Omniscan PA, PipeWizard: автоматическое, (полуавтоматическое – для процессов калибровки).

Перемещение преобразователя может осуществляться в любой последовательности из представленных вариантов в табл. 4.1.

Табл. 4.1. Сканирование при автоматическом или полуавтоматическом сканировании

схема сканирования	количество осей	примечания
двунаправленное (bidirectional)	2	сбор информации производится при прямом и обратном ходе преобразователя (рис. 4.1)
однонаправленное (unidirectional)	2	сбор информации производится в одном направлении хода преобразователя; сканер перемещается вперед и назад на каждом шаге сканирования (рис. 4.1)
линейное (linear)	1	все данные записываются при одном проходе по оси сканирования (рис. 4.2)
наклонное	2	то же, что и двунаправленное, однонаправленное или линейное, однако акустическая ось направлена под углом к основной механической оси (рис. 4.3)
круговое	1	сканирование по спиральной траектории по цилиндрической поверхности (рис. 4.4)
спиральное	1	сканирование по спиральной траектории по плоской поверхности круглой формы (рис. 4.5)
произвольное	1-6	сканирование по запрограммированной траектории сложной формы

4.1.1 Двухнаправленное сканирование

При *двухнаправленном сканировании* сбор данных производится при прямом и обратном ходе преобразователя (рис. 4.1).

4.1.2 Однонаправленное сканирование

При *однонаправленном сканировании* сбор данных производится только при перемещении преобразователя в одном направлении (рис. 4.1). Затем сканер смещается на 1 шаг сканирования и т.д.

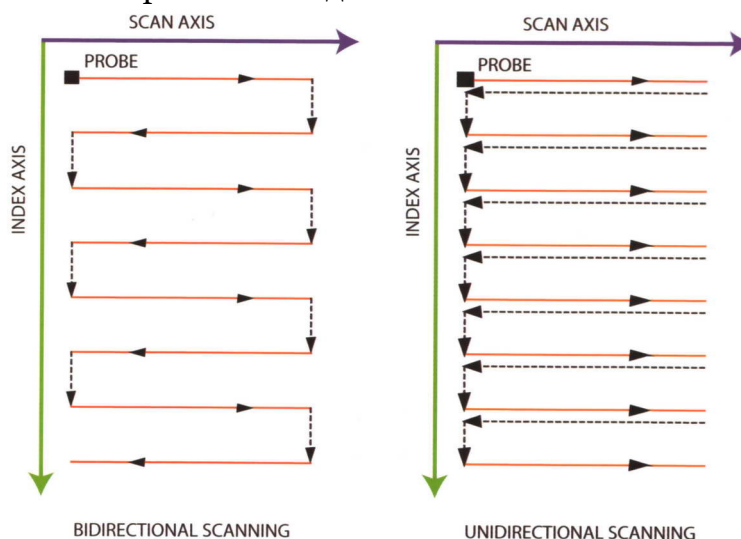


Рис. 4.1. Двухнаправленное (слева) и однонаправленное (справа) типы сканирования. Красной линией показан ход преобразователя, при котором совершается запись данных пунктиром – холостой ход преобразователя без записи данных

4.1.3 Линейное сканирование

Линейное сканирование – перемещение преобразователя, задаваемое только одной координатой. Линейное сканирование является однонаправленным и проводится по линейной траектории. Оно характеризуется скоростью сканирования, границами траектории сканирования и шагом между точками, в которых происходит запись данных. Линейное сканирование часто применяется при контроле сварных швов и при записи профиля коррозии. Линейное электронное сканирование по одной оси (поперек шва) в сочетании с механическим перемещением преобразователя по другой оси (вдоль шва) производится существенно быстрее, чем аналогичное механическое растровое сканирование обычным наклонным преобразователем. Пример линейного электронного сканирования по глубине при выявлении ряда боковых отверстий приведен на рис. 4.2.

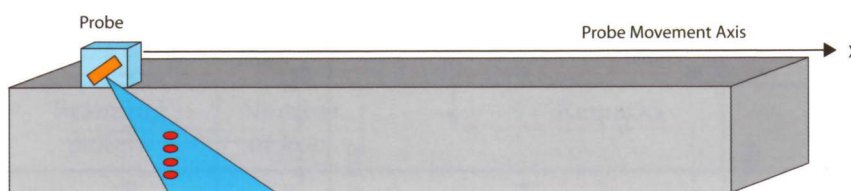


Рис. 4.2. Линейное электронное сканирование по глубине

4.1.4 Наклонное сканирование

Наклонное сканирование (также называемое «угловое сканирование» в программе TomoView 2.2) является разновидностью нормального двунаправленного скана. Оно позволяет использовать угол ввода ультразвукового луча, произвольно ориентированный относительно оси механического перемещения преобразователя. Рис. 4.3 показывает перемещение преобразователя и среднюю линию его траектории.

Данный способ сканирования полезен в случае, когда, например, ориентация и расположение дефектов требуют специфического способа озвучивания для распознавания формы и размеров.

Особенности наклонного сканирования следующие:

- применяется для контроля деталей сложной геометрии, в которых дефекты ориентированы под углом к удобным осям перемещения преобразователя;
- позволяет адаптировать обычную линейную фазированную решетку для контроля деталей сложной геометрии;
- размер файла данных уменьшается в 2-3 раза;
- амплитуды сигналов от дефектов увеличиваются в 6-8 раз;
- увеличивается скорость сканирования.

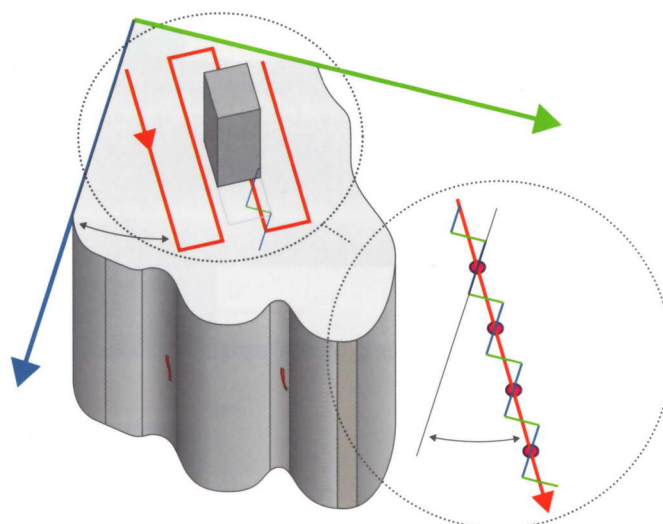


Рис. 4.3. Пример наклонного (углового) двунаправленного сканирования.

Слева: траектория перемещения преобразователя относительно механических осей детали; справа: траектория перемещения (красная линия) отклонена от механических осей для достижения оптимального угла для обнаружения трещин в зоне усталости

4.1.5 Круговое сканирование

Круговое сканирование используется для контроля деталей цилиндрической формы. Перемещение контролируется двумя независимыми датчиками координаты. Датчик продольного перемещения (scan-axis encoder) контролирует положение преобразователя по окружности детали, а датчик поперечного перемещения (index-axis encoder) – положение преобразователя по длине детали. Для того, чтобы обнулить датчик кругового перемещения по совершении полного оборота используется специальный сигнал синхронизации, частота которого

задает также скорость линейного перемещения. Комбинация этих двух перемещений дает в итоге объемно-спиральную траекторию (рис. 4.4.)

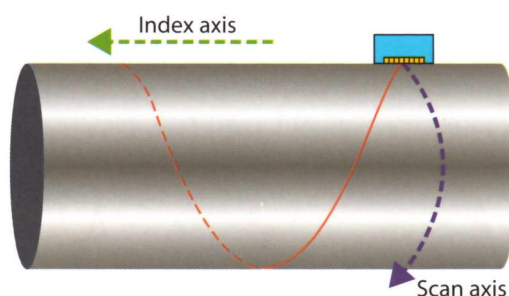


Рис. 4.4. Круговое сканирование по цилиндрической траектории.

4.1.6 Спиральное сканирование

Спиральное сканирование удобно использовать для контроля круглых деталей небольшой толщины (дисков). Механизм обеспечивает перемещение преобразователя по плоской спирали на поверхности детали (рис. 4.5). Два независимых датчика контролируют перемещения. Датчик кругового перемещения (scan-axis) обеспечивает вращательное движение преобразователя вокруг центра вращения, а датчик линейного перемещения (index-axis) задает радиус этого перемещения. Сигнал синхронизации используется для задания скорости линейного перемещения и для обнуления датчика вращательного движения при совершении полного оборота.

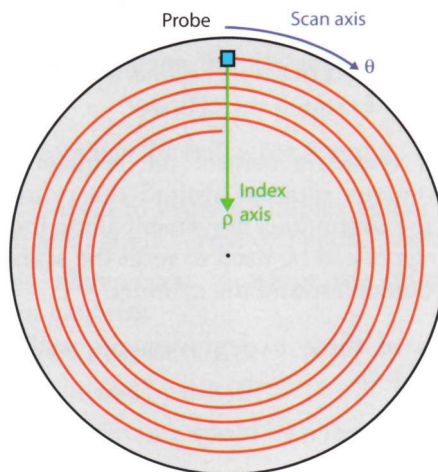


Рис. 4.5. Спиральное сканирование диска

4.1.7 Направление ультразвукового луча

Направление ультразвукового луча преобразователя относительно направлений его продольного и поперечного перемещения может быть различным (см. рис. 4.6). Эти направления задаются *углом разворота преобразователя*.

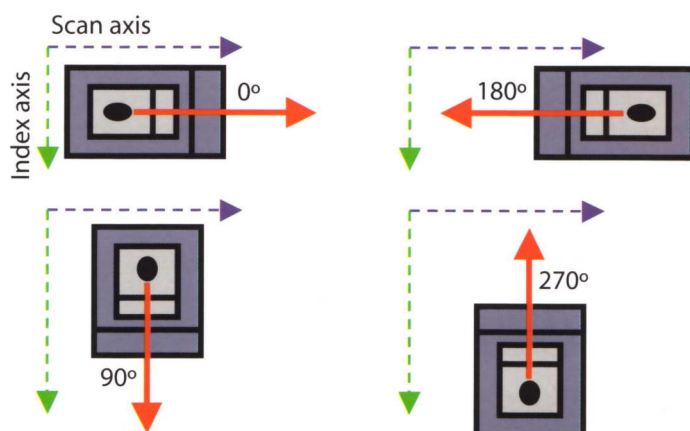


Рис. 4.6. Положение преобразователя и звукового луча относительно направлений линейного и кругового перемещения. Угол разворота преобразователя используется при расчете фокальных законов.

Размеры поверхности ввода ультразвука, шаг траектории сканирования и шаг записи данных по оси сканирования – все эти параметры определяют разрешение полученной дефектограммы, размер пикселей на изображении и размер файла данных.

Пример настройки траектории сканирования в программе TomoView 2.2R9 представлен на рис. 4.7.

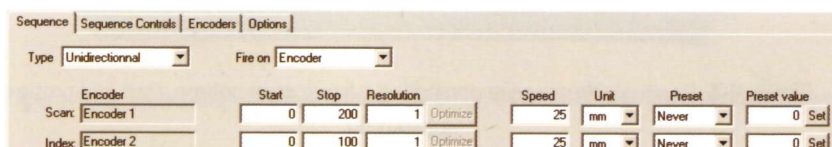


Рис. 4.7. Однонаправленное сканирование зоны размером 200 x 200 мм. Размер пикселя на С-скане составляет 1 x 1 мм. Скорость сканирования по обеим осям составляет 25 мм/с.

4.1.8 Другие способы сканирования

В зависимости от того, перемещается ли преобразователь, перемещается ли деталь и как направлен ультразвуковой луч, становятся возможными следующие виды сканирования (табл. 4.2 и рис. 4.8 – 4.10)

Табл. 4.2. Способы сканирования в зависимости от детали, преобразователя и луча

Деталь	Преобразователь	Луч	Сканирование
Неподвижна	Неподвижен	Линейный	Линейное
Неподвижна	Перемещается линейно	Вращается	Круговое
Перемещается линейно	Неподвижен	Вращается	Круговое
Неподвижна	Перемещается	Линейный (90° разворот)	Однонаправленное

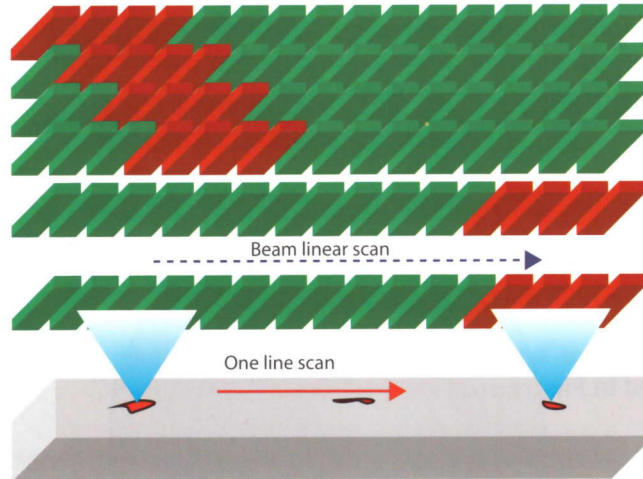


Рис. 4.8. Электронное сканирование лучом, путем перемещения рабочей части активной апертуры. Преобразователь и деталь неподвижны.

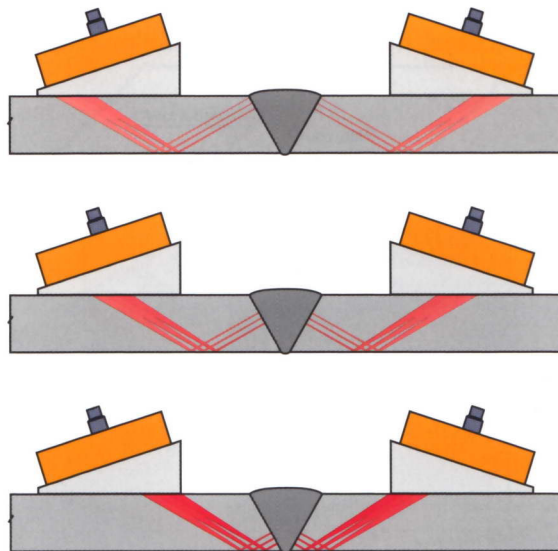


Рис. 4.9. Электронное и линейное сканирование сварного шва. Электронное сканирование заменяет традиционное поперечное перемещение преобразователя; остается только механическое продольное перемещение.

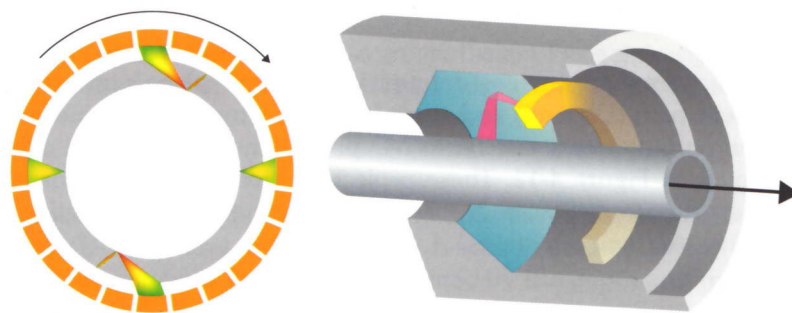


Рис. 4.10. Круговое сканирование, реализуемое посредством линейного перемещения детали и электронного перемещения звукового луча.

4.1.9 Сканирование по времени

Если реализуется «сканирование по времени», то запись развертки при сканировании производится через фиксированные промежутки времени. Интервал времени между последовательными записями рассчитывается через общее количество необходимых точек записи и частоту записи А-сканов прибором.

$$T_{\text{time-base}} = \frac{N_{\text{acquisitions}}}{N_{\text{A-scans/s}}} \quad (4.1)$$

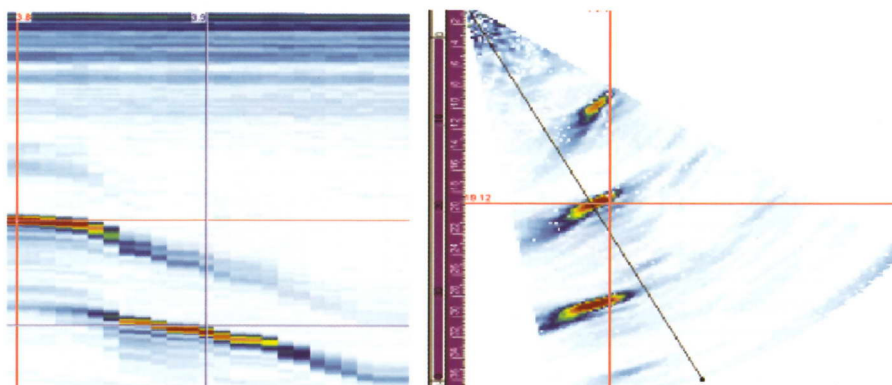


Рис. 4.11. Примеры записи сканов по времени: В-скан (слева) и S-скан (справа)

4.2 Ультразвуковые изображения (сканы)

Виды ультразвуковых изображений определяются взаимным расположением пути ультразвукового луча и параметрами сканирования (оси продольного и поперечного перемещения преобразователя). Наиболее важные изображения, представляющие собой двумерные проекции внутренней структуры объекта на ту или иную плоскость, представлены на рис. 4.12. Данные проекции называются В-скан, С-скан и D-скан, или, что то же самое, боковая, верхняя и торцевая проекции.

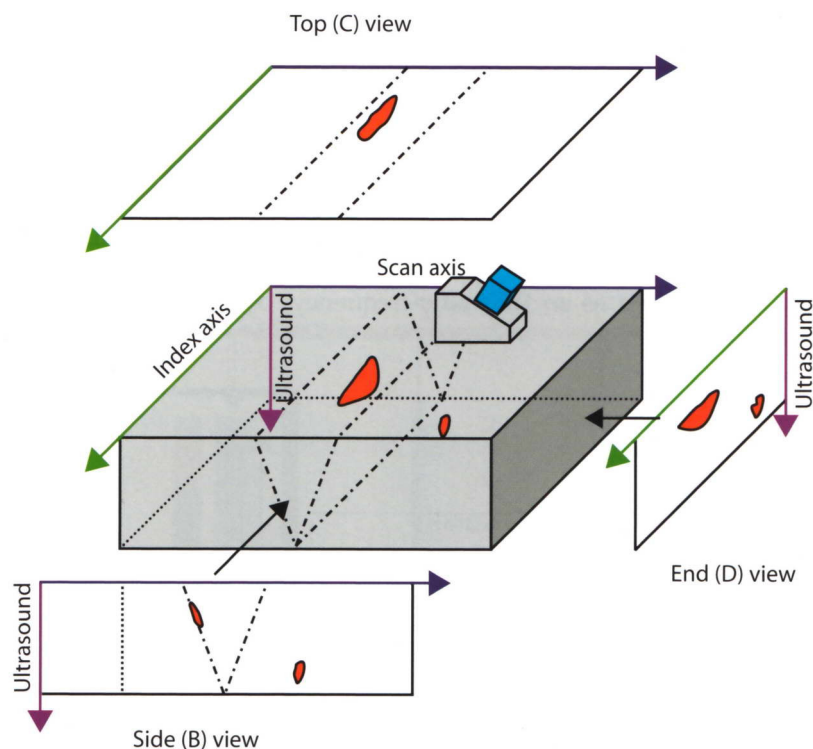


Рис. 4.12. Ультразвуковые изображения: боковой В-скан, верхний С-скан, торцевой D-скан. Оси рисунка: красная – направление распространения ультразвука, синяя – ось электронного сканирования, зеленая – ось механического перемещения преобразователя

Основными видами сканов являются следующие:

- А-скан;
- В-скан;
- С-скан;
- D-скан;
- S-скан;
- полярный вид;
- многополосная диаграмма;
- TOFD-изображение.

Существуют также изображения, представляющие комбинацию этих методов.

4.2.1 А-скан

А-скан представляет собой вид ультразвуковых сигналов как зависимость амплитуды принятого сигнала от времени его прихода (или от пройденного им расстояния). А-скан может быть представлен либо в виде радиочастотного сигнала, либо в виде детектированного сигнала.

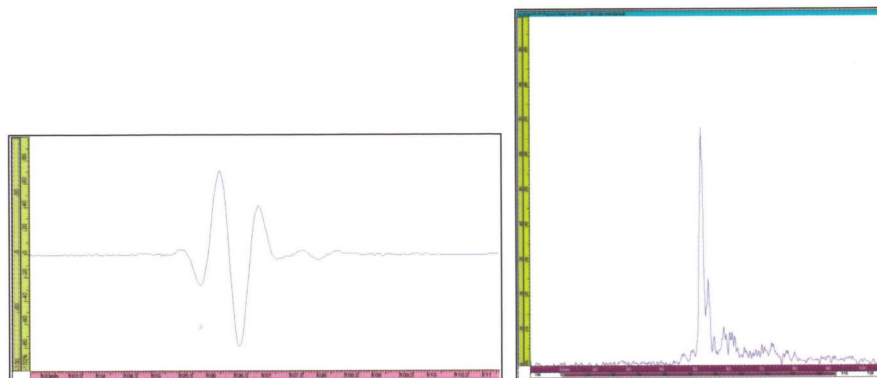


Рис. 4.13. Представления А-скана: радиочастотный сигнал (слева); детектированный сигнал (справа)

Амплитудно-цветовое кодирование детектированного сигнала (рис. 4.14) является дополнительным измерением (степенью свободы), которое позволяет связать на двумерном изображении три вида данных: время прихода сигналов (горизонтальная ось), положение преобразователя по траектории сканирования (вертикальная ось), цвет (амплитуда сигнала от белого – минимальная до красного - максимальная).

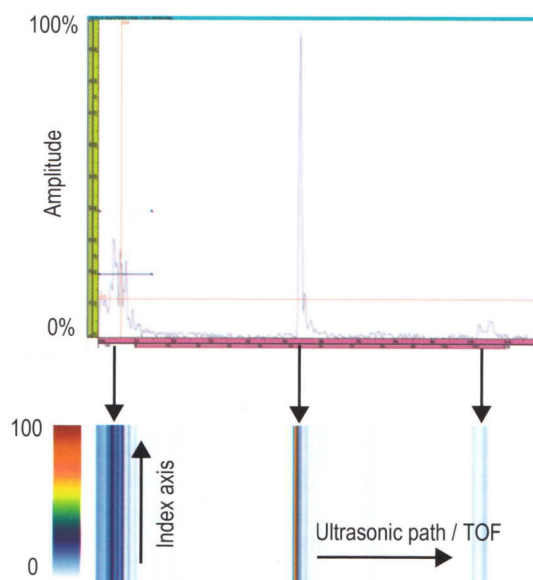


Рис. 4.14. Пример использования амплитудно-цветового кодирования множества А-сканов для последующего их соединения в В-скан

Данные ультразвукового контроля с использованием *радиочастотных сигналов* обычно представляются в цветовой палитре, состоящей из градаций серого цвета, от белого (максимальная положительная амплитуда) до черного (максимальная отрицательная), при этом нулевое значение записывается 50%-серым цветом. Это позволяет сохранить информацию не только об амплитуде сигнала, но так же и о его фазе. Такое кодирование обычно применяется в методах TOFD (рис. 4.15).

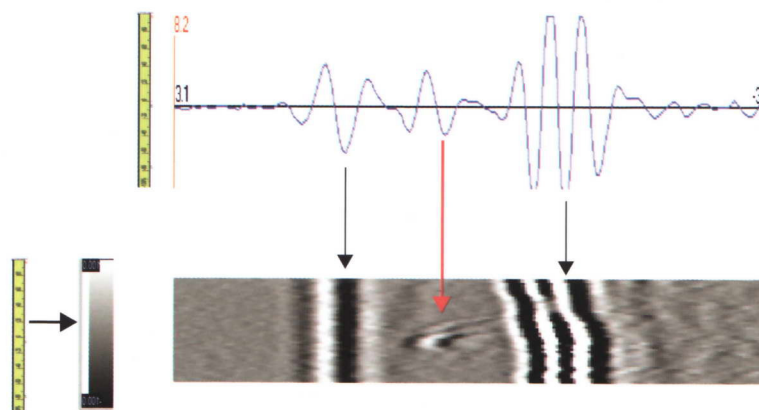


Рис. 4.15. Принцип кодирования радиочастотного сигнала градациями серого цвета.

4.2.2 В-скан

В-скан представляет собой двумерное изображение данных ультразвукового контроля. Чаще всего горизонтальная ось используется для координаты преобразователя, а по вертикальной оси откладывается время прихода сигнала (или пройденное им расстояние) – см. рис. 4.16. При необходимости изображение может быть повернуто.

Положение данных на скане связано с показанием датчика координаты (или времени) в момент записи данных в определенной точке. По сути, *В-скан* представляет собой множество собранных в пакет *А-сканов*, полученных в последовательных точках траектории сканирования. Каждый *А-скан* подвергается амплитудно-цветовому кодированию, тем самым превращаясь в ряды цветных пикселей на *В-скане*. Совокупности точек с высокой амплитудой сигнала (соответственно с интенсивным цветом) образуют на экране цветные области. Их положение, форма и размер дают определенную информацию о положении и форме несплошностей в контролируемой детали.

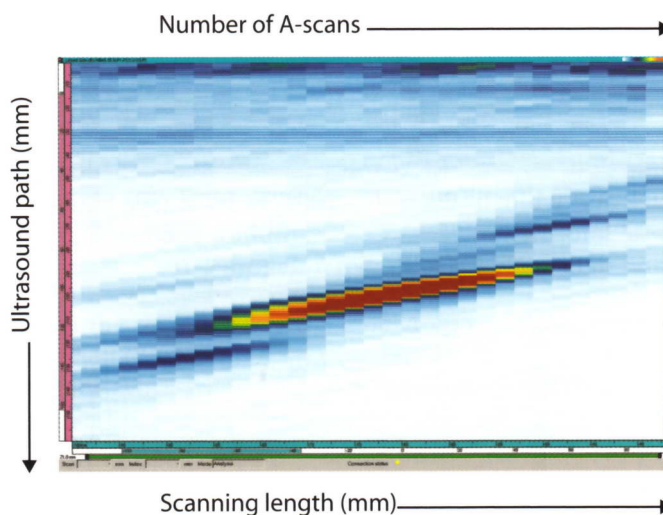


Рис. 4.16. Нескорректированный *В-скан*, содержащий изображение отражателя

Если изображение получено преобразователем с призмой, то ось, соответствующая пути ультразвукового луча на В-скане должна быть скорректирована с учетом угла ввода. В этом случае В-скан будет представлять вид сбоку на контролируемую деталь, при этом горизонтальная и вертикальная оси изображения будут соответствовать глубине и горизонтальному расстоянию на детали.

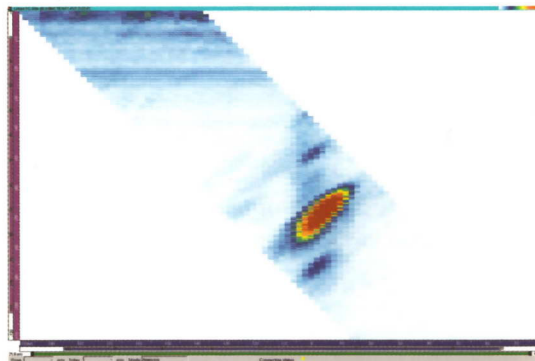


Рис. 4.17. В-скан с предыдущего рисунка, скорректированный с учетом угла ввода луча

4.2.3 С-скан

С-сканом называется двумерное изображение результатов ультразвукового контроля, представляющее собой изображение контролируемой детали в плане. Оси изображения соответствуют направлениям продольного и поперечного сканирования по поверхности образца. При обычном сканировании обе оси являются осями механического перемещения преобразователя. При использовании линейной фазированной решетки – контроль в поперечном направлении обеспечивается электронным сканированием, а контроль в продольном направлении – механическим сканированием. Положение данных на изображении определяется показанием датчика координаты (или времени), контролирующего процесс сканирования. На пикселях С-скана отображается обычно максимальное значение амплитуды из всех точек объема детали, которые проецируются на данный пиксель изображения.

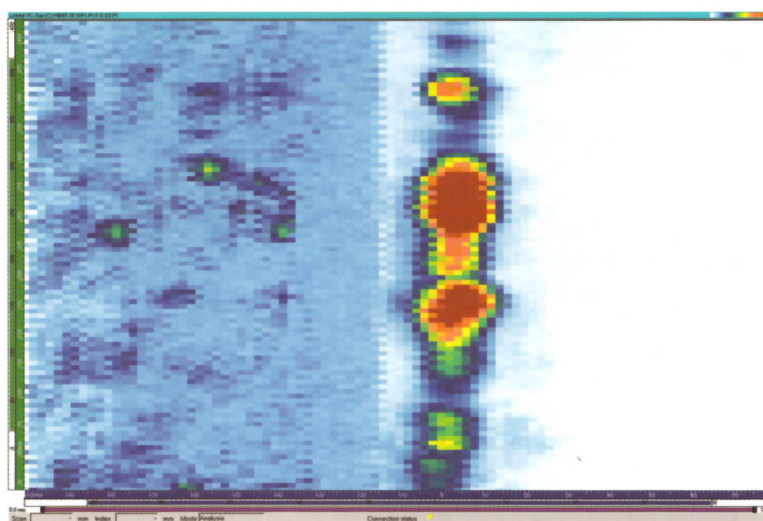


Рис. 4.18. Пример С-скана

4.2.4 D-скан

D-сканом называется двумерное изображение, на котором одна из осей соответствует положению преобразователя по траектории сканирования, а вторая ось – времени прихода сигнала (или пройденному им пути). Этим *D-скан* напоминает *B-скан*. Основное отличие состоит в том, что при контроле сварных швов *B-скан* отражает поперечное сечение сварного шва, а *D-скан* – проекцию его внутренней структуры на продольную плоскость. При использовании фазированной решетки с призмой *B-скан* формируется за счет электронного сканирования из одного положения преобразователя, а формирование *D-скана* обеспечивается механическим перемещением преобразователя вдоль шва.

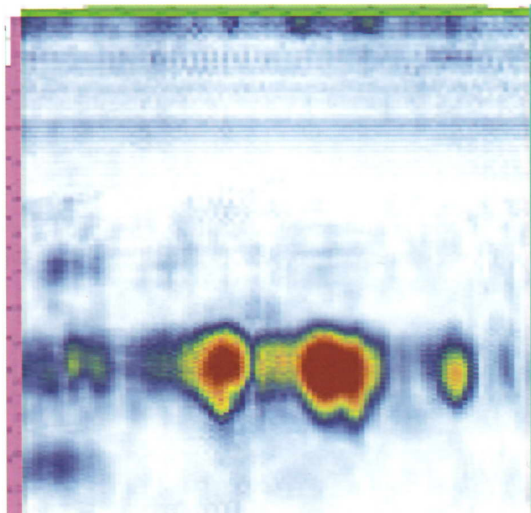


Рис. 4.19. Пример торцевого скана (*D-скана*)

4.2.5 S-скан

S-скан (секторный или азимутальный скан) представляет собой двумерное изображение, полученное из множества *A-сканов*, из одного положения преобразователя под различными углами ввода. Типичный *S-скан* представляется в диапазоне углов с использованием одного фокусного расстояния. Горизонтальная ось изображения соответствует горизонтальной координате на контролируемой детали, а вертикальная ось изображения соответствует глубине.

S-скан является характерным для фазированных решеток, и может использоваться при контроле продольными, поперечными волнами в контактном или иммерсионном вариантах, прямым преобразователем или с призмой. Координаты на *S-скане* могут быть нескорректированы или скорректированы: последний вариант особенно полезен для наглядной визуализации внутренней структуры контролируемой детали; такие изображения удобно сравнивать.

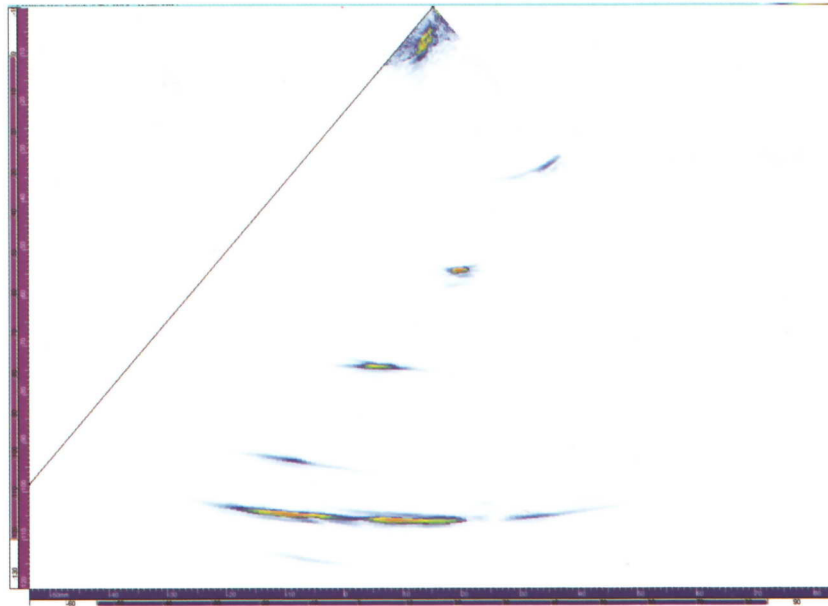


Рис. 4.20. Пример S-скана

4.2.6 Полярный вид

Полярный вид (рис. 4.21) – это двумерное изображение, удобное для представления данных о контроле цилиндрических изделий с использованием кругового сканирования. На полярном виде удобно измерять местоположение и размеры дефекта.

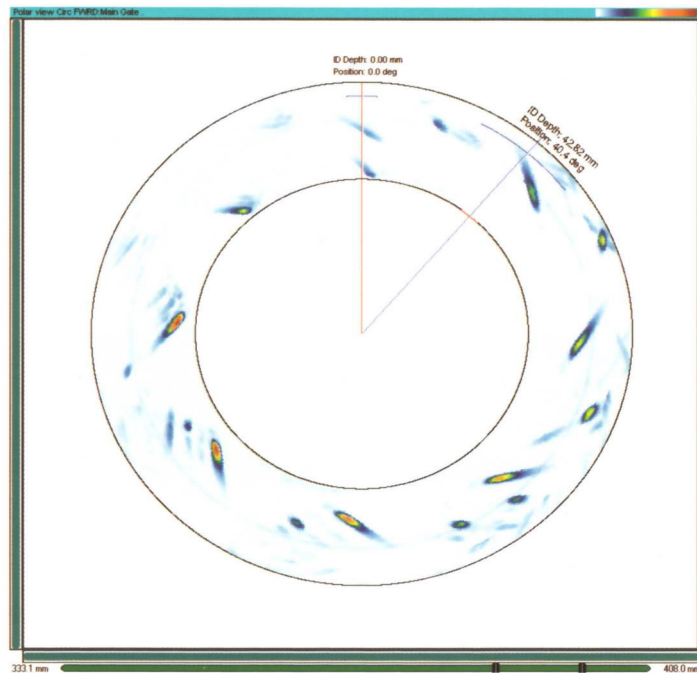


Рис. 4.21. Пример полярного вида

4.2.7 Многополосная диаграмма

Прим. пер.: термин «strip charts» я перевел как «многополосная диаграмма» за неимением лучшего перевода. Осознаю его неудачность и прошу сообщить, если в отечественной практике существуют другие термины для обозначения диаграмм такого типа.

Многополосная диаграмма – это изображение сигналов в стробе как функции времени. В диаграмму возможно включение различных видов данных, например, времени прихода или координаты. Обычно, диаграммы используют много каналов, каждый из которых представлен отдельной полосой, содержащей данные о контроле определенной зоны сварного шва или другого изделия (рис. 4.22).

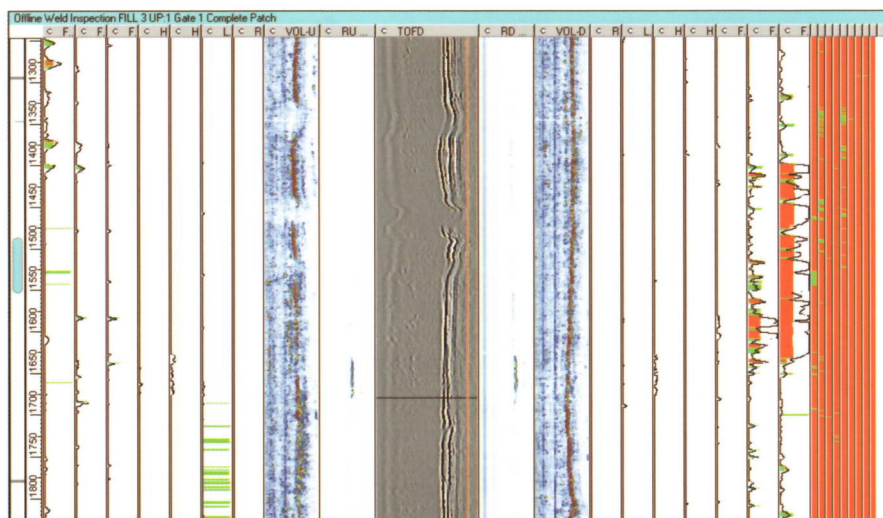


Рис. 4.22. Многоканальная диаграмма контроля трубопровода. На диаграмме отражены данные об амплитуде и времени прихода сигнала, сигналы TOFD, сигналы контроля акустического контакта а также В-сканы.

4.2.8 Множественные виды

Несколько видов могут быть отображены на экране одновременно, как показано на рис. 4.23. Эти изображения требуют записей всех А-разверток (в отличие от многополосных диаграмм, которые требуют только максимального значения амплитуды в стробе).

Изображения могут быть отображены как отдельное сечение или как проекция всего объема объекта контроля – эта возможность настраивается специальным стробом (рис. 4.24 и 4.25).

На рис. 4.26 приведено возможное одновременное отображение трех сканов эхоимпульсного метода и данные полученные по методу TOFD.

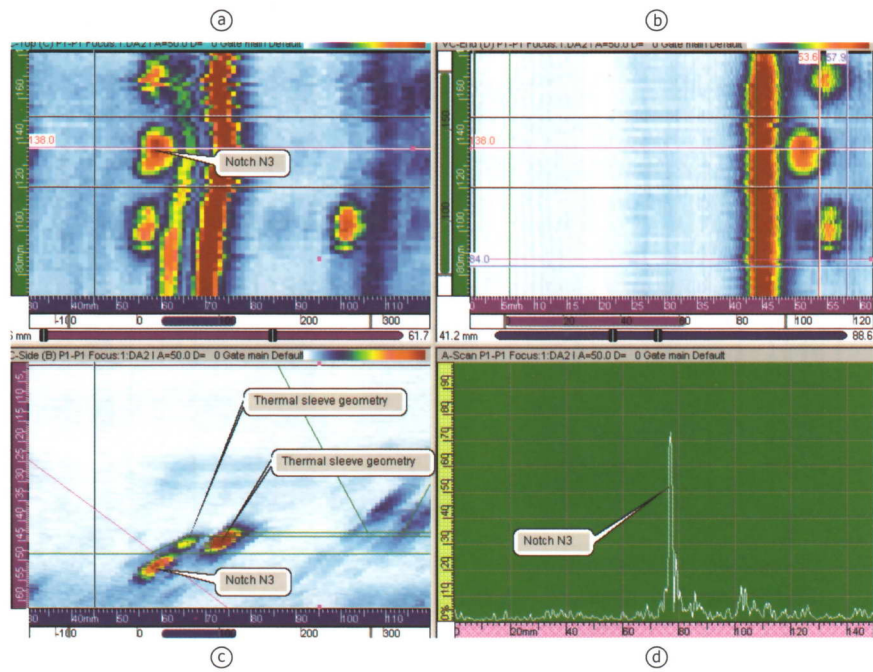


Рис. 4.23. Одновременное отображение различных видов разверток на экране дефектоскопа при контроле сварного шва фазированной решеткой на низкой частоте:
 а) С-скан; б) D-скан; в) В-скан; д) А-скан

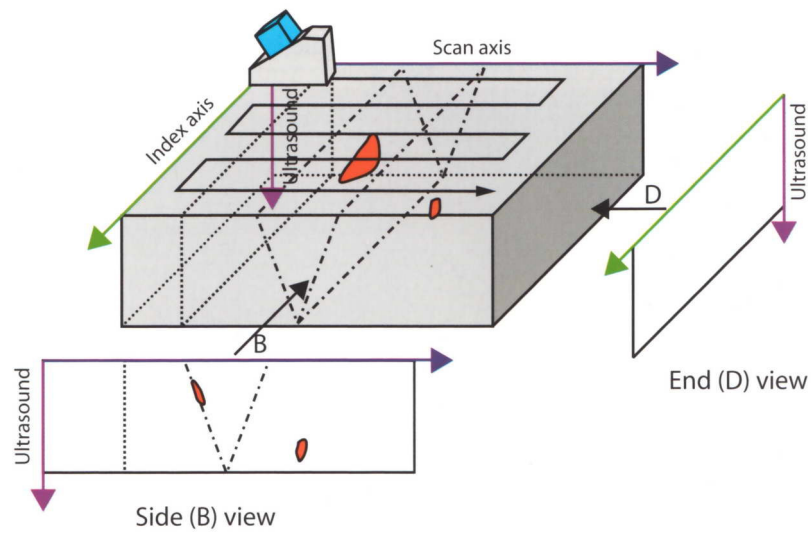


Рис. 4.24. Отдельное сечение в виде В- и D-сканов

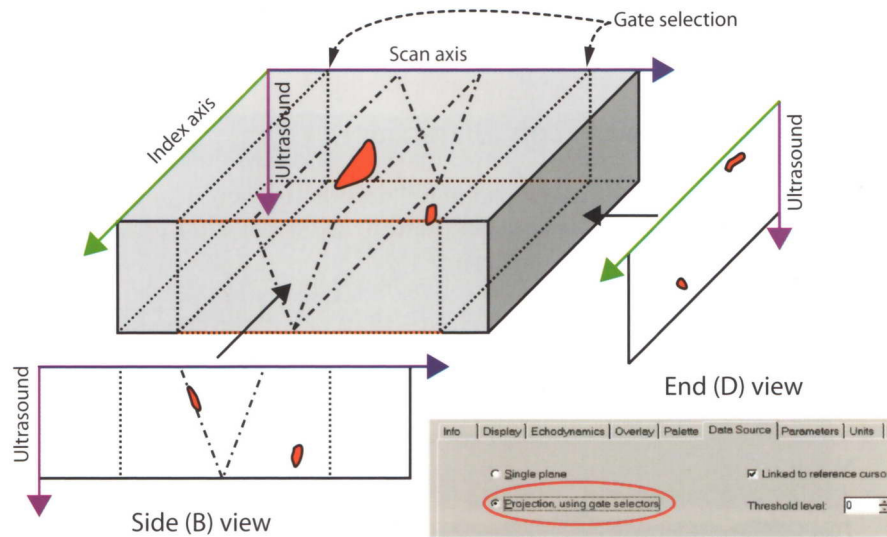


Рис. 4.25. Проекция всего объема в виде В- и D-сканов. Отображаются все дефекты, обнаруженные в заданных пределах временной селекции.

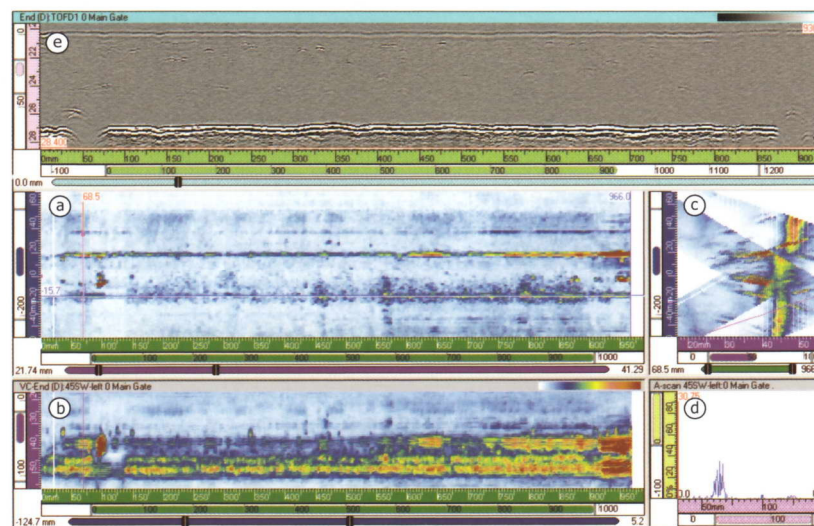


Рис. 4.26. Верхняя (а), боковая (b), торцевая (с) проекции шва, А-скан (d) и TOFD (e).

4.2.9 Дифракционно-временной метод (TOFD)

TOFD очень полезен при контроле сварных швов трубопроводов и сосудов высокого давления.

Детально суть TOFD описана в разделе 2.13.1. Рис. 4.27 показывает принцип контроля по методу TOFD, а рис. 4.28 показывает типичный вид В-скана, полученного по данному методу.

Данное изображение относится в первую очередь к «традиционному» варианту TOFD, который использует дифракцию продольных волн. Следует помнить, что в данном методе так же могут использоваться при необходимости другие типы волн и многомодовые варианты.

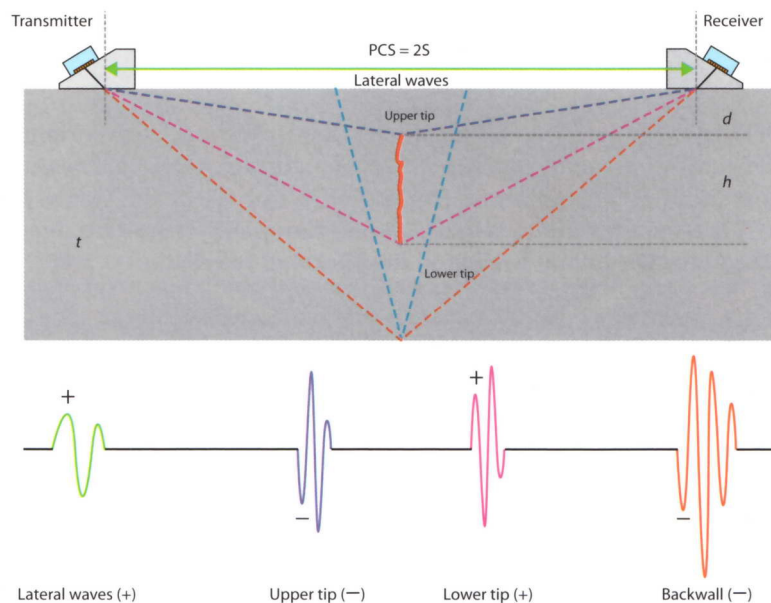


Рис. 4.27. Основной принцип метода TOFD при контроле сварного шва.

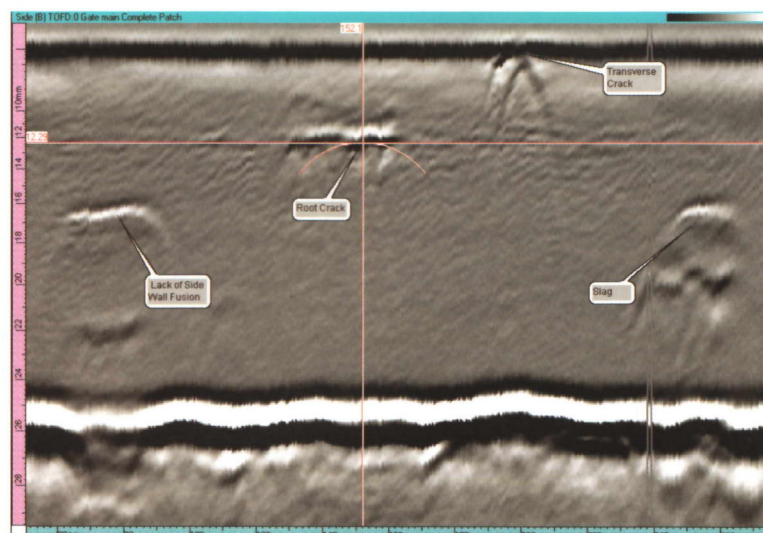


Рис. 4.28. Обычный вид изображения при контроле методом TOFD.

TOFD является мощным методом, позволяющим производить определение размеров дефектов, основанное на точно измеряемом времени прихода сигналов дифракции.

TOFD позволяет обнаруживать дефекты в 90% толщины сварного шва. Около 10% толщины шва приходится на внутреннюю и внешнюю мертвые зоны, однако точное значение определяется частотой, демпфированием преобразователей и другими особенностями аппаратуры. Для получения 100% контроля толщины шва метод TOFD следует комбинировать с эхо-импульсным методом, как показано в разделе 4.2.10. Они являются взаимодополняющими: сильные стороны эхо-метода (например, дефекты выходящие на поверхность) являются слабыми сторонами TOFD и наоборот.

4.2.10 Комбинирование контроля TOFD и эхо-методом

Комбинация методов TOFD и эхо-импульсного называется Rapid Detection Technique – RDTECH (технология быстрого обнаружения). Для упрощения сбора и анализа данных технология предполагает многоканальный контроль соответствующими приборами, например традиционная система μ Tomoscan или система с фазированными решетками Tomoscan FOCUS.

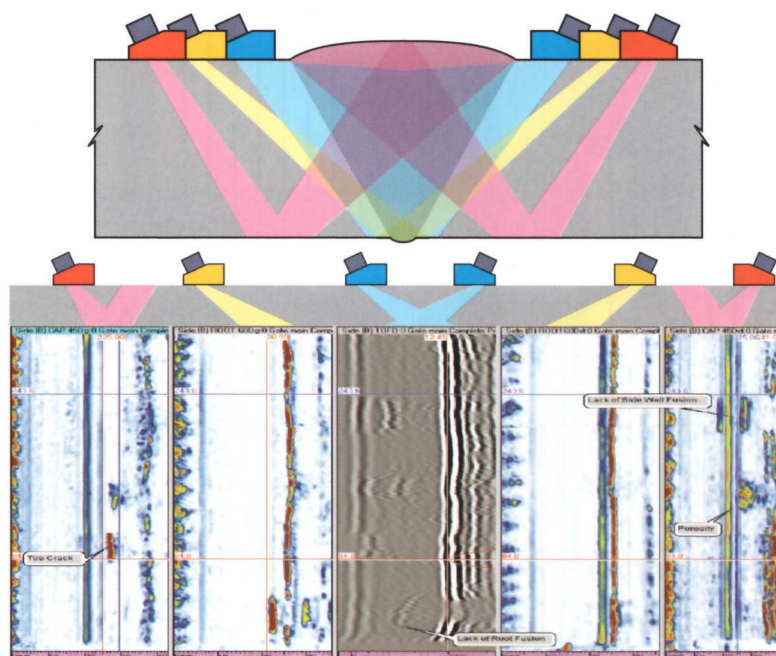


Рис. 4.29. Комбинация эхо-импульсного метода и TOFD при многоканальном сканировании: синий – TOFD, желтый – эхо-импульсный контроль прямым лучом, красный – отраженным лучом.

4.2.11 Комбинированные многополосные диаграммы

При комбинировании методов TOFD и эхо-импульсного все множество разверток может быть сведено воедино на многополосной диаграмме – см. рис. 4.30.

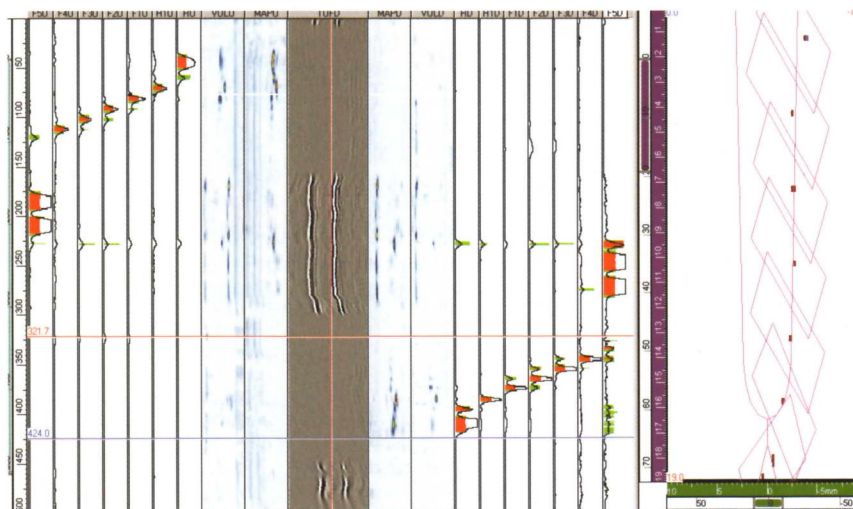


Рис. 4.30. Многополосная диаграмма, отражающая результаты контроля сварного шва сосуда высокого давления

4.2.12 «Томокуб»

Фирма R/D Tech разработала «Томокуб» (Tomoview Cube) – удобную форму представления результатов контроля в разных плоскостях (рис. 4.31). На пяти сторонах куба представлены параметры контроля и скорректированные В-, С- и D-сканы.

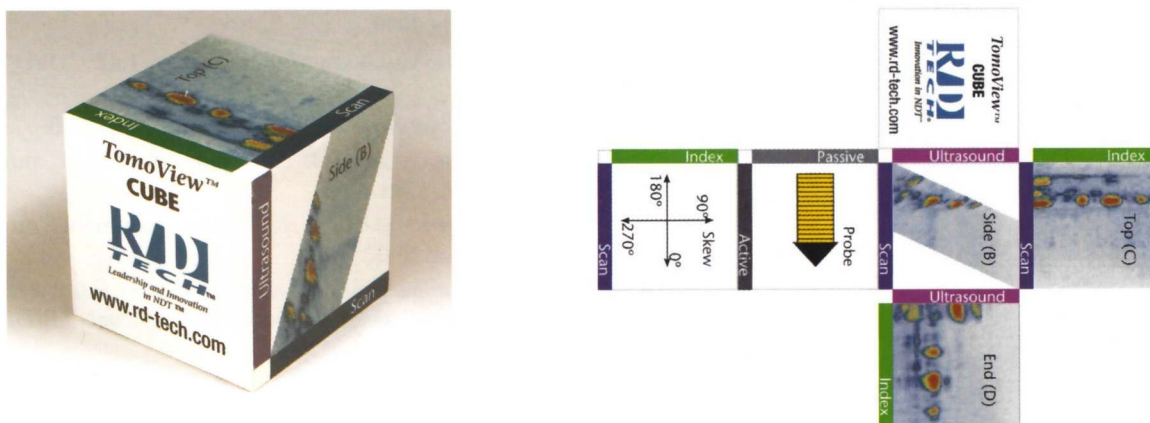


Рис. 4.31. R/D Tech Tomoview Cube. «Томокуб» (слева) и его развертка (справа)

5. Примеры применения фазированных решеток

Прим.пер.: по сравнению с другими разделами данный раздел оказался более сложным для полностью адекватного перевода, т.к. в некоторых разделах встречаются специфические термины; я их оставлял непереуведенными; кроме того, авторы книги весьма поверхностно ставят задачи, не объясняя, почему были выбраны именно такие технические решения. Надеюсь, что специалисты, работающие в соответствующих отраслях, смогут извлечь необходимую информацию из приведенных здесь рисунков и фотографий; со своей стороны гарантирую бережную передачу содержания исходного текста без смысловых искажений.

Проведение контроля ультразвуковыми фазированными решетками основывается на следующих исходных данных:

- тщательно разработанные технические условия (схема контроля, критерии фиксации, особые условия);
- информация о контролируемом изделии – чертежи, материал;
- информация об условиях эксплуатации детали, вызывающих ее дефектность;
- информация об ожидаемых производственных или эксплуатационных дефектах – их форма, размер, расположение;
- информация о поверхностях детали: шероховатость, температура, кривизна;
- сертифицированные репрезентативные образцы для настройки аппаратуры и обучения операторов;
- оптимальные параметры настройки аппаратуры;
- необходимые исходные данные для настройки прибора, сканера, преобразователя и программного обеспечения;
- аттестованная методика контроля;
- персонал, обученный и аттестованный для работы в конкретных условиях;
- учет влияния окружающей среды на операторов, аппаратуру и результаты контроля (радиация, шум, температура, влажность, высота, глубина и т.п.);
- учет эффективности работы аппаратуры и персонала без влияния на качество и безопасность работы, основанный на предыдущем опыте работ.

Разработка и аттестация методики должна проводиться на основании концепции избыточности (дефект должен обнаруживаться различными преобразователями под различными углами) и подтверждаемости (подтверждаемость обнаруженного дефекта другим методом или другим типом волн).

Очень часто контроль фазированными решетками выполняют для очень надежной диагностики небольших дефектов при высокой скорости контроля. При этом важнейшей задачей является оптимизация программных и физических параметров аппаратуры. Раздел 5.1 касается важных аспектов относительно оптимизации физических параметров аппаратуры.

5.1 Приборы R/D Tech

R/D Tech производит следующие приборы: OmniScan, QuickScan PA, Tomoscan FOCUS, Tomoscan III PA (см. рис. 5.1 – 5.4). Данные приборы имеют гибкие настройки и могут использоваться с различными дополнительными блоками, сканерами (рис. 5.5).

- OmniScan – недорогой прибор, работающий от батарей, имеющие встроенный блок для работы с фазированными решетками, который позволяет проводить ручное, полуавтоматический и автоматический контроль. Обычно используется для контроля профиля коррозии, обнаружения дефектов и специальных задач, в которых требуется портативность прибора;
- QuickScan PA является относительно недорогой встраиваемой системой, имеющей высокую частоту следования зондирующих импульсов, ориентированной на применение в линиях непрерывного контроля труб и другой продукции;
- Tomoscan FOCUS была первой коммерческой системой фирмы R/D Tech, созданной для использования в высокотехнологичных лабораториях, в энергетике, невулканомическом производстве, авиакосмической отрасли и др. Выпущенные и внедренные в производство системы исчисляются сотнями экземпляров;
- Tomoscan III PA – высокотехнологичная система, схожая с Tomoscan FOCUS, однако предлагающая большее разрешение и большую скорость записи и передачи данных.

Сравнение различных приборов представлено в табл. 5.1.



Рис. 5.1. Портативный прибор OmniScan PA.



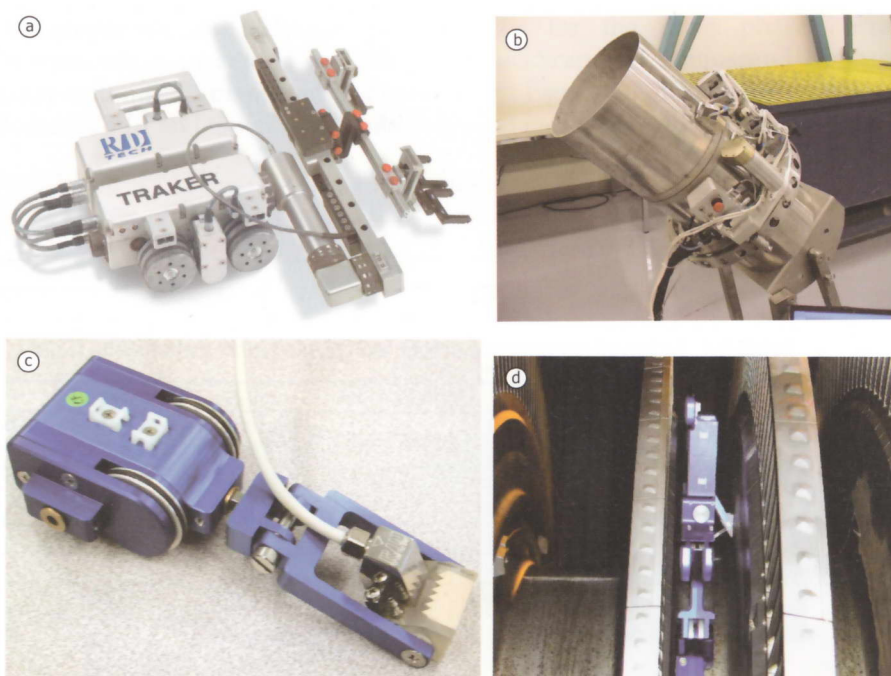
Рис. 5.2. Прибор Tomoscan FOCUS



Рис. 5.3. Прибор Tomoscan III PA



Рис. 5.4. Прибор Quickscan PA.



Courtesy of Boeing and GE, USA

Рис. 5.5. Примеры различных сканеров фирмы R/D Tech: а) ROVER для сосудов высокого давления; б) PS 12-X для труб; с) сканер «жук»; д) сканер для роторов

Табл. 5.1. Технические данные приборов R/D Tech

Tomoscan III PA	QuickScan PA	OmniScan PA
Main product features		
<ul style="list-style-type: none"> • Large data file • Advanced data analysis • Highly skilled operator • High data transfer and storage > 3 Mb/s • Level-2 and Level-3 operators 	<ul style="list-style-type: none"> • Parallel firing • High PRF • Data storage (TOF, amplitude) • Alarm Go/No Go • Real-time data processing and alarm • Regular operators (no level of skill required) 	<ul style="list-style-type: none"> • Manual/semiautomated • Limited data storage • Flaw detection • Limited data analysis • Level-1 and Level-2 operators
Main applications		
<ul style="list-style-type: none"> • Power generation • Reactor components • Turbines • Steam generators • Research laboratories • Pressure vessels 	<ul style="list-style-type: none"> • Industrial in-line and manufacture • Aerospace 	<ul style="list-style-type: none"> • Aircraft and military • Civil engineering and structure • Petrochemical and BOP • Corrosion mapping • Fastener inspection • Crack detection/sizing
Technical data		
Integrated motor control: yes	Not applicable	No
Data storage: >1 GB	C-scan + Indication log	<256 MB
Number of ultrasonic channels: 32 / sequential	Custom-built: up to 64 / parallel	16 / sequential / parallel
Resolution: 12 bits	8 bits	10 bits (8 bits stored)
Digitizer A/D: 100 MHz	100 MHz	100 MHz
Axis support: 2 automatic	2 automatic	2 semiautomatic
Tomoscan III PA	QuickScan PA	OmniScan PA
Data file format: RDTIFF	RDTIFF	Special RDTIFF; data can be analyzed in TomoView™
Weight: <20 kg (44.1 lbs)	Custom <20.5 kg (45.2 lbs)	<4 kg (8.82 lbs)
Portability: yes	no	yes
Power supply: mains	mains	Battery: 15 V or mains
Price: \$\$\$	\$\$	\$



Рис.5.6. Приборы Tomoscan III PA (слева) и QuickScan PA (справа) при типичных способах установки и эксплуатации

5.2 Экспресс-проверка приборов

Излучающе-приемный тракт приборов может быть проверен при помощи специального генератора с разъемом Hypertronics BQUS002 (рис. 5.7), по методике «изображения двойной стрелки».



Рис. 5.7. Разъем Hypertronics BQUS002 для совмещенного (слева) и раздельно-совмещенного (справа) режимов работы

При правильной работе всех излучающих и приемных каналов на экране выводится изображение «двойной стрелки» без прерываний.

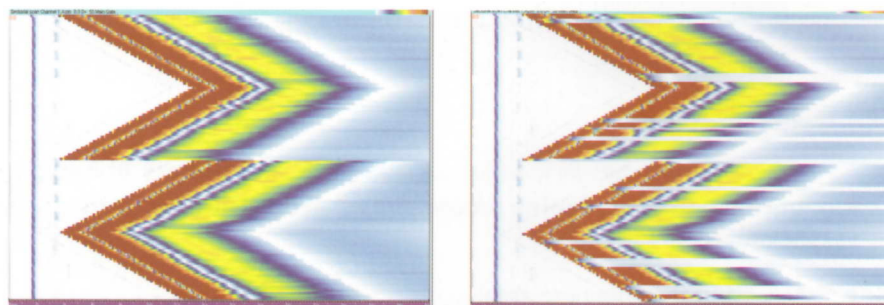


Рис. 5.8. Скан, отображаемый на экране при проверки работоспособности излучающих и приемных каналов: правильная работа (слева); имеются неработающие излучатели или усилители (справа – белые полосы на скане). Стандартная методика R/D Tech.

5.3 Проверка работоспособности элементов преобразователя

Отдельные элементы преобразователя проверяются в режиме линейного сканирования. В зависимости от шага решетки и типа преобразователя, оператор может использовать небольшую отвертку диаметром 0,5 ... 0,8 мм. Следует аккуратно касаться жалом отвертки каждого элемента преобразователя, подключенного к прибору и следить за сигналами на экране. Каждый элемент должен вызывать ультразвуковые импульсы в отвертке.

В зависимости от типа преобразователя и решаемой задачи, преобразователь может работать корректно даже если от 10% до 25% элементов не работают или повреждены (рис. 5.9).

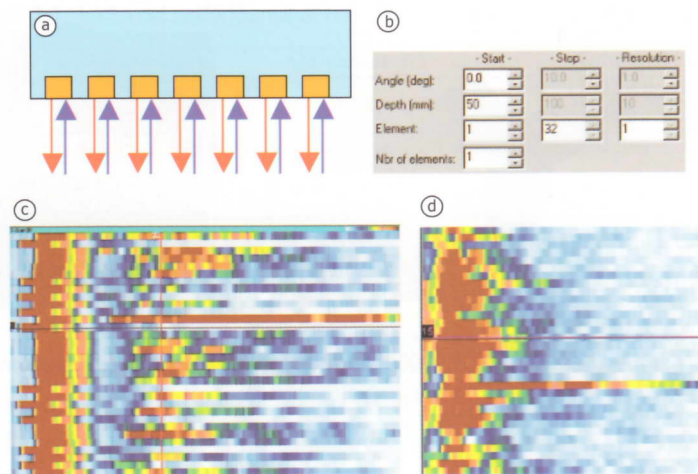


Рис. 5.9. Линейное сканирование для определения поврежденных элементов решетки: а) принцип; б) фокальные законы для решетки из 32 элементов; в) изображение S-скана для решетки с 10 неработающими элементами; д) нескорректированный скан линейной решетки

5.4 Моделирование хода лучей

Моделирование лучей в объекте контроля определенной геометрии (рис. 5.10) очень полезно для:

- оценки зоны озвучивания;
- расчета фокальных законов и диапазона контроля;
- оптимизации параметров сканирования (направления продольного и поперечного сканирования, шага сканирования);
- оценки влияния трансформированных волн;
- достижения улучшенного изображения дефектов;
- обнаружения дефектов, возникающих в характерных зонах (например непровары по границам разделки свариваемых элементов);
- оформления заключения о контроле.

Моделирование хода лучей может быть частью процесса аттестации методики контроля. Программное обеспечение для моделирования в настоящее время доступно для покупки в виде дешевых или полнофункциональных версий. Часто подобные программы позволяют решать задачи контроля путем минимальных финансовых вложений и трудозатрат.

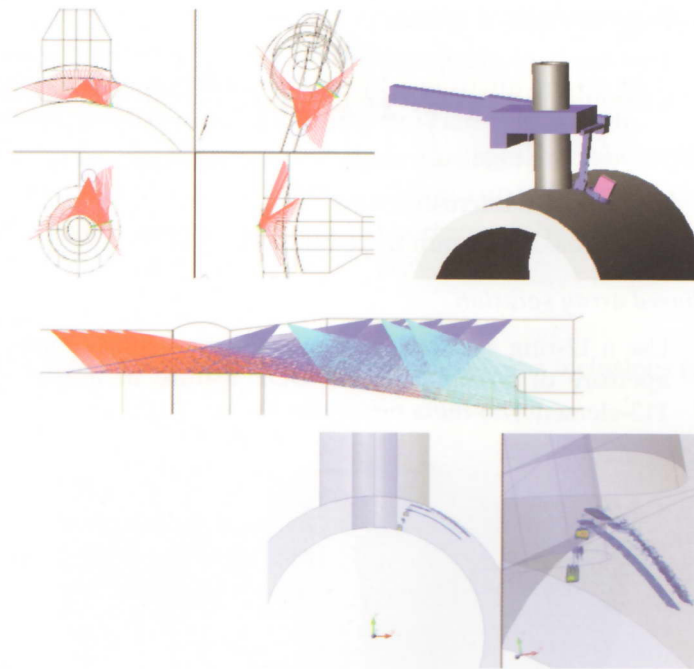


Рис. 5.10. Пример моделирования хода лучей при контроле фазированной решеткой места приварки патрубка к корпусу

5.5 Аэрокосмическая отрасль

Этот раздел рассматривает большое количество вопросов контроля в аэрокосмической отрасли. Больше количество информации можно найти в литературе по ссылкам 10 ... 17.

5.5.1 Контроль титановых заготовок

Больше информации по данному вопросу можно найти в литературе по ссылкам 12 – 17.

а) Задача контроля

Поиск и определение размеров включений альфа-фазы и частиц керамики в титановых заготовках диаметром от 7,5 см до 35 см.

б) Особые требования

- контроль акустического контакта;
- полностью автоматическая система;
- тонкая настройка механики;
- дружественный пользовательский интерфейс.

в) Трудности

- крупнозернистая структура;
- малый размер дефектов (0,4 – 0,8 мм).

г) Решение с применением фазированных решеток

- использование 12-мм круглого концентрического преобразователя с общей апертурой 80 мм и динамической фокусировкой по глубине и/или 113-элементного круглого матричного преобразователя (рис. 5.11).

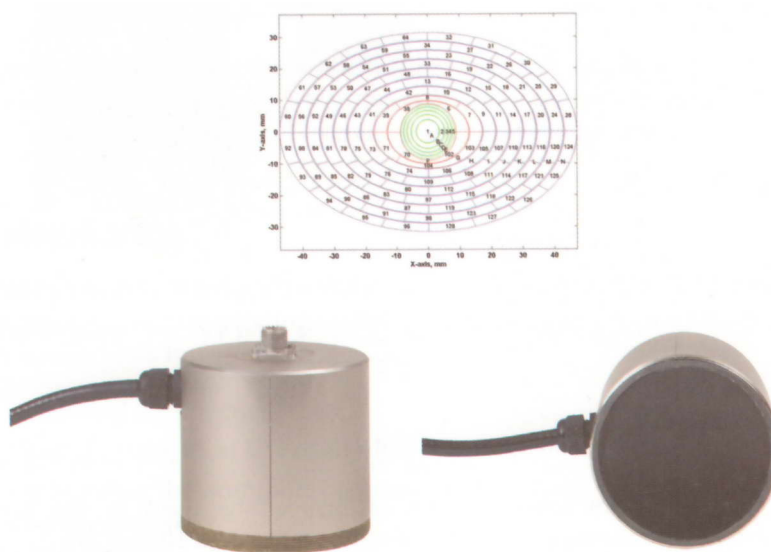


Рис. 5.11. Преобразователь 5 МГц концентрический (сверху) и круглый матричный преобразователь (снизу) для контроля титановых заготовок

д) Описание решения

- использование эллиптического концентрического преобразователя для перекрытия большого диапазона диаметров изделий;
- использование динамической фокусировки по глубине для обеспечения узкого луча (ширина 5 мм на глубине 125 мм);
- та же решетка может генерировать два луча для заготовок большого диаметра;
- возможность выявления дефектов диаметром (плоскодонные отверстия): 0,4 мм на глубине до 7,5 см и 0,8 мм на глубине до 12 см;
- возможность выявления включений альфа-фазы: 0,5 мм на глубине до 5 см, 1 мм на глубине до 12 см;
- автоматическая фиксация дефектов и простой последующий анализ.

е) Подробности

- использованы образцы с плоскодонными отверстиями и включениями альфа-фазы (рис. 5.12);
- установка с иммерсионным способом контроля фазированными решетками приведена на фотографии на рис. 5.14;
- результаты контроля образцов представлены на рис. 5.13.

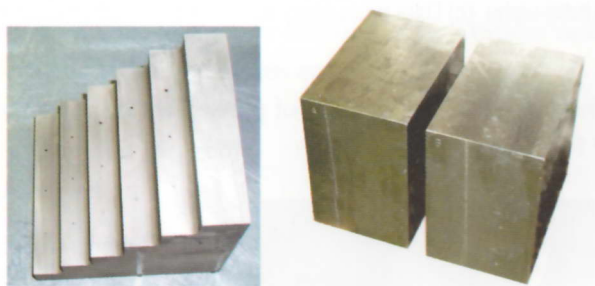


Рис. 5.12. Образцы с плоскодонными отверстиями и включениями

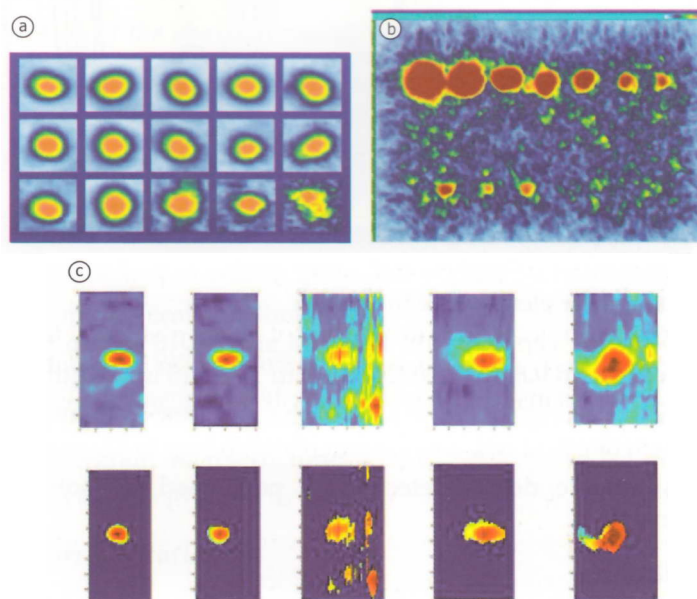


Рис.5.13. Необработанные изображения дефектов в образцах:
 а) плоскодонные отверстия; б) включения;
 с) изображения дефектов после спектральной обработки



Рис. 5.14. Иммерсионный контроль титановых заготовок
 двумерной круглой фазированной решеткой.

5.5.2 Контроль сварных швов, выполненных с помощью трения

Больше информации о контроле швов, выполненных с помощью трения можно найти в литературе по ссылкам 1, 2 и 10.

а) Типовые требования к неразрушающему контролю

- длина шва – до 12 метров;
- толщина стенки – от 3 до 15 мм;
- наружный диаметр – от 2,5 до 5 метров;
- материал – алюминий, однако технология может применяться к любым материалам, сваренным трением;
- вертикальная или горизонтальная ориентация шва;
- контроль шва неправильной формы, при которой невозможно выполнить растровое сканирование;
- ограниченный доступ к шву;
- контроль акустического контакта;
- полностью автоматический контроль;
- быстрое выполнение контроля.

б) Выявляемые дефекты

- непровар;
- включения оксидов;
- «червоточины»;
- дефекты корня шва;
- продольные и поперечные дефекты;
- пористость.

в) Описание решения

- по одной фазированной решетке с каждой стороны шва для поиска продольных дефектов, плюс третья фазированная решетка для поперечных дефектов;
- обнаружение продольных дефектов углами ввода 35° и 65° поперечной волной;
- обнаружение поперечных дефектов углом ввода 45° поперечной волной при углах разворота -30° , 0° и $+30^\circ$;
- электронное сканирование лучом;
- полный контроль шва обеспечивается механическим сканированием (до 20 метров);
- акустический контакт обеспечивается локальной иммерсионной ванной.

д) Компоненты системы контроля

- Tomoscan FOCUS 32:128;
- сканер ROVER с адаптером;
- управляющий модуль MCDU-02 с джойстиком;
- преобразователи – 3 фазированных решетки, 10 МГц, по 64 элемента;
- акустический контакт – локальная иммерсионная ванна;
- система рециркуляции воды;
- тележка для автономной работы;
- стойка для аппаратуры с системой кондиционирования.

е) Примеры (рис. 5.15 – 5.20)

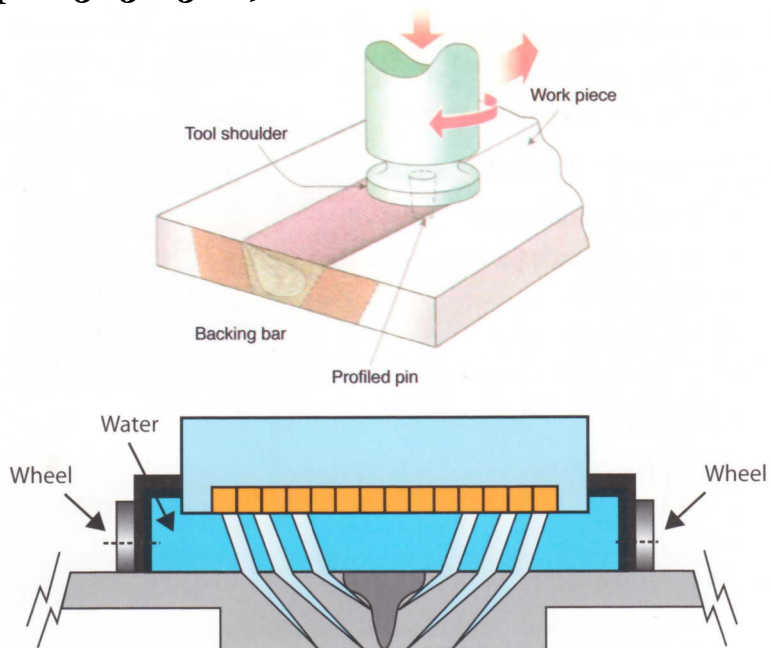


Рис. 5.15. Электронное сканирование сварного шва. Принцип сварки (сверху), сфокусированные лучи для сканирования шва (снизу)

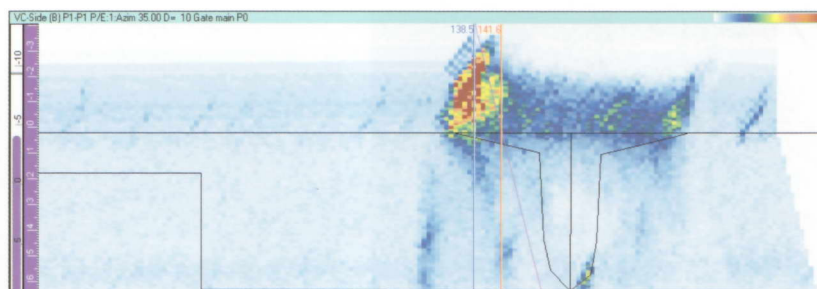
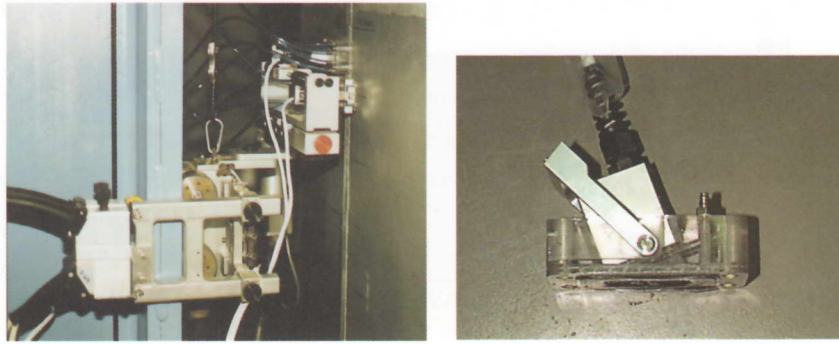


Рис. 5.16. Изображение трещины, обнаруженной в корне шва



Courtesy of Boeing, USA

Рис. 5.17. Дефектоскоп, управляющий модуль и компьютер, установленные в кондиционированную стойку (слева); система рециркуляции воды (справа)



Courtesy of Boeing, USA

Рис. 5.18. Сканер с адаптером (слева) и фазированная решетка с локальной иммерсионной ванной (справа)

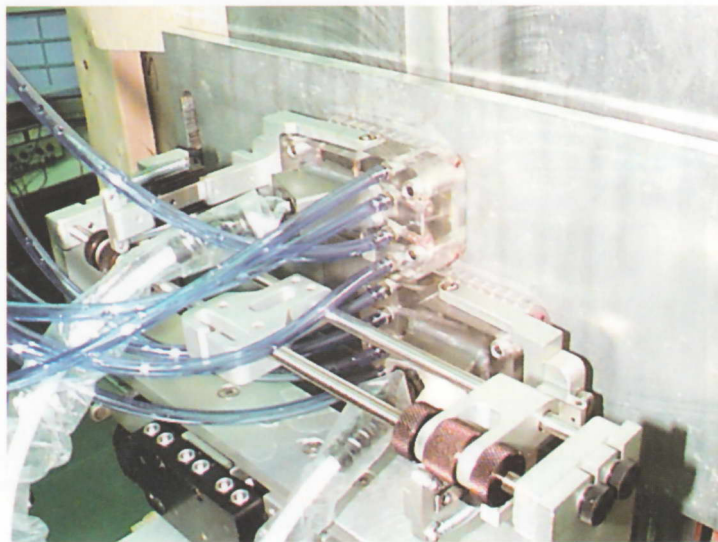


Рис. 5.19. Система в работе

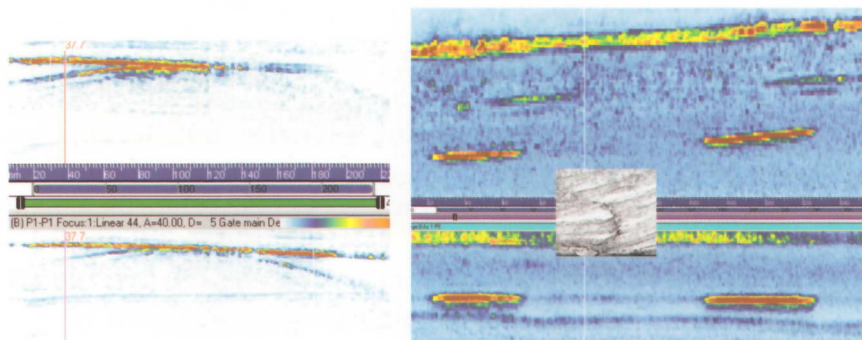


Рис. 5.20. Обнаружение дефекта, выходящего на внутреннюю поверхность (слева) и дефекта типа faying bond (справа)

5.5.3 Контроль болтовых отверстий

а) Задача контроля

- обнаружение усталостных трещин размером от 0,75 мм, начинающихся от болтовых отверстий;
- бо́льшая номенклатура толщин и диаметров отверстий (рис. 5.21);
- время на контроль – не более 1 минуты на 1 отверстие;

- преобразователь для ручной установки или перемещения;
- аттестованная система.

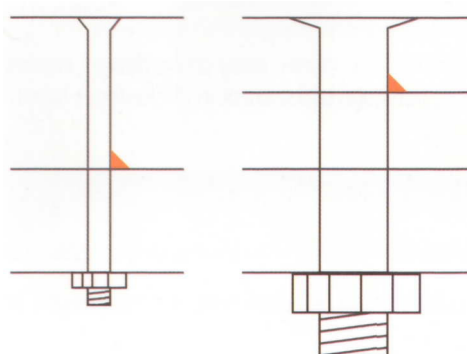
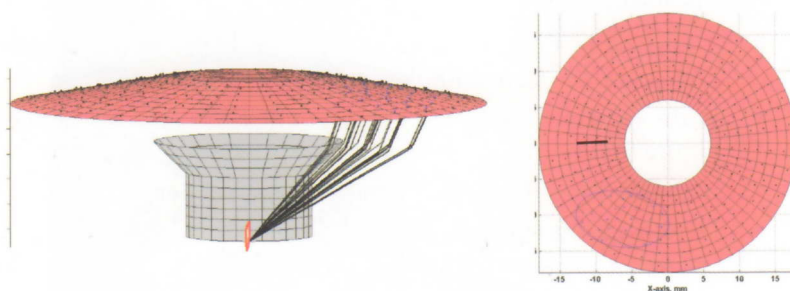


Рис. 5.21. Угловые трещины на болтовых отверстиях различных диаметров в элементах различной толщины

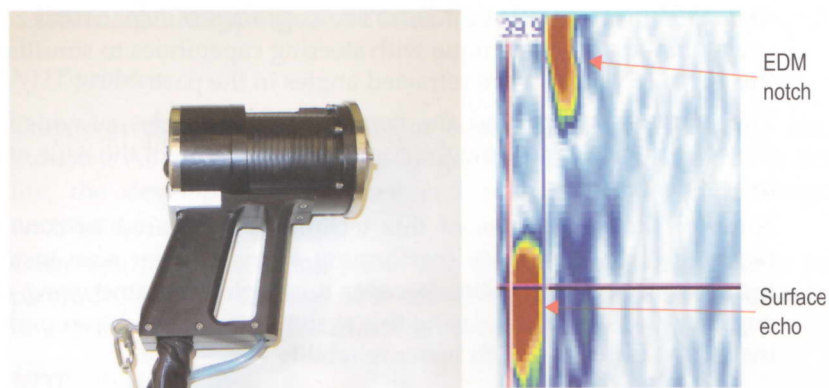
б) Решение задачи контроля

- использование специальной конической матрицы с большим количеством элементов (504 шт.);
- выполнение электронного сканирования по 360° углу вокруг отверстия (рис. 5.22);
- объединение элементов преобразователя в подгруппы с разными размерами элементов так, чтобы снизить уровень дополнительных лепестков диаграммы направленности;
- преобразователь весом менее 2 кг (корпус «фен») (рис. 5.23);
- регулировка усиления по каналам для выравнивания чувствительности элементов;
- сканирование выполняется под разными углами и из разных позиций;
- автоматическая центровка преобразователя на отверстии;
- одновременно работают 64 элемента преобразователя (рис. 5.24). Система FastFOCUS, использующая два модуля QuickScan PA 32:256.



Courtesy of USAF and Lockheed Martin AS, USA

Рис. 5.22. Коническая матрица преобразователя:
луч в изометрической проекции (слева) и обнаружение трещины (справа)



Courtesy of USAF and Lockheed Martin AS, USA

Рис. 5.23. Фотография преобразователя (слева) и сигнал от дефекта размером 0,75 мм



Рис. 5.24. Система с фазированной решеткой, включающая 2 блока QuickScan PA

5.5.4 Контроль авиационного шасси с использованием фазированных решеток

а) Задача контроля

Авиационные шасси испытывают интенсивные нагрузки при взлете и посадке. Контролировать требуется цилиндр переменного диаметра. Наилучший способ контролировать его – использовать фазированную решетку с озвучиванием детали поперечной волной под углами от 40° до 65° . Адаптированная призма и электронное сканирование позволяют провести полное исследование за один проход. Преимуществами данной технологии являются: простота сканирования (линейное вместо растрового) и озвучивание большого объема за один проход.

б) Требования к аппаратуре

- призма, притертая к контролируемой детали;
- А-, В- и S-скан;
- сохранение всех сканов для последующего анализа;
- диаметр детали от 12,5 до 20 мм;
- толщина детали от 12 мм до 38 мм;
- дружелюбный интерфейс;
- портативность.

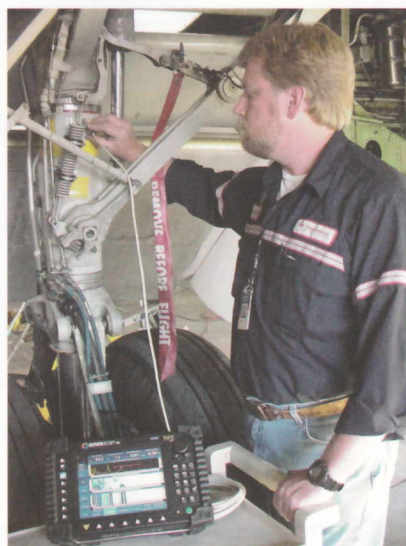


Рис. 5.25. Портативный прибор OmniScan PA, используемый для контроля шасси

5.5.5 Измерение профиля коррозии фюзеляжа

а) Задача контроля

Оценка степени коррозии фюзеляжа является одной из важнейших задач в авиационной промышленности, в связи с тем, что большинство воздушных судов эксплуатируются большее время, чем предполагается при их изготовлении. Измерение коррозии фюзеляжа является сложной задачей потому, что на поверхностях имеются болтовые отверстия и головки болтов, а также поверхности ввода практически никогда не бывают плоскими.

б) решение задачи

Система контроля имеет специальный сканер с локальной иммерсионной ванной. Система обеспечивает быстрое и надежное измерение профиля коррозии с помощью С-скана (рис. 5.26)

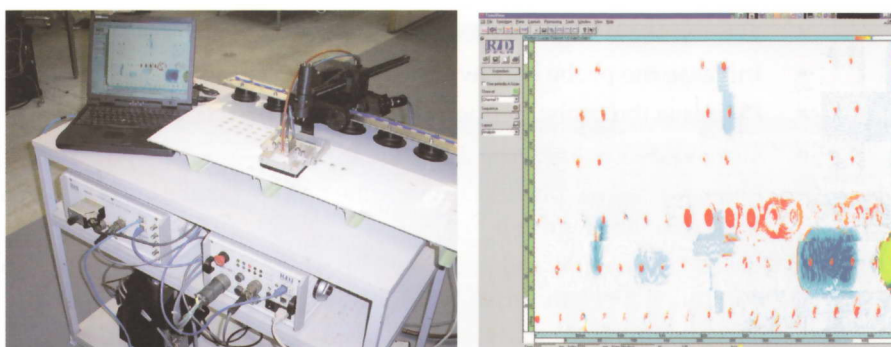


Рис. 5.26. Система на фазированных решетках для записи профиля коррозии (слева) и пример С-скана, показывающего различные степени коррозии.

5.6 Энергетика

5.6.1 Контроль несимметричных сварных швов

а) Задача контроля

- различные материалы с различными коэффициентами теплового расширения сварены вместе, что может вызывать растрескивание шва;
- сильное затухание и изменения скорости звука в аустенитной части шва;
- искажение траектории ультразвукового луча;
- крупнозернистая структура, вызывающая реверберационные шумы;
- ограниченный доступ вследствие геометрии шва;
- аттестация методики контроля.

б) Решение задачи

- раздельно-совмещенный преобразователь с 2 фазированными решетками, продольные волны, размерность обеих решеток – 1,5-мерная;
- оптимальные углы наклона призм;
- небольшое «покачивание» лучей в горизонтальной плоскости для увеличения отношения сигнал-шум;
- преобразователи имеют полосу пропускания >100%;
- частота преобразователя – от 0,8 МГц до 2 МГц;
- анализ дефекта по изображениям шва, как объединенным (спроецированным), так и послойным;
- аттестация методики с использованием эталонных образцов с искусственными дефектами (рис. 5.27 – 5.31);
- использование прозвучивания под углом 0° для проверки толщины и качества акустического контакта; сканирование по углу от 30° до 80° с шагом 1°; фокусные расстояния от 5 до 50 мм; сканирование по каждой линии со скоростью 20 мм/с.

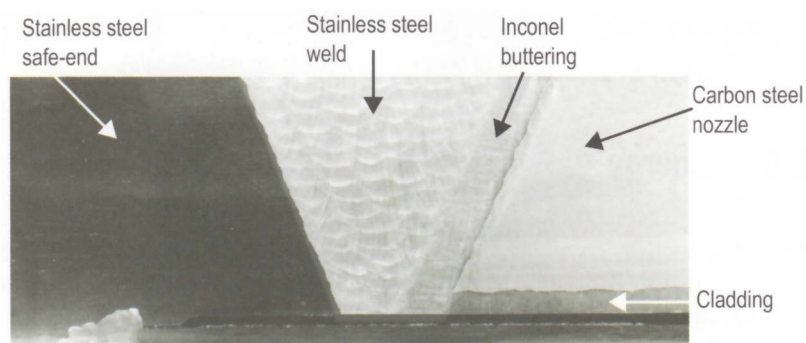


Рис. 5.27. Макроструктура несимметричного сварного шва

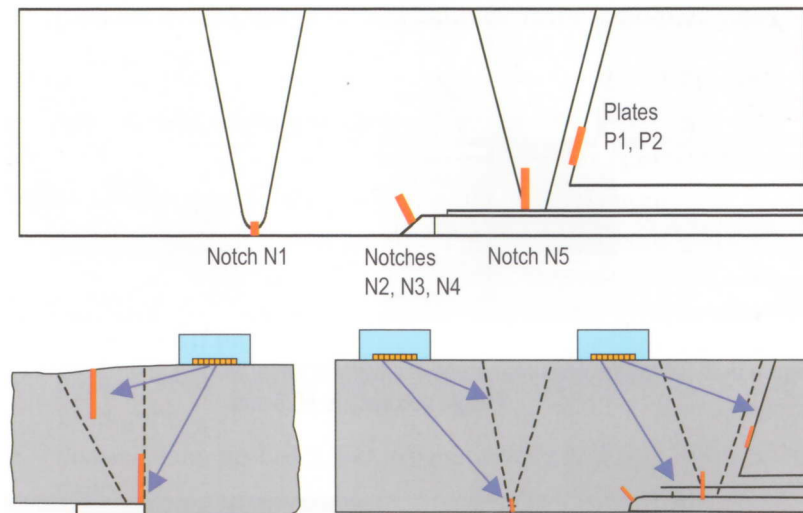


Рис. 5.28. Расположение искусственных отражателей в стандартном образце (сверху) и схемы прозвучивания (снизу)

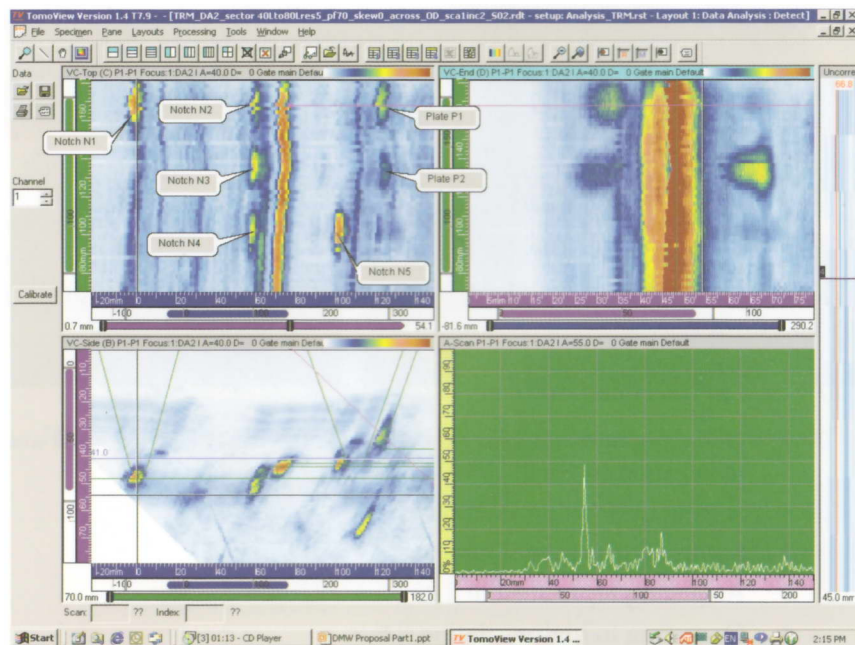


Рис.5.29. Обнаружение искусственных отражателей. Объединенный вид.

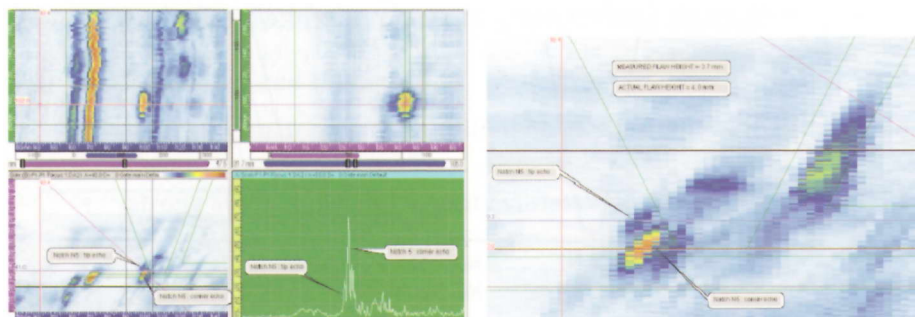


Рис. 5.30. Обнаружение дефектов в несимметричном сварном шве. Точность определения протяженности ± 3 мм. Точность определения высоты $\pm 0,3$ мм.

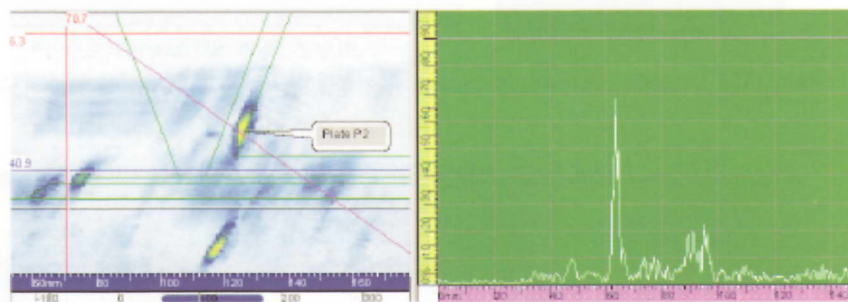


Рис. 5.31. Обнаружение непрямого в buttering. Отношение сигнал-шум 18 дБ.

5.6.2 Высокоскоростной контроль сварных швов труб из нержавеющей стали

а) Задача контроля

- поиск и измерение размеров дефектов в шве и зоне термического влияния;
- минимальное время настройки аппаратуры;
- минимальное время сканирования;
- получение воспроизводимых результатов;
- работа в зоне воздействия радиоактивных излучений.

б) Решение

- простой в установке трубный сканер (рис. 5.32);
- лазерное устройство позиционирования;
- линейное сканирование (скорость 38 мм/с, шаг 1 мм) двумя фазированными решетками (с двух сторон шва);
- объединенные изображения;
- суммарное время менее 5 минут на 1 сварной шов;
- определение условных границ дефектов относительным методом (- 12 дБ);
- использование сигналов дифракции на краях дефекта для определения его высоты.

в) Система на фазированных решетках

- TomoScan III PA;
- линейный преобразователь 5 МГц/32 элемента для 12-дюймовой трубы;
- преобразователь размерности 1,5, частота 1 МГц для 36-дюймовой трубы с узким валиком усиления;
- сканер PS 12X + источник питания.

г) Преимущества

- снижение дозы излучения, получаемой оператором, в 10 раз;
- время сканирования менее 1 минуты на 1 шов.

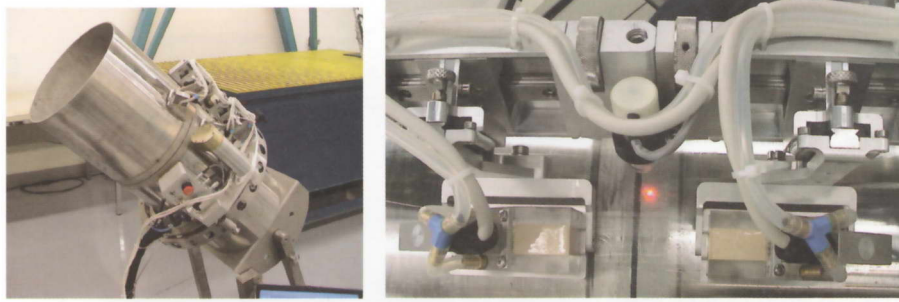


Рис. 5.32. Трубный сканер (слева) с двумя преобразователями на фазированных решетках и лазерным устройством позиционирования

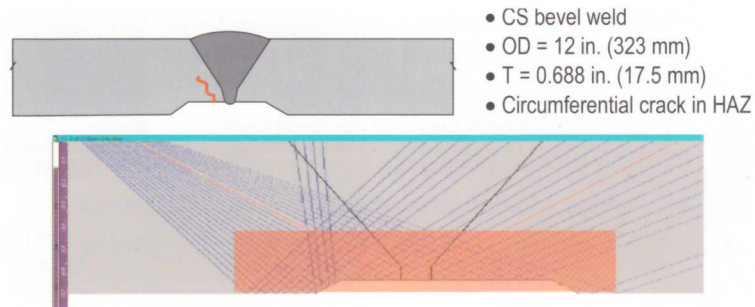


Рис. 5.33. Сварной шов из углеродистой стали и моделирование лучей при контроле фазированной решеткой

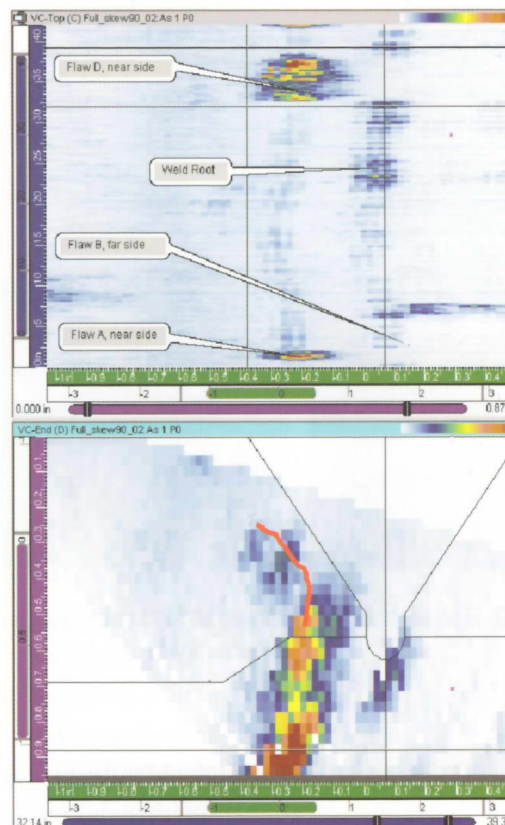


Рис. 5.34. Пример обнаружения дефекта в 12-дюймовой трубе.

Возможности обнаружения дефектов представлены в таблице 5.2.

Табл. 5.2. Дефекты, обнаруживаемые в 12-дюймовой трубе из углеродистой стали

код дефекта	расположение	размер		
		измеренный	действительный	ошибка
Протяженность в мм по относительному методу по уровню -12 дБ				
A	верхняя часть	27	21	+8
B	нижняя часть	30	30	0
D	верхняя часть	131	115	+16
Высота в мм				
A	верхняя часть	8,3	8,7	0,4
B	нижняя часть	13,8	13,6	0,2
D	верхняя часть	7,3	7,2	0,1

* допуски по ASME XI составляют ± 19 мм на протяженность и ± 3 мм на высоту.

5.6.3 Контроль сварных швов труб главного контура охлаждения

а) Параметры контроля

- размеры шва – 900 x 75 мм;
- узкий валик усиления;
- опорный отражатель – пропилы с острыми краями, тип А, высотой 10 мм.

б) Система контроля

- ТомоScan III PA;
- сканер PS 12;
- раздельно-совмещенная 1,5-мерная фазированная решетка, 1 МГц, 2 части по 2 x 11 элементов, шаг 4,5 мм.;
- секторное сканирование (от 30° до 60° с шагом 1°) продольными волнами;
- линейное сканирование с разрешением 1 мм и скоростью 40 мм/с;
- объединенные сканы.

Особенности контроля иллюстрируются рис. 5.35 и 5.36.

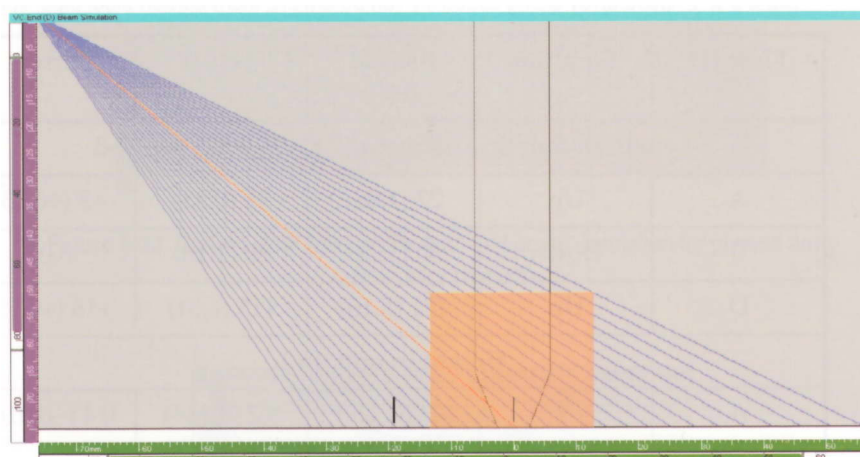


Рис. 5.35. Моделирование лучей при контроле фазированной решеткой шва с узким валиком усиления

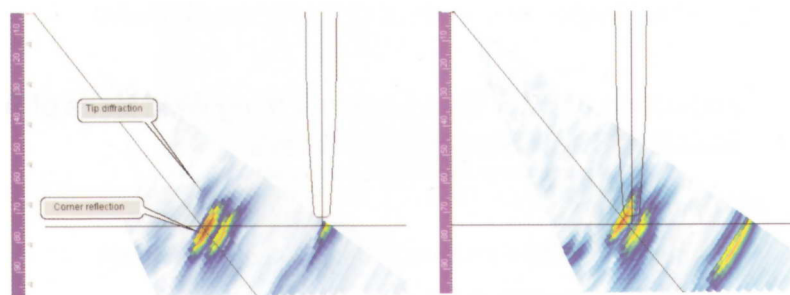


Рис. 5.36. Обнаружение и измерение размеров опорных отражателей

5.6.4 Контроль сварного шва в месте приварки патрубка к корпусу реактора

а) Задача контроля

- контроль сварного шва и околошовной зоны в месте приварки патрубка к корпусу (рис. 5.37);
- контроль должен охватывать полную окружность патрубка с учетом переменной толщины стенки и геометрии;
- обнаружение и измерение размеров плоских дефектов с высотой от 3 мм и протяженностью от 20 мм;
- документирование, визуализация данных с целью облегчения расшифровки.

б) Решение задачи

- применение водонепроницаемой 1,5/2-мерной решетки (рис. 5.38);
- моделирование хода лучей для подтверждения углов и фокальных законов;
- использование образцов с опорными отражателями (рис. 5.39);
- использование динамической фокусировки по глубине;
- использование 12-битной дискретизации;
- использование цилиндрически-скорректированного изображения;
- сканер разработан заказчиком.

в) Преимущества

- достоверный контроль;
- контроль выполняется быстрее в 5-10 раз;
- простое документирование результатов.

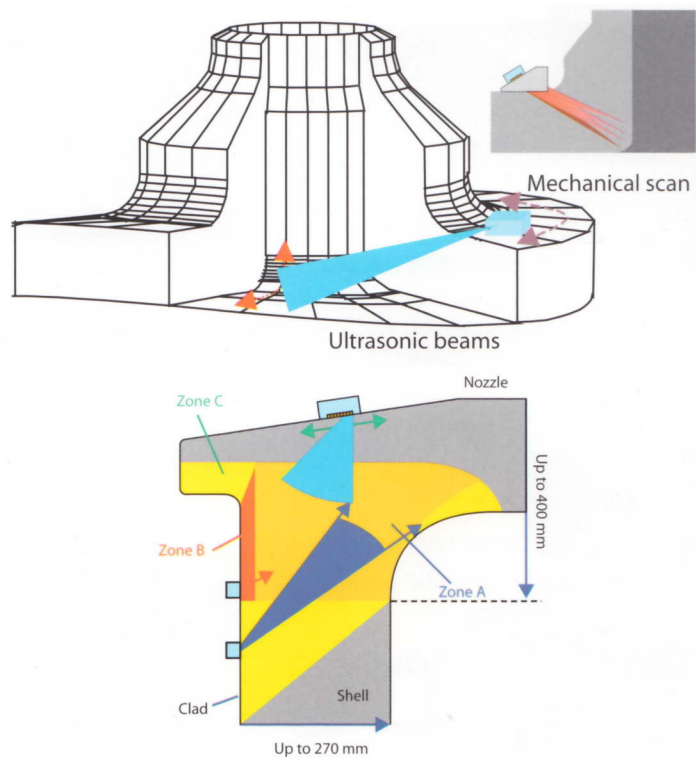


Рис. 5.37. Принцип контроля внутреннего радиуса в месте приварки патрубка

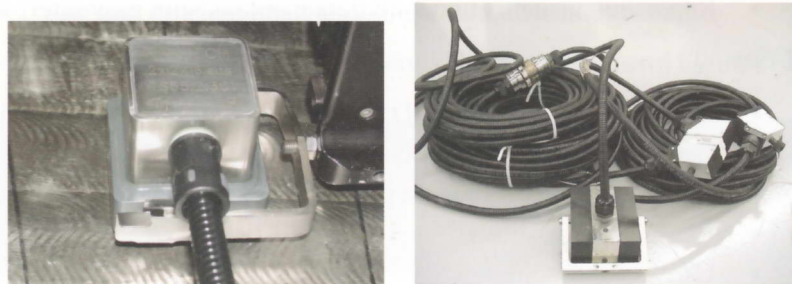


Рис. 5.38. Водонепроницаемая фазированная решетка (раздельно-совмещенная, на продольных волнах)

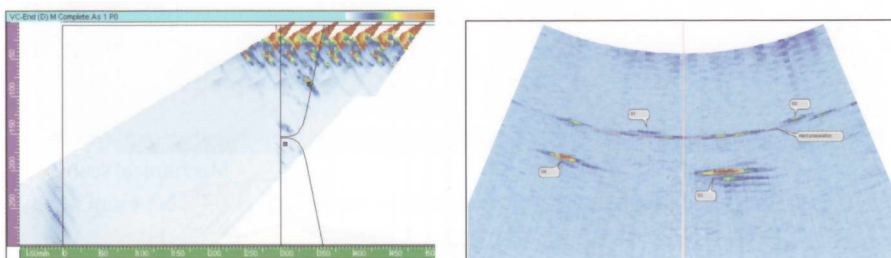


Рис. 5.39. Результаты обнаружения опорных отражателей в образце: объединенные сканы (слева) и цилиндрически скорректированный скан (справа)

5.6.5 Трещины в трубах CANDU feeder

а) Задача контроля

- обнаружение и измерение размеров усталостных трещин;
- сильно ограниченный доступ;
- высота трещин менее 1 мм;
- зона высокой радиоактивности.

б) Решение задачи

- использование колесного датчика координаты, прикрепленного к фазированной решетке (рис. 5.40);
- использование 10 МГц, 16-элементной фазированной решетки;
- используется прибор TomoScan FOCUS или OmniScan;
- используется эхо-импульсный метод для обнаружения и TOFD для измерения размеров (рис. 5.41);
- упрощение расшифровки данных.



Рис. 5.40. Обнаружение фазированной решеткой усталостных трещин в трубе: преобразователь с датчиком координаты (слева), изображения дефектов (справа)

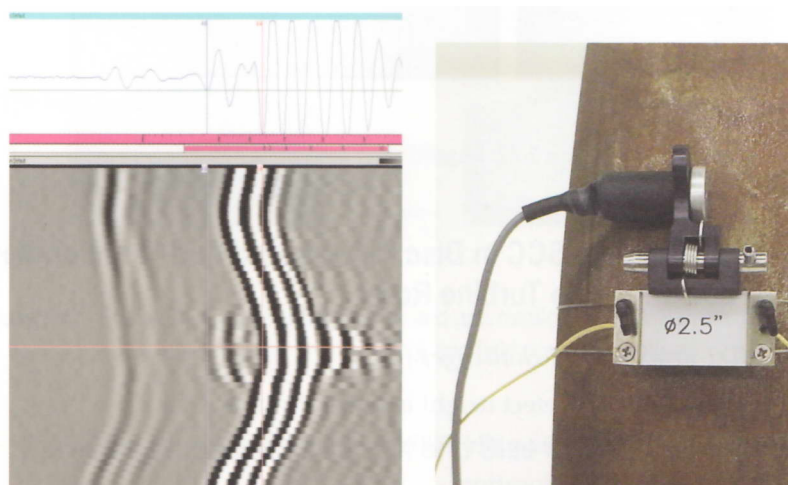


Рис. 5.41. Измерение размеров дефектов дифракционно-временным методом

5.6.6 Обнаружение стресс-коррозионных трещин в сварных или цельных роторах

а) Задача контроля

- обнаружение стресс-коррозионных трещин малого размера на больших дистанциях распространения ультразвука (от 150 мм до 400 мм) в различных участках сварного ротора (рис. 5.42);
- ограниченный доступ.

б) Решение задачи

- использование секторного сканирования от 30° до 60° с шагом 1° поперечными волнами;
- линейная фазированная решетка, 5 МГц, 16 элементов;
- настройка по пропилам длиной 2 мм, высотой 0,5 мм;
- разработан специализированный сканер;
- сканирование по всей окружности выполняется при закреплённом преобразователе и вращении ротора специальным приводом.

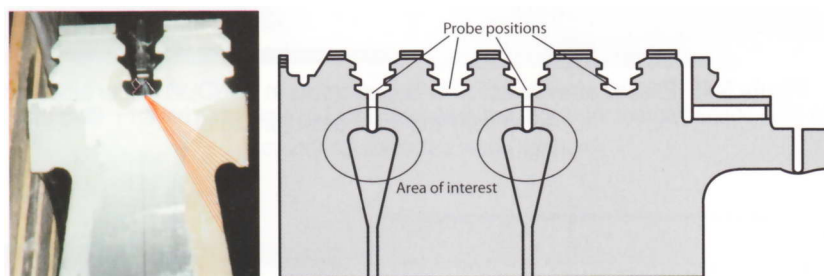


Рис. 5.42. Контроль сварного шва ротора

5.6.7 Обнаружение стресс-коррозионных трещин в дисках ротора турбины низкого давления

а) Задача контроля

- высота трещин от 1 до 3 мм;
- расстояние от преобразователя от 300 мм до 600 мм;
- различная ориентация трещин;
- время на контроль: 2 дня на ротор, содержащий от 6 до 10 дисков.

б) Решение задачи

- использование линейной фазированной решетки от 4 МГц до 6 МГц, 32 элемента, активная апертура от 30 мм до 60 мм;
- специализированный манипулятор;
- зоны сканирования определяются геометрией конкретного диска;
- ротор контролируется на месте установки, поворачиваясь на стойках креплений.

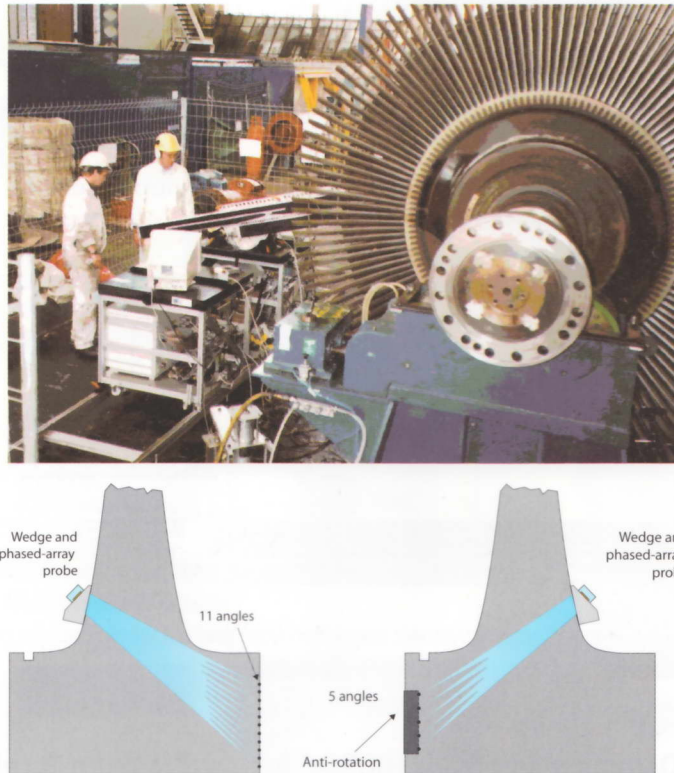


Рис. 5.43. Контроль элементов ротора турбины низкого давления: общий вид и принцип озвучивания

5.6.8 Обнаружение стресс-коррозионных трещин в основном металле ротора

а) Особенности контроля

- ограниченный доступ: контроль со стороны канала в роторе.

б) Решение задачи

- специальный преобразователь с притертой призмой;
- сращение ротора, при прижиге преобразователя к внутренней поверхности (рис.5.44);
- данные отображаются в полярных координатах (рис. 4.13).

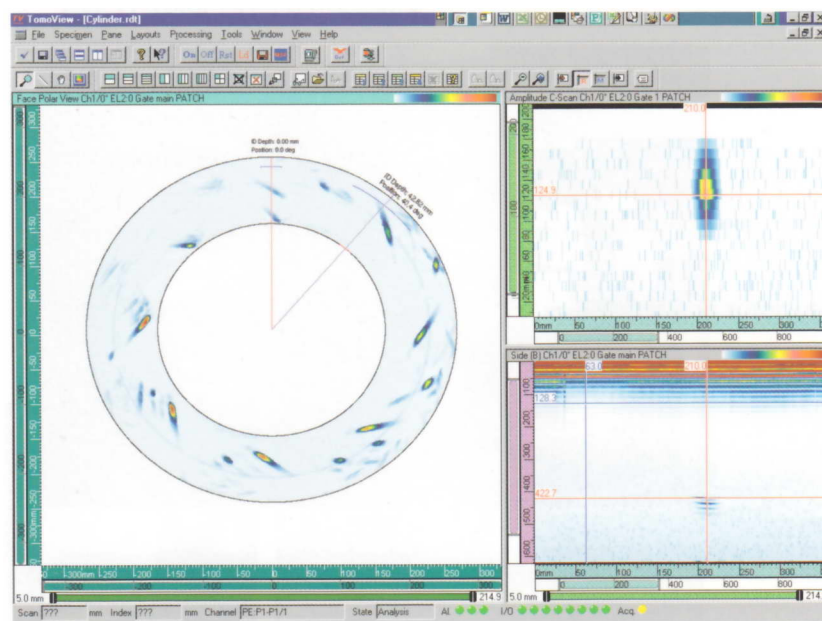


Рис. 5.44. Представление результатов контроля ротора

5.6.9 Обнаружение и определение размеров стресс-коррозии в деталях турбины низкого давления

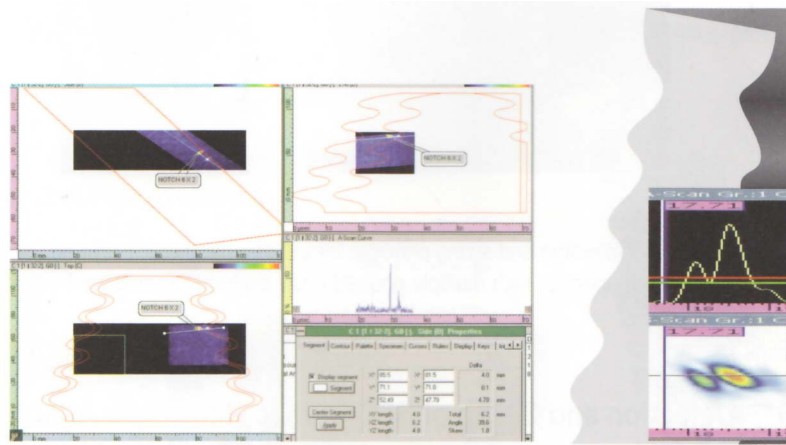
Прим. пер.: здесь применяются специфические термины, которые я намеренно оставил непереведенными. Надеюсь, специалисты работающие в энергетике, поймут, о каких деталях турбины идет речь.

а) Задача контроля

- высокая производительность контроля (7500 точек контроля в течение 5 дней);
- требуется высокая достоверность;
- размеры обнаруживаемых трещин: 3 x 1 мм, 5 x 1 мм, 4 x 1,5 мм, 9 x 0,5 мм, 9 x 2 мм;
- ограниченная площадь установки преобразователя;
- зоны контроля по глубине: от 12 до 130 мм, от 10 до 90 мм, от 60 до 100 мм, от 2 до 45 мм.

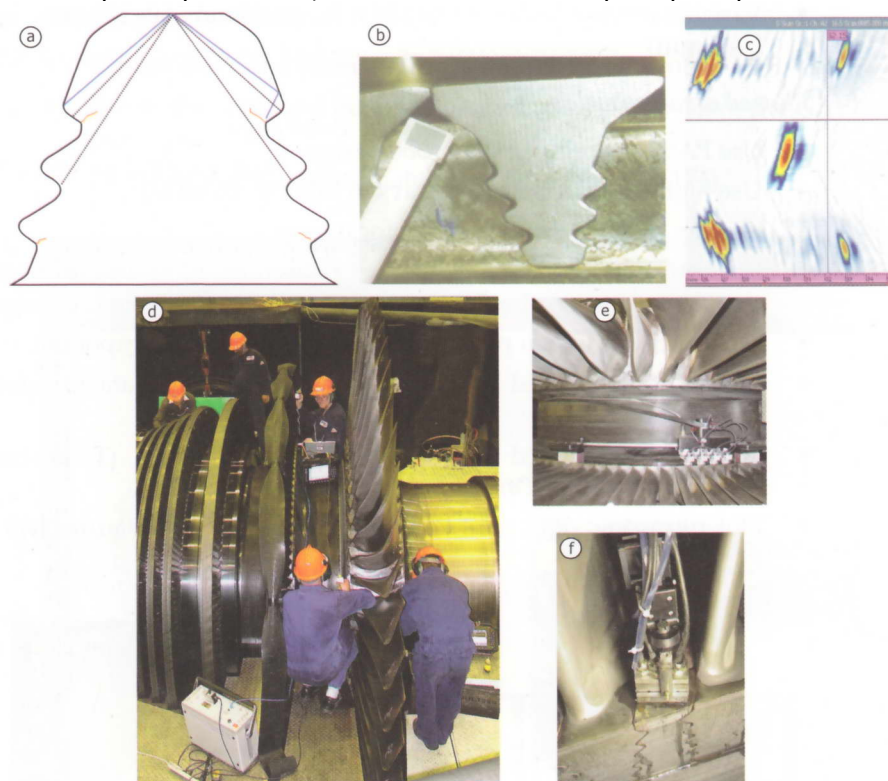
б) Решение задачи

- конструкция преобразователя рассчитана с использованием пакета PASS;
- частота преобразователя – от 6 МГц до 12 МГц;
- фокальные законы рассчитаны с использованием моделирования хода лучей;
- используются 4 фазированные решетки для четырех L-1 steeples и три фазированных решетки для пяти L-0 steeples.;
- для каждого компонента турбины изготовлены специальной формы преобразователи и сканеры;
- использованы 3 прибора (TomoScan III, FOCUS и OmniScan) для автоматизированного и ручного сканирования;
- представление результатов контроля – см. рис. 5.45 и 5.46.



Courtesy of Ontario Power Generation, Canada, and GEC ALSTOM

Рис. 5.45. Представление результатов контроля L-0 blade (слева), и обнаружение пропила размером 9 x 0,5 мм в hook L-1 steeple прибором OmniScan



Courtesy of Ontario Power Generation, Canada

Рис. 5.46. Обнаружение дефектов в L-1 steeple: hook 1 (а и b), типичное изображение (c), контроль приборами FOCUS (d), OmniScan (e) и TomoScan III (f)

5.6.10 Обнаружение и измерение размеров стресс-коррозии на краях дисков

а) Задача контроля

- обнаружение стресс-коррозии малых размеров по краям дисков турбины низкого давления;
- разработка методики различения изображений стресс-коррозии и язвенной коррозии;
- контроль 1 ротора (от 6 до 10 дисков) в течение 1-2 дней;
- достоверные результаты контроля.

б) Решение задачи

- совмещенный или раздельно-совмещенный преобразователь;
- частота 6-10 МГц, продольные волны;
- распознавание образов на изображениях с использованием акустической тени (shadow) и скип-сигналов (рис. 5.48);
- получение дополнительной информации о дефекте по амплитуде сигнала;
- прибор TomoScan III, сжатие информации и высокая частота записи данных;
- шаг сканирования по углу от $0,3^\circ$ до $0,5^\circ$;
- специальная обработка изображений.

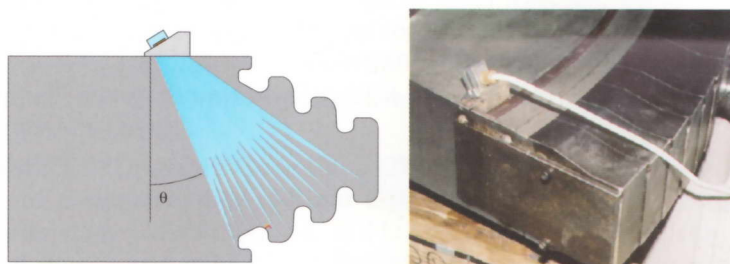


Рис. 5.47. Схема озвучивания дефектной зоны и преобразователь (10 МГц, 32 элемента), установленный на образце

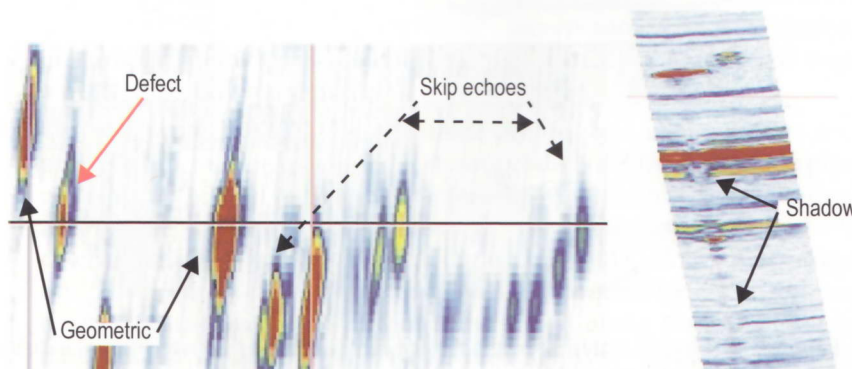


Рис. 5.48. Скип-сигналы от трещин (слева) и эффект акустической тени (справа)

5.6.11 Обнаружение и измерение размеров усталостных трещин в турбинных лопатках

а) Задача контроля

- обнаружение и измерение размеров усталостных и стресс-коррозионных трещин в турбинных лопатках;
- сложная геометрия и ограниченный доступ;
- требуется высокая достоверность;
- высокая производительность;
- установка сканера на поверхности разной кривизны.

б) Решение задачи

- моделирование хода лучей для проверки фокальных законов и охвата S-скана;
- линейный или матричный преобразователь частотой от 7 до 10 МГц;
- разработка специального сканера.

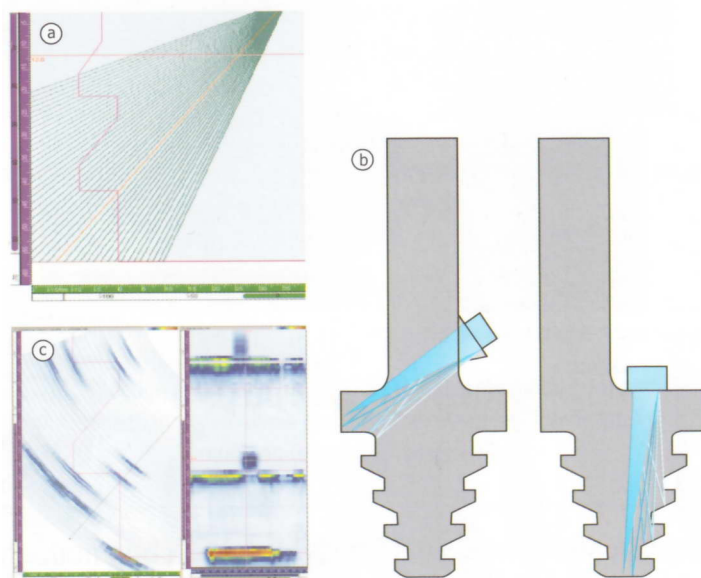


Рис. 5.49. Контроль фазированной решеткой турбинной лопатки: а) моделирование хода лучей; б) схема озвучивания; с) изображение на экране дефектоскопа

5.7 Контроль сварных швов сосудов под давлением

5.7.1 Нормативные документы по контролю сосудов

Обычно сосуды под давлением контролируют согласно кодам ASME в зависимости от их назначения.

Прим. пер.: в зарубежной практике понятие «руководящий документ» принято обозначать словом «code». Здесь я сохраняю терминологию и перевожу это понятие словом «код».

- 1) Группа кодов ASME предписывает общий порядок контроля. Обычный подход предписывает один или два определенных угла ввода, под которыми контролируется сварной шов, зона термического влияния и прилегающий основной металл. Один из углов обычно составляет 45° для поперечной волны, что обеспечивает надежное выявление трещин, выходящих на поверхность благодаря угловому эффекту. Второй рекомендованный угол ввода отличается не менее чем на 10° и выбирается исходя из особенностей контролируемого шва и предполагаемых дефектов. Преобразователи с рекомендованными углами перемещаются в заданных пределах таким образом, чтобы при сканировании озвучить необходимый объем шва и околошовной зоны. Конкретные указания приведены в конкретных документах.
- 2) ASME TOFD: Код ASME 2235 разрешает использование автоматизированного метода TOFD для контроля сварных швов толщины большей чем 12,7 мм (полдюйма). TOFD наиболее полезен для обнаружения и измерения размеров дефектов в средней части шва. Однако, результаты, полученные данным методом сложны для расшифровки, а сам метод имеет мертвые зоны вблизи наружной и внутренней поверхности шва. В настоящее время не существует северо-американских стандартов, регулирующих применение метода TOFD. В Евросоюзе и Великобритании существуют два стандарта: BS7706:1993 и ENV 583-6. ASME 2235 имеет неутвержденные критерии приемки по информации,

полученной по методу TOFD, которые требуют обязательного подтверждения достоверности результатов.

Прим. пер.: книга издана в 2007 г.; не исключено, что к настоящему времени были введены соответствующие новые стандарты, однако я это не проверял

- 3) Коды по линейному сканированию: это в первую очередь API 5L и другие. Для контроля кольцевых швов трубопроводов чаще всего используется код ASTM E-1961. Это единственный обязательный код, касающийся автоматизированного ультразвукового контроля, предписывающий использование «зонной дискриминации» для швов с узким валиком усиления. «Зонная дискриминация» подразумевает разделение шва на вертикальные зоны, каждая из которых контролируется сфокусированным наклонным лучом; при этом преобразователь перемещается по окружности трубы на определенном расстоянии от шва; затем смещается по оси трубы для контроля следующей зоны и т.д. Для данной технологии допускается использовать как традиционные методы контроля, так и фазированные решетки. Код ASTM E-1961 совместим с большинством кодов ASME.

Технология контроля фазированными решетками предполагает существенные изменения в технологии контроля сосудов давления. Вместо поперечного перемещения преобразователя (растрового сканирования) фазированные решетки предполагают электронное поперечное сканирование, что уменьшает время на сканирование. При этом преобразователь перемещается механически только в продольном направлении (вдоль контролируемого сварного шва). Отличие традиционного и нового методов иллюстрируются на рис. 5.50.

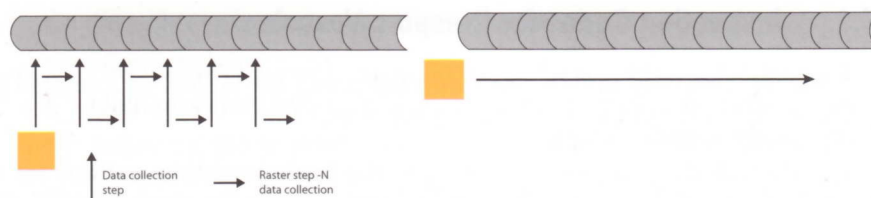


Рис. 5.50. Сравнение традиционного растрового сканирования (слева) и сканирования фазированной решеткой (справа). Электронное поперечное сканирование обеспечивает контроль всего сечения шва из одного положения преобразователя, а его механическое перемещение обеспечивает контроль всей протяженности шва.

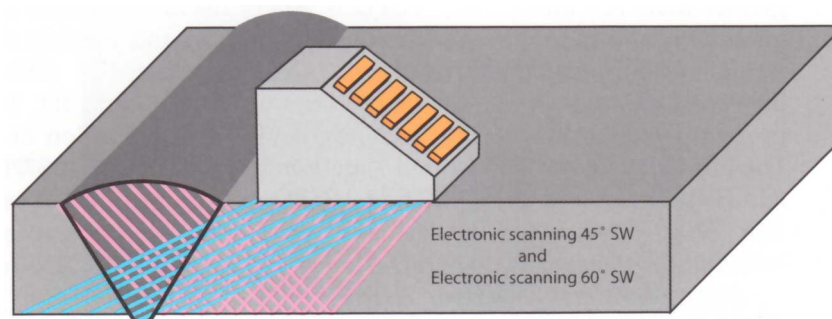


Рис. 5.51. Озвучивание сварного шва прямым и отраженным лучом под фиксированными углами с помощью электронного сканирования. Тот же преобразователь может реализовывать метод TOFD.

Преимущество фазированных решеток состоит в том, что возможно выполнять озвучивание под множеством углов, или выполнять линейное сканирование под заданными углами. Рис. 5.51 показывает, как фазированной решеткой выполняется электронное сканирование под углами 60° (прямым лучом) и 45° (отраженным лучом) поперечной волной, что полностью соответствует требованиям кода ASME.

Возможно множество подходов, реализующих контроль сосудов в соответствии с требованиями кода, например следующие:

- TOFD в сочетании с эхо-импульсным для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов;
- растровое сканирование согласно ASME эхо-импульсным методом в сочетании с TOFD;
- усовершенствованные многоканальные технологии контроля (см. гл. 5.7.3);
- зонная дискриминация (см. раздел 5.8).

Основные трудности при контроле сосудов высокого давления и их решения перечислены ниже.

а) Основные задачи и трудности контроля

- необходимо надежно обнаруживать дефекты сварки заданной ориентации;
- быстрый, высокопроизводительный контроль;
- отображение результатов в форме, легкой для расшифровки;
- низкая стоимость контроля;
- ультразвуковой контроль должен полностью заменять радиографический и рентгеновский виды контроля (из соображений безопасности).

б) Решение задач

- использование фазированных решеток, обеспечение прозвучивания под двумя или более углами ввода и дополнительно методом TOFD;
- использование линейного продольного сканирования для ускорения процесса контроля;
- использование «верхнего, бокового, торцевого» изображений, или «верхнего, бокового и TOFD» изображений;
- размеры дефектов на изображениях измеряются с помощью измерительных курсоров на экране дефектоскопа;
- правильный выбор манипулятора: сканер на магнитных колесах, «охватывающий» сканер для малых диаметров, вращение самого объекта контроля, манипулятор-робот, ручное сканирование с различными датчиками координаты и т.п.

5.7.2 Система PV-100: линейное сканирование с использованием TOFD и эхо-импульсного метода

а) Особенности задачи контроля

- требуется недорогое оборудование;
- портативность;
- обязательное соответствие стандарту;
- автоматизация необязательна.

б) Решение задачи

- линейное сканирование ручным сканером (рис. 5.52-5.53);
- недорогой прибор – OmniScan;
- недорогой ручной труд оператора: отсутствие автоматизации снижает стоимость.

с) Ограничения

- портативная система имеет ограниченные возможности по сравнению с TomoScan FOCUS или TomoScan III;
- ручное сканирование менее надежно, чем автоматизированное;
- полученные изображения хуже по качеству;
- зона контроля меньше, чем при использовании более сложных систем (см. раздел 5.7.3).

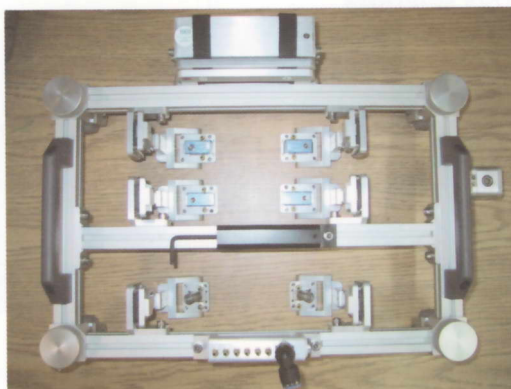


Рис. 5.52. Сканер HST-X03. Данный блок содержит обычные преобразователи и TOFD, однако в него возможно установить фазированные решетки.

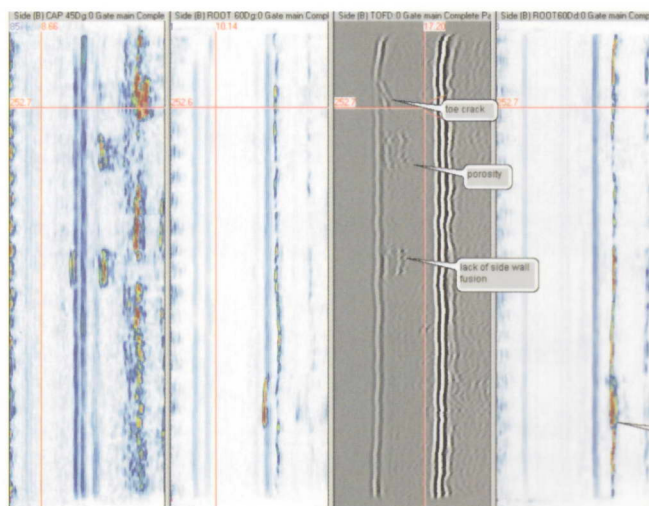


Рис. 5.53. Контроль сосуда давления комбинацией эхо-импульсного и TOFD.

Данные методы хорошо работают совместно. Например, TOFD пропустил дефект – непровар в корне шва, который на развертке эхо-метода хорошо виден.

5.7.3 Система PV-200: универсальная система с фазированными решетками и TOFD

а) Задачи контроля

- универсальная система для контроля широкого диапазона толщин сосудов высокого давления и различной геометрии в соответствии с различными нормативными документами;
- автоматический, полуавтоматический и ручной контроль;
- реализация различных техник контроля – эхо-импульсный метод, дифракционно-временной метод, зонная дискриминация, сочетание методов;
- использование различных сканеров;
- высокоскоростное сканирование и сбор данных;
- программное обеспечение, обеспечивающее всесторонний анализ данных.

б) Решения задач

- прибор TomoScan III для скоростного сбора данных (рис. 5.54);
- электронное и механическое сканирование, зонная дискриминация, эхо-метод и TOFD (рис. 5.55);
- использование сканера TRAKER (см. раздел 5.7.5);
- программное обеспечение TomoView 2, обеспечивающее всесторонний анализ данных: отображение всех видов разверток и измерительные курсоры в 3-мерных координатах (рис. 5.56 и 5.57);
- гибкий подход к решению задач.



Рис. 5.54. Система для контроля сосудов на основе прибора TomoScan III

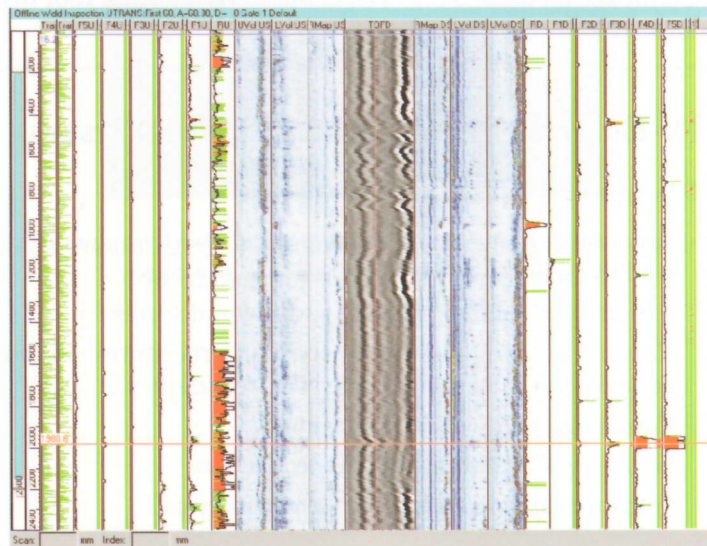


Рис. 5.55. Отображение результатов контроля с использованием зонной дискриминации (см. раздел 5.8)

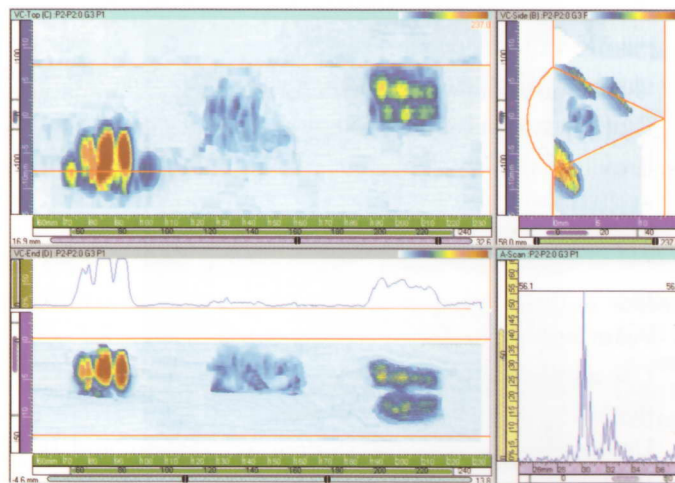


Рис. 5.56. Типичные виды сварного шва, отображающие расположение и форму дефектов

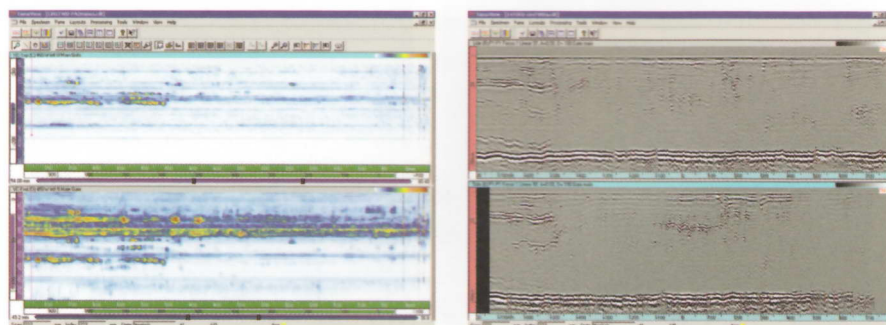


Рис. 5.57. Объединенные В- и С-сканы и двойной TOFD-скан сварного шва.

5.7.4 Система PV-300: система высшего класса, использующая ультразвуковые и вихретоковые фазированные решетки

а) Задачи контроля

- обеспечение максимальной информации о качестве ответственных деталей;
- контроль в объеме 200% для каждой области детали (поверхность, подповерхностная область, средняя часть), т.е. полный контроль двумя методами (рис. 5.58);
- обнаружение продольных и поперечных дефектов;
- обнаружение поверхностных дефектов в автоматическом режиме;
- отличное документирование результатов контроля.

б) Решение задач

- применение нескольких фазированных решеток в продольном направлении;
- использование дополнительных преобразователей под углами 45° и 70° для поиска поперечных дефектов;
- использование эхо-импульсного метода, TOFD, контроля по схеме «тандем» и зонной дискриминации;
- использование двустороннего TOFD;
- использование улучшенной технологии формирования луча для получения «обратного» сигнала диффракции и улучшенного TOFD;
- использование вихретокового метода для поиска поверхностных и подповерхностных дефектов;
- адаптация сканирующей системы и преобразователей к конкретной задаче.

в) Преимущества системы PV-300 (рис. 5.59)

- двойной контроль всех областей: эхо-метод и вихретоковые решетки для поверхности; тандем и TOFD для средней части; двунаправленные TOFD-пары для лучшего определения размеров дефектов; пары преобразователей под двумя углами для обнаружения поперечных дефектов;
- увеличенное количество элементов в преобразователях для более детального контроля сварных швов большой толщины;
- наибольший объем и достоверность контроля ответственных деталей;
- наиболее точное определение размеров дефектов.

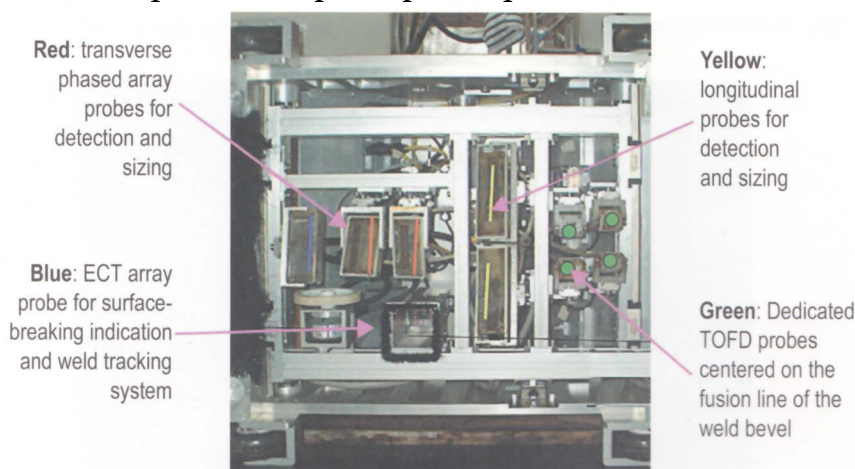


Рис. 5.58. Размещение преобразователей в сканере системы PV-300. Маркировка блоков: Red – решетки поперечных волн; Yellow – решетки продольных волн; Green – преобразователи для метода TOFD, центрированные относительно валика усиления шва; Blue – вихретоковые преобразователи для обнаружения поверхностных дефектов



Рис. 5.59. Сканирующий блок системы PV-300 (слева) и система, смонтированная на тележке, включающая 3 блока TomoScan III или FOCUS, вихретоковую аппаратуру и систему обеспечения акустического контакта (справа)

5.7.5 Типичные сканеры для контроля сосудов

На рис. 5.60-5.65 показаны фотографии различных механических систем сканирования сварных швов. Выбор конкретной системы определяется спецификой задачи, бюджетом и т.п.

а) Вращение объекта контроля



Рис. 5.60. Закрепленная акустическая головка, содержащая 2 фазированных решетки, контактирующая с вращающимся сосудом

б) «Охватывающий» сканер для труб менее 2 метров в диаметре



Courtesy of Canspec, Canada

Рис. 5.61. Сканер, охватывающий трубу по периметру, содержащий 2 хорошо защищенных фазированных решетки

в) Сканер на магнитных колесах

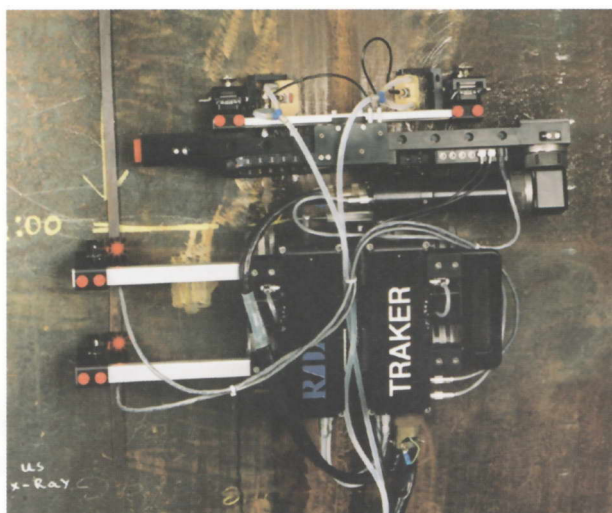


Рис. 5.62. Сканер TRAKER на магнитных колесах, перемещающийся вдоль шва и использующий 2 фазированных решетки для эхо-импульсного метода и TOFD. При движении сканер следует за специальной магнитной лентой и может контролировать патрубки и иные компоненты сложной формы

г) Ручное сканирование



Рис. 5.63. Приспособление для ручного сканирования сварных швов. Данная версия может содержать фазированные решетки или несколько традиционных преобразователей (см. разделы 4.2.10 и 5.7.2)

д) Сканер-робот

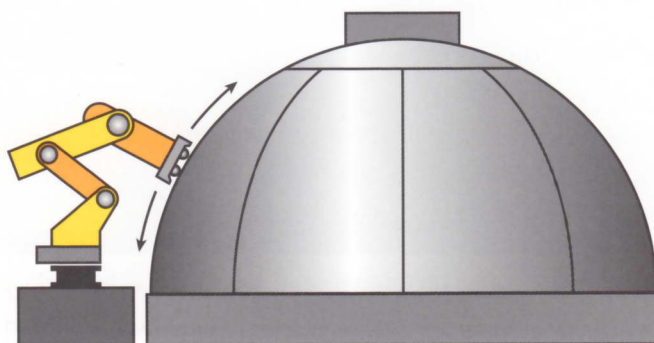


Рис. 5.64. Робот-манипулятор, контролирующей изогнутую поверхность сосуда. Искательная головка содержит 2 фазированные решетки для эхо-импульсного метода и TOFD.

е) Датчик координаты для ручного контроля

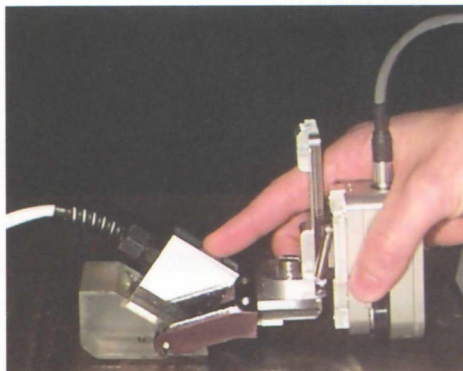


Рис. 5.65. Фазированная решетка с датчиком координаты. Это наиболее простое и дешевое решение для контроля с использованием фазированных решеток.

5.8 Фазированные решетки для контроля трубопроводов

При автоматизированном контроле трубопроводов фазированные решетки предоставляют большие возможности, чем традиционные системы с множеством обычных преобразователей.

5.8.1 Стандартная зонная дискриминация сварного шва трубопровода

а) Задачи и сложности контроля

- быстрый и надежный контроль газопровода с узкими валиками усиления сварного шва с использованием зонной дискриминации (рис. 5.66 и 5.67);
- обнаружение дефектов малых размеров;
- обнаружение дефектов четко выраженной ориентации, например вертикальных непроваров;
- определение размеров с точностью не хуже чем ± 1 мм;
- приемка или браковка сварного шва в реальном времени (рис. 5.68-5.69).

б) Решение задач

- использование 2 фазированных решеток по сторонам шва для реализации эхо-метода, TOFD и «тандем», а также специальных методов (рис. 5.70 и 5.71);
- использование сильно сфокусированных лучей;
- использование зонной дискриминации согласно коду ASTM E-1961-98;
- сканирование со скоростью 100 мм/с, отображение многополосных диаграмм;
- измерение амплитуды и времени прихода сигналов;
- использование цветового порога амплитуды для наблюдения записываемых дефектов в реальном времени;
- использование специальных таблиц для быстрой оценки допустимости дефектов.

в) Преимущества фазированных решеток перед обычными преобразователями

- автоматизированная процедура настройки (рис. 5-72);
- линейное сканирование с большим количеством зон (рис. 5.73);
- лучшее формирование луча и изображений (рис. 5.74);
- возможность настройки для контроля большой номенклатуры диаметров, толщин, профилей шва;
- экономически эффективный контроль вследствие экономии времени;
- снижение затрат на аппаратуру (один комплект подходит для всего);
- подходит для специальных задач – бесшовные трубы, оболочки, толстостенные трубы, малые диаметры;
- удаленное управление – сканер может управляться через Internet.

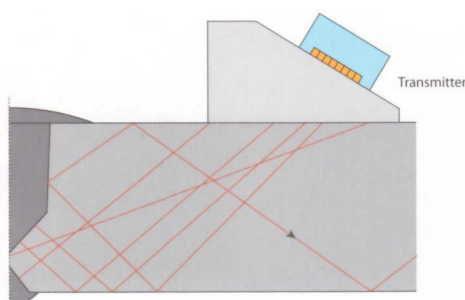


Рис. 5.66. Схема зонной дискриминации, разделяющая сварной шов на зоны с индивидуальными настройками углов ввода, глубины фокуса для обнаружения непроваров и других дефектов.

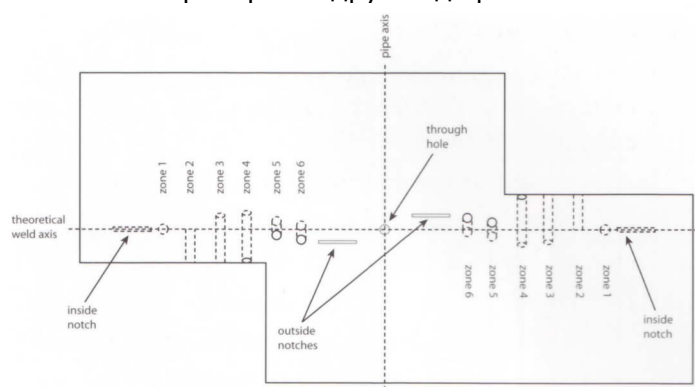


Рис. 5.67. Стандартный образец с плоскодонными отверстиями для каждой зоны.

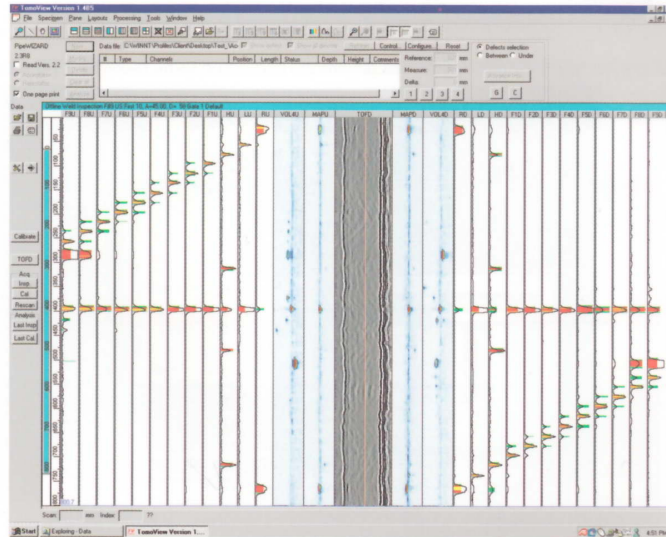


Рис. 5.68. Сигналы настройки от плоскодонных отверстий в стандартном образце. Каждая полоса соответствует конкретной зоне. Трещины фиксируются на скане TOFD, а пористость – на двух В-сканах

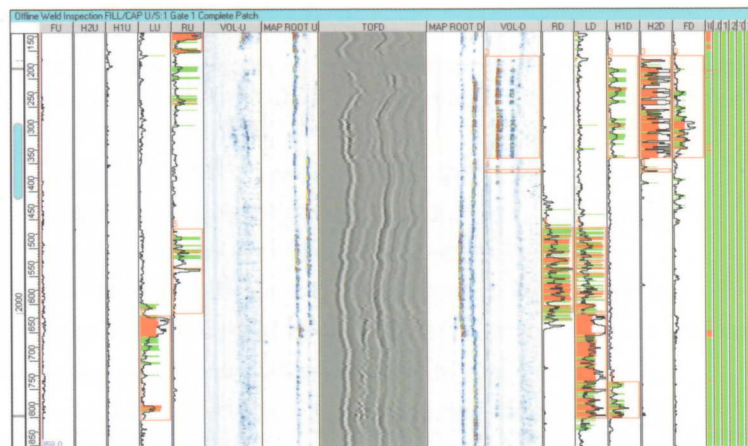


Рис. 5.69. Зонная дискриминация при контроле трубопровода. Сигналы, превышающие пороговый уровень, отображаются красным цветом, а не достигающие порога – зеленым, что облегчает распознавание дефектов, измерение их размеров и положения.



Рис. 5.70. Система PipeWIZARD, включающая компьютер, Tomoscan FOCUS, блок управления, монитор, клавиатуру.

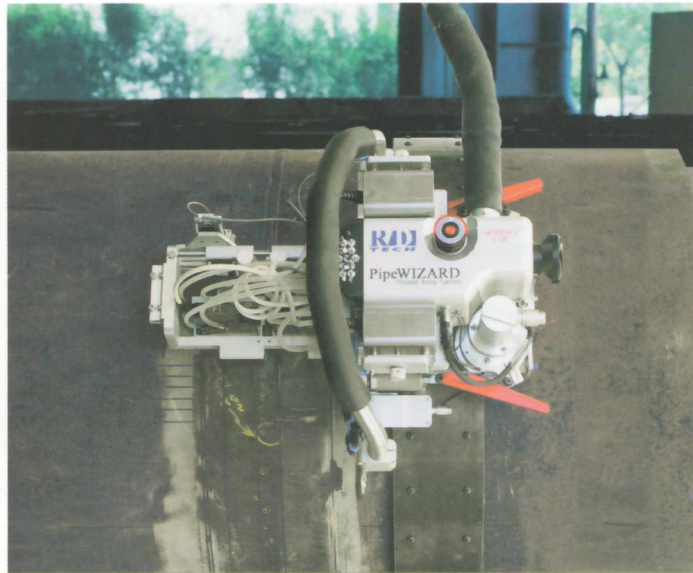


Рис. 5.71. Сканер системы PipeWIZARD, содержащий 2 фазированные решетки по 128 элементов каждая, датчик координаты и систему подачи контактной жидкости (воды).

Channel	Tx/Rx	Name	Config	Wave	Angle	Path	Element	Nb Activ	Index	Velocity	Skew	C
1	Tx/Rx	Root US	Pulse.Ec.	Shear	60.0	30.56	37	17	-26.98	3230	270	
2	Tx/Rx	Root DS	Pulse.Ec.	Shear	60.0	30.56	101	17	-26.98	3230	90	
3	Tx/Rx	LCP US	Pulse.Ec.	Shear	70.0	40.62	26	17	-38.17	3230	270	
4	Tx/Rx	LCP DS	Pulse.Ec.	Shear	70.0	40.62	90	17	-38.17	3230	90	
5	Tx/Rx	HP US	Pulse.Ec.	Shear	50.0	30.72	42	16	-25.58	3230	270	
6	Tx/Rx	HP DS	Pulse.Ec.	Shear	50.0	30.72	106	16	-25.58	3230	90	
7	Tx	FB1 US	Pitch.Ca.	Shear	95.0	39.84	32	17	-35.13	3230	270	
7	Rx				61.0	18.76	43	17		3230		
8	Tx	FB1 DS	Pitch.Ca.	Shear	95.0	39.84	96	17	-35.13	3230	90	
8	Rx				61.0	18.76	107	17		3230		
9	Tx	FB2 US	Pitch.Ca.	Shear	95.0	42.75	30	17	-37.60	3230	270	
9	Rx				61.0	14.99	50	8		3230		
10	Tx	FB2 DS	Pitch.Ca.	Shear	95.0	42.75	94	17	-37.60	3230	90	
10	Rx				61.0	14.99	114	8		3230		
11	Tx	FB3 US	Pitch.Ca.	Shear	95.0	46.39	28	16	-40.70	3230	270	
11	Rx				61.0	11.22	52	9		3230		
12	Tx	FB3 DS	Pitch.Ca.	Shear	95.0	46.39	92	16	-40.70	3230	90	
12	Rx				61.0	11.22	116	9		3230		

Index=26.98 mm
Path US=30.56 mm
X=-0.51 mm
Y=15.28 mm
WD=37.60 mm
WD=16.18 us
Gate S=3.00 mm
Gate E=3.00 mm

Рис. 5.72. Процедура автоматической настройки на контроль сварного шва трубопровода. Оператор вводит профиль сварного шва как чертёж в AutoCAD, затем программа сама рассчитывает фокальные законы и необходимые установки.

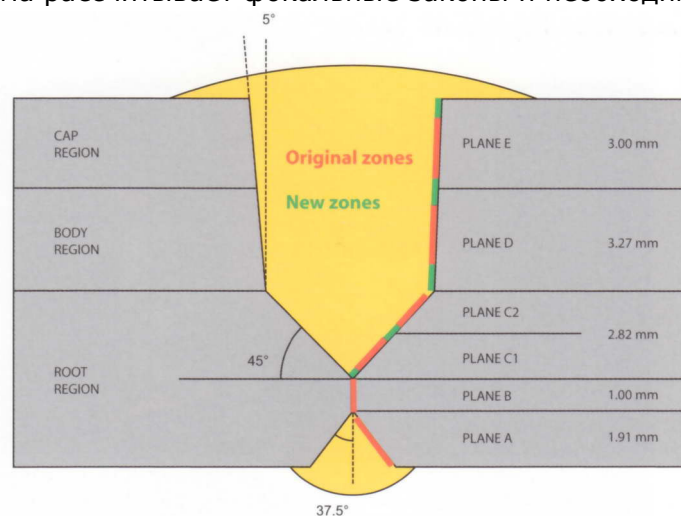


Рис. 5.73. Разделение шва на зоны. Для улучшения точности изображения дефектов допускается вводить большее число зон. Данная возможность уникальна для фазированных решеток и определяется максимальным количеством каналов в системе контроля.

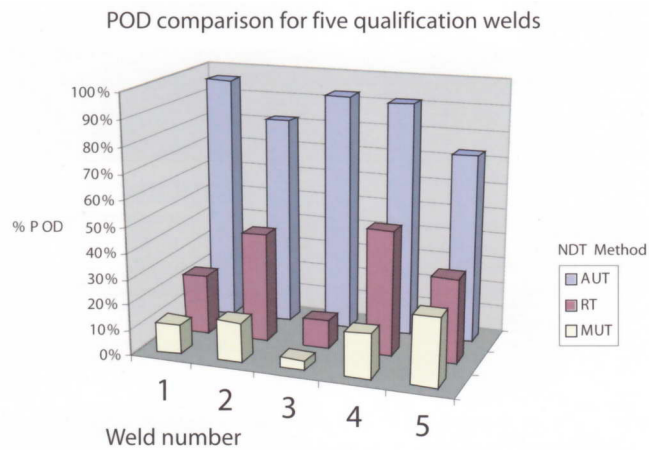


Рис. 5.74. Сравнение автоматизированного УЗК (AUT), радиографического (RT) и ручного УЗК (MUT). Обнаружение дефектов автоматизированным УЗК с фазированными решетками намного лучше, чем другими методами благодаря использованию сфокусированных лучей.

5.8.2 Бесшовная сварка труб

а) Задачи и сложности контроля

- толщина стенки может изменяться в пределах $\pm 12\%$;
- вариации толщины стенки мешают точному применению зонной дискриминации;
- обычное сканирование слишком медленно.

б) Решение задач

- использование нескольких настроек для различных фактических толщин труб;
- одновременное выполнение настроек;
- измерение толщины стенки по каналу TOFD и выбор соответствующей настройки для правильной оценки дефектов.

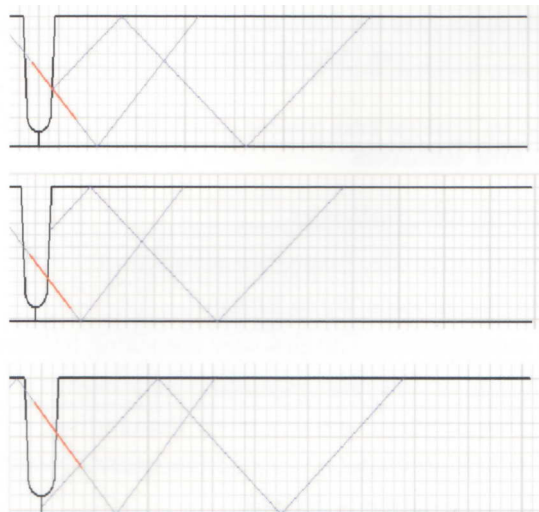


Рис. 5.75. Ход лучей для номинальной, максимальной и минимальной толщин стенки трубы. Если фактическая толщина стенки отличается от предполагаемой, дефект будет пропущен.

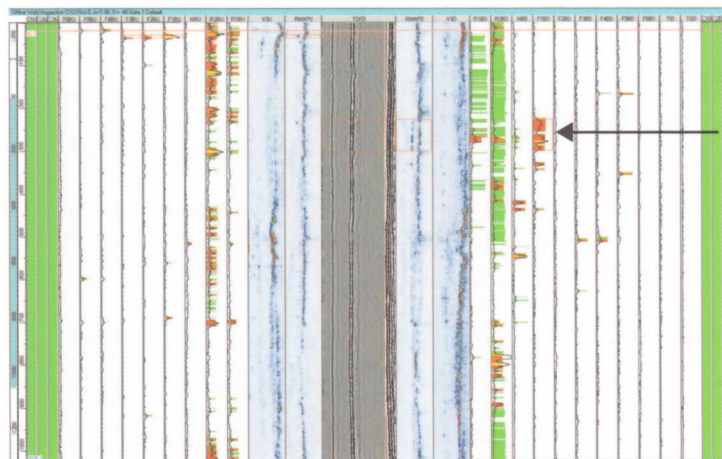


Рис. 5.76. Изображение результатов контроля. Стрелкой показан выявленный недопустимый дефект.

5.8.3 Risers and Tendors

а) Задачи и трудности контроля

- требуется очень высокая достоверность контроля;
- большие толщины стенок труб – до 50 мм;
- оптимальные углы ввода сильно зависят от расположения дефекта в шве;
- требуется очень высокая вероятность обнаружения дефекта;
- требуется очень точное определение размеров дефекта;
- требуется высокая скорость контроля;
- требуется полное документирование результатов контроля.

б) Решение задач

- зонная дискриминация с очень большим количеством каналов;
- углы ввода выбираются соответственно различным частям шва;
- для увеличения вероятности обнаружения дефекта используются дополнительные лучи в отдельных зонах (корень шва, например) – см. рис. 5.77 – 5.79;
- используется TOFD и специальные методики, например «обратная» дифракция.

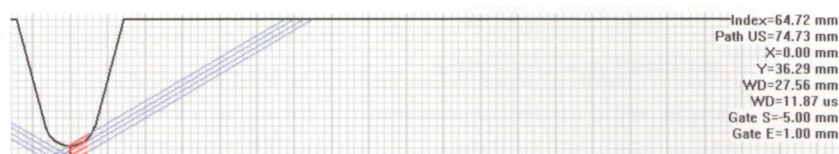


Рис. 5.77. Моделирование хода лучей для обнаружения дефекта в корне шва

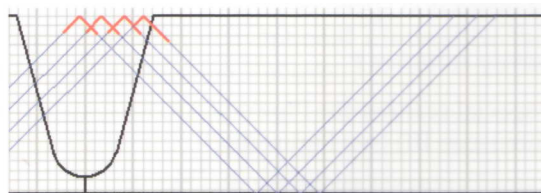


Рис. 5.78. Моделирование хода лучей для обнаружения дефекта в верхней части шва.

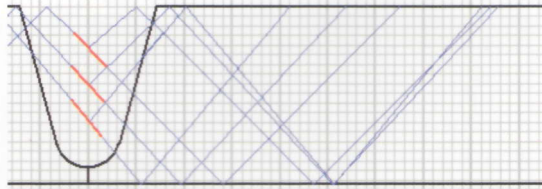


Рис. 5.78. Различное озвучивание средней части шва для большей вероятности обнаружения растрескивания.

с) Преимущества перед обычными преобразователями

- фазированные решетки могут создавать большее количество лучей (84) по сравнению с традиционными преобразователями (26) в данной задаче;
- более простое обнаружение дефектов;
- фазированные решетки обеспечивают большую плотность контроля в критических зонах;
- каждая зона может быть проконтролирована под разными углами ввода, что увеличивает вероятность обнаружения дефектов;
- фазированные решетки лучше приспособлены для таких технологий контроля, как, например, «обратная» дифракция.

5.8.4 Трубы малого диаметра

а) Задачи и трудности контроля

- прозвучивание под одним углом недостаточно для полного контроля шва;
- существуют трудности доступа к шву;
- требуется оценка шва по двухбалльной системе – «годен или не годен»;
- требуется портативная и недорогая аппаратура;
- требуется быстрый контроль.

б) Решение №1

- применение специального сканера для системы PipeWIZARD (рис. 5.80);
- использование малогабаритных фазированных решеток в случае ограниченного доступа;
- использование притертых призм;
- прозвучивание под определенными углами;
- программный алгоритм для принятия решения «годен/не годен».

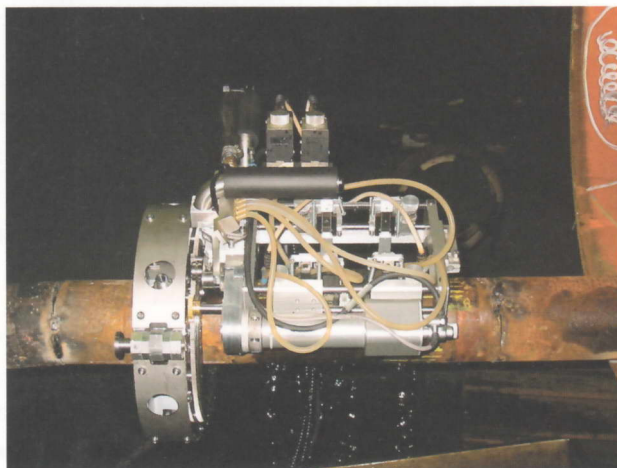


Рис. 5.80. Фотография кольцевого сканера для труб диаметром от 63 мм до 400 мм

в) Преимущества решения №1

- удобно, если вы уже являетесь владельцем системы PipeWizard, или прибора TomoScan;
- обеспечивает надежный, достоверный контроль;
- высокая скорость контроля;
- отличная визуализация и документирование данных.

г) Решение №2

- использование специализированного «орбитального» сканера (рис. 5.81-5.82);
- прибор OmniScan для портативности;
- относительно низкая стоимость;
- лучшее качество контроля, чем традиционные методы, но меньше возможностей, чем у решения №1.

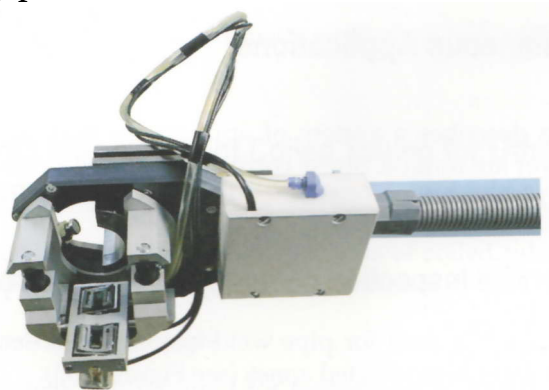


Рис. 5.81. «Орбитальный» сканер с двумя фазированными решетками. Сканер зажимается на трубе, затем преобразователи совершают полный оборот вдоль шва.



Рис. 5.82. Сканер, установленный на сварном шве для контроля в процессе монтажа

5.9 Прочие применения

В данном разделе описываются специфические задачи контроля в различных отраслях промышленности, успешно решаемые фазированными решетками.

5.9.1 Контроль труб в эксплуатации на предмет стресс-коррозионных трещин

Прибор Omniscan можно использовать для контроля сварных швов на предмет стресс-коррозионных трещин в зонах, подверженных нагреву (рис. 5.83). Для этой задачи используют S-скан и ручной контроль, т.к. стресс-коррозионные трещины отражают хорошо под различными углами.



Рис. 5.83. Контроль сварных швов на нефтеперерабатывающем заводе.

5.9.2 Контроль сварных швов coiled труб в нефтехимических производствах

а) Задачи и трудности контроля

- требуется надежный и высокоскоростной контроль;
- различные толщины и диаметры, а также овальность сечения труб;
- необходимо следовать требованиям ASTM 273 и API 5LCP;
- требуется быстрое распознавание наличия и типа дефекта.

б) Решение задачи

- использование двух фазированных решеток для контроля шва, и четыре – для измерения толщины (рис. 5.84);
- использование специального алгоритма для отстройки от сигналов, связанных с геометрией сварного шва (рис. 5.85);
- притертые призмы под диаметр контролируемых труб.

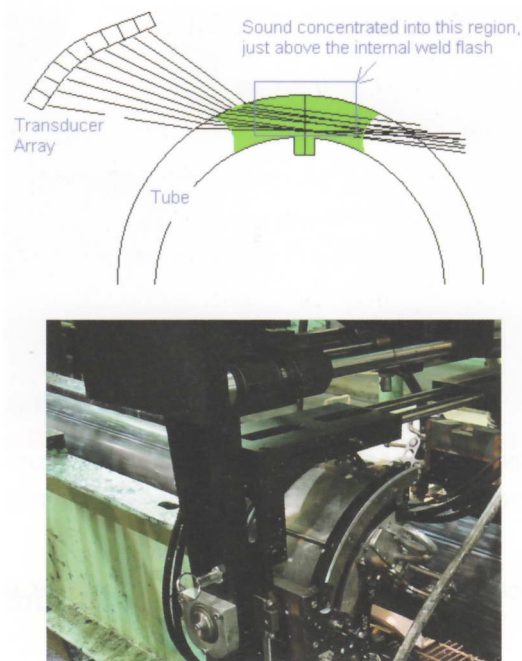


Рис. 5.84. Контроль фазированной решеткой coiled труб: принцип (сверху) и фотография сканера (снизу)

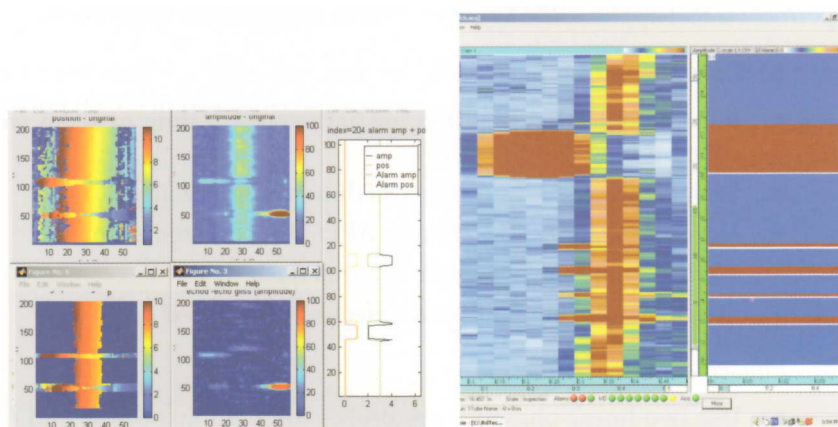


Рис. 5.85. Результаты контроля с обработкой по алгоритму отстройки от внутренней геометрии шва.

5.9.3 Контроль тавровых сварных швов мостовых конструкций

а) Задачи и трудности контроля

- толщина швов от 10 до 16 мм;
- необходимо достоверное обнаружение трещин, непроваров;
- требуется озвучивание под разными углами;
- ограниченное пространство для перемещения преобразователя;
- требуется недорогое оборудование.

б) Решение задачи

- прибор Omniscan и ручное сканирование с датчиком координаты;
- линейная фазированная решетка, 5 МГц, 16 элементов;
- линейное сканирование S-сканом под углами 40° и 70° с каждой стороны шва;
- отображение результатов в реальном времени в виде A- и S-сканов.

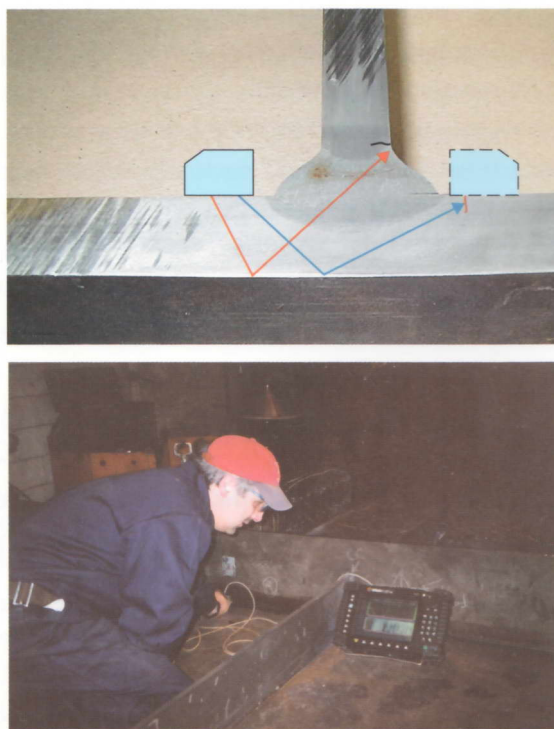


Рис. 5.86. Контроль тавровых соединений мостовых конструкций.

5.10 Заводы и производства

В данном разделе описаны применения фазированных решеток на трубных заводах и других крупносерийных производствах.

5.10.1 Контроль ERW труб

а) Задачи и трудности контроля

- ERW (electric-resistance-welded) трубы имеют различные диаметры от 25 мм до 175 мм и толщины стенки от 1 мм до 6 мм;
- высокая скорость контроля – 2 метра/сек;
- отклонение линии шва - $\pm 30^\circ$;
- геометрические ограничения шва;
- требуемая чувствительность: трещины на наружной и внутренней поверхности – от 5% толщины стенки, боковые отверстия диаметром 1,5 и 3 мм;
- соответствие кодам API 5LX и CSA 662;
- обнаруживаемые дефекты – трещины, прожиги, непровары, холодная сварка;
- углы озвучивания: 45° и 70° поперечной волны;
- документирование результатов контроля на дефекты и профиля шва.

б) Решение задачи

Контроль шва на дефекты сварки:

- по одной фазированной решетке на 128 элементов с каждой стороны шва;
- подбор оптимального угла ввода;
- линейное электронное сканирование по апертуре каждого преобразователя;
- угол ввода поперечной волны от 35° до 70° ;
- контроль акустического контакта по сигналу продольной волны 0° .

Контроль профиля шва:

- фазированная решетка сверху шва, покрывающая пределы его отклонения;
- электронное сканирование по апертуре преобразователя.

Механические решения:

- перекрытие диаметров от 15 мм до 170 мм;
- локальная иммерсионная ванна;
- при прохождении сварного шва через локальную иммерсионную ванну выполняется непрерывный контроль;
- четыре степени свободы для слежения за движением поверхности контролируемой трубы: способность автопозиционирования на любых предусмотренных диаметрах.

в) Требования к аппаратуре

Программное обеспечение:

- специализированный софт с профилями оператора и руководителя;
- сохраняемые настройки;
- функция электронного поиска оптимального угла ввода;
- функция электронной настройки чувствительности;
- возможен вывод данных в виде файлов MicroSoft Access;
- представление информации в виде А-скана и многополосной диаграммы.

Функциональность системы:

- обнаруживаются дефекты: трещины на внешней и внутренней поверхности высотой от 5% толщины стенки, прожиги;
- запись профиля шва с точностью 0.001 дюйма (0,025 мм);
- скорость контроля 2 м/с; обеспечивает обнаружение бокового отверстия диаметром 3 мм.

Перечень аппаратуры:

- 2 модуля QuickScan PA 16:128 элементов;
- 1 промышленный компьютер с монитором и удаленным пультом управления;
- 1 пакет специализированного программного обеспечения;
- 4 фазированные решетки для перекрытия диапазона диаметров от 25 мм до 125 мм в трех поддиапазонах;
- 1 ультразвуковой искательный блок в сборе;
- 1 система позиционирования;
- 1 механизм сканирования;
- 1 система обеспечения акустического контакта;
- 1 консоль для монтажа оборудования;
- 1 basic PLC.

Опции:

- дополнительный ультразвуковой искательный блок;
- для профилометрии: дополнительный блок QuickScan 16:128;
- дополнительные фазированные решетки.

г) Общий вид системы



Рис. 5.87. Контроль ERW-труб фазированными решетками: принцип, вид преобразователя и пример отклонения линии сварного шва

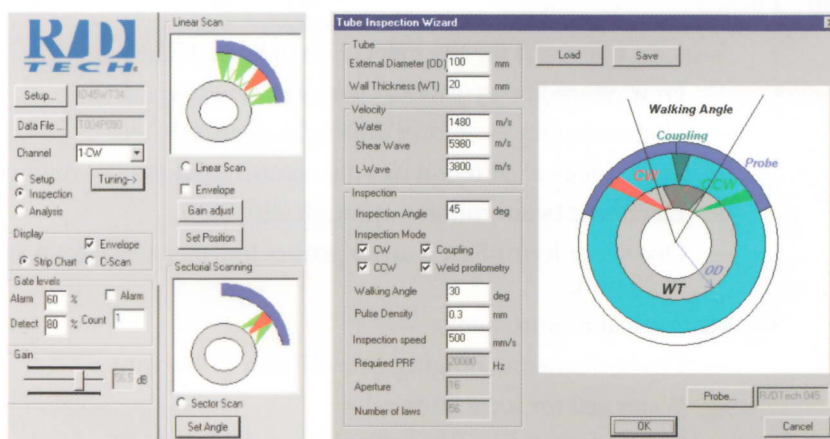
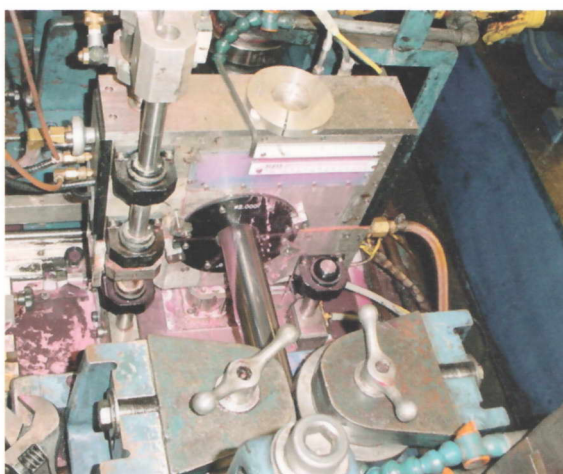


Рис. 5.88. Система с фазированными решетками: общий вид и окна настройки параметров контроля

5.10.2 Контроль основного металла штанг, полос, стержней в производственном потоке

а) Задачи и трудности контроля

Типичные требования к контролю:

- контроль углеродистой стали, нержавеющей стали, пружинных сталей и сталей, содержащих никель;
- скорость контроля 1 метр/сек;
- диаметры изделий – от 15 мм до 75 мм;

- контроль согласно коду API (application program interface);
- длина изделий – от 2 м до 10 м;
- изгиб, коробоватость, волнистость изделий – до 4 мм/метр;
- контроль основного металла проводить продольными волнами под углом 0°;
- контроль на поверхностные дефекты: поперечными волнами под оптимальным углом;
- расстояние между последовательными изделиями – от 1,2 м до 1,5 м;
- неконтролируемые участки на концах изделий – не более 50 мм.

Выявляемые дефекты:

- настройка амплитуды по плоскодонному отверстию диаметром 0,7 мм или эквивалентному боковому отверстию;
- дефекты, вызванные нарушением технологического процесса производства.

б) Решение задачи

Акустические решения:

- применение 4 фазированных решеток, каждая из которых контролирует сектор сечения 90°;
- точная центровка преобразователей относительно изделия;
- фокусировка луча на различной глубине, соответственно диаметру контролируемого прутка;
- электронное сканирование поворотом луча на 360°;
- один и тот же набор из 4 преобразователей перекрывает ряд диаметров, отличающихся до 25 мм.

Механические решения:

- контроль изделий диаметром от 10 мм до 100 мм;
- локальная иммерсионная ванна со способностью «автоцентровки»;
- непрерывное прозвучивание с минимальными неконтролируемыми концами;
- четыре степени свободы для подстройки под кривизну поверхности прутков;
- система позиционирования для адаптации одного набора преобразователей к различным диаметрам.

в) Возможности системы

Программное обеспечение:

- специализированный софт с профилями оператора и руководителя;
- сохранение и загрузка настроек;
- программа-«мастер» для быстрой настройки на новые типоразмеры изделий;
- электронное сканирование для автоматического выравнивания чувствительности по всем каналам;
- алгоритм автоматической калибровки;
- экспорт данных в файл Microsoft Access;
- отображение результатов в виде А-скана и многополосных диаграмм.

Возможности по обнаружению дефектов:

- обнаружение плоскодонного отверстия диаметром 0,7 мм с отношением сигнал-шум не менее 15 дБ;
- обнаружение дефекта 0,35 x 5 мм с отношением сигнал-шум не менее 12 дБ;

- скорость контроля 1,2 метра/сек;
- неконтролируемые концы – менее 10 мм;
- подгружаемые настройки на каждый типоразмер;
- фокусировка на заданной глубине в соответствии с контролируемым диаметром;
- определение поверхностных дефектов глубиной от 0,2 мм до 5 мм с использованием поперечных волн.

г) Общий вид системы контроля

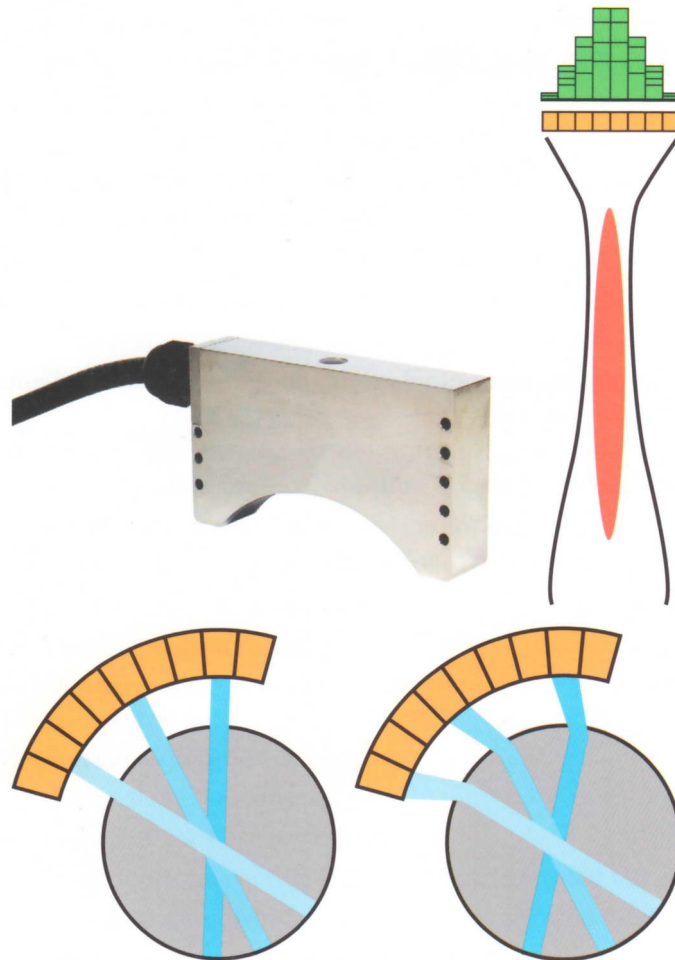


Рис. 5.89. Контроль стержня с помощью фазированных решеток продольной волной под углом 0° и поперечными волнами под оптимальными углами

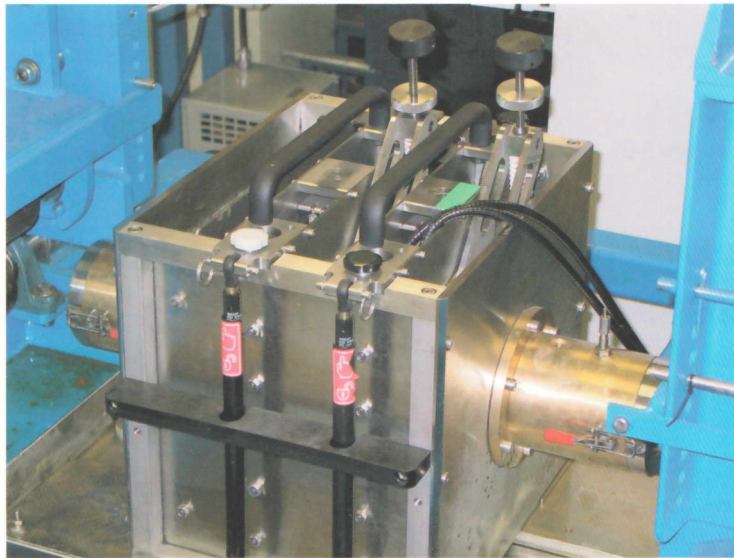
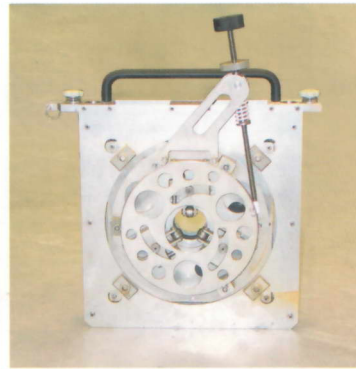
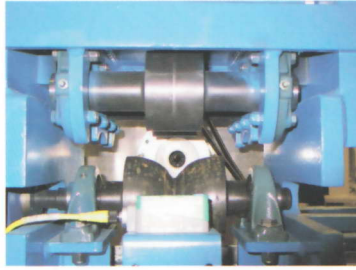
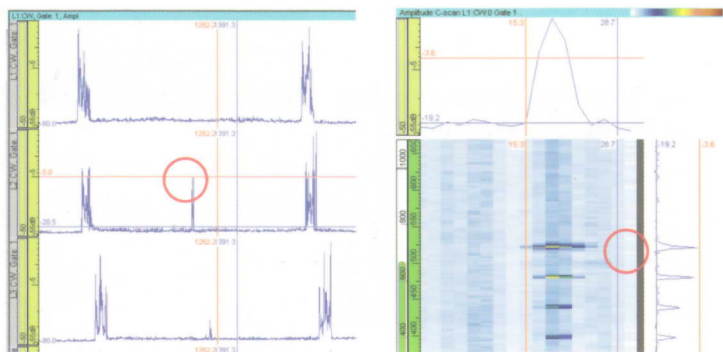


Рис. 5.90. Вид системы с фазированными решетками



Strip chart showing FBH defect at 0.35 mm.

For the supervisor level, A-scan, C-scan, and strip chart display. FBH 0.7 mm at different depths; 2 mm to 15.5 mm with SNR from 10 dB to 15 dB.

Рис. 5.91. Представление результатов контроля

5.10.3 Контроль цельных труб в производственном потоке

а) Задачи и трудности контроля

- контроль большой номенклатуры трубок (диаметры от 15 до 45 мм, толщины от 0,8 мм до 5 мм);;
- контроль большой номенклатуры труб (диаметры от 50 мм до 500 мм и толщины от 2 мм до 25 мм);
- надежное обнаружение дефектов независимо от ориентации: высота дефекта до 0,5 мм, протяженность до 6 мм в основном металле трубок и труб;
- измерение толщины стенки трубы и степени овальности сечения;
- производительность контроля не менее 0,5 метра/сек;
- работа 24 часа в сутки, 7 дней в неделю;
- неконтролируемые области по краям – не более 75 мм;
- перенастройка аппаратуры на контроль другого типоразмера – не более 30 минут.

б) Решение задач

Продольные дефекты:

- фазированные решетки по 128 элементов;
- полное покрытие диаметров от 15 до 45 мм с помощью 4 фазированных решеток;
- полное покрытие диаметров от 45 до 90 мм с помощью 6 фазированных решеток;
- электронное сканирование активной апертурой из 16 элементов;
- электронная фокусировка луча на наружной или внутренней стенке трубы;
- попеременное сканирование по/против часовой стрелки;
- одновременное озвучивание всеми решетками (рис. 5.92).

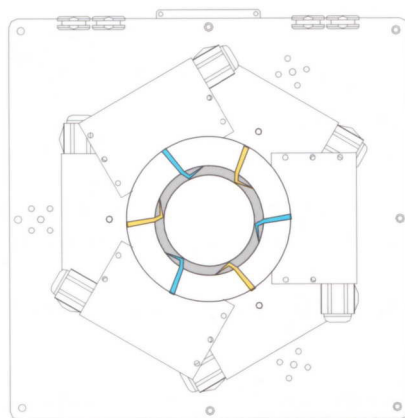


Рис. 5.92. Контроль трубы 6 фазированными решетками на предмет наличия продольных дефектов.

Поперечные дефекты:

- полное покрытие четырьмя коническими фазированными решетками по 64 элемента;
- механическое отклонение луча для возбуждения поперечных волн;
- электронное сканирование 6-элементной апертурой для виртуального вращения луча;
- электронная фокусировка на наружной или внутренней поверхности трубы;
- прямое и обратное направление сканирования по оси трубы;
- одновременное озвучивание с разных сторон (рис. 5.93).

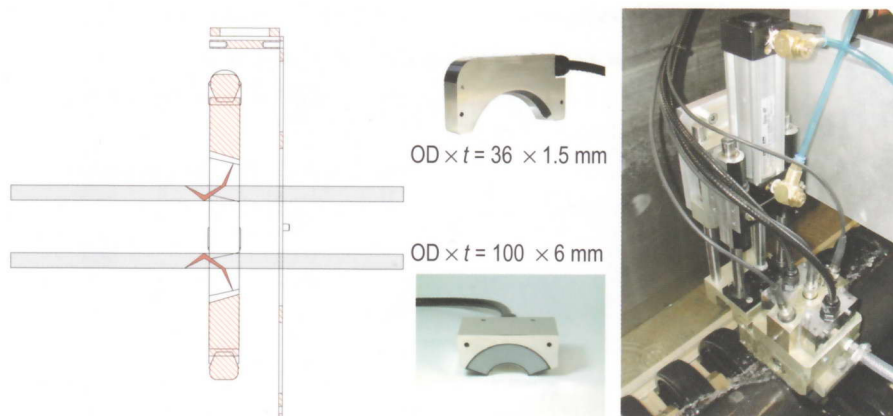


Рис. 5.93. Принцип обнаружения поперечных дефектов фазированными решетками, два типа преобразователей и блок преобразователей в сборе для контроля труб.

Измерение толщины:

- восемь традиционных преобразователей;
- измеряется наружный и внутренний диаметр, вычисляется толщина;
- дополнительно возможно измерение овальности и эксцентриситет толщины стенки в поперечном сечении трубы;
- точность измерения – до 5 мкм.

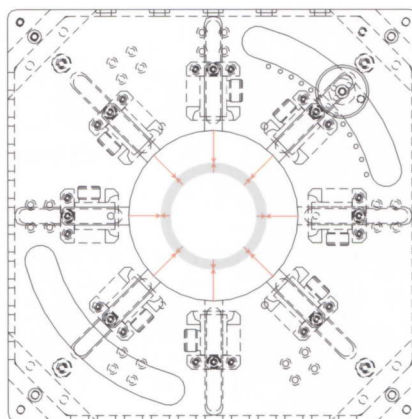


Рис. 5.94. Измерение геометрии трубы с помощью 8 преобразователей

в) Технические характеристики системы

Тип дефектов:

- продольные дефекты длиной 25 мм, глубиной 0,2 мм;
- поперечные дефекты длиной 10 мм, глубиной 0,2 мм.

Воспроизводимость результатов:

- В статическом режиме:
2 дБ (± 1 дБ) по продольной волне
3 дБ ($\pm 1,5$ дБ) по поперечной волне
- В динамическом режиме:
3 дБ ($\pm 1,5$ дБ) по продольной волне
4 дБ (± 2 дБ) по поперечной волне

- соотношение сигнал-шум больше 12 дБ для всех проконтролированных труб;
- неконтролируемые зоны в начале и конце трубы – не более 50 мм;
- скорость контроля: до 1,5 м/с только продольными волнами; до 1 м/с поперечными волнами;
- время на перенастройку аппаратуры – менее 10 минут.

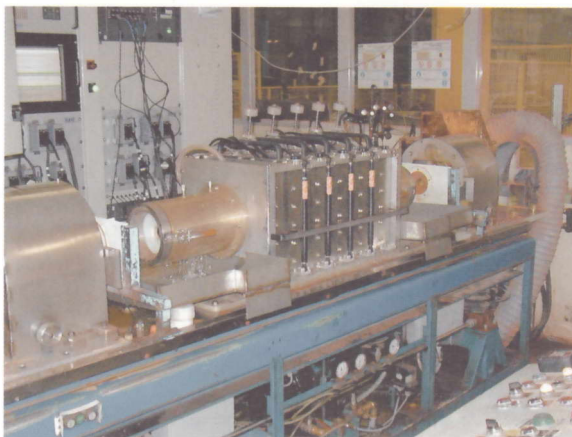


Рис. 5.95. Установка для контроля трубок (сверху) и труб (снизу)

5.10.4 Контроль сварных швов медного контейнера для ядерных отходов

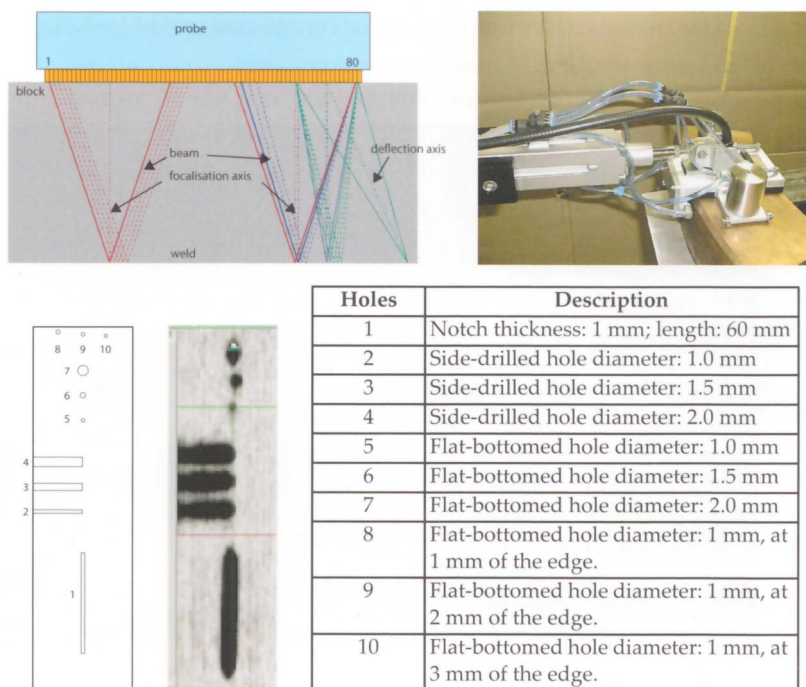
Больше информации о контроле электронно-лучевой сварки контейнеров для радиоактивных отходов можно найти в литературе по ссылке 11.

а) Задачи и трудности неразрушающего контроля

- надежный контроль шва, выполненного электронно-лучевым способом, между контейнером и крышкой толщиной 60 мм;
- крупнозернистая структура;
- удаленное управление;
- высокая скорость контроля;
- аппаратура должна быть опробована на реальных швах.

б) Решение

- электронное и механическое сканирование;
- фазированная решетка на частоту 3 МГц с шагом элементов 1 мм;
- размер активной апертуры оптимизирован на стандартном образце (рис. 5.96);
- сканирование на 360° по окружности контейнера;
- материал – медь (скорость звука 4700 м/с);
- обнаружение плоскодонных отверстий 8, 9 и 10 (см. рисунок) достигается на отдельной настройке – активная апертура из 16 мм, угол ввода 10° .



Courtesy of SKB, Sweden

Рис. 5.96. Контроль фазированной решеткой электронно-лучевого шва между контейнером и крышкой: схема контроля, преобразователь с манипулятором, стандартный образец и его ультразвуковое изображение

5.10.5 Ультразвуковой контроль массивных поковок

а) Задача ультразвукового контроля

- требуется достоверный контроль;
- большой объем контроля;
- требуется документация результатов.

б) Решение задачи контроля

- использование фазированных решеток для увеличения зоны озвучивания и скорости сканирования (рис. 5.97);
- сбор и отображение информации в реальном времени.

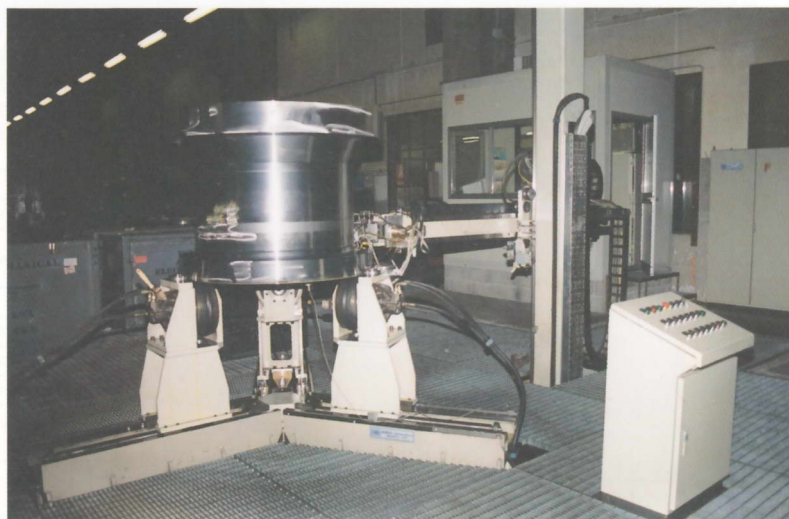


Рис. 5.97. Контроль круглой поковки фазированными решетками.

5.11 Контроль в железнодорожном транспорте

5.11.1 Контроль осей (с колесами или без них)

а) Задачи и трудности контроля

- контроль на месте;
- ограниченный доступ;
- очень малые усталостные трещины в важных зонах;
- продолжительное время непрерывного контроля;
- минимальная стоимость аппаратуры.

б) Решение задачи

- несколько фазированных решеток на поперечных волнах, вводимых под оптимальными углами в диапазоне от 30° до 70° (рис.5.98);
- объединенные сканы;
- возможно использование одной фазированной решетки с большой активной апертурой и прозвучиванием нескольких секторов (в случае, если доступ возможен только с одной стороны оси).

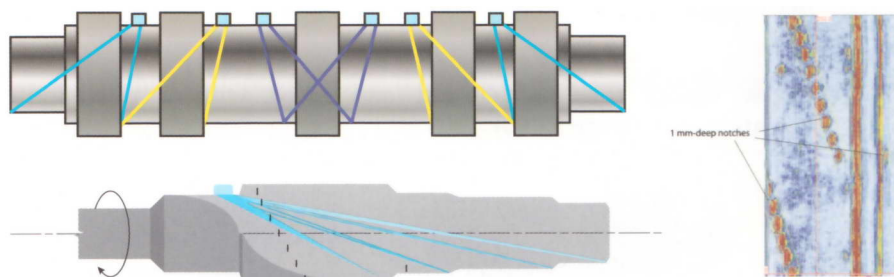


Рис. 5.98. Контроль оси с использованием нескольких фазированных решеток, а также одним преобразователем при ограниченном доступе

5.11.2 Контроль рельсов

а) Задачи и трудности контроля

- обнаружение малых трещин, ориентированных в различных направлениях и расположенных в теле рельса;
- выполнение сканирования на скорости 50 км/час;
- простой анализ и документирование.

б) Решение задачи

- использовать фазированную решетку для контроля металла рельса как показано на рис. 5.99;
- использовать несколько S-сканов;
- отображение данных на двумерных объединенных сканах.

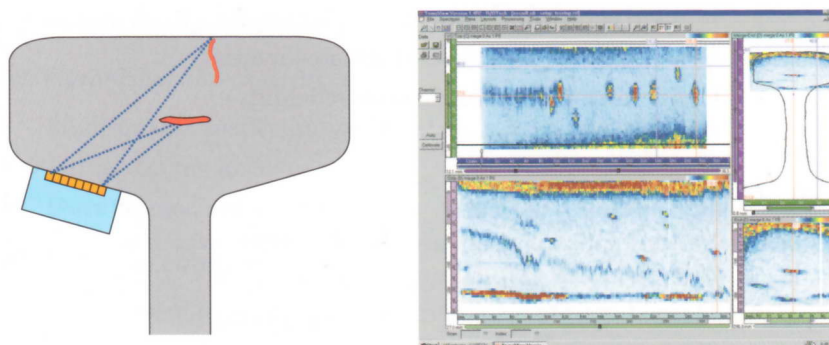


Рис. 5.99. Контроль рельса фазированной решеткой: принцип контроля и форма представления результатов.

Поперечные дефекты могут быть обнаружены в раздельно-совмещенном режиме (рис. 5.100).

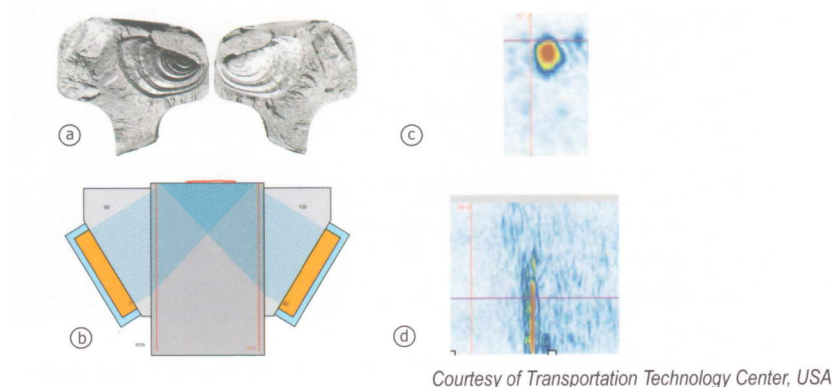


Рис. 5.100. Обнаружение фазированными решетками поперечных трещин. Используются решетки по 60 элементов и линейное сканирование 8-элементной активной группой. Ширина луча в фокусе – 1,2 мм. Измерение дефекта возможно на полученных сканах с и d.

5.11.3 Контроль колес

а) Задачи и трудности контроля

- необходимо обнаруживать дефекты в конкретных зонах колеса (рис. 5.101);
- обнаруживать приповерхностные дефекты;
- высокая скорость контроля;
- недорогое оборудование;
- колеса могут быть изношены или иметь коррозию;
- дружественный интерфейс.

б) Решение задачи

- основано на модуле QuickScan PA (рис. 5.102);
- дружественный программный интерфейс (рис. 5.103);
- контроль выполняется при вращении колеса со скоростью 200 мм/с;
- контроль всех видов колес;
- не требуется механическая настройка;
- настройка чувствительности – по плоскодонному отверстию диаметром 1,6 мм;
- возможно добавить преобразователи для контроля дополнительных областей колеса;
- используется динамическая фокусировка по глубине;
- отображение многополосной диаграммы;
- сигнализация дефекта в каждой зоне;
- автокалибровка без вмешательства оператора;
- повторяемость результатов в статическом режиме $\pm 1,5$ дБ;
- система соответствует коду AAR и/или требованиям заказчика;
- экспорт данных в файл Microsoft Access;
- колесо разделено на зоны контроля, для каждой зоны создается отдельная многополосная диаграмма. Конкретное расположение плоскодонного отражателя вводится в программу, после чего калибровка выполняется автоматически без участия оператора;
- чувствительность по элементам преобразователя выравнивается с точностью до 0,3 дБ;
- преобразователи на частоту 5 МГц по 128 элементов; преобразователи подходят для контроля всех типов колес.

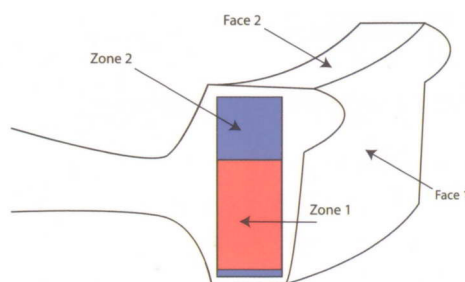


Рис. 5.101. Зоны контроля и поверхности ввода на колесе.

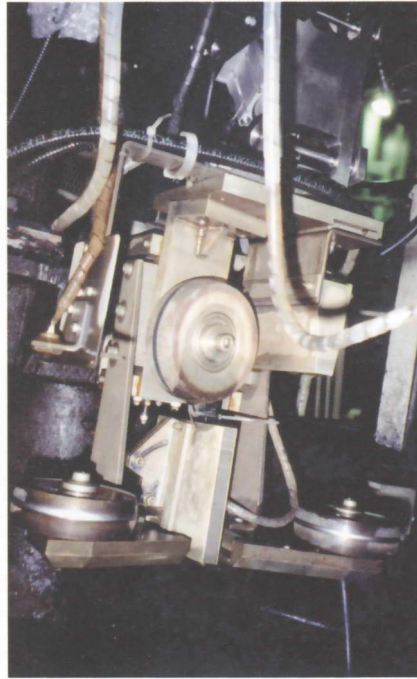


Рис. 5.102. Автоматический контроль железнодорожного колеса на месте.

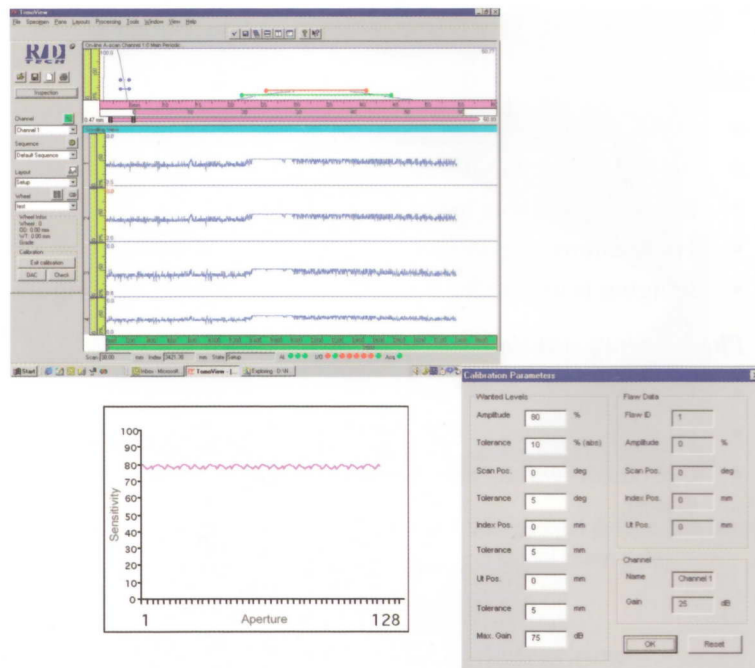


Рис. 5.103. Пример автокалибровки аппаратуры.

5.12 Применение портативных систем с фазированными решетками.

Некоторые портативные решения уже были упомянуты в данной книге, например в разделах 5.6.5, 5.6.9, 5.7.5, 5.8.4, 5.9.1, 5.9.3. Ниже рассказано о других возможных применениях портативного прибора OmniScan. Другие возможные применения в настоящее время разрабатываются, например контроль сварных швов с использованием электронного сканирования в соответствии с требованиями действующих кодов (документов).

5.12.1 Конструктивные сварные швы: тавровые

а) Задачи и трудности контроля

- сложная геометрия;
- относительно большая толщина;
- требуется частый и достоверный контроль;
- требуется недорогая аппаратура;
- важно получение изображений вследствие специфической геометрии.

б) Решение задачи

- использование S-скана в диапазоне углов от 25° до 60° с шагом 0,5° для визуализации структуры;
- использование А-скана для оценки размера по амплитудному признаку;
- использование поперечных волн.

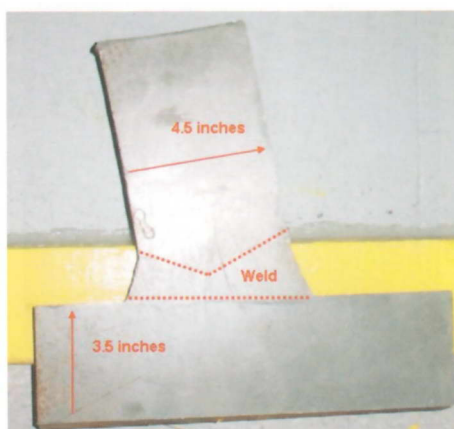


Рис. 5.104. Срез таврового шва большой толщины

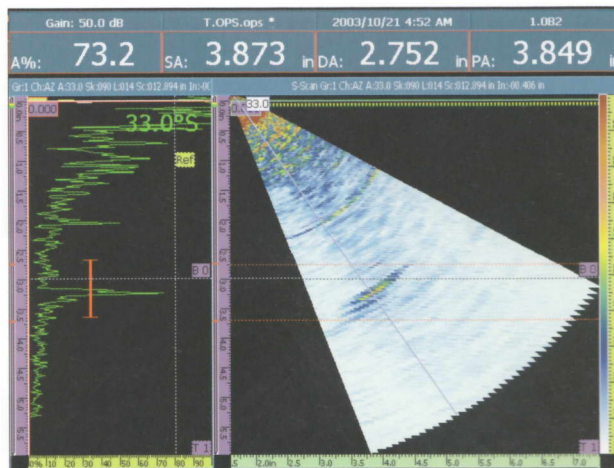


Рис. 5.105. S-скан таврового шва, содержащий сигнал от трещины. А-скан получен по направлению, которое на S-скане задается прямой голубой линией под углом 33°. Красные маркеры на обоих сканах задают временную селекцию (строб).

5.12.2 Конструктивные сварные швы: стыковые

а) Задачи и трудности контроля

- быстрый и надежный контроль сварных стыков трубных и плоских элементов;
- документирование результатов контроля;
- получение изображений для определения условных размеров.

б) Решение задачи

- прибор OmniScan и фазированная решетка с призмой, поперечные волны;
- секторное электронное сканирование поперек шва и механическое перемещение преобразователя вдоль шва;
- сохранение и отображение данных в виде S-сканов или в виде трех видов «верхнего, бокового, торцевого» (рис. 5.106).

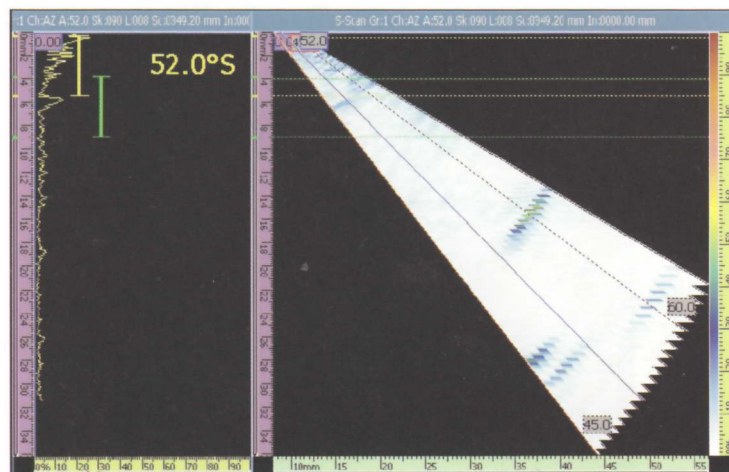


Рис. 5.106. Типичный S-скан сварного шва с образцами непроваров.

5.12.3 Аустенитные сварные швы малого диаметра

а) Задачи и трудности контроля

- быстрый контроль швов из нержавеющей стали (искривление траектории луча и сильное затухание);
- надежность результатов контроля;
- полное документирование результатов.

б) Решение задачи

- использование двух фазированных решеток, размещенных по сторонам от контролируемого шва;
- калибровка выполняется с созданием кривой ВРЧ по двум точкам – пропилам на глубину 10% толщины шва на наружной и внутренней поверхностях трубы;
- электронное сканирование в пределах 4 мм для определения дефектов, лежащих в стороне от центральной линии шва;
- использование специального делителя для возбуждения обоих преобразователей;
- использование механизированного низкопрофильного сканера (рис. 5.107);
- датчик координаты MiniME;
- данные документируются в виде А-, С- и S-сканов;
- оценка дефектов производится по любому из сканов с помощью измерительных курсоров (рис. 5.108).

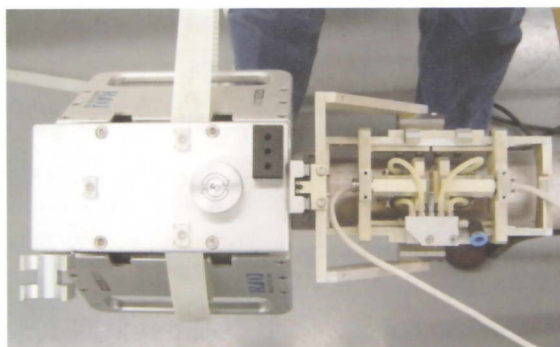


Рис. 5.107. Сканер с двумя фазированными решетками и датчиком координаты

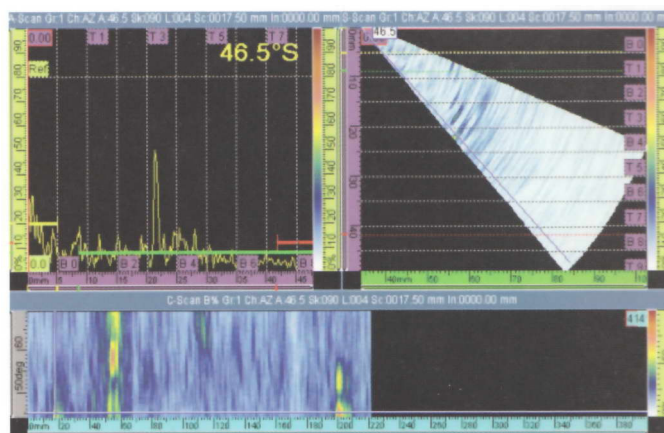


Рис. 5.108. Типичные А-, С- и S-сканы, отображающие сигнал от настроечного плоскостонного отверстия диаметром 1,5 мм

5.12.4 Флокены (Hydrogen-induced cracking, HIC)

а) Задачи и трудности контроля

- флокены (HIC) легко обнаруживаются, но SONIC (stress-oriented HIC) обнаружить труднее;
- флокены образуют множественные отражатели параллельные поверхности; SONIC формирует отражатели между флокенами под углом к поверхности;
- цель состоит в том, чтобы достоверно определить, имеются ли SONIC среди существующих флокенов;
- контроль должен быть быстрым и сравнительно недорогим;
- желательно документирование результатов.

б) Решение задачи

- контроль продольными волнами с использованием S-скана в пределах $0^\circ \pm 30^\circ$;
- используется режим AutoTrack, который автоматически отображает тот A-скан в секторе сканирования, в котором амплитуды сигналов максимальны;
- фокусировка на половине толщины детали, т.к. чаще всего флокены и SONIC возникают на $1/3$ и $2/3$ толщины;
- калибровка только при 0° ;
- SONIC определяется как наличие дополнительных сигналов между сигналами от флокенов (рис. 5.109-5.110).

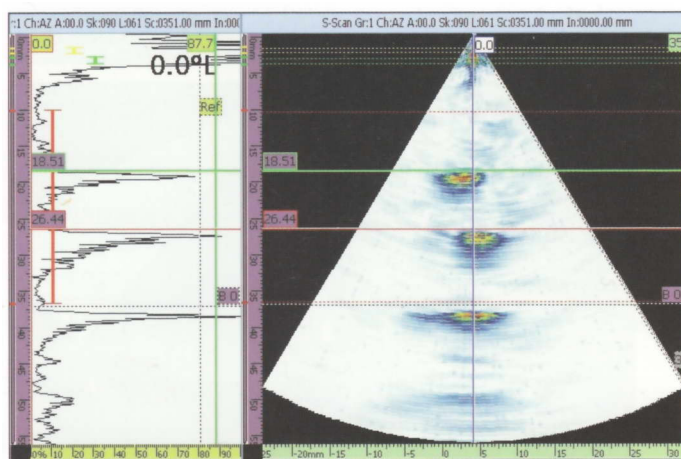


Рис. 5.109. Сигналы флокенов (HIC) без каких-либо дополнительных дефектов

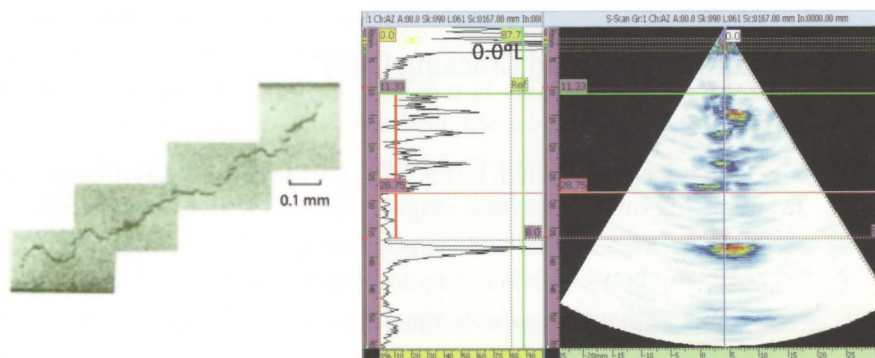


Рис. 5.110. Одновременное наличие сигналов от флокенов (HIC) и SONIC

5.12.5. Tie-ins в сварных швах трубопроводов

а) Проблемы контроля

- tie-ins в трубопроводах обычно являются объектом ручного контроля в соответствии, например, с API 1104;
- оборудование для автоматизированного контроля трубопроводов обычно слишком дорого и громоздко для контроля tie-ins;
- tie-ins требуют времени на изготовление, поэтому может возникать задержка аппаратуры на месте.

б) Решение задачи

- использование прибора OmniScan;
- линейное сканирование с ручной настройкой параметров;
- в соответствии с кодом выполнение сканирования под углами 45° , 60° и 70° и по методу TOFD;
- минимальная стоимость, минимальные неудобства.

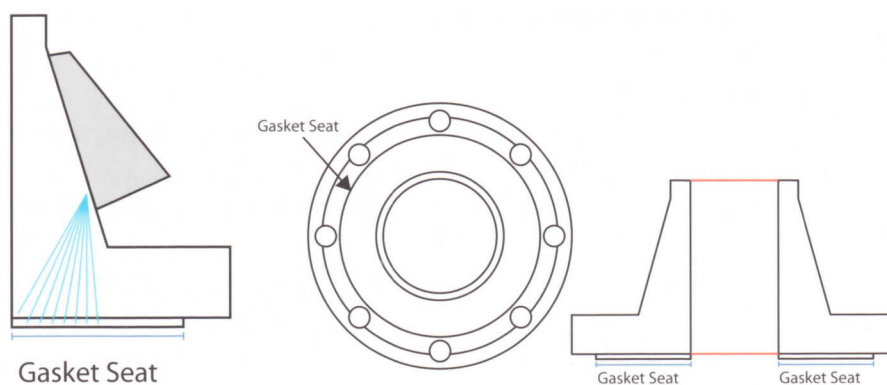
5.12.6. Контроль коррозии фланца под прокладкой

а) Задачи и трудности контроля

- обнаружение коррозии под прокладкой;
- сложные углы для ультразвукового контроля (рис. 5.111);
- требуется сканирование в ограниченном пространстве;
- контроль возможен только со стороны трубы;
- контроль проводится без удаления болтов.

б) Решение задачи

- использование 16-элементной фазированной решетки с базовым углом ввода 45° и секторным сканированием от 30° до 85° ;



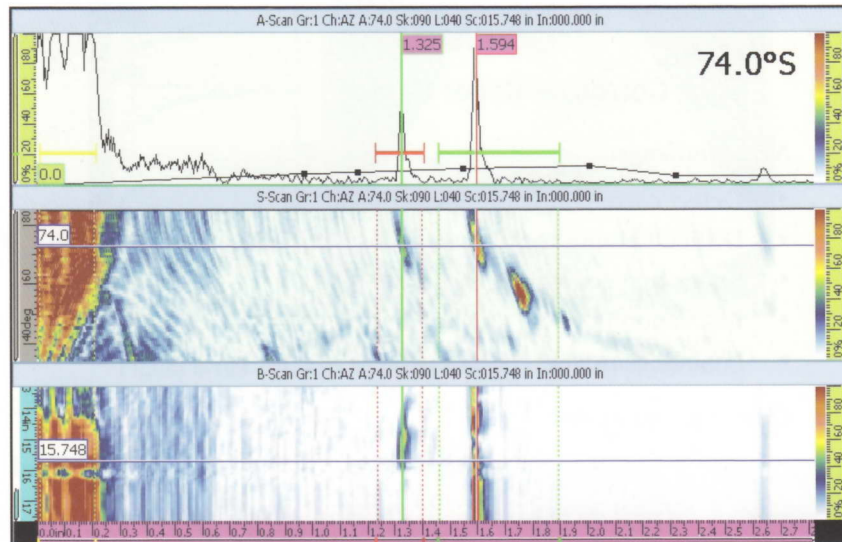


Рис. 5.112. А-скан, В-скан и скорректированный В-скан, показывающий распределение коррозии

5.12.7. Контроль деталей: контроль резьбы

а) Задачи и трудности контроля

- контроль резьбы во внутреннем канале хвостовика ракеты;
- требуется изображение, простое для распознавания;
- требуется быстрый контроль;
- сохранение данных.

б) Решение задачи

- использование прибора OmniScan с призмой специальной формы;
 - линейное сканирование и сфокусированные лучи;
- используется В-скан для отображения образа резьбы на экране (рис. 5.115).

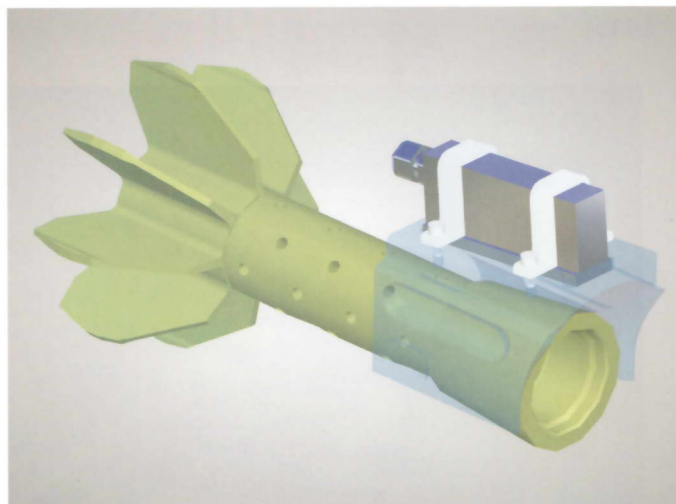


Рис. 5.113. Хвостовик ракеты и макет преобразователя на специальной призме

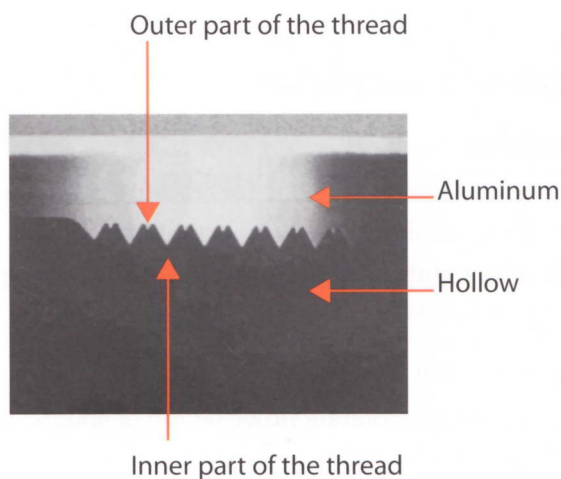


Рис. 5.114. Разрез канала хвостовика с двойной резьбой

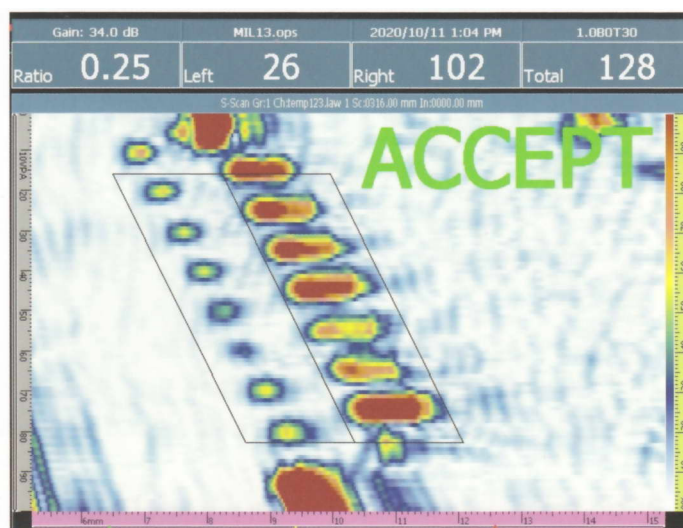


Рис. 5.115. Изображение зубцов качественной резьбы

5.12.8 Контроль деталей: контроль оси

а) Задачи и трудности контроля

- контроль длинной оси на предмет трещин (рис. 5.116);
- требуется быстрый и достоверный контроль;
- расшифровка данных может быть трудной вследствие отражений от галтельных переходов;
- обнаружение и измерение размеров дефектов.

б) Решение задачи

- прозвучивание фазированной решеткой оси с торца в продольном направлении;
- секторное сканирование в узком диапазоне углов – от осевого направления до касания лучом стенки оси;
- отображение результатов в виде скорректированного S-скана;
- калибровка по искусственным пропилам.

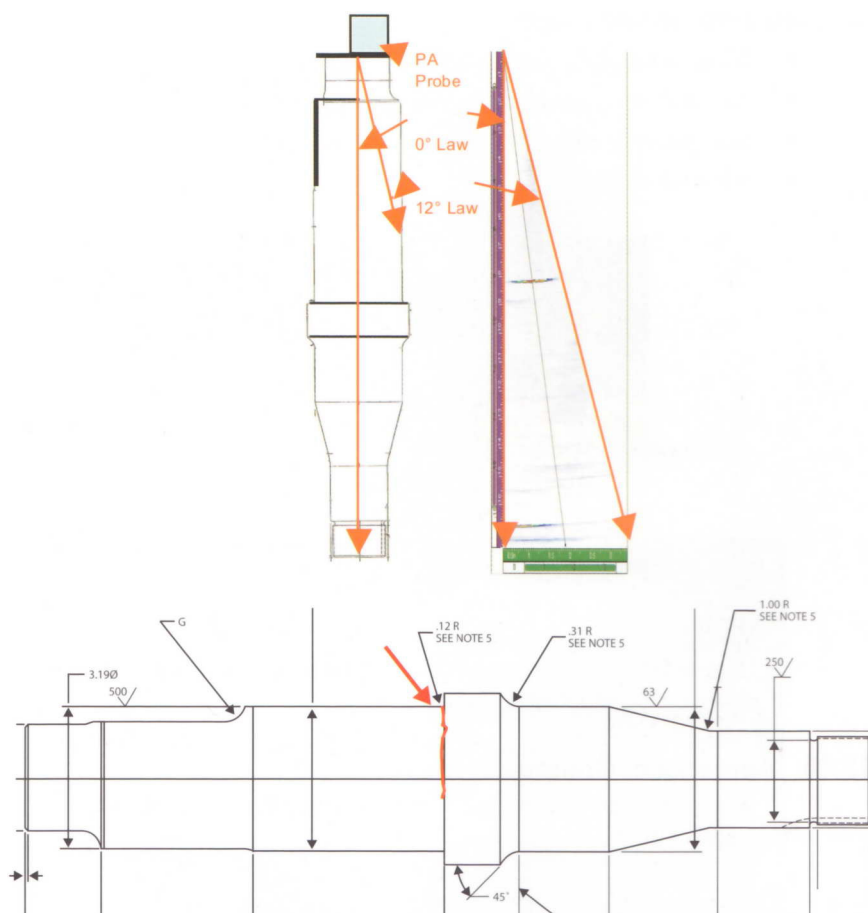


Рис. 5.116. Ось и скорректированный S-скан с изображением искусственных отражателей (сверху) и положение естественной трещины (снизу)

5.12.9 Контроль сварного шва, выполненного лазером

а) Задачи и трудности контроля

- сложная геометрия сварного шва;
- требуется быстрый контроль;
- требуется документирование результатов.

б) Решение задачи

- акустический контакт с помощью локальной ванны;
- ручное сканирование с датчиком координаты;
- сканирование шва длиной 10 метров со скоростью 25 мм/с;
- поперечное сканирование электронным способом;
- отображение S-скана в реальном времени;
- сохранение результатов контроля в полном объеме.

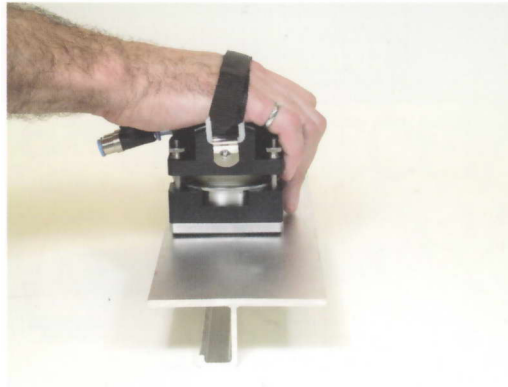


Рис. 5.117. Нормальное сканирование сварного шва в алюминии, выполненного лазером

5.12.10 Контроль композитов

а) Задачи и трудности контроля

- контроль композитных углепластиковых плит толщиной 6 мм;
- калибровочный образец с наиболее частым дефектом – расслоением (рис. 5.118);
- надежное обнаружение и измерение размеров дефектов;
- сохранение результатов контроля.

б) Решение задачи

- линейное механическое и электронное сканирование;
- преобразователь на 5 МГц, 32 элемента, шаг решетки 1 мм, для лучшего разрешения рекомендуется преобразователь на 64 элемента с шагом 0,6 мм;
- наличие дефекта определяется по падению амплитуды донного сигнала;
- отображение А- и С- сканов;
- сохранение данных.

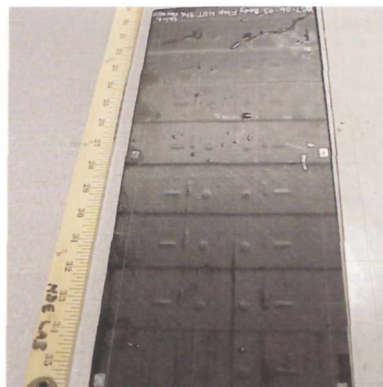


Рис. 5.118. Образец контролируемой композитной плиты

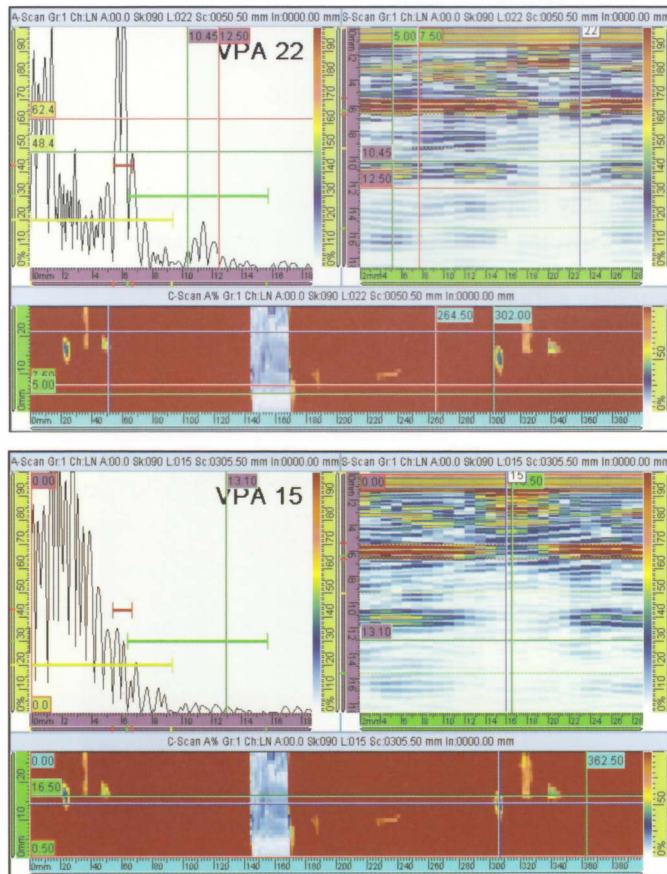


Рис. 5.119. Результаты сканирования композитного образца. Хороший образец с донным сигналом (сверху) и образец с дефектами, экранирующими донный сигнал (снизу)

5.12.11 Тавровые композитные детали

а) Задачи и трудности контроля

- надежный контроль определенных областей таврового композитного элемента (рис. 5.120);
- выполнение быстрого и недорогого контроля.

б) Решение задачи

- линейное электронное и механическое сканирование фазированной решеткой (рис. 5.121);
- контактный способ ввода ультразвука;
- обнаружение расслоений (рис. 5.122).

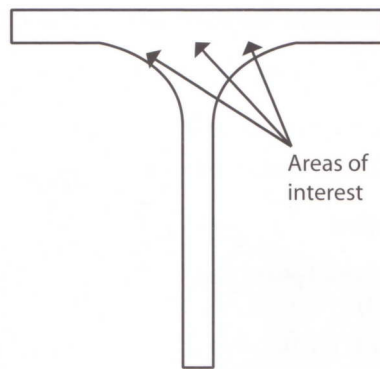


Рис. 5.120. Схема композитного таврового элемента с указанием контролируемых областей (areas of interest)

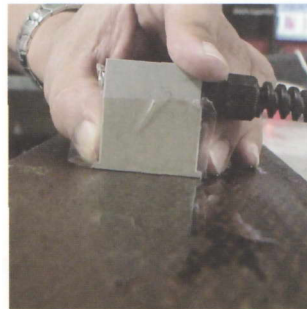


Рис. 5.121. Сканирование детали фазированной решеткой

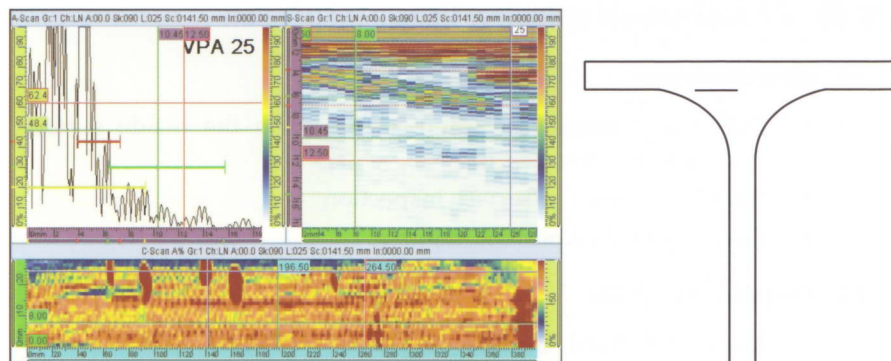


Рис. 5.122. А-, В- и С-сканы для таврового элемента (слева); образец с опорным отражателем (справа)

5.12.12 Контроль турбинных лопаток

а) Задачи и трудности контроля

- обнаружение трещин в основании турбинных лопаток;
- быстрый и недорогой контроль некритических зон.

б) Решение задачи

- секторное сканирование для обнаружения; использование сигнала дифракции на вершине для измерения высоты трещин (рис. 5.123);
- ручное сканирование.

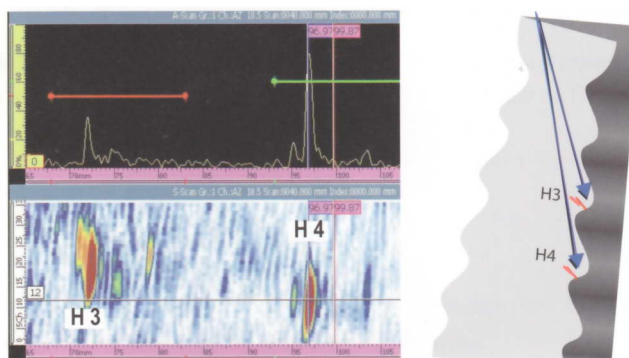


Рис. 5.123. Обнаружение трещин в основании турбинных лопаток

5.12.13 Контроль патрубков в нефтехимической промышленности

а) Задачи и трудности контроля

- обнаружение и измерение коррозии на внутренней поверхности 17,5-сантиметровых патрубков;
- выполнение контроля на патрубках в процессе эксплуатации;
- недорогое оборудование.

б) Решение задачи

- фазированная решетка на частоту 10 МГц, 32 элемента (рис. 5.124);
- секторное сканирование продольными волнами от 0° до 70°;
- отображение информации на скорректированном S-скане;
- измерение глубины и площади коррозии (рис. 5.125).

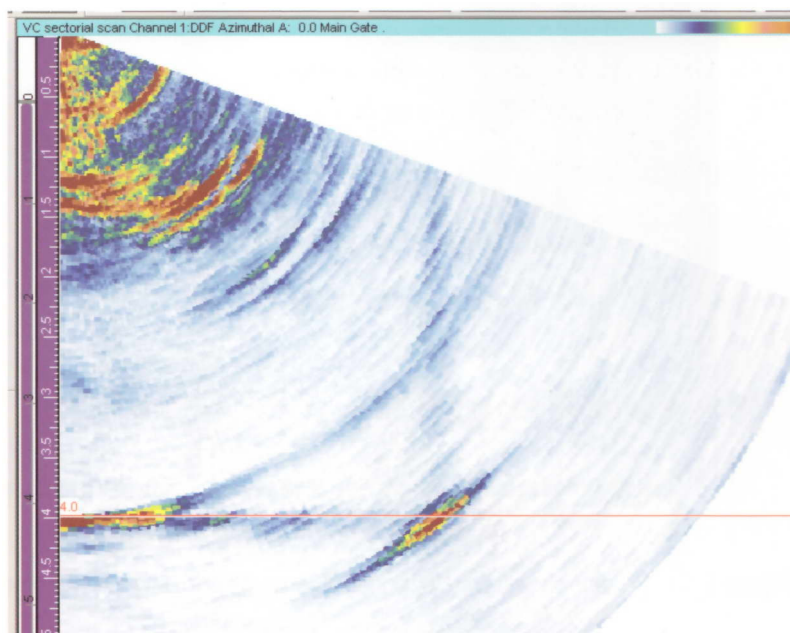


Рис. 5.124. S-скан патрубка; видны донная поверхность, вертикальная поверхность и сильно отражающий угол между ними

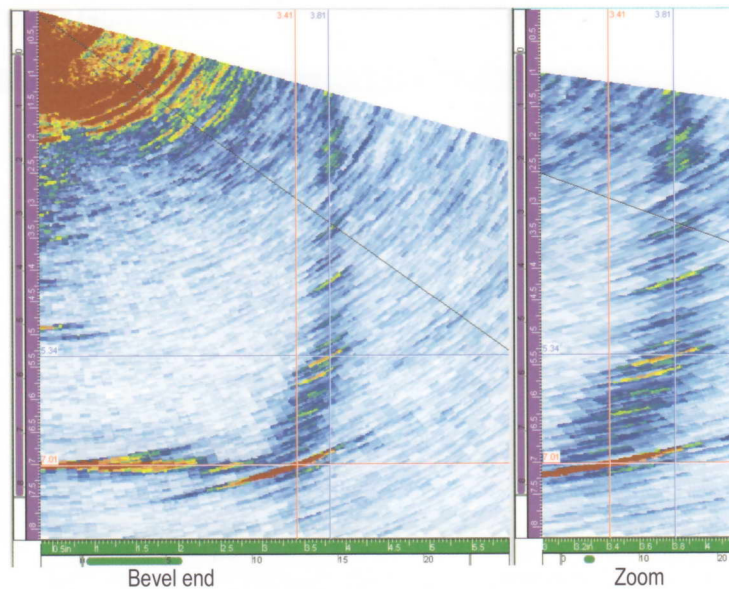


Рис. 5.125. Скан корродированного патрубка. Изображение справа увеличено.

5.12.14 Лопasti компрессора

а) Задачи и трудности контроля

- требуется контроль под несколькими углами (рис. 5.126);
- трудно получить изображения дефектов;
- требуется быстрый и недорогой контроль.

б) Решение задачи

- фазированная решетка на 10 МГц;
- секторное сканирование в диапазоне $0^\circ \pm 25^\circ$;
- скорректированное изображение.

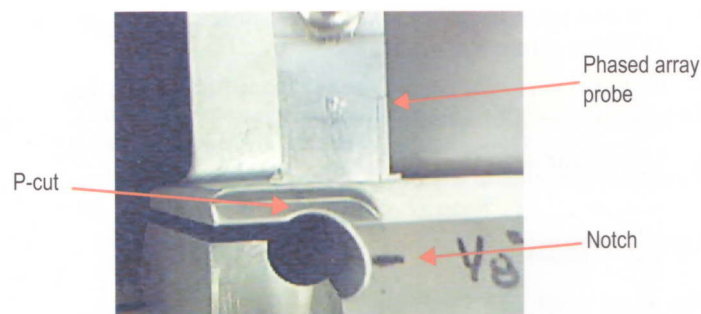


Рис. 5.126. Фотография преобразователя, сканирующего лопасть компрессора с опорным отражателем (пропилем)

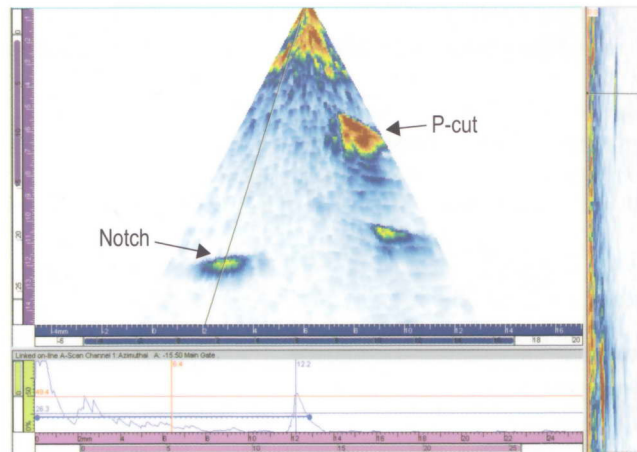


Рис. 5.127. Изображение дефектов.

5.12.15 Аустенитные сварные швы

а) Задачи и трудности контроля

- требуется быстрый контроль;
- высокое затухание поперечных волн в аустенитной стали;
- требуется портативное оборудование;
- обнаружение и измерение дефектов.

б) Решение задачи

- использование продольных волн;
- фазированная решетка на 5 МГц, 16 элементов с шагом 1 мм (для толщины шва 20 мм);
- секторное сканирование в диапазоне от 35° до 65° (конкретный диапазон зависит от условий) – рис. 5.129;
- линейное механическое сканирование.

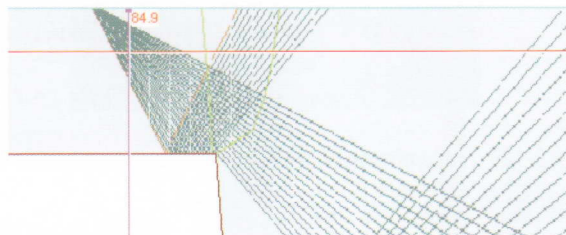


Рис. 5.128. Моделирование хода лучей в аустенитном шве

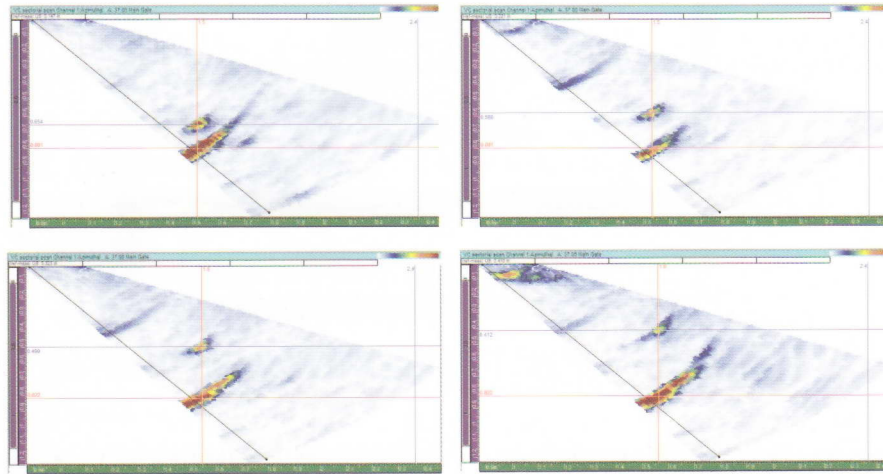


Рис. 5.129. Образы трещин различной высоты на S-скане. Трещина представляется как мощный сигнал от корня (красный маркер) и более слабый дифрагированный сигнал от вершины (синий маркер).

6. Выводы и рекомендации

6.1. Преимущества фазированных решеток

Все преимущества фазированных решеток по сравнению с традиционной технологией контроля можно обобщить следующим образом:

- 1) *Скорость.* Благодаря тому, что фазированная решетка перемещается только в продольном направлении вдоль сварного шва, а поперечное перемещение не требуется (оно заменяется электронным сканированием по апертуре решетки), контроль требует значительно меньше времени. Это сокращает расходы на операторов, а также снижает потери, связанные с простоем оборудования во время его контроля.
- 2) *Универсальность.* С использованием различных настроек аппаратуры одним преобразователем-решеткой можно контролировать множество различных изделий и деталей.
- 3) *Решение сложных задач.* Использование специальных настроек позволяет относительно легко контролировать сложные объекты, например, патрубки. Также фазированные решетки могут реализовывать сложные способы контроля, например «тандем», контроль различными углами, контроль с трансформацией моды и с использованием зонной дискриминации.
- 4) *Малые габариты.* Один преобразователь с управляемым лучом заменяет обычные преобразователи в задачах, где требуется контроль несколькими преобразователями.
- 5) *Механическая надежность.* В преобразователе отсутствуют подвижные части, что делает преобразователь более надежным и снижает износ; единственной изнашиваемой деталью является сменная призма.
- 6) *Измерение размеров дефекта* выполняется из одного положения преобразователя.
- 7) *Фокусировка луча* одним преобразователем на любой предусмотренной глубине, статическая или динамическая.

6.2. Решения задач контроля с помощью фазированных решеток

В табл. 6.1 сведены наиболее распространенные задачи контроля и их решения с помощью фазированных решеток.

Табл. 6.1. Основные применения фазированных решеток

Требование	Технические решения
Быстрое проведение контроля	<ul style="list-style-type: none">• QuickScan PA для трубного производства• TomoScan III для специальных задач• Увеличенная частота следования импульсов• Использование нескольких преобразователей
Ограниченный доступ вследствие сложной геометрии объекта контроля	<ul style="list-style-type: none">• Миниатюрные фазированные решетки• S-скан• Контроль различными типами волн• Двумерные (матричные) решетки• Моделирование хода лучей
Универсальность аппаратуры для большой номенклатуры различных	<ul style="list-style-type: none">• Универсальная фазированная решетка• Настройка на параметры контроля

объектов	посредством загрузки файла настроек
Высокая достоверность контроля	<ul style="list-style-type: none"> • Контроль под множеством углов и различными методами • Использование взаимоподтверждающих методов – S-сканы, В-сканы, эхо-импульсного, TOFD, продольные и поперечные волны • Дефект оценивается по всем использованным методам
Контроль в условиях радиоактивности	<ul style="list-style-type: none"> • Быстрая настройка аппаратуры • Быстрое сканирование • Использование S-скана
Надежность оборудования	<ul style="list-style-type: none"> • Меньшее количество преобразователей и более простая их конструкция • Больше электронных узлов и меньше механических узлов • Простое обслуживание и ремонт • Удаленный сервис
Высокая производительность	<ul style="list-style-type: none"> • Электронное сканирование по всем возможным направлениям • Комбинированные настройки параметров контроля • Сжатие данных, сглаживание, оцифровка, высокая частота следования, DDF
Точность локализации дефектов	<ul style="list-style-type: none"> • Оптимальные методы контроля • Высокая частота преобразователя, высокое отношение сигнал-шум • Малые размеры луча • Динамическая фокусировка по глубине • Использование сигналов дифракции • Усреднение и обработка данных
Получение изображений	<ul style="list-style-type: none"> • Скорректированные сканы • Озвучивание дефектов под разными углами с разных сторон • Объединенные сканы • Обработка сигналов
Анализ в реальном времени	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая скорость обработки и передачи информации • Работа нескольких операторов в сети из нескольких терминалов • Совместный доступ к данным
Подводный контроль	<ul style="list-style-type: none"> • Аппаратура в герметичном исполнении, устойчивая к давлению
Воспроизводимость результатов контроля	<ul style="list-style-type: none"> • Малые погрешности датчиков координат • Автокалибровка чувствительности • Аттестованные методики, оборудование и операторы
Крупнозернистые материалы	<ul style="list-style-type: none"> • Преобразователь с широкой полосой пропускания и низкой частотой • Использование продольных волн • Спектральная обработка сигнала • Увеличенное усреднение • Малый диаметр луча

Надежность оборудования в поточном производстве	<ul style="list-style-type: none"> • Установка на основе прибора QuickScan • Специальная конструкция преобразователей, оптимальное их количество • Минимальное механическое сканирование • Оптимальная частота следования импульсов • Оборудование для работы 24 часа в день, 7 дней в неделю
Анализ и документирование результатов	<ul style="list-style-type: none"> • Использование программы TomoView для просмотра данных контроля • Использование таблиц дефектов • Экспорт данных в MS Access, Excel или MATLAB
Соответствие методикам	<ul style="list-style-type: none"> • Аттестация методики контроля фазированными решетками несимметричных сварных швов в соответствии с ASME XI (appendix VIII) • Сертификация фазированных решеток в нефтехимической промышленности для контроля трубопроводов и сосудов давления
Контроль с целью заключения о годности объекта к эксплуатации	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая точность определения положения, ориентации и размеров дефектов • Улучшенная фронтальная и лучевая разрешающая способность • Классификация дефектов по типу на основании образов на изображении
Обучение и аттестация персонала	<ul style="list-style-type: none"> • R/D Tech (Канада) • Институт Сварки (Великобритания) • Центр EPRI NDE • Центр NDE Professionals
Стоимость внедрения и обслуживания	<ul style="list-style-type: none"> • Начальные вложения сопоставимы со стоимостью автоматизированных систем среднего уровня • Обслуживание оборудования на протяжении его жизненного цикла ниже, чем для обычных систем • Расширенные возможности аппаратуры экономят время и затраты на проведение контроля • OmniScan является самым недорогим решением и предлагает возможность расширения возможностей благодаря дополнительным модулям • Комплекты аппаратуры могут иметь узкую специализацию (комплекты для сварки, для коррозии, для основного металла) и, соответственно, сниженную стоимость по сравнению с универсальными комплектами

Фазированные решетки уже стали развитой технологией, и решения для многих задач контроля уже доступны. Стоимость оборудования постепенно снижается. Например, сейчас прибор OmniScan имеет стоимость промежуточную между совершенными промышленными системами и традиционными одноканальными дефектоскопами.

6.3. Внедрение оборудования на фазированных решетках

Для внедрения приборов на фазированных решетках в организации следует предпринять следующие шаги:

- ознакомиться с известными случаями применения фазированных решеток в похожих задачах;
- определить преимущества, которые будут получены при переходе от традиционной технологии к фазированным решеткам;
- изучить руководства по эксплуатации приборов;
- четко определить задачу контроля и дефекты, которые требуется выявлять
- учесть характеристики контролируемой детали и дефектов (толщина, кривизна, шероховатость, материал, размеры, положения и ориентации дефектов и т.п.);
- разработать методику контроля, при этом определить углы ввода или диапазон качания луча, размеры апертуры, диапазон контроля, способ ввода ультразвука, тип волн, и т.п.;
- связаться с производителем аппаратуры для обсуждения особенностей методики и ее решения с помощью фазированных решеток.