

Министерство образования Российской Федерации
Уральский государственный технический университет – УПИ
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Учебное пособие

Составитель Д.Ю. Бирюков

Научный редактор – профессор, доктор технических наук В.С. Коров

Екатеринбург
УГТУ-УПИ
2008

УДК 620.179.16

ББК 30.607

Б064

Автор-составитель: Д.Ю. Бирюков

Рецензенты: кафедра "Путь и железнодорожное строительство
Уральского государственного университета путей
сообщения (проф., д-р техн. наук Г.Л. Аккерман);
ст. науч. сотр., канд. хим. наук А.М. Непомилуев
(ИХТТ УрО РАН)

Б 64 Преобразователи и методы неразрушающего контроля / сост.

Д. Ю. Бирюков. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. 179 с.

ISBN

Учебное пособие по курсу «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» для студентов специальности 200503 «Стандартизация и сертификация».

В настоящем пособии приводятся основные сведения по физическим принципам и явлениям, положенным в основу различных методов измерений, а также приводится описание методов измерений и контроля изделий и материалов.

Подготовлено кафедрой "Физические методы и приборы контроля качества". Публикуется в рамках Федеральной программы Уральского НОЦ "Перспективные материалы" (Award No. REC-005 (CRDF)).

Библиогр.: 6 назв. Табл. 7. Рис. 121.

УДК 620.179.16

ББК 30.607

ISBN

© Бирюков Д.Ю., составление, УГТУ-УПИ, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ И СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ	6
1.1. Основные понятия и определения.....	8
1.2. Классификация измерений	10
1.3. Классификация и характеристики средств измерения.....	13
1.4. Структуры средств измерения.....	17
1.5. Статические характеристики средств измерения.....	19
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	21
2.1. Измерительные преобразования и измерительные преобразователи	21
2.2. Характеристики измерительных преобразователей неэлектрических величин	24
2.3. Классификация преобразователей.....	24
2.4. Резистивные преобразователи механических величин.....	26
2.4.1. Контактные преобразователи	26
2.4.2. Реостатные измерительные преобразователи.....	28
2.4.3. Тензорезисторы	29
2.5. Оптоэлектрические преобразователи.....	31
(преобразователи теплового и светового излучения)	31
2.6. Тепловые преобразователи	40
2.6.1. Термоэлектрические преобразователи.....	40
2.6.2. Терморезистивные преобразователи.....	43
2.7. Возбуждение и прием упругих волн электроакустическими преобразователями	46
2.7.1. Электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи.....	47
2.7.2. Электроемкостные преобразователи	49
2.7.3. Лазерные преобразователи.....	50
2.7.4. Магнитострикционные преобразователи.....	52
2.7.5. Пьезоэлектрические преобразователи	53
2.7.6. Прямые ПЭП.....	61
2.7.8. Раздельно-совмещенные (Р-С) ПЭП.....	64
2.7.9. Специальные виды преобразователей.....	65
2.8. Акустическое поле преобразователя.....	68
2.9. Акустический тракт.....	75

3. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	85
3.1. Физические основы акустических методов контроля.....	85
3.1.1. <i>Колебания и волны</i>	85
3.1.2. <i>Гармонические колебания</i>	89
3.1.3. <i>Шкала неперов и децибел</i>	92
3.1.4. <i>Спектральный состав акустических импульсов</i>	93
3.1.5. <i>Типы и поляризация упругих волн</i>	96
3.1.6. <i>Типы волн</i>	97
3.1.7. <i>Причины ослабления волн при распространении</i>	103
3.1.8. <i>Акустические свойства сред</i>	105
3.1.9. <i>Отражение и прохождение волн на границах сред</i>	110
3.2. Методы акустического контроля.....	123
3.2.1. <i>Классификация методов</i>	123
3.2.2. <i>Методы отражения</i>	125
3.2.3. <i>Методы прохождения</i>	131
3.2.4. <i>Комбинированные методы</i>	134
3.2.5. <i>Импедансный метод</i>	137
3.2.6. <i>Методы собственных частот (колебаний) и резонансные методы</i>	138
3.2.7. <i>Акустико-эмиссионный метод</i>	140
3.2.8. <i>Способы акустического контакта</i>	141
4. МАГНИТНЫЙ И ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ	145
4.1. Физические основы и классификация методов	145
4.2. Магнитопорошковая дефектоскопия	163
4.3. Магнитографический метод	167
4.4. Феррозондовый метод.....	171
4.5. Магнитный контроль структуры и физико-механических свойств	172
4.6. Вихревой контроль.....	174
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	178

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью данной дисциплины “Методы и средства измерений, испытаний и контроля” является:

- 1) изучение и систематизация измерений, методов измерений и контроля, средств измерений и контроля;
- 2) изучение физических процессов и явлений, положенных в основу измерений и контроля свойств материалов и изделий;
- 3) применение вычислительной техники в средствах измерений;
- 4) подготовка специалистов к решению сложных проблем метрологического обеспечения производства, стандартизации и сертификации продукции.

Курс "Методы и средства измерений, испытаний и контроля" представляет собой необходимый этап в обучении студентов специальности 200503 “Сертификация и стандартизация” и призван сформировать у студентов систему знаний о принципах построения современных измерительных задачах, методах и средствах измерений и контроля различных физических величин, свойств веществ и материалов.

Сведения, полученные в данном курсе, служат основой для усвоения материала специальных дисциплин, посвященных современным физическим методам и средствам измерений, испытаний и контроля технологических процессов, а также прикладной метрологии, стандартизации и сертификации в приборостроении.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ И СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

При описании явлений и процессов, а также свойств материальных тел используются различные физические величины. Число этих величин достигает нескольких тысяч: электрические, магнитные, пространственные и временные; механические, акустические, оптические, химические, биологические и др. Указанные величины отличаются не только качественно, но и количественно и оцениваются различными числовыми значениями.

Для того чтобы установить числовое значение физической величины, необходимо провести измерение. Результатом измерения является количественная характеристика в виде именованного числа с одновременной оценкой степени приближения полученного значения измеряемой величины к истинному значению физической величины. Нахождение числового значения измеряемой величины возможно лишь опытным путем, т. е. в процессе физического эксперимента.

Для реализации любого процесса измерения необходимы технические средства, которые могут воспринимать, преобразовывать и представлять в удобном виде числовые значения физических величин.

На практике при измерении физических величин применяются электрические методы и неэлектрические (например, пневматические, механические, химические и др.).

Электрические методы измерений получили наиболее широкое распространение, т.к. с их помощью достаточно просто осуществлять преобразование, передачу, обработку, хранение, представление и ввод измерительной информации в ЭВМ.

Технические средства и различные методы измерений составляют основу измерительной техники. Любой производственный процесс характеризуется большим числом параметров, которые могут изменяться в широких пределах. Для поддержания требуемого режима работы технологической установки необходимо измерение таких параметров. При этом чем достовернее осуществляется измерение технологических параметров, тем лучше качество конечной продукции. На современных предприятиях, например нефтехимического профиля с непрерывным характером производства, для поддержания качества выпускаемой продукции измеряют температуру, объемный и массовый расход веществ, давление, уровень и количество вещества, время, состав ве-

щества (плотность, влажность, содержание механических примесей и др.), напряжение, силу тока, скорость и т.д. Число требуемых для измерения параметров достигает нескольких тысяч. В атомной энергетике, например, число требуемых для измерения параметров процессов достигает десятков тысяч.

Получение и обработка измерительной информации предназначены не только для достижения требуемого качества продукции. Это нужно также для организации производства, учета и составления баланса количества вещества и энергии.

На современном уровне производства задача получения и обработки измерительной информации усложняется настолько, что ее эффективное решение становится возможным лишь на основе применения специализированных измерительно-вычислительных средств.

В истории развития измерительной техники можно выделить несколько этапов:

- 1) показывающие приборы (середина и вторая половина XIX в.);
- 2) аналоговые самопишущие приборы (конец XIX – начало XX в.);
- 3) автоматические и цифровые приборы (серед. XX в. – 50-е гг.);
- 4) информационно-измерительные системы (XXI в.).

Расширение номенклатуры и качественных показателей средств измерительной техники неразрывно связано с достижениями радиоэлектроники. Одним из современных направлений развития измерительной техники являются цифровые приборы с дискретной формой представления информации. Такая форма представления результатов оказалась удобной для преобразования, передачи, обработки и хранения информации. Развитие дискретных средств измерительной техники в настоящее время привело к созданию цифровых вольтметров постоянного тока, погрешность показаний которых ниже 0,0001 %, а быстродействие преобразователей напряжение-код достигает нескольких миллиардов измерений в секунду; верхний предел измерения современных цифровых частотомеров достиг гигагерца; цифровые измерители временного интервала имеют нижний предел измерения до долей пикосекунды; электрические токи измеряются в диапазоне от 10^{-16} до 10^5 А, а длины – в диапазоне от 10^{-12} (размер атомов) до $3,086 \cdot 10^{16}$ м. Широкие возможности открылись перед измерительной техникой в связи с появлением микропроцессоров (МП) и микроЭВМ. Благодаря им значительно расширились области применения средств

измерительной техники, улучшились их технические характеристики, повысились надежность и быстродействие, открылись пути реализации задач, которые ранее не могли быть решены.

1.1. Основные понятия и определения

Понятия и определения, используемые в измерительной технике, регламентируются ГОСТ 16263 - 70.

Измерение – это информационный процесс получения опытным путем численного отношения между данной физической величиной и некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения.

Результат измерения – именованное число, найденное путем измерения физической величины. Результат измерения может быть принят как действительное значение измеряемой величины. Одна из основных задач измерения – оценка степени приближения или разности между истинным и действительным значениями измеряемой физической величины- погрешности измерения.

Погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Погрешность измерения является непосредственной характеристикой точности измерения.

Точность измерения – степень близости результата измерения к истинному значению измеряемой физической величины.

Измерение уменьшает исходную неопределенность значения физической величины до уровня неизбежной остаточной неопределенности, определяемой погрешностью измерения.

Значение погрешности измерения зависит от совершенства технических устройств, способа их использования и условий проведения эксперимента.

Принцип измерения – это физическое явление или совокупность физических явлений, положенных в основу измерения. Примером может служить измерение температуры с использованием термоэффекта и другие физические явления, используемые для проведения эксперимента, которые должны быть выбраны с учетом получения требуемой точности измерения.

Измерительный эксперимент – это научно обоснованный опыт для получения количественной информации с требуемой или возможной точностью определения результата измерений. Проведение измерительного эксперимента предполагает наличие технических устройств, которые могут обеспечить заданную точность получения ре-

зультата. Технические устройства, участвующие в эксперименте, заранее нормируются по показателям точности и относятся к средствам измерений.

Средство измерений – это техническое устройство, используемое в измерительном эксперименте и имеющее нормированные характеристики точности.

Количественная информация, полученная путем измерения, представляет собой измерительную информацию.

Измерительная информация – это количественные сведения о свойстве или свойствах материального объекта, явления или процесса, которые получают с помощью средств измерений в результате их взаимодействия с объектом.

Количество измерительной информации – это численная мера уменьшения неопределенности количественной оценки свойств объекта.

Взаимодействие объекта исследования и средств измерений в процессе эксперимента предполагает наличие сигналов, которые являются носителями информации. Важными носителями информации являются электрический ток, напряжение, импульсы и другие электрические параметры.

Измерительный сигнал – сигнал, функционально связанный с заданной точностью с измеряемой физической величиной.

Метод измерения – это совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Важное значение в измерительной технике имеет единство измерений.

Единство измерений – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в указанных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Единство измерений позволяет сравнивать результаты различных экспериментов, проведенных в различных условиях, выполненных в разных местах с использованием разных методов и средств измерений. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения установленных единиц физической величины и передачи их размеров применяемым средствам измерения.

Перечисленные понятия составляют предмет метрологии.

Метрология – это учение о мерах, это наука о методах и средствах обеспечения единства измерений и способах достижения требуемой точности. Мера предназначена для воспроизведения физической величины данного размера.

Законодательная метрология – это раздел метрологии, включающий комплексы взаимосвязанных и взаимообусловленных правил, требований и норм, а также другие вопросы, нуждающиеся в регламентации и контроле со стороны государства, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений. В соответствии с изложенным характеристики средств измерений, определяющие точность измерения с их помощью, называют метрологическими характеристиками средств измерения. Метрологические характеристики нормируются в обязательном и установленном порядке с целью обеспечить единство измерений.

Контроль – процесс установления соответствия между состоянием (свойством) объекта контроля и заданной нормой. В результате контроля выдается суждение о состоянии объекта.

1.2. Классификация измерений

Виды измерений

По способу нахождения числового значения физической величины измерения подразделяются на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямые измерения – измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных (например, измерение тока амперметром).

Косвенные измерения – измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям (например, определение значения сопротивления резистора $R=U/I$ по измеренным значениям напряжения U и тока I).

Совокупные измерения – производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин.

Совместные измерения – производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для нахождения зависимости между ними.

Число уравнений должно быть равно числу подлежащих определению величин. (Например, измерение, при котором массы отдельных гирь набора находят по известной массе одной из них и результатам сравнения масс различных сочетаний гирь данного набора, является

совокупным измерением; измерение, при котором сопротивление резистора R_{20} при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ и его температурные коэффициенты находят по данным прямых измерений сопротивления R_t и температуры t , выполненных при разных температурах, является совместным измерением:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] .)$$

Измерения могут выполняться с однократными или многократными наблюдениями.

Наблюдение при измерении – экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение из группы значений величин, подлежащих совместной обработке для получения результатов измерений.

Результат наблюдения – результат величины, получаемый при отдельном наблюдении.

По характеру зависимости измеряемой величины от времени измерения разделяются на статические, при которых измеряемая величина остается постоянной во времени в процессе измерения; динамические, при которых измеряемая величина изменяется в процессе измерения и является непостоянной во времени.

По условиям, определяющим точность результатов, измерения бывают максимально возможной точности, достигаемой при существующем уровне техники; контрольно-поверочные, погрешность которых не должна превышать некоторое заданное значение; технические, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений.

По способу выражения результатов измерения различают абсолютные и относительные измерения.

Методика измерения – детально намеченный порядок процесса измерений, регламентирующий методы, средства, алгоритмы выполнения измерений, которые в определенных (нормированных) условиях обеспечивают измерения с заданной точностью.

Алгоритм измерения – точное предписание о выполнении в определенном порядке совокупности операций, обеспечивающих измерение значения физической величины.

Методы измерений

Различают методы измерения непосредственной оценки и сравнения с мерой.

1. Метод непосредственной оценки – метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, заранее градуированного в единицах измеряемой физической величины. Поскольку данный метод прост, он и наиболее распространен, хотя точность его невысока.

2. Метод сравнения с мерой – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод по сравнению с методом непосредственной оценки более точен, но несколько сложен. Метод сравнения имеет следующие модификации: противопоставления, дифференциальный, нулевой, замещения, совпадения.

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами. Метод применяют при измерении ЭДС, напряжения, тока. Характерным является наличие двух источников энергии.

Дифференциальный метод – метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Точность метода возрастает с уменьшением разности между значениями сравниваемых величин. Метод применяют при измерении параметров цепей (сопротивления, индуктивности, взаимной индуктивности, емкости), напряжения и др.

Нулевой метод – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля.

Метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. Метод замещения часто применяют при измерении параметров цепей. В сочетании с явлением резонанса на высоких частотах он позволяет исключить паразитные сигналы (шумы) и обеспечить высокую точность.

Метод совпадений – метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических

сигналов. Метод применяют при измерении частот, приеме точных сигналов времени.

Рассмотренные методы определяют принципы построения измерительных приборов.

1.3. Классификация и характеристики средств измерения

Для реализации методов измерения применяются различные виды СИ: мера, измерительный преобразователь, измерительный прибор, вспомогательное средство измерения, измерительная информационная система.

Мера представляет собой средство для воспроизведения физической величины в единицах измерения либо в виде дольных и кратных единиц. Меры бывают однозначные, или постоянные, и многозначные, или переменные. Меры в виде отдельных элементов составляют набор. Если они механически связаны между собой, то представляют собой магазин мер.

Измерительный преобразователь – это СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшей обработки, хранения и ввода в ЭВМ, но не поддающееся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительный прибор (ИП) – это СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Следовательно, прибор должен представлять собой совокупность нескольких преобразователей и обязательно иметь выходное отсчетное устройство.

Наиболее распространенными СИ являются приборы непосредственной оценки, у которых имеется подвижный элемент в виде стрелки и неподвижный элемент в виде шкалы, цена деления которой соответствует дольным и кратным значениям единицы измеряемой физической величины.

Часто приборы снабжаются специальным подвижным устройством, осуществляющим регистрацию на бумаге. В этом случае приборы называют регистрирующими.

Вспомогательные средства измерения – совокупность различных вспомогательных элементов, предназначенных для работы совместно с ИП. Такие вспомогательные СИ, как правило, влияют на метрологические характеристики СИ, и поэтому они также нормируются.

К вспомогательным СИ относятся: различные шунты для расширения шкалы прибора, специальные высокочастотные коаксиальные кабели и др.

Образцовые приборы предназначены для воспроизведения физической величины, с их помощью обеспечивается единство измерений.

Образцовые меры и приборы находятся под охраной государства. Ими осуществляется поверка рабочих мер и ИП. Рабочие меры и приборы подразделяют на лабораторные и технические.

Лабораторные меры и приборы применяются исключительно в лабораторных условиях, их точность выше, чем точность технических приборов, хотя во многих случаях конструктивно и метрологически они не отличаются. Повышенная точность лабораторных мер и приборов обеспечивается специальными градуировочными характеристиками, прикладываемыми к ним.

Измерительные информационные системы (ИИС) – это СИ, предназначенные для автоматического представления информации в виде, удобном для использования в системах управления или регулирования.

В связи с усложнением решаемых задач в ИИС широко применяются различные специализированные вычислительные устройства и ЭВМ.

В зависимости от назначения ИИС различают четыре их разновидности:

- 1) измерительная система (ИС), предназначенная для установления количественных характеристик объекта;
- 2) система контроля (СК), предназначенная для установления соответствия параметров объекта нормам или требованиям на характеристику объекта;
- 3) система диагностики (СД), предназначенная для установления причин неисправностей и их локализации в объекте;
- 4) система распознающая (СР), предназначенная для установления принадлежности данного объекта к некоторому классу образов объекта.

В настоящее время не существует единых критериев для оценки эффективности СИ, поэтому оценку СИ осуществляют по следующим четырем основным характеристикам: точность, быстродействие, чувствительность, надежность.

Точность – характеристика СИ, под которой понимают степень приближения результатов измерений к истинному значению измеряемой величины. Часто вместо понятия "точность" применяют понятие "погреш-

ность", под которой понимают степень отклонения показаний СИ y от действительного значения измеряемой величины x_d .

Для оценки погрешностей вводят ряд понятий:

абсолютная погрешность

$$\Delta = y - x_d; \quad (1.1)$$

относительная погрешность (%)

$$\delta = \Delta / x_d \cdot 100 \quad (1.2)$$

или

$$\delta = \Delta / y \cdot 100; \quad (1.3)$$

приведенная погрешность

$$\delta_{пр} = |\Delta|_{\max} / y_{\max}, \quad (1.4)$$

где $|\Delta|_{\max}$ — максимальное значение абсолютной погрешности; $y_{\max}$ — максимальное значение шкалы измерительного прибора.

Погрешность СИ, возникающая при нормальных условиях его эксплуатации, называют основной погрешностью. Погрешности, возникающие при внешних условиях эксплуатации, отличных от номинальных, называют дополнительными погрешностями.

Быстродействие СИ характеризуется числом измерений в единицу времени, полосой частот входного параметра, при которых СИ не выходит за заданный предел точности. У стрелочных приборов быстродействие оценивают временем с момента изменения входного сигнала до момента, когда стрелка прибора вошла в полосу не более 1% от установившегося значения входного параметра по шкале прибора и остается в этой полосе.

Чувствительность СИ (s) представляет собой реакцию прибора на входной сигнал, т. е. отношение выходной величины к входной:

$$s = dy/dx. \quad (1.5)$$

Часто под s понимают величину

$$s = \Delta y / \Delta x. \quad (1.6)$$

Кроме того, в некоторых случаях используют понятия чувствительности, вычисляемые по формулам:

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x / x} \quad (1.7)$$

$$\text{или } s = \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x} . \quad (1.8)$$

Для стрелочных приборов $s = a/x$. Поэтому измеряемая величина

$$x = \frac{1}{s} \alpha , \quad (1.9)$$

где $1/s$ – постоянная прибора или цена деления; a – показание прибора.

Не следует путать чувствительность СИ с порогом чувствительности, под которым понимают наименьшее значение входного сигнала, при котором уверенно обнаруживается изменение выходного сигнала.

Одной из важных характеристик СИ является метрологическая надежность, под которой понимают сохранение точностных характеристик СИ в заданных пределах в установленный период его эксплуатации при определенных внешних условиях окружающей среды. При этом имеется в виду не только выход из строя какого-либо элемента СИ и соответственно прекращение его работы, но и обязательное сохранение метрологических характеристик (погрешности, чувствительности, быстродействия и др.) при указанных условиях.

Одной из важных количественных характеристик надежности СИ является вероятность безотказной работы. Обозначим через τ время от момента включения СИ в работу до момента, когда по каким-либо причинам оно вышло из строя или уже не отвечает своим метрологическим параметрам, а через t рассматриваемый промежуток времени, τ – случайная величина, и поэтому $p(t) = P(\tau \geq t)$, где $p(t)$ — вероятность того, что данное средство измерения будет работоспособно в рассматриваемый промежуток времени. Применяются и другие вероятностные характеристики (например, время восстановления и др.).

В технических условиях на любое СИ указываются требования к характеристикам надежности. Например, за $t = 1\,000$ ч величина $p(t)$ должна быть не менее 0,85, т. е. $p(t) \geq 0,85$.

К характеристикам СИ также относятся: диапазон измерения (задаваемый верхним и нижним пределами измерения), входное сопротивление, собственное потребление энергии, стабильность характеристики, защищенность от внешних воздействий, габариты, масса, стоимость и др.

1.4. Структуры средств измерения

Структура СИ в общем виде показана на рис. 1.1. Здесь на СИ и выходной сигнал y воздействуют как параметры $z_1, z_2, \dots, z_n$, так и $q_1, q_2, \dots, q_n$ — значения внутренних, конструктивных, геометрических или других параметров (тип материала, трение, контактная ЭДС и ряд других дестабилизирующих внутренних факторов), которыми характеризуется данное СИ; z_n — значения внешних неинформативных параметров, воздействующих на СИ (влажность, температура, давление и др.).

В зависимости от классификации методов измерений — прямое или уравнивающее преобразование — типовая структура может быть разомкнутой и замкнутой.

Разомкнутые структуры могут быть последовательного или параллельного вида. На рис. 1.2 представлены примеры разомкнутых структур (прямого преобразования).

Структура замкнутого вида (уравнивающего преобразования) приведена на рис. 1.3. Здесь КПП имеет коэффициент преобразования K ; КОП имеет коэффициент преобразования $j3$. Замкнутые структуры подразделяют на статические и астатические.

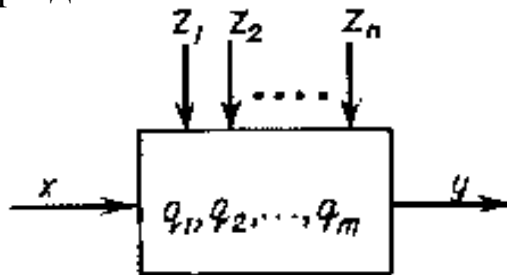


Рис. 1.1. Структура СИ в общем виде

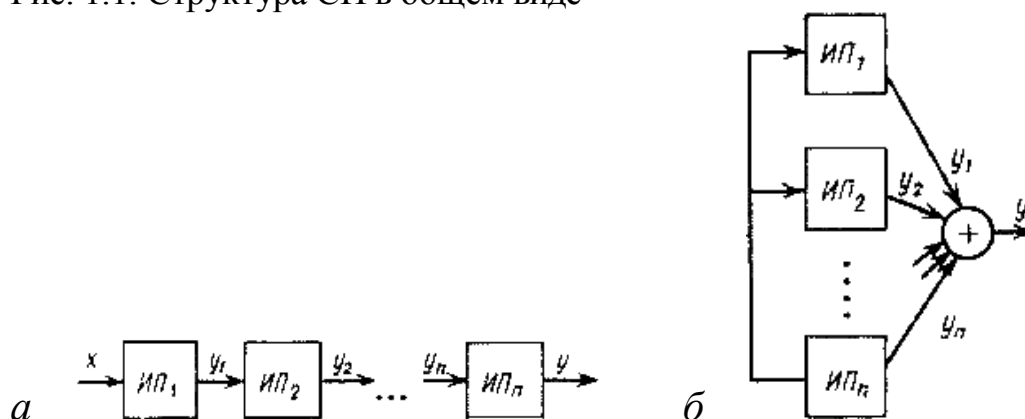


Рис.1.2. Структурная схема СИ прямого преобразования:

a — последовательная; b — параллельная (ИП — измерительный преобразователь)

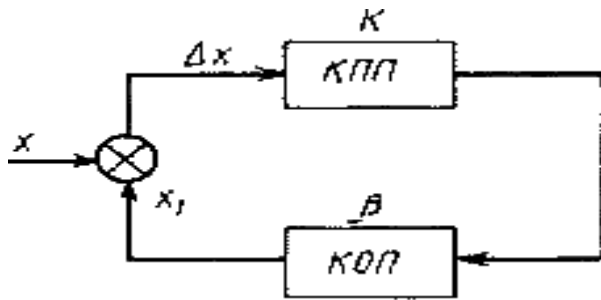
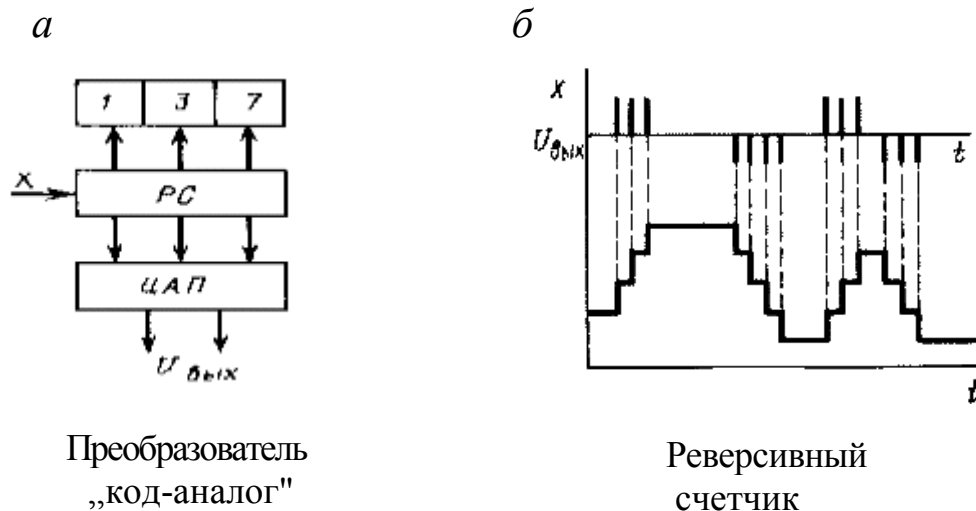


Рис. 1.3. Структурная схема СИ уравнивающего преобразования:

КПП — канал прямого преобразования; КОП — канал обратного преобразования



Преобразователь
„код-аналог“

Реверсивный
счетчик

Рис. 1.4. Электронный элемент памяти:

a — структура элемента; *б* — временная диаграмма (РС — реверсивный счетчик; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь)

По рис. 1.4 $y = \Delta x \cdot K$, $\Delta x = x - x_f$ и $x_f = y\beta$, тогда $y = Kx/(1 + K\beta)$. Если принять $K\beta \gg 1$, то вся погрешность СИ определяется нестабильностью коэффициента β .

Каждый из каналов преобразования может состоять из последовательных, параллельных либо последовательно-параллельных звеньев.

Обязательным условием работы системы статического вида является $\Delta x \neq 0$. Особенность СИ со структурой статического вида состоит в том, что погрешность в ней хуже астатической из-за наличия выходного указателя.

Астатическая система отличается от статической тем, что в ее структуре присутствует элемент памяти. Схема электронного элемента памяти показана на рис. 1.4.

Наличие элемента памяти обеспечивает поддержание выходного сигнала даже при значении $\Delta x = 0$.

Электронный элемент памяти работает следующим образом. Реверсивный счетчик $РС$ подсчитывает поступающие на его вход импульсы, при этом показания его изменяются, что видно на цифровом индикаторе. Одновременно будут меняться значения $U_{\text{ВЫХ}}$.

Общим недостатком структур уравнивающего преобразования является возникновение автоколебаний при увеличении коэффициента преобразования КПП для уменьшения погрешности СИ, поэтому стали применять структуры программного уравнивающего преобразования. Эти структуры отличаются тем, что они разомкнутого типа, следовательно, в них отсутствует ограничение на увеличение коэффициента преобразования. В таком случае источник компенсирующего сигнала формирует выходной сигнал по заранее заданной программе.

Недостаток данной системы в том, что требуется большая скорость разворачивания компенсирующего сигнала для получения минимально необходимого числа точек отсчета, с помощью которых затем можно восстановить исходную непрерывную выходную функцию с допустимой погрешностью.

1.5. Статические характеристики средств измерения

Любое СИ в статическом режиме описывается аналитической зависимостью между входной и выходной величинами: $y = f(x)$. Наиболее характерные виды этой функции представлены на рис. 1.5.

Характеристики СИ подразделяют на заданную, расчетную и экспериментальную: $y_o = f_o(x)$.

Заданная характеристика идеально отражает связь между x и y .

Расчетная характеристика имеет вид

$$y_{\text{расч}} = f_{\text{расч}}(x_1, q_1, \dots, q_m, q_{m+1}, q_n), \quad (1.10)$$

где $q_1, \dots, q_m$ — конструктивные параметры, характеризующие СИ; q_{m+1}, q_n — внутренние дестабилизирующие факторы (термоЭДС, трение в опорах и др.).

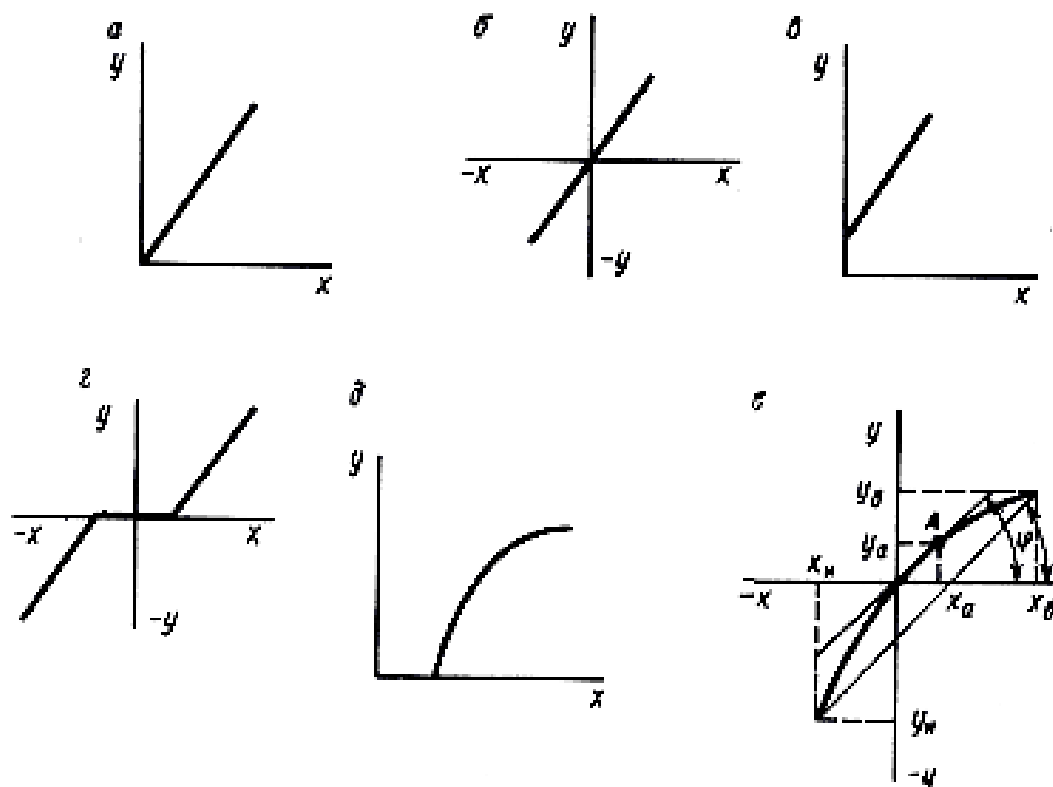


Рис.1.5. Виды статических характеристик СИ:

а, б – линейные; в – линейная со смещенным нулем; г – линейная с порогом нечувствительности; д, е – нелинейные функции

Если значения параметров $q_1, \dots, q_m$ соответствуют заданным значениям $q_1 = q_{10}, \dots, q_m = q_{m0}$, а внутренние дестабилизирующие факторы $q_{m+1} = q_{m+2} = \dots = q_{n-1} = q_n = 0$, то характеристику называют расчетно-номинальной:

$$y_{\text{расч.-ном}} = f_{\text{расч.-ном}}(x, q_{10}, \dots, q_{m0}) \quad (1.11)$$

По этой характеристике обычно осуществляют согласование элементов СИ.

Экспериментальная характеристика может быть установлена на основе эксперимента $y_{\text{экс}} = f_{\text{экс}}(x)$.

Для всех видов характеристик, кроме нелинейных, чувствительность постоянна, а для нелинейных – чувствительность является функцией положения точки на характеристике.

Рассмотрим вопросы чувствительности на примере кривой рис. 1.5, е.

Пусть точка А находится на характеристике $y = f(x)$. Здесь $X_B - X_H$ представляет собой диапазон изменения входного сигнала, а $y_B - y_H$ – шкалу СИ. В этом случае

$$s_A = \frac{y_a}{x_a} = \frac{m_y}{m_x} \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.12)$$

где m_y — масштаб по оси y ; m_x — масштаб по оси x ;

Иногда для нелинейных характеристик СИ приводится средняя чувствительность

$$\bar{s} = \frac{y_в - y_n}{x_в - x_n} = \frac{m_y}{m_x} \operatorname{tg} \varphi_0, \quad (1.13)$$

т. е. соединяют крайние точки характеристики $y = f(x)$ прямой линией и считают постоянной чувствительность во всем диапазоне измерения.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1. Измерительные преобразования и измерительные преобразователи

Измерительное преобразование представляет собой отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной.

Любое измерительное устройство использует те или иные функциональные связи (разной степени сложности), поэтому применение измерительных преобразований является единственным методом практического создания любых измерительных устройств. Что справедливо не только для сложных устройств, но и для простейших (например штангенциркуля), если под функциональным преобразованием понимать и масштабное преобразование в виде умножения на постоянный коэффициент (в т. ч. равный единице). Например, вместо расстояния между губками штангенциркуля отсчитывается соответствующее расстояние по его шкале.

В большинстве случаев целесообразно измерять неэлектрические величины электрическими приборами. Это вызвано следующими причинами:

- 1) широкий амплитудный диапазон. Использование электроники позволяет в тысячи раз усиливать электрические сигналы и, следовательно, во столько же раз увеличивать чувствительность аппаратуры (для увеличения соотношения сигнал/шум существуют специальные методы);
- 2) малая инерционность электрической аппаратуры, т. е. широкий частотный диапазон;
- 3) электрические величины значительно проще передавать на большие расстояния;

- 4) над электрическими величинами можно проводить различные математические операции, что позволяет автоматически вводить поправки, интегрировать и дифференцировать результаты и т. д.

Электрические приборы для измерения неэлектрических величин обязательно содержат измерительный преобразователь неэлектрической величины в электрическую.

Измерительный преобразователь устанавливает однозначную функциональную зависимость выходной электрической величины от измеряемой входной неэлектрической величины (температуры, перемещения, силы, давления и т. д.).

Преобразование неэлектрических величин в электрические может осуществляться двумя способами:

- 1) активным преобразованием энергии одного вида в энергию другого вида, в результате чего вырабатываются электрические величины: напряжение, ток, заряд;
- 2) воздействием на электрические величины (пассивное преобразование), требующим вспомогательной энергии:

а) на основе непосредственного применения физических зависимостей. В частности, могут быть использованы зависимости от измеряемой величины таких физических величин, как сопротивление, проводимость, магнитная и диэлектрическая проницаемости, индуктивность, напряжение, интенсивность зарядов и излучений;

б) путем механических воздействий. Эти воздействия позволяют изменять такие величины, как сопротивление, индуктивность, емкость;

в) методом компенсации (таким способом можно измерять силу тока). Компенсацию можно осуществлять вручную или автоматически.

Неэлектрические физические величины можно также преобразовывать в другие, не только электрические величины.

Измерительный преобразователь – это техническое устройство, построенное на определенном физическом принципе действия, выполняющее одно частное измерительное преобразование. На основе того же физического принципа действия могут быть созданы не измерительные, а энергетические преобразователи, предназначенные для преобразования потоков энергии. В отличие от измерительных, эти преобразователи обычно называются силовыми (силовой трансформатор, силовой выпрямитель и т. д.). Главное требование к энергетическим преобразователям – высокое значение энергетического КПД, т. е. малые потери при передаче

энергии. Основное требование к измерительным преобразователям – точная передача информации, иначе говоря, минимальные погрешности.

Понятие “измерительный преобразователь” значительно более узкое, более конкретное, чем понятие “измерительное преобразование”, т. к. одно и то же измерительное преобразование может быть выполнено целым рядом различных по принципу действия измерительных преобразователей. Пример: преобразование температуры в механическую величину

- температура → жидкостный термометр → перемещение;
- температура → термопара → ЭДС → магнитоэлектрический прибор → перемещение.

Датчиком прибора для измерения той или иной физической величины называется конструктивная совокупность ряда измерительных преобразователей, размещенных непосредственно у объекта измерения.

Метод измерения – это совокупность отдельных преобразований, необходимых для восприятия информации о размере измеряемой величины и преобразования ее в такую форму, которая необходима получателю информации (человеку, машине).

На рис.2.1 показана упрощенная схема электрического прибора для измерения неэлектрической величины.

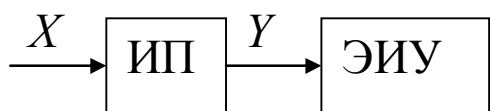


Рис. 2.1. Упрощенная схема электрического прибора

Измеряемая неэлектрическая величина X подается на вход измерительного преобразователя ИП. Выходная электрическая величина Y преобразователя измеряется электрическим измерительным устройством (ЭИУ). Обычно шкала ЭИУ градуируется в единицах электрической величины.

Широко применяются электрические приборы, в которых измеряемая неэлектрическая величина подвергается нескольким последовательным преобразованиям. В качестве предварительных преобразователей часто используют неэлектрические измерительные механизмы, преобразующие измеряемую неэлектрическую величину в перемещение подвижной части этих механизмов. Перемещение подвижной части преобразуется измерительным преобразователем в электрическую величину.

2.2. Характеристики измерительных преобразователей неэлектрических величин

Зависимость выходной величины измерительного преобразователя Y от входной X в общем виде выражается уравнением преобразования $Y = F(X)$. Функция преобразования для некоторых ИП известна, а для других ее приходится находить экспериментально, т. е. прибегать к градуировке ИП. Результаты градуировки выражаются в виде таблиц, графиков или аналитическим путем.

При оценке и сравнении ИП необходимо учитывать их следующие основные характеристики.

1. Постоянство во времени функции преобразования. При изменении с течением времени функции преобразования приходится повторять градуировку, что крайне нежелательно, а в некоторых случаях невозможно.

2. Вид функции преобразования. Обычно наиболее желателен линейный характер зависимости $Y = F(X)$. Многозначность или разрыв функции преобразования указывают на непригодность ИП для работы в данном интервале изменения измеряемой величины.

3. Погрешность и чувствительность. Основная погрешность ИП – это погрешность при нормальных условиях, т. е. при номинальных значениях влияющих величин. Дополнительная погрешность ИП – это погрешность, обусловленная отклонением одной из влияющих величин от номинального значения.

$$y = f(x) \rightarrow y = f(x, z) .$$

4. Обратное воздействие преобразователя на измеряемую величину. (Термопара, терморезистор искажают температурное поле объекта исследования.)

5. Динамические свойства преобразователя. При измерении входной величины в ИП возникает переходной процесс (не только инерционность), на характер которого влияет наличие в преобразователе элементов, запасующих энергию (перемещающихся деталей, катушек индуктивности, конденсаторов, деталей, обладающих теплоемкостью). Переходной процесс проявляется также в виде инерции – запаздывания реакции ИП на изменение входной величины.

2.3. Классификация преобразователей

Существующие преобразователи неэлектрических величин можно классифицировать по различным признакам. Наиболее часто классифика-

цию ведут по физическому принципу, заложенному в основу построения датчиков преобразователей физических величин. Выделяют 8 групп.

1. Резистивные датчики. В основу их построения заложено преобразование измеряемой физической величины в изменение омического сопротивления. При этом измеряемая механическая величина предварительно преобразовывается в перемещение (деформацию).

2. Электромагнитные датчики. К этой группе относятся датчики, которые используют взаимодействие магнитных потоков, создаваемых протекающим по контурам электрическим током. Электромагнитные датчики в свою очередь подразделяются на индуктивные, трансформаторные и индукционные.

3. Пьезоэлектрические датчики. Эти датчики основаны на использовании пьезоэффекта, при котором осуществляется преобразование динамического усилия в электрический заряд. Существуют датчики, использующие обратный пьезоэффект. Пьезоэлектрические датчики по физическому принципу действия иногда относят к электростатическим, т. к. информационным параметром является электростатический заряд.

4. Электростатические датчики. Они основаны на взаимодействии двух заряженных тел. К таким датчикам относят, например, емкостные, позволяющие регистрировать различные механические усилия, уровень жидкости, состав веществ и др.

5. Гальваномагнитные датчики. Эти датчики основаны на гальваномагнитном эффекте, сущность которого заключается в изменении электрических параметров преобразователей под действием магнитного поля или появления ЭДС. Такие датчики бывают магниторезистивного типа и основаны на эффекте Холла.

6. Электрохимические датчики. К данной группе относятся электрохимические резистивные датчики, гальванические, полярографические, электрокинетические и химотронные преобразователи. Принцип действия этих датчиков основан на зависимости параметров электролитического преобразователя от состава и концентрации, температуры и других свойств раствора, а также на зависимости электрической разности потенциалов на границе раздела твердой и жидкой фаз от скорости перемещения раствора.

7. Тепловые датчики. Принцип работы датчиков основан на использовании физических закономерностей, определяемых тепловыми

процессами. К этим датчикам относятся датчики термохимического, терморезистивного и термоэлектрического типов.

8. Оптоэлектрические датчики. Основаны на преобразовании оптических излучений в электрический сигнал. В зависимости от длин волн и интенсивности воспринимаемых оптических лучей такие датчики позволяют регистрировать яркость света, температуру веществ, спектральный состав оптических излучений, состав веществ и др.

Как указывалось ранее, в зависимости от вида выходного сигнала все датчики подразделяются на активные (генераторные) и пассивные (параметрические). Генераторные датчики под воздействием измеряемого физического параметра вырабатывают электрическую энергию. Параметрическими называют датчики, которые под воздействием измеряемой величины меняют какие-либо электрические параметры. В частности, к этим параметрам относят сопротивление, фазовый сдвиг, масштабный коэффициент и др. Для использования датчиков параметрического типа требуется дополнительный источник опорного сигнала.

Еще один способ классификации – по разновидности измеряемых физических величин. Различают датчики линейных и угловых перемещений, усилий, крутящих моментов, давлений и напряжений, параметров движения, температуры, концентрации веществ, излучения света и т. д.

Теперь перейдем к подробному рассмотрению преобразователей, используя при этом первую из трех классификаций.

2.4. Резистивные преобразователи механических величин

2.4.1. Контактные преобразователи

Существует две разновидности контактных преобразователей:

- переключательные;
- резистивные преобразователи силы.

Контактными переключательными называются измерительные преобразователи, в которых измеряемое механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. Таким образом, естественной входной величиной таких преобразователей является пространственное перемещение.

Простейший переключательный преобразователь (см. рис. 2.2) является однопредельным и имеет одну пару контактов 4 и 5, замыкание кото-

рых происходит в зависимости от измеряемого перемещения, например изменения размера изделия l .

При увеличении размера изделия переместится шток 3 и укрепленный на нем контактирующий элемент 4 войдет в соприкосновение с контактом 5. При этом активное сопротивление между контактами изменится от бесконечности до малой величины, определяемой значением контактного сопротивления.

Конструктивно измерительный шток закрепляется на плоских пружинах 2. Погрешность срабатывания переключательных преобразователей составляет 1–2 мкм.

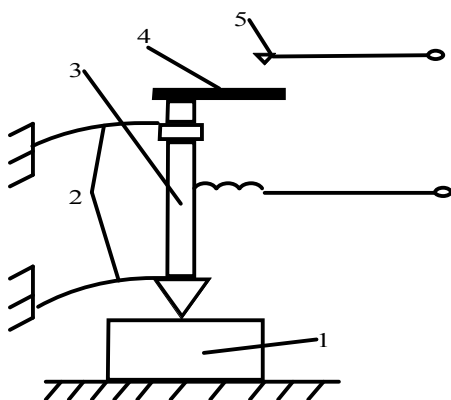


Рис. 2.2. Переключательный преобразователь

Резистивные преобразователи силы – это преобразователи, в которых используется изменение переходного сопротивления контакта при различном усилии прижима. Из угольных пластинок толщиной около 1 мм набирают столбик, чтобы приложенное осевое усилие изменяло переходное сопротивление контакта, которое практически и составляет активное сопротивление столба пластинок.

Для общего активного сопротивления столба справедливо выражение

$$R_a = R_k + R_0 = R_0 + k / F_e, \quad (2.1)$$

где R_k – контактное сопротивление между пластинками; R_0 – сопротивление пластинок; k – коэффициент пропорциональности; F_e – сила.

Исходя из этого, изменение сопротивления в зависимости от прикладываемой нагрузки можно представить в виде

$$\Delta R_a = -k \Delta F_e / [F_e (F_e + \Delta F_e)]. \quad (2.2)$$

Наряду с простотой конструктивного исполнения такие преобразователи характеризуются высокой чувствительностью. Однако им свойственны относительно большие погрешности измерений (нестабильность нуля, нестабильность, обусловленная старением).

2.4.2. Реостатные измерительные преобразователи

Реостатные измерительные преобразователи представляют собой в простейшем случае реостат, щетка (движок) которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины. Таким образом, естественной входной величиной реостатных преобразователей является перемещение движка, которое может быть либо угловым, либо линейным. Выходной величиной служит активное сопротивление, распределенное линейно или по некоторому закону по пути движка.

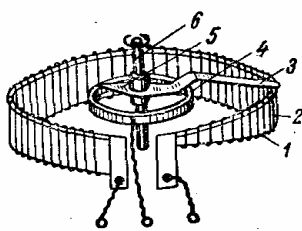


Рис. 2.2. Реостатный преобразователь

На рис. 2.2 показано устройство реостатного преобразователя. На каркас 1 из изоляционного материала намотана с равномерным шагом проволока 2. Изоляция проволоки на верхней грани каркаса зачищается, и по металлу проволоки скользит щетка 3. Добавочная щетка 5 скользит по токоъемному кольцу 4. Обе щетки изолированы от приводного валика 6.

Реостатные преобразователи выполняются как с проводом, намотанным на каркас, так и реохордного типа. Чаще всего применяют провода из манганина, константана или фехраля. В очень ответственных случаях, когда требования к износостойкости контактной поверхности особенно высоки или когда контактные давления очень малы, применяют провод из сплава платины с иридием (90% Р1 + 10% 1г). Добавка иридия к платине увеличивает твердость и прочность последней, повышает кислотоупорность, антикоррозийность и износостойкость.

Провод реостата должен быть покрыт либо эмалью, либо слоем окислов, изолирующих соседние витки друг от друга.

При работе реостатного преобразователя в условиях вибраций применяют щетки из проволок различной длины (от точки крепления до точки контактов) или из пластин с двумя-тремя надрезами. Этим обеспечивается разная собственная частота вибраций отдельных частей щетки.

Каркас реостатного преобразователя обычно выполняется из текстолита или пластмассы, применяются также каркасы из алюминия, покрытого или изоляционным лаком, или оксидной пленкой толщиной до 10 мкм, обладающей достаточно хорошими изоляционными свойствами.

Формы каркасов очень разнообразны: они могут быть в виде плоской или цилиндрической пластины, плоского или цилиндрического кольца, плоского сегмента и т. д.

Реостатные преобразователи аналогично контактными являются ступенчатыми (дискретными) преобразователями (за исключением преобразователей реохордного типа), поскольку непрерывному изменению измеряемой неэлектрической величины соответствует ступенчатое изменение сопротивления. Это обстоятельство вызывает погрешность квантования, уменьшающуюся с увеличением числа витков ω преобразователя.

Для преобразователей с равномерной намоткой погрешность квантования $\gamma = 100/(2\omega)\%$. Число витков преобразователя, определяющее его разрешающую способность, обычно выбирают не меньше 100–200.

2.4.3. Тензорезисторы

Принцип действия тензорезисторов основан на тензоэффекте, т. е. изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации. При деформации проводника изменяются его длина l и площадь поперечного сечения Q . Деформация кристаллической решетки приводит к изменению удельного сопротивления ρ . Эти изменения приводят к изменению сопротивления проводника

$$R = \rho l / Q. \quad (2.3)$$

Характеристикой тензоэффекта материала является коэффициент относительной тензочувствительности k . Он равен отношению изменения сопротивления к изменению длины проводника

$$k = \varepsilon_R / \varepsilon_l, \quad (2.4)$$

где $\varepsilon_R = \Delta R / R$ – относительное изменение сопротивления проводника; $\varepsilon_l = \Delta l / l$ – относительное изменение длины проводника.

В настоящее время нашли применение проводниковые (фольговые, проволоочные, пленочные) и полупроводниковые тензорезисторы.

Наилучшим материалом для измерения температур ниже 180 °С, является константан. Тензочувствительность константана $S_T \sim 2$. Нелинейность функции преобразования не превышает 1 %.

Фольговые тензорезисторы (см. рис. 2.3) представляют собой тонкую лаковую пленку, на которую нанесена фольговая тензочувствительная решетка из константана толщиной 4–12 мкм.

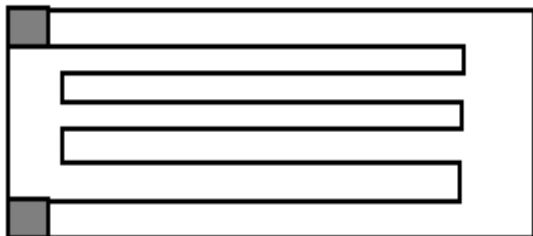


Рис. 2.3. Тензорезистор

Решетка сверху покрыта лаком. Фольговые тензорезисторы нечувствительны к поперечной деформации вследствие малого сопротивления перемычек между тензочувствительными элементами.

Проволочный тензорезистор имеет аналогичную фольговым конструкцию, но решетка выполнена из константановой проволоки диаметром 20–50 мкм. По метрологическим и эксплуатационным характеристикам лучше фольговые.

Полупроводниковые тензорезисторы представляют собой пластинку монокристалла кремния или германия длиной 5–10 мм, шириной 0,2–0,8 мм.

Номинальное сопротивление фольговых и проволочных тензорезисторов составляет 100–800 Ом, полупроводниковых 50–800 Ом. Чувствительность полупроводниковых тензорезисторов выше и лежит в пределах 55–130. Недостатком полупроводниковых тензорезисторов является большой разброс параметров.

Выделяют два основных направления использования тензорезисторов для измерения неэлектрических величин.

1. Использование тензоэффекта проводника, находящегося в состоянии объемного сжатия. В этом случае естественной входной величиной преобразователя является давление окружающего его газа или жидкости. На данном принципе строятся манометры для измерения высоких и сверхвысоких давлений. Выходной величиной преобразователя является изменение его активного сопротивления.

2. Использование тензоэффекта растягиваемого или сжимаемого тензочувствительного материала. Тензорезисторы применяются в виде “свободных” преобразователей и в виде наклеиваемых.

“Свободные” тензопреобразователи выполняются в виде одной или ряда проволок, закрепленных между подвижной и неподвижной деталями и, как правило, выполняющих одновременно роль упругого элемента. Естественной входной величиной таких преобразователей является весьма малое перемещение подвижной детали.

Наиболее распространены наклеиваемые проволочные тензорезисторы. Такой преобразователь, являясь приклеенным к испытываемой детали, воспринимает деформации ее поверхностного слоя. В итоге естественной входной величиной наклеиваемого тензопреобразователя является деформация поверхностного слоя детали, на которую он наклеен, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации.

2.5. Оптоэлектрические преобразователи

(преобразователи теплового и светового излучения)

Приемники оптического излучения можно разделить на две большие группы: тепловые и фотоэлектрические. К тепловым приемникам относятся термоэлементы и болометры, принцип работы которых основан на предварительном преобразовании энергии излучения в тепловую. К фотоэлектрическим приемникам, объединяемым общим названием “фотоэлементы”, относятся преобразователи, в которых используются явления внешнего или внутреннего фотоэффекта: вакуумные и газонаполненные фотоэлементы, фоторезисторы, вентильные фотоэлементы, фотодиоды и фототриоды, фотогальваномагнитные фотоэлементы.

Тепловой приемник представляет собой тонкий металлический диск 1 и термочувствительный элемент 3, измеряющий температуру диска (см. рис. 2.4).

Диск 1, покрытый слоем черни 2, поглощающим падающее на него излучение, нагревается до значения температуры, при котором мощность, рассеиваемая излучением, теплопроводностью и конвекцией, будет равна поглощаемой мощности. Коэффициент поглощения черной поверхности мало отличается от единицы в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения, если слой черни

имеет толщину (до 30—40 мкм), большую максимальных длин волн, на которые рассчитан приемник. Таким образом, выходная величина приемника пропорциональна интегральной мощности P_X падающего на его приемную площадку излучения и не зависит от спектрального состава этого излучения.

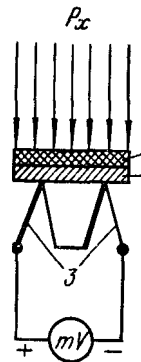


Рис. 16-6

Рис. 2.4. Тепловой приемник излучения

Для уменьшения конвективных потерь преобразователь излучения помещают в вакуум (при откачивании воздуха в баллоне до 10^{-4} мм рт. ст. чувствительность возрастает более чем в 10 раз.)

Стеклянная стенка оболочки преобразователя поглощает излучение и ограничивает спектральный диапазон преобразователя. Данный недостаток может быть уменьшен, если применять тонкие окна из кварца, прозрачного для инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Площадь элемента, воспринимающего излучение, не должна превышать сечения падающего пучка лучей и в зависимости от поставленной задачи может составлять $0,1-10^4$ мм². В качестве термочувствительного элемента могут использоваться:

- терморезистор;
- батарея термопар;
- пирозлектрический преобразователь;
- пьезорезонатор, частота которого изменяется в зависимости от температуры.

В ряде случаев преобразователь излучения не имеет специального диска и представляет собой плоскую полосу из двух различных металлов, образующих термопару, или тонкую полосу из металла или полупроводника, изменяющую свое сопротивление в зависимости от температуры. Преобразователи с изменяющимся сопротивлением на-

зываются болометрами. Порог чувствительности по мощности излучения, при которой выходное напряжение преобразователя равно эффективному напряжению шумов, составляет для наиболее чувствительных преобразователей излучения 10^{-8} — 10^{-10} Вт. Наименьшая постоянная времени преобразователей 0,5—5 мс.

Фотоэлементы, в отличие от тепловых приемников, являются селективными преобразователями, поэтому выходная величина фотоэлементов определяется не только интенсивностью падающего на них излучения, но и его спектральным составом.

Основными характеристиками фотоэлементов являются световая, спектральная, статическая, вольт-амперная и частотная.

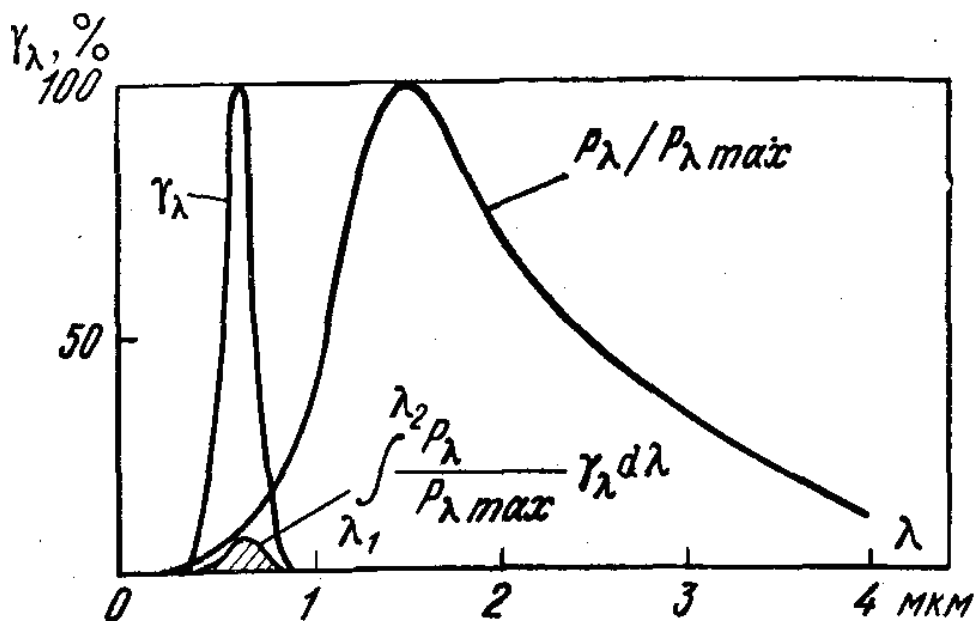


Рис. 2.5. Спектральные характеристики чувствительности фотоэлемента

Световая характеристика выражает зависимость значения фототока от величины падающего на фотоэлемент светового потока $I_{\Phi} = f(\Phi)$ при постоянном напряжении между электродами $U = \text{const}$.

Спектральная характеристика (рис. 2.5) определяет зависимость спектральной чувствительности фотоэлемента от длины волны светового потока $S_{\lambda} = f(\lambda)$ при неизменном напряжении между электродами. По этой характеристике определяют максимальную спектральную чувствительность фотоэлементов и ширину спектральной области, в которой он пригоден для работы.

Спектральной чувствительностью фотоэлемента (мкА/Вт), называют отношение приращения фототока к изменению монохроматического лучистого потока длиной волны λ :

$$S_{\lambda} = \frac{\Delta I_{\Phi}}{\Delta P_{\lambda}}. \quad (2.5)$$

Зависимость $S_{\lambda} = f(\lambda)$ называется абсолютной спектральной характеристикой. На практике же чаще используется относительная спектральная характеристика

$$\gamma_{\lambda} = \frac{S_{\lambda}}{S_{\lambda \max}}, \quad (2.6)$$

где $S_{\lambda \max}$ – максимальное значение спектральной чувствительности фотоэлемента.

Важным параметром фотоэлемента является его интегральная чувствительность

$$S_P = \frac{\Delta I_{\Phi}}{\Delta P} = \frac{S_{\lambda \max} \int_0^{\infty} P_{\lambda} \gamma_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{\lambda} d\lambda}, \quad (2.7)$$

значение которой зависит от степени перекрытия функций спектральной чувствительности фотоэлемента γ_{λ} и спектральной плотности P_{λ} лучистого потока при номинальном значении внешнего напряжения.

Интегральные чувствительности, приводимые в паспортных данных, определены при использовании стандартных источников излучения: типа А ($\theta = 2848$ К) – для фотоэлементов с внешним фотоэффектом и типа А, Б ($\theta = 2500$ К) и В ($\theta = 2360$ К) – для фотоэлементов с внутренним фотоэффектом.

Статическая вольт-амперная характеристика показывает зависимость фототока в цепи фотоэлемента от напряжения, приложенного к его электродам $I_{\Phi} = f(U)$ при постоянном значении светового потока неизменного спектрального состава $\Phi_{\lambda} = \text{const}$.

Частотная характеристика определяет зависимость амплитуды фототока в цепи фотоэлемента или его фотоЭДС от частоты пульсирующего с постоянной амплитудой потока излучения.

Фотоэлементы имеют различное конструктивное исполнение. Вакуумные фотоэлементы конструктивно оформляются обычно в виде стеклянного баллона (см. рис. 2.6), на внутреннюю поверхность которого наносится светочувствительный слой из щелочных металлов. Ка-

тод занимает около половины внутренней поверхности баллона, а остальная прозрачная его часть служит входным световым окном.

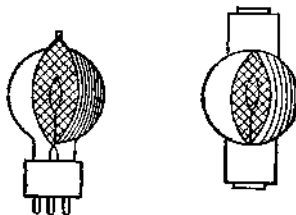


Рис. 2.6. Общий вид электровакuumных фотоэлементов

Анод фотоэлемента выполнен в виде металлического стержня, кольца или сетки и расположен в центре баллона. Внутри баллона создается вакуум до 10^{-2} – 10^{-3} Па. Под действием светового потока фотокатод излучает поток электронов, которые при наличии между катодом и анодом постоянного напряжения создают фототок.

На рис. 2.7, а приведено семейство статических вольт-амперных характеристик вакуумных фотоэлементов. Нижняя характеристика соответствует темновому току (в абсолютной темноте). Световые характеристики вакуумных фотоэлементов представлены на рис. 2.7, б.

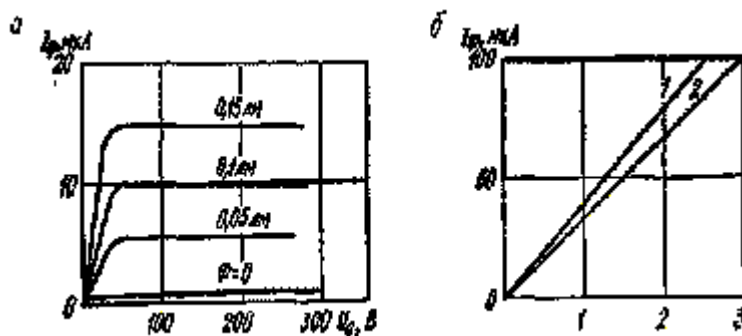


Рис. 2.7. Статические вольт-амперные характеристики вакуумных фотоэлементов

Характеристика 1 относится к сурьмяно-цезиевым фотоэлементам с металлической подложкой, а характеристика 2 – к кислородно-цезиевым.

Преобразование светового потока в ток в вакуумных фотоэлементах практически безинерционно ($\approx 10^{-9}$ с), однако следует учитывать большую инерционность цепи, определяемую внутренним сопро-

тивлением и емкостью фотоэлемента, а также подключенных к нему внешних устройств.

Недостатком электровакуумных фотоэлементов является их низкая интегральная чувствительность и значительные габариты.

Ионные фотоэлементы конструктивно аналогичны вакуумным. Отличительная особенность их состоит в том, что баллоны таких преобразователей наполнены инертным газом, например аргоном. При наличии фотоэлектронной эмиссии и электрического поля в пространстве между анодом и катодом происходит ионизация газа, за счет чего возрастает общий поток электронов.

Интегральная чувствительность ионных фотоэлементов в несколько раз выше, чем вакуумных. Существенными недостатками ионных фотоэлементов по сравнению с вакуумными является более высокий уровень собственных шумов, значительная инерционность, возникновение самостоятельного, т. е. неуправляемого световым потоком, дугового электрического разряда в газе при превышении рабочего напряжения.

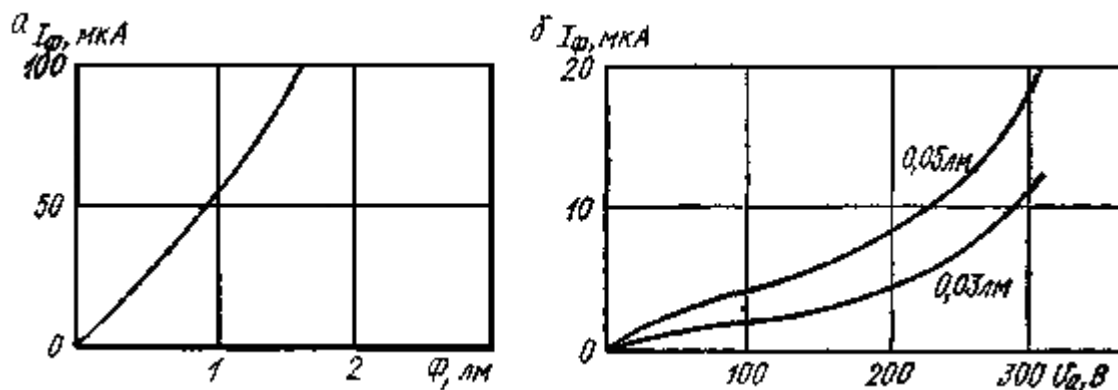


Рис. 2.8. Световая (а) и вольт-амперная (б) характеристики ионных фотоэлементов

Световая характеристика ионных элементов (рис. 2.8, а) при малых световых потоках сохраняет линейную зависимость, а при больших световых потоках линейность нарушается. Вольт-амперные характеристики (рис. 2.8, б) ионных фотоэлементов существенно отличаются от характеристик вакуумных фотоэлементов. Поскольку ионные фотоэлементы вследствие непрерывно увеличивающейся ионизации газа не имеют режима насыщения, их вольт-амперные характеристики не содержат горизонтальных участков.

Разновидностью электровакуумных фотоэлементов являются *фотоэлектронные умножители* — комбинированные фотоэлементы, использующие первичную фотоэлектронную и вторичную электронную

эмиссии. При этом вторичная электронная эмиссия вызывается бомбардировкой потоком первичных электронов вторичных катодов, находящихся под более высокими потенциалами. Общий коэффициент усиления может достигать сотен тысяч и даже нескольких миллионов.

Благодаря большому коэффициенту усиления и сравнительно низкому уровню собственных шумов фотоэлектронные умножители успешно используются для регистрации очень слабых световых сигналов, значение которых могут составлять единицы фотонов. Фотоэлектронные умножители используются, например, в спектроскопии, толщиномерах, уровнемерах и т. п.

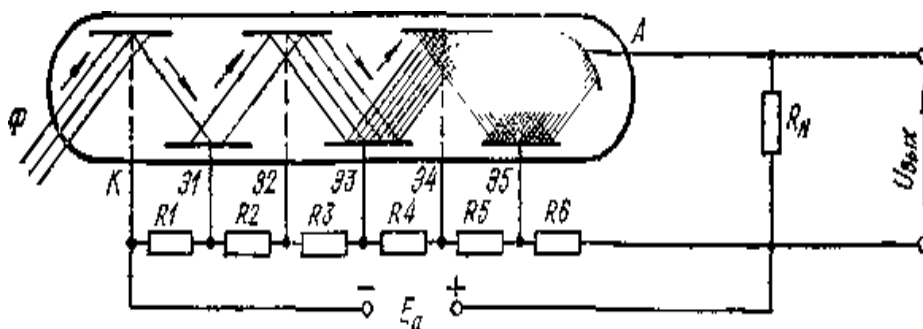


Рис. 2.9. Принцип действия фотоэлектрического умножителя

Конструктивно фотоумножитель представляет собой цилиндрический стеклянный баллон с помещенной внутри системой электродов и системой фокусировки электронного пучка, а также контактными выводами, расположенными на цоколе преобразователя. Система электродов состоит из катода К, анода А и вторичных катодов (эмиттеров) Э (рис. 2.9).

Фотоэлектронные умножители почти безынерционны. Их световая характеристика линейна в широком диапазоне изменения светового потока, внутреннее сопротивление достигает 10^4 МОм, порог чувствительности 10^{-9} – 10^{-12} Ом, область спектральной чувствительности для различных типов умножителей составляет примерно 3 000–8 000 А.

Фоторезисторами называют светочувствительные полупроводниковые преобразователи, обладающие фоторезистивным эффектом и увеличивающие свою электропроводность под воздействием светового потока. Конструктивное оформление фоторезисторов и применяемые светочувствительные материалы разнообразны. В одних фоторезисторах полупроводниковый светочувствительный материал нанесен методом напыления в вакууме или химическим осаждением на изоляцион-

ную пластину, которая помещена в пластмассовую или металлическую оправу с окошком для пропускания света. У других фоторезисторов, наш пример ФС-К, светочувствительный элемент изготовлен методом прессования из порошкообразного материала в виде прямоугольных или кольцевых пластинок с последующей наклейкой на изоляционную подложку. Светочувствительный элемент фоторезисторов ФСК-М изготовлен из монокристалла кадмия. Светочувствительный слой всей фоторезисторов покрыт прозрачной защитной лаковой пленкой.

Одной из основных характеристик фоторезисторов является кратность изменения сопротивления

$$n = \frac{R_{\text{темн}}}{R_{\text{свет}}}, \quad (2.8)$$

где $R_{\text{темн}}$ – темновое сопротивление; $R_{\text{свет}}$ – сопротивление освещенного фотопреобразователя.

Значения коэффициента n для различных фоторезисторов лежат в пределах от единиц до нескольких десятков тысяч.

Вольт-амперные характеристики этих преобразователей линейны в пределах допустимой мощности рассеивания (0,01–0,1 Вт), световая характеристика имеет вид $I_{\phi} = A\Phi_k^m$, где $m = 1 \dots 0,5$. Данная характеристика линейна при малых освещенностях.

Характеристики фоторезисторов сильно зависят от температуры. Поэтому их допустимый температурный диапазон составляет $-60 \dots +60$ °С.

Существенным недостатком, ограничивающим частотный диапазон, является инерционность фоторезисторов, достигающая для некоторых их типов 0,01–0,1 с.

Вентильный фотоэлемент представляет собой полупроводниковый диод (см. рис. 2.10, а), чувствительным элементом которого является полупроводник p -типа, над которым специальной обработкой образован тонкий слой полупроводника n -типа и разделяющий их тончайший запирающий слой, называемый p – n –переходом. Сверху полупроводник покрыт полупрозрачным металлическим слоем или сеткой 1 из серебра, золота или платины, служащей верхним электродом. Нижним электродом является металлическое основание 2.

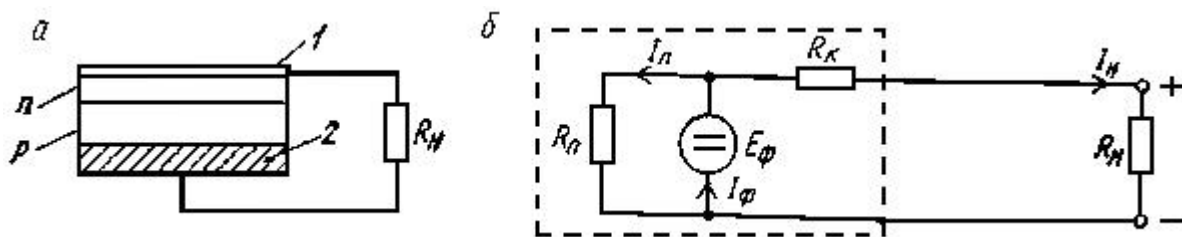


Рис. 2.10. Вентильный фотоэлемент и его эквивалентная схема

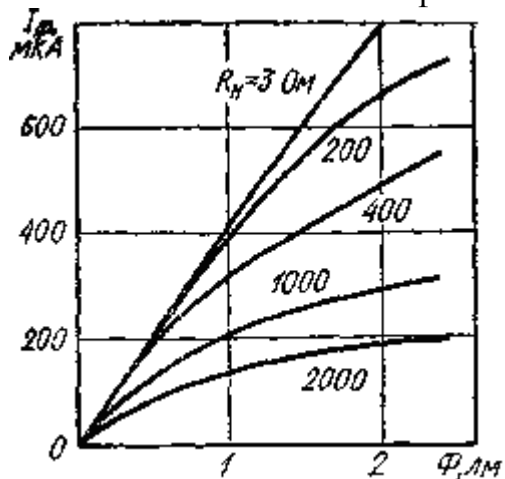


Рис. 2.11. Световые характеристики селеновых вентильных фотоэлементов

Под действием светового потока, проникающего через полупрозрачный электрод и тонкий слой n -полупроводника, вследствие фотоэффекта в p -полупроводнике образуется повышенная концентрация электронно-дырочных пар. Электроны увлекаются потенциальным барьером на границе p - n -перехода и беспрепятственно проникают в слой n -полупроводника, заряжая его отрицательно, а дырки, оставшиеся в p -полупроводнике, заряжают его положительно. В результате этого процесса между электродами возникает разность потенциалов, значение которой зависит от интенсивности светового потока и интегральной чувствительности фотоэлемента.

Если к электродам освещаемого вентильного фотоэлемента подключить сопротивление нагрузки R_H , то под действием возникшей фотоЭДС в цепи потечет электрический ток, который, как это следует из эквивалентной схемы фотогенератора (рис. 2.10, б), будет равен

$$I_H = I_\Phi \frac{R_n(\Phi)}{R_n(\Phi) + R_k + R_H} = \frac{k\Phi}{1 + (R_k + R_H)/R_n(\Phi)}, \quad (2.9)$$

где $R_n(\Phi)$ — внутреннее сопротивление фотоэлемента, являющееся функцией светового потока; R_k — сопротивление контактов; $I_\Phi = k\Phi$ — первичный фототок, возбуждаемый в фотогенераторе (вентильном фотоэлементе).

При малых значениях потока и малых сопротивлениях нагрузки $R_k + R_n \ll R_n(\Phi)$ ток в нагрузке будет линейной функцией светового потока. При больших световых потоках световые характеристики нелинейны даже в режиме короткого замыкания, т.к. в этом случае $R_n(\Phi) < R_k$.

Следует отметить, что вентильные фотоэлементы обладают большой инерционностью, из-за чего они могут быть использованы лишь при постоянных световых потоках.

Фотодиодами называют вентильные фотоэлементы, используемые преимущественно в диодном режиме работы, т. е. с внешним источником напряжения, подключенным к фотоэлементу в обратном направлении. При таком включении потенциальный барьер возрастает и определяется внешним напряжением. Условия проникновения неосновных носителей через $p-n$ -переход существенно облегчаются, а обратное сопротивление этого перехода резко возрастает. В результате возрастает чувствительность, а световые характеристики становятся линейными в широком диапазоне световых потоков.

Наибольшее распространение получили кремниевые и германиевые фотодиоды ФД и ФДК.

2.6. Тепловые преобразователи

2.6.1. Термоэлектрические преобразователи

Принцип действия термоэлектрического преобразователя (термопары) основан на использовании термоэлектрического эффекта, сущность которого заключается в возникновении термоЭДС e_0 в цепи, состоящей из двух разнородных проводников или полупроводников, называемых термоэлектродами, если температуры θ_1 и θ_2 соответствующих частей преобразователя (рис. 2.12, а) разные.

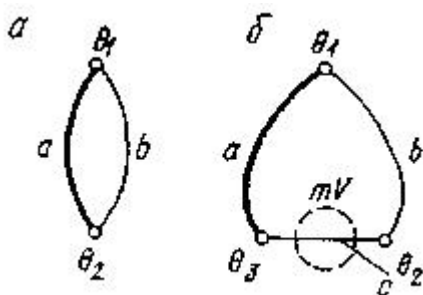


Рис. 2.12. Простейшие термоэлектрические цепи

Строгой теории термоэлектрических явлений на сегодняшний день не существует. Возникновение термоЭДС объясняется суммарным действием двух термоэлектрических эффектов: явления Томсона и явления Зеебека. Явление Томсона заключается в установлении на концах однородного проводника, имеющего температурный градиент, некоторой разности потенциалов вследствие того, что электроны диффундируют от горячего конца проводника к холодному. Возникающая термоЭДС, называемая *термоЭДС Томсона*, определяется выражением:

$$e_{\theta} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sigma d\theta, \quad (2.10)$$

где σ — коэффициент Томсона для данного проводника.

Если составить цепь из двух различных однородных проводников a и b , то суммарная термоЭДС Томсона равна разности термоЭДС Томсона каждого проводника и определяется выражением

$$e_{\theta ab} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sigma_a - \sigma_b) d\theta \quad (2.11)$$

где σ_a и σ_b — коэффициенты Томсона для проводника a и b соответственно.

Сущность явления Зеебека состоит в следующем. При соприкосновении двух разнородных проводников в месте их контакта возникает контактная разность потенциалов, обусловленная различной концентрацией носителей зарядов. Зеебеком было установлено, что в замкнутой цепи двух разнородных проводников, спаи которых находятся при разных температурах, электродвижущая сила $E_{ab}(\theta_1)$, возникающая при переходе от проводника a к проводнику b в точке с температурой θ_1 , и электродвижущая сила $E_{ba}(\theta_2)$, возникающая при переходе от проводника b к проводнику a , имеют противоположные знаки и не равны между собой.

Суммарная термоЭДС, которая возникает в цепи, состоящей из двух различных проводников a и b , является суммой контактных ЭДС и ЭДС Томсона:

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = E_{ab}(\theta_1) + E_{ba}(\theta_2) + \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sigma_a - \sigma_b) d\theta. \quad (2.12)$$

Эта суммарная термоЭДС для данной пары проводников зависит только от значений температур θ_1 и θ_2 и может быть представлена разностью соответствующих функций:

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = e_{ab}(\theta_1) - e_{ab}(\theta_2). \quad (2.13)$$

При малых разностях температур спаев можно допустить, что развиваемая термопарой термоЭДС пропорциональна разности температур спаев

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = k(\theta_1 - \theta_2), \quad (2.14)$$

где k — коэффициент пропорциональности, различный для разных, пар материалов термоэлектродов.

Если один спай поместить в среду с постоянной температурой, например θ_2 , то возникающая термоЭДС в общем случае является нелинейной функцией температуры θ_1 :

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = e_1(\theta_1) \quad (2.15)$$

Спай термопары, помещаемый в исследуемую среду, называют рабочим или горячим, а концы, температура которых поддерживается обычно постоянной, — свободными или холодными.

Поскольку в цепь термопары подключается измерительный прибор либо иной преобразователь, то в месте подсоединения образуются другие спаи и цепь термопары в простейшем случае следует рассматривать как состоящую из трех проводников a , b и c (рис. 2.12, б). Суммарная термоЭДС такой цепи такова:

$$e = e_{ab}(\theta_1) + e_{bc}(\theta_2) + e_{ca}(\theta_3). \quad (2.16)$$

Так как согласно закономерности Вольта $e_{ca}(\theta) = -e_{ab}(\theta) - e_{bc}(\theta)$ последнее выражение можно записать в виде:

$$e = e_{ab}(\theta_1) + e_{bc}(\theta_2) - e_{ab}(\theta_3) - e_{bc}(\theta_3) \quad (2.17)$$

Учитывая, что

$$e_{ab}(\theta_1) - e_{ab}(\theta_3) = e_{ab}(\theta_1, \theta_3), \quad (2.18)$$

$$e_{bc}(\theta_2) - e_{bc}(\theta_3) = e_{bc}(\theta_2, \theta_3),$$

получим

$$e = e_{ab}(\theta_1, \theta_3) + e_{bc}(\theta_2, \theta_3). \quad (2.19)$$

Из выражения (2.19) следует, что если температуры θ_2 и θ_3 на границах третьего проводника не равны, то термоЭДС термопары ab искажается ЭДС $e_{bc}(\theta_2, \theta_3)$ паразитной термопары bc . Если же $\theta_2 = \theta_3 = \theta_0$, то $e_{bc}(\theta_2, \theta_3) = 0$ и $e = e_{ab}(\theta_1, \theta_0)$, т. е. наличие в цепи термопары

третьего проводника, на границах которого температуры равны, не вызывает искажения термоЭДС основной термопары.

Выражение $e_{ca}(\theta) = e_{cb}(\theta) - e_{ab}(\theta)$ позволяет определить термоЭДС любой термопары при известных термоЭДС других термопар, образованных каждым из термоэлектродов с базовым. Для сравнения термоэлектрических характеристик материалов была создана единая платиновая нормаль, по отношению к которой определяется термоЭДС других материалов. Поэтому в справочной литературе принято приводить значения термоЭДС, развиваемых наиболее распространенными термоэлектродными материалами в паре с платиной при температуре рабочего спая $\theta_1 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ и температуре свободных концов $\theta_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$.

2.6.2. Терморезистивные преобразователи

Принцип действия терморезистивных преобразователей основан на свойстве проводников или полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Для преобразований температуры используют материалы, обладающие высокой стабильностью температурного коэффициента сопротивления (ТКС), высокой воспроизводимостью электрического сопротивления для данной температуры, значительным удельным электрическим сопротивлением и высоким ТКС, стабильностью химических и физических свойств при нагревании, инертностью к воздействию исследуемой среды.

Из проводниковых материалов широкое применение получила платина. Этот благородный металл даже при высоких температурах в окислительной среде не изменяет своих физических и химических свойств. Температурный коэффициент сопротивления в диапазоне $0...100\text{ }^\circ\text{C}$ составляет примерно $1/273\text{ град}^{-1}$, удельное сопротивление при $20\text{ }^\circ\text{C}$ равно $0,105\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, диапазон преобразуемых температур составляет $-260...+1300\text{ }^\circ\text{C}$.

Температурная зависимость сопротивления платины в диапазоне $0...650\text{ }^\circ\text{C}$ описывается уравнением Каллендара

$$R_\theta = R_0(1 + A\theta + B\theta^2), \quad (2.20)$$

где R_θ, R_0 — сопротивления преобразователя при θ и $0\text{ }^\circ\text{C}$; A и B — постоянные коэффициенты (для платиновой проволоки, применяемой в промышленных термопреобразователях температуры, $A = 3,9702 \cdot 10^{-3}\text{ 1/K}$, $B = -5,8893 \cdot 10^{-7}\text{ 1/K}^2$).

В интервале температур 0...-200 °С зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид

$$R_{\theta} = R_0 [1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100)^3], \quad (2.21)$$

где $C = -4,356 \cdot 10^{-12} \text{ 1/K}^3$ — постоянный коэффициент.

Зависимости (2.20) и (2.21) являются весьма точной аппроксимацией функции преобразования платиновых преобразователей температуры в интервале -200... + 650 °С, которые используются в этом интервале для воспроизведений Международной температурной шкалы как эталонные.

К недостаткам платиновых преобразователей температуры относится довольно высокая загрязняемость платины при высоких температурах парами металлов (особенно железа), сравнительно невысокая химическая стойкость в восстановительной среде, вследствие чего она становится хрупкой, теряет стабильность характеристик.

Медь благодаря своей низкой стоимости и довольно высокой стойкости к коррозии широко применяется в преобразователях температуры в диапазоне -50...+180 °С. Температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha_{\theta} = 1/234,7 \text{ 1/K}$, зависимость электрического сопротивления от температуры — линейная:

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha_{\theta}\theta). \quad (2.22)$$

К недостаткам медных преобразователей температуры относится высокая окисляемость меди при нагревании, вследствие чего они применяются в указанном сравнительно узком диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов.

Кроме платины и меди для чувствительных элементов термопреобразователей температуры применяют никель, вольфрам и другие чистые металлы.

Никель — химически стойкий материал даже при высоких температурах, однако имеет сложную зависимость сопротивления от температуры и невысокую ее воспроизводимость. В диапазоне температуры -50...+180 °С температурная зависимость сопротивления никеля следующая

$$R_{\theta} = R_0(1 + A\theta + B\theta^2 + C\theta^3) \quad (2.23)$$

где $A = 0,00547 \text{ 1/K}$, $B = 0,639 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}^2$; $C = 0,69 \cdot 10^{-8} \text{ 1/K}^3$ — постоянные коэффициенты.

Тугоплавкие металлы — вольфрам, молибден, тантал и ниобий — имеют ограниченное применение. Влияние рекристаллизации и роста зерен в результате действия температуры делает чувствительный эле-

мент из таких материалов хрупким и поэтому очень чувствительным к механическим вибрациям.

Сплавы, обладающие более высоким удельным электрическим сопротивлением, чем чистые металлы, не нашли применения как материалы чувствительных элементов термопреобразователей из-за сравнительно низкого ТКС, значение которого во многом зависит от количественного и качественного состава примесей. Следует отметить, что незначительное количество примесей в чистых металлах практически не изменяет характера зависимости их сопротивления от температуры. Дело в том, что согласно правилу Матиссена – Флеминга составляющая сопротивления, вызванная загрязнениями, не зависит от температуры, а следовательно, характер температурной зависимости металла с незначительным количеством примесей определяется температурной зависимостью основного материала.

Полупроводниковые терморезисторы отличаются от металлических большими значениями ТКС, и меньшими габаритами, и инерционностью. Температурная зависимость таких термопреобразователей довольно хорошо описывается формулой

$$R_{\theta} = Ae^{\frac{B}{\theta}} \quad (2.24)$$

где A , B — постоянные коэффициенты.

Существует много разновидностей полупроводниковых терморезисторов, отличающихся конструктивными и техническими параметрами. Это стержневые полупроводниковые терморезисторы, покрытые эмалью (ММТ-1, КМТ-1), герметизированные металлической капсулой (ММТ-4, КМТ-4), каплевидные герметизированные стеклом (СТЛ-19, СТЗ-19) и др. Номинальные значения сопротивлений терморезисторов имеют допуск обычно $\pm 20\%$.

В общем случае коэффициент B не является величиной постоянной. Однако зависимость сопротивления от температуры полупроводниковых терморезисторов в рабочем диапазоне преобразований может быть достаточно точно аппроксимирована двумя функциями и определяться для низких температур одним значением B , а для высоких — другим. Недостатками полупроводниковых терморезисторов, существенно снижающими их эксплуатационные качества, является нелинейность зависимости сопротивления от температуры, значительный разброс как номинальных значений сопротивлений различных образцов, так и их ТКС.

2.7. Возбуждение и прием упругих волн электроакустическими преобразователями

Излучение и прием упругих волн осуществляют с помощью электроакустических преобразователей. *Электроакустические преобразователи* трансформируют электрическую энергию в механические колебания и обратно. Преобразователи классифицируют по нескольким признакам.

По способу акустического контакта различают преобразователи:

контактные, которые прижимают к поверхности ОК, предварительно смазанной контактной жидкостью. Иногда слой жидкости заменяется эластичным протектором. Толщина слоя контактной среды не превышает $\lambda/2$;

иммерсионные, между поверхностью которых и изделием находится слой контактной жидкости толщиной в несколько длин волн. Изделие целиком или частично погружается в ванну;

контактно-иммерсионные с локальной иммерсионной ванной;

щелевые, между поверхностью которых и ОК создается зазор около длины волны, а контактная жидкость удерживается силами поверхностного натяжения;

с сухим точечным контактом. Они имеют шарообразную поверхность, соприкасающуюся с изделием;

бесконтактные, возбуждающие упругие волны через слой воздуха (воздушно-акустическая связь) или с помощью трансформации электрической энергии в акустическую в самом объекте контроля с помощью тех или иных физических эффектов.

По способу соединения преобразователей с УЗ дефектоскопом различают такие:

совмещенные преобразователи, которые одновременно соединяются и с генератором и с приемником дефектоскопа. Они служат как для излучения, так и для приема ультразвука;

раздельные преобразователи. Излучатель подсоединяют к генератору дефектоскопа, приемный преобразователь подсоединяют ко входу приемно-усилительного блока дефектоскопа;

раздельно-совмещенные преобразователи, которые состоят из излучающей и приемной частей, объединенных конструктивно между собой.

По направлению акустической оси преобразователи разделяют:

- 1) на *прямые*, излучающие волны нормально к поверхности ОК;
- 2) на *наклонные*, в том числе с переменным углом наклона.

По форме акустического поля различают преобразователи:

обычные с плоской пьезопластиной;

фокусирующие. Пучок волн, который излучают такие преобразователи, сужается в определенной (малой) области пространства;

мозаичные, в т. ч. фазированные решетки. Состоят из нескольких элементов, управляемых по отдельности.

Различают *узкополосные и широкополосные преобразователи*. Ширина полосы пропускания узкополосных преобразователей меньше одной октавы, у широкополосных – больше одной октавы. Одна октава означает отношение частот на концах диапазона, равное двум.

Электроакустические преобразователи используют несколько физических эффектов для генерации акустических колебаний и волн: есть пьезоэлектрические преобразователи, электромагнитно-акустические, электроемкостные лазерные, магнитострикционные и др. Наибольшее применение находят пьезоэлектрические преобразователи. Ниже мы рассмотрим их подробно, а сначала укажем принцип действия преобразователей остальных перечисленных выше типов.

2.7.1. Электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи

Действие электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМА) основано на электродинамическом и магнитоупругом взаимодействиях. Упругие волны возбуждаются и принимаются бесконтактным способом. Простейшая схема ЭМА-преобразователя показана на рис. 2.13. Объект контроля намагничен магнитом 1. Катушка 2 питается переменным током и создает переменное магнитное поле. За счет магнитоупругого взаимодействия происходит взаимное притяжение и отталкивание ферромагнитного материала и катушки. Электродинамическое взаимодействие возникает в токопроводящих материалах. Переменное магнитное поле возбуждает в ОК вихревые токи. На элемент объема ОК, в котором течет вихревой ток, действует пондеромоторная сила F , направление которой показано стрелками на рис. 2.14. Под действием переменной силы F элемент объема совершает колебания. В результате по нормали к поверхности распространяется волна, упругие смещения которой лежат в плоскости, параллельной поверх-

ности. Таким образом, генерируется поперечная волна. Пондеромоторная сила пропорциональна произведению силы переменного тока J и магнитной индукции B . Поэтому и амплитуда упругих смещений также пропорциональна произведению JB .

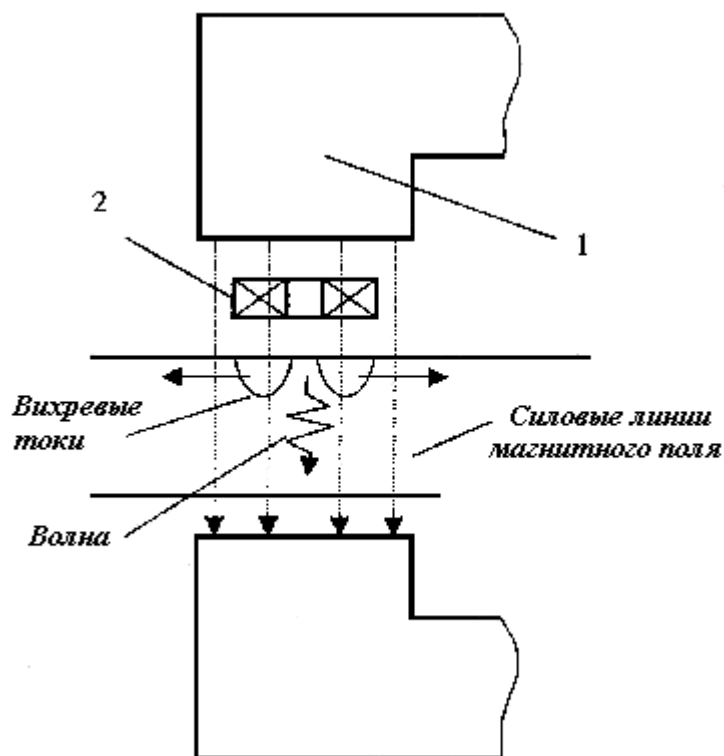


Рис. 2.13. Схема ЭМА-преобразования

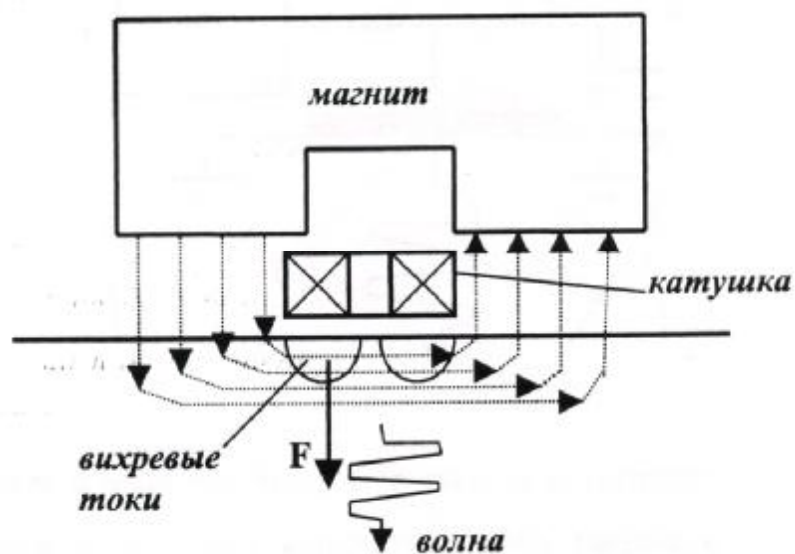


Рис. 2.14. Схема ЭМА-преобразователя для продольных волн

Прием упругих волн также может осуществляться ЭМА-преобразователем. К приемному ЭМА-преобразователю предъявляются несколько иные требования, чем к излучающему. Амплитуда сигнала с него пропорциональна числу витков катушки, поэтому число витков приемной катушки в отдельных и отдельно-совмещенных преобразователях больше, чем в излучающей. ЭМА-преобразователи соответствующей конструкции позволяют возбуждать поперечные волны, распространяющиеся под углом к поверхности ввода, а также продольные и поверхностные волны. Схема возбуждения продольных волн показана на рис. 2.14. В этом случае пондеромоторная сила действует вдоль нормали к поверхности ввода.

Эффективность возбуждения акустических волн ЭМА-преобразователями существенно ниже, чем пьезоэлектрическими. Кроме того, часто она сильно зависит от расстояния между катушкой и объектом контроля. Тем не менее, ЭМА-преобразователи нашли несколько областей применения. Их главное преимущество – бесконтактное излучение и прием волн, благодаря чему возможен контроль с высокой скоростью перемещения. Преобразователи этого типа применяются для контроля нагретых изделий, а также в ультразвуковой толщинометрии. ЭМА-преобразователи успешно применяются для контроля изделий, однородных по сечению, таких как листы, прутки, трубы, прокат. Объекты контроля могут иметь довольно грубую поверхность, но обязательно должны быть либо проводящими, либо ферромагнитными.

2.7.2. Электроемкостные преобразователи

Электроемкостные преобразователи (рис. 2.15) используют электростатическое взаимодействие пластины – электрода 1 с объектом контроля 2. Генератор переменного напряжения 3 периодически заряжает пластину и создает электрическое поле в зазоре между пластиной и ОК, из-за чего возникает сила притяжения пластины и изделия, возбуждающая упругую волну в объекте контроля. Это продольная волна, распространяющаяся по нормали к поверхности, она имеет удвоенную частоту по сравнению с частотой генератора. Удвоенная частота возникает потому, что за один период колебаний генератора между пластинами и ОК дважды возникает сила притяжения, независимо от знака заряда пластины. Источник постоянного напряжения 4 обеспечива-

ет начальное прижатие пластины. Между пластиной и объектом контроля помещают слой диэлектрика 5.

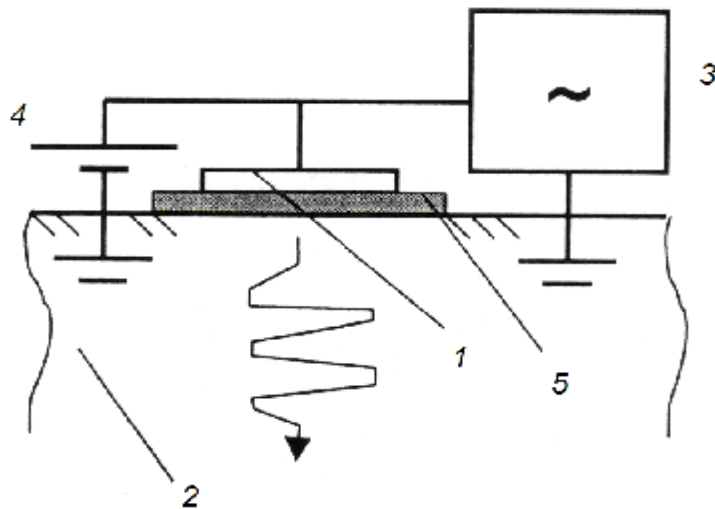


Рис. 2.15. Электроемкостный преобразователь

Электроемкостные преобразователи используются для контроля металлических (проводящих) изделий. Расстояние между пластиной и ОК должно быть по возможности меньше, как правило, это десятые доли миллиметра. Коэффициент преобразования таких преобразователей невелик, значительно меньше пьезоэлектрических.

2.7.3. Лазерные преобразователи

Схемы лазерных излучателей и приемников различны. Излучатели относятся к группе термоакустических преобразователей, возбуждающих упругие волны за счет быстрого нагрева поверхности твердого тела, например, электрической искрой или лучом импульсного лазера. Принцип действия лазерного излучателя иллюстрирует рис. 2.16.

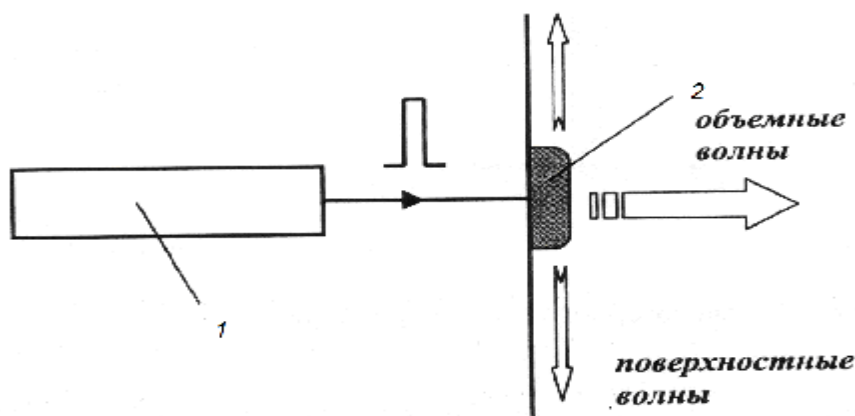


Рис. 2.16 Лазерное возбуждение ультразвука

Луч лазера 1 падает на объект контроля. Энергия, содержащаяся в импульсе излучения, выделяется в изделии и превращается в тепло, вызывая быстрый локальный нагрев в области 2. Из-за теплового расширения при нагреве возникают упругие смещения, распространяющиеся в виде волн. Особенность лазерного способа возбуждения состоит в том, что одновременно возбуждается целый спектр частот акустических волн от сотен килогерц до ста мегагерц. Энергия одного импульса лазера составляет единицы джоулей. Частота повторения невелика, 1–10 импульсов в секунду, это ограничивает скорость сканирования. За счет малого диаметра луча лазера данным способом можно возбуждать волны в труднодоступных местах ОК.

Бесконтактный прием упругих колебаний и волн осуществляется с помощью лазерного интерферометра. Простейшая схема интерферометра показана на рис. 2.17. В интерферометрах используются лазеры с непрерывным излучением. Луч лазера 1 попадает на полупрозрачное зеркало 2 и разделяется на два. Один луч отражается от зеркала 3 и попадает в фотоприемник 4. Другой луч падает на поверхность ОК, отражается от нее, вновь попадает на полупрозрачное зеркало и, наконец, падает в фотоприемник. Если на поверхность объекта контроля падает упругая волна, то она вызывает смещения поверхности и приводит к разности хода между двумя лучами. Фотоприемник выделяет сигнал, пропорциональный скорости смещения отражающей поверхности ОК.

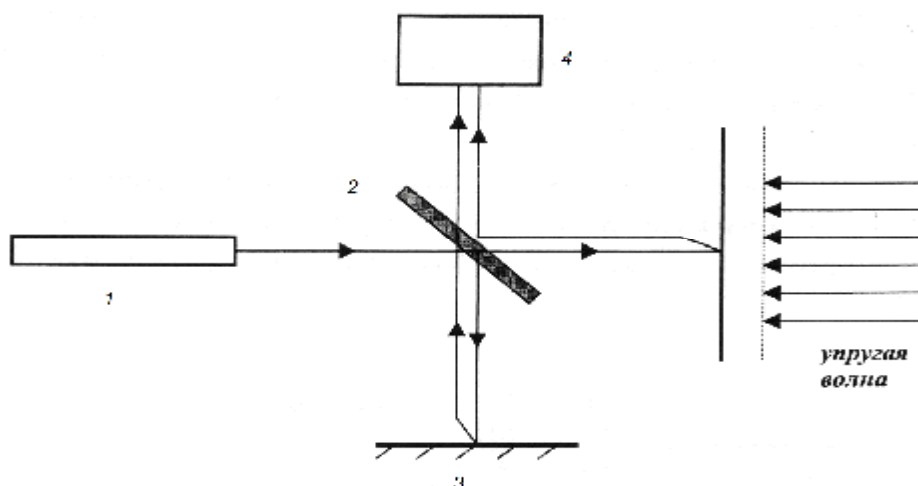


Рис. 2.17. Схема лазерного интерферометра

К достоинствам лазерного приемника упругих волн можно отнести широкополосность и возможность абсолютных измерений без эталонных образцов. Однако методу присущи недостатки: сложность аппаратуры, чувствительность к вибрациям, возможен контроль только хорошо отражающих свет гладких (шлифованных или полированных) поверхностей.

2.7.4. Магнитострикционные преобразователи

Для возбуждения мощных низкочастотных ультразвуковых колебаний используются магнитострикционные преобразователи. *Магнитострикция* – это изменение линейных размеров тела при намагничивании. Обратный эффект называют магнитоупругостью. Схема магнитострикционного преобразователя показана на рис. 2.18. Намагничивающая катушка питается переменным током. Сердечник из-за эффекта магнитострикции изменяет размеры и возбуждает колебания в ОК. На частотах до 40 кГц применяют магнитострикционные преобразователи из никеля, пермаллоя или пермендюра. На высоких частотах потери из-за вихревых токов возрастают и снижают эффективность преобразования. В качестве сердечников возможно применение редкоземельных материалов с очень большой магнитострикцией, например терфенола, и магнитодиэлектриков – ферритов.

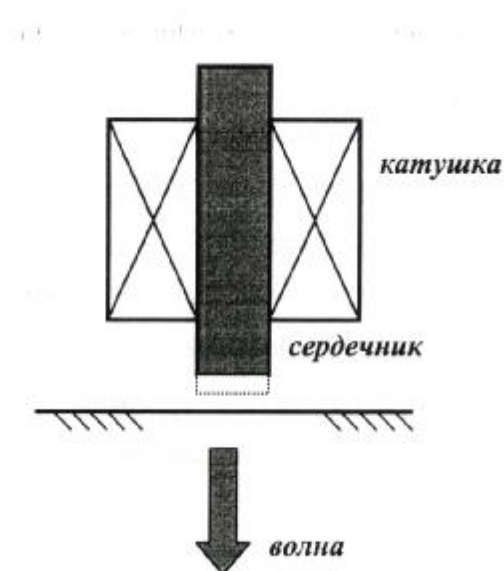


Рис. 2.18. Магнитострикционный преобразователь

2.7.5. Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрические преобразователи используют прямой и обратный пьезоэффект. *Прямым пьезоэффектом* называется возникновение связанных электрических зарядов на поверхности тела при его деформации (см. рис. 2.19, *а*). Если на пластинку из пьезоэлектрического материала падает упругая волна, вызывая его деформацию, то на поверхности пластинки возникают переменные электрические заряды. Это явление используется при приеме упругих волн.

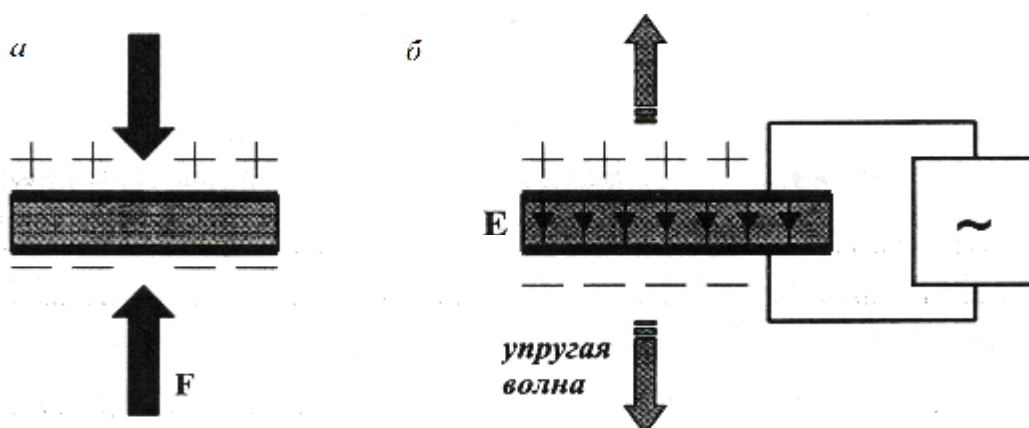


Рис. 2.19. Явления прямого (*а*) и обратного (*б*) пьезоэффекта

Обратным пьезоэффектом называется изменение размеров тела в электрическом поле (E на рис. 2.19, б). Явление обратного пьезоэффекта применяют для возбуждения волн.

Прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты наблюдаются в некоторых кристаллах, например, в кварце. Для возбуждения нужного вида колебаний пластинку вырезают вдоль определенного кристаллографического направления. В преобразователях, предназначенных для ультразвуковой дефектоскопии, чаще всего применяют сегнетоэлектрическую пьезокерамику. Пьезокерамическому материалу придают требуемую форму, пока он находится в пластичном состоянии. Затем его спекают при высокой температуре около 1000°C и выше и поляризуют в сильном электрическом поле.

Обычно пьезоэлементу придают форму пластины. На обе поверхности пластины наносят тонкие металлические электроды. *Резонансная частота* пьезопластины зависит от ее толщины h . Условие резонанса таково: на толщине h должна укладываться половина длины ультразвука, $h = \lambda/2$. Отсюда для резонансной частоты f_0 получаем формулу

$$f_0 = \frac{c}{2h}, \quad (2.25)$$

где c — скорость ультразвука в материале пьезоэлемента. Поперечные размеры пьезопластины выбирают из условия $af_0 = (12 \dots 15) \text{ мм} \cdot \text{МГц}$, где a — радиус пьезопластины.

Эффективность возбуждения волн пьезоэлементом зависит от пьезомодуля

$$dq = dP, \quad (2.26)$$

где q — величина связанных зарядов на единицу площади, P — давление.

Пьезоэлектрические свойства сохраняются до температуры, называемой *точкой Кюри* T_k . Выше T_k пьезосвойства материала пропадают. Для изготовления пьезопластин ультразвуковых преобразователей чаще всего применяют кристаллический кварц, титанат бария и пьезокерамику цирконат-титанат свинца марки ЦТС-19. Их основные свойства сведены в табл. 2.1.

Благодаря хорошим пьезоэлектрическим свойствам, достаточно высокой температуре Кюри преобразователи с пластинами из ЦТС-19 нашли наиболее широкое применение. К недостаткам пластин из тита-

ната бария относят низкую температуру Кюри и временное старение. Пьезопреобразователи из кварца имеют низкую чувствительность, но зато очень хорошую временную стабильность и высокую T_k . При точно выдержанной кристаллографической ориентации пластины они способны излучать и принимать чистые моды (продольные или поперечные).

Таблица 2.1

Основные свойства материалов

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Пьезомодуль d , 10 ⁻¹² Кл/Н	T_k , °С	Скорость звука, км/с
Кварц	2,65	2,3	573	5,74
Титанат бария	5,30	190	105 ±10	4,7
ЦТС-19	7,00	200	290	3,3 ±0,3

Основные параметры пьезопреобразователей

Технические параметры преобразователей регламентируются ГОСТ 14782-86 "Соединения сварные. Методы ультразвуковые" и ГОСТ 26266-90 "Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования". К основным параметрам относят следующие

1) Коэффициент преобразования.

Вводят коэффициент преобразования при излучении:

$$K_u = P_{ак} / U_u, \quad (2.27)$$

где $P_{ак}$ — излученная акустическая мощность; U_u — напряжение на излучателе,

и коэффициент преобразования при приеме $K_n = U_n / P_{ак}$, где U_n — напряжение принятого сигнала.

Работу преобразователя в совмещенном режиме характеризует коэффициент двойного преобразования:

$$K_{uu} = K_u K_n = U_n / U_u. \quad (2.28)$$

Кривые 1, 2, 3 показывают изменение характеристики при уменьшении добротности электрического контура зондирующего генератора из-за увеличения связи с нагрузкой.

Зависимость коэффициента преобразования от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой, ее типичный вид показан на

рис. 2.20. Частота f_0 очень близка к рассчитанной по формуле (2.25).

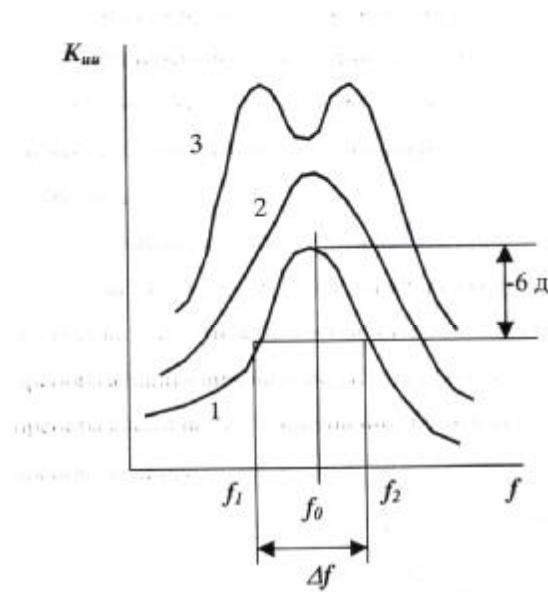


Рис. 2.20. Амплитудно-частотная характеристика преобразователя

На рабочей частоте f_0 амплитуда эхоимпульса от отражателя достигает максимального значения. В России принят ряд стандартных рабочих частот. Наиболее употребительные рабочие частоты, МГц: 1,25; 1,8 (дополнительная); 2,5; 5; 10. Частоты преобразователей зарубежного производства могут не совпадать с этим рядом. В таком случае используется зарубежный преобразователь с ближайшим более высоким значением частоты по сравнению с указанным преобразователем в документации на ультразвуковой контроль (УЗК). Допуски на соответствие частот составляют $\pm 10\%$ выше 1,25 МГц и $\pm 20\%$ до 1,25 МГц.

2) *Полоса преобразования Δf* (показана на нижней кривой рис.2.20) — это разность частот $f_2 - f_1 = \Delta f$, где f_1 и f_2 — частоты, на которых амплитуда эхо—импульса (или коэффициента преобразования) уменьшается в 2 раза (на 6 дБ, если K_{uu} измеряется в децибелах). Обычно ширина полосы составляет около 30 % от рабочей частоты.

3) Для наклонных преобразователей вводят понятия точки выхода, стрелы и угла ввода. *Точка выхода* это точка пересечения оси излучения в призме и поверхности выхода. *Стрела преобразователя* — это расстояние от точки выхода до передней грани преобразователя. Стрела преобразователя — важный параметр, определяющий возможность контроля данным преобразователем сварных швов. Слишком большая стрела не позволяет проконтролировать всю нижнюю половину сече-

ния шва прямым лучом. Положение точки выхода маркируется риской на боковой поверхности преобразователя. Допуск на положение точки выхода ± 1 мм.

4) *Угол ввода луча* — это угол между нормалью к поверхности в точке выхода и линией, соединяющей центр цилиндрического отражателя с точкой выхода, в положении преобразователя, когда амплитуда эхо—сигнала наибольшая. Из-за эффекта зависимости коэффициента прохождения от угла падения и из-за эффекта квазиискривления акустической оси угол ввода может отличаться от угла преломления, рассчитанного по закону Снеллиуса. Наилучшее совпадение этих углов получается в интервале углов падения $30—50^\circ$. Причиной квазиискривления акустической оси является затухание в материале. С увеличением глубины расположения отражателя угол ввода луча уменьшается. При малом затухании ультразвука этот эффект можно не учитывать.

Угол ввода луча может изменяться в процессе эксплуатации преобразователя:

- за счет истирания и изменения угла призмы;
- изменения скорости распространения ультразвуковых колебаний в призме вследствие старения или изменения температуры. Угол ввода изменяется на $0,5 \dots 0,7^\circ$ на каждые 10°C изменения температуры.

Для отклонения угла ввода α от номинального значения установлены допуски:

- для преобразователей с углом ввода до $60^\circ \pm 1,5^\circ$;
- для преобразователей с углом ввода 60° и больше $\pm 2^\circ$.

5) Важным параметром является *время задержки* волны в призме наклонного преобразователя или в акустической задержке. Время задержки измеряется в микросекундах и определяется как отношение длины акустической оси излучения в призме или акустической задержке к скорости ультразвука.

6) Направленность поля пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) измеряют при изменении угла ввода по уровню -6 дБ от максимального значения амплитуды эхо—сигнала и оценивают *шириной раскрытия диаграммы направленности*. Типичные значения составляют $4—10^\circ$, причем ширина раскрытия уменьшается с ростом произведения af_0 . Подробнее о структуре поля ПЭП рассказывается в следующем разделе. Чем выше направленность, тем больше амплитуда эхо—сигнала от отражателя при прочих равных условиях.

7) *Мертвая зона* – участки вблизи поверхности ввода и донной поверхности, дефекты в которых не могут быть выявлены эхоимпульсным методом при данных параметрах контроля. Понятие мертвой зоны иллюстрирует рис. 2.21.

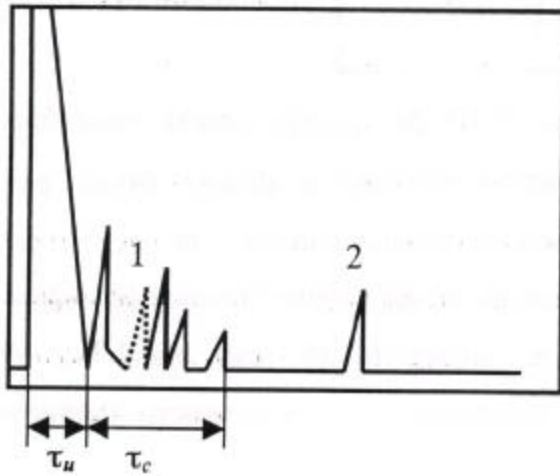


Рис. 2.21. Экран дефектоскопа с импульсами в пределах (1) и вне (2) мертвой зоны

Эхо-импульс от отражателя, расположенного в мертвой зоне вблизи поверхности ввода, попадает в область зондирующего сигнала и последующих шумовых и реверберационных сигналов. Размер мертвой зоны зависит от длительности зондирующего импульса τ_u и длительности переходных процессов τ_c , происходящих из-за недостаточного демпфирования и отражений в призме. Размер мертвой зоны оценивается по формулам

$$H_M = \frac{(\tau_u + \tau_c)C_l}{2}, \quad (2.29)$$

$$H_M = \frac{(\tau_u + \tau_c)C_l}{2} \cos \gamma - L_{\text{пр}} \cos \alpha, \quad (2.30)$$

где H_M по 2.29 – прямой преобразователь; где H_M по 2.30 – наклонный преобразователь.

Часть мертвой зоны наклонного ПЭП приходится на призму. С увеличением угла призмы наклонного ПЭП мертвая зона уменьшается. Для уменьшения мертвой зоны нужно повышать частоту ультразвуковых волн (УЗВ), что дает возможность сократить длительность зондирующего импульса при том же числе периодов колебаний в импульсе.

Мертвая зона вблизи донной поверхности образуется потому, что сильный донный сигнал мешает выявлению относительно слабого отражения от дефекта. Размер мертвой зоны вблизи донной поверхности прямого преобразователя меньше, чем H_M в формуле (2.29). В наклонном преобразователе мертвая зона вблизи донной поверхности, как правило, не возникает.

8) *Лучевая разрешающая способность* ПЭП Δr (разрешающая способность по глубине или дальности) — это минимальное расстояние между двумя отдельно выявляемыми компактными отражателями, расположенными по оси излучения. Отражатели считаются выявленными отдельно, если глубина минимума между двумя максимумами (импульсами) составляет не менее 6 дБ (см. рис. 2.22). Лучевая разрешающая способность уменьшается с уменьшением длительности зондирующего импульса $\tau_{из}$.

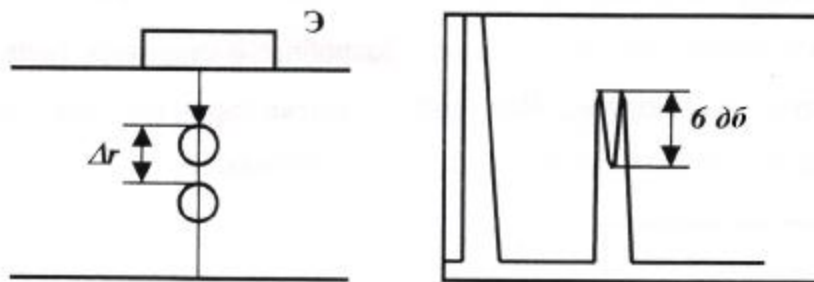


Рис. 2.22. К понятию лучевой разрешающей способности ПЭП

9) *Фронтальная разрешающая способность* Δl — это минимальное расстояние между двумя отдельно выявляемыми точечными отражателями, расположенными перпендикулярно акустической оси (для прямого преобразователя — лежащими на одной глубине). Фронтальная разрешающая способность зависит от глубины залегания отражателя h , длины волны λ и диаметра излучателя D :

$$\Delta l = \frac{h\lambda}{D}. \quad (2.31)$$

Для уменьшения Δl нужно улучшать направленность преобразователя, которая определяется отношением λ/D .

10) *Область рабочих температур* — это интервал температур поверхности ОК, при которых ПЭП может эксплуатироваться без ущерба.

Стандартные ПЭП имеют условные обозначения следующей структуры (табл. 2.2)

Таблица 2.2

Стандартные обозначения ПЭП

Варианты и расшифровка символов	Положение символов в номенклатуре							
	*	*	*	(*)	*, *	*	(*)	***
	1- контактный	1- прямой	1- совме- щенный	Н- непло- ский		угол ввода в		
	2- иммерсион- ный	2- наклон- ный	2- раздель- но совме- щенный	Ф- фоку- сирую- щий	Рабо- чая частота в Мгц	граду- сах для наклон- ных ПЭП (Ø плас- тины в мм для прямых)	допол- нитель- ные характе- ристи- ки	поряд- ковый номер от 001 до 999
	3- контактно- иммерсион- ный	3- комбини- рованный	3- раздель- ный					
	4- бескон- тактный							

Знаком "*" в таблице обозначены цифры или буквы. Элементы обозначения, помещенные в скобках, не являются обязательными, и могут отсутствовать. В качестве дополнительных характеристик могут фигурировать обозначения, например: Т100— максимальная температура объекта контроля 100⁰С, М миниатюрное исполнение.

2.7.6. Прямые ПЭП

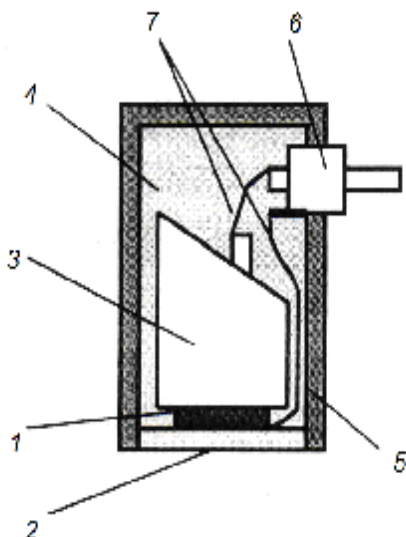


Рис. 2.23. Схема прямого преобразователя

Схема прямого преобразователя из комплекта "Приз-4" приведена на рис. 2.23. Пьезопластина 1 предназначена для излучения и приема упругих волн. Толщина ее соответствует нужной рабочей частоте. Изготовлена пластина из пьезоэлектрического материала, например, керамики ЦТС-19. Диаметр и рабочая частота связаны соотношением $af_0 = (12...15) \text{ мм} \cdot \text{МГц}$. Протектор 2 служит для защиты пьезоэлемента от истирания и механических воздействий. Через протектор упругие волны передаются от пьезопластины к объекту контроля.

Демпфер 3 служит для гашения части акустического излучения, направленной вверх. Это достигается или подбором формы демпфера так, чтобы отраженные от верхней и боковых стенок лучи не попадали на нижнюю стенку по нормали, или подбором материала, сильно поглощающего УЗВ.

Прижимая пластину, демпфер резко сокращает время релаксации свободных колебаний пьезопластины (рис. 2.24) и тем самым уменьшает мертвую зону. За счет поджатия демпфером полоса пропускания Δf несколько увеличивается, но коэффициент преобразования уменьшается. Иногда, как на рис. 2.23, через демпфер передается электрический сигнал, тогда демпфер должен быть проводящим.

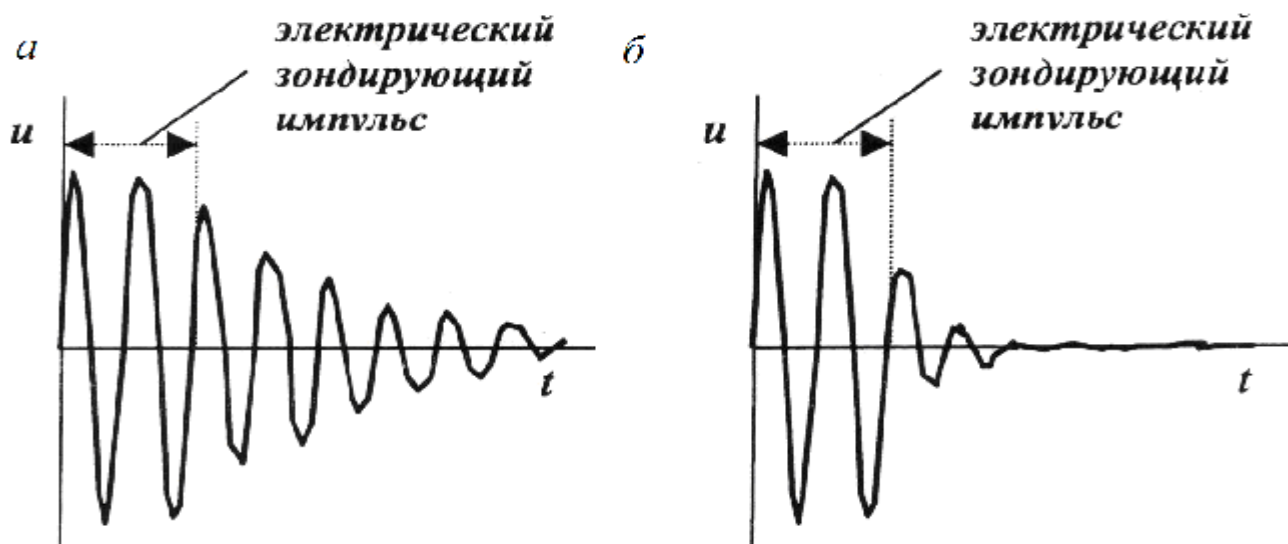


Рис. 2.24. Свободные колебания пьезопластины

Заливочная масса 4 (см. рис. 2.23) служит для защиты элементов конструкции от влаги, для увеличения механической прочности и стабильности. В конструкциях, где отсутствует демпфер, заливочная масса выполняет его функции. Корпус 5 служит для объединения всех элементов ПЭП в одну конструкцию. Электрический соединитель 6 (разъем) служит для подключения ПЭП к дефектоскопу через коаксиальный кабель. Электрические провода 7 соединяют разъем с электродами пьезопластины.

2.7.7. Наклонные ПЭП

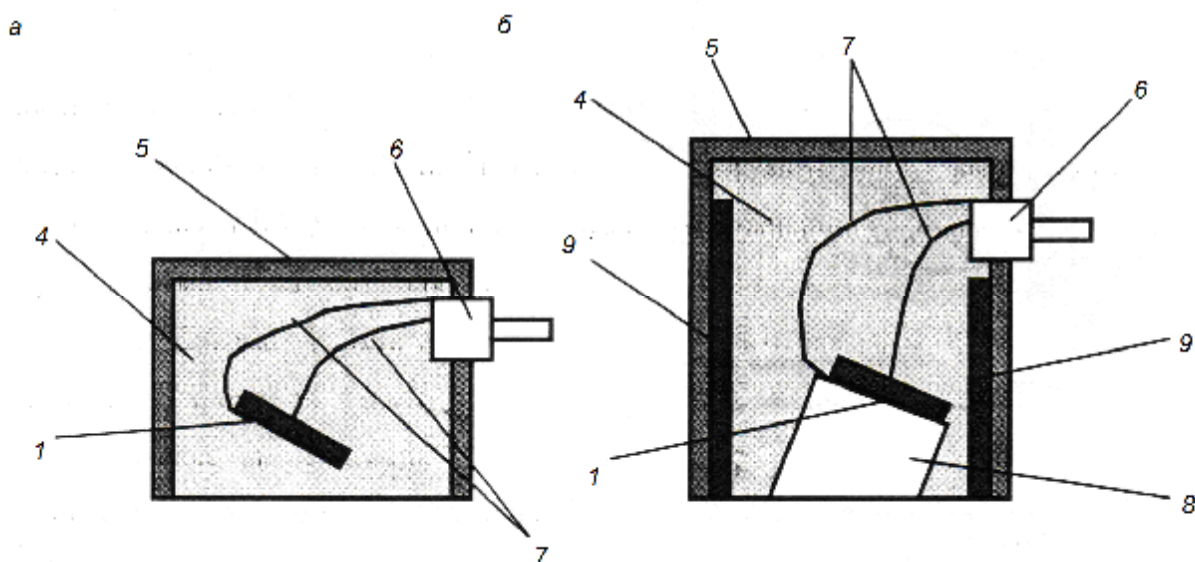


Рис. 2.25. Схема конструкции наклонных преобразователей

Схема конструкции серийных наклонных преобразователей из комплектов "Приз-5" (а) и "Приз-6" (б) показана на рис. 2.25. Элементы, уже встречавшиеся в конструкции прямого ПЭП, рассмотренного выше, повторно здесь перечисляться не будут. Демпфер 3 в данном варианте преобразователя отсутствует, его роль выполняет заливочная масса 4. Среди новых элементов важными являются следующие.

Призма 8 служит для передачи упругих волн от пьезопластины к объекту контроля. Призма формирует угол ввода. Изготавливается обычно из оргстекла. Материал призмы должен обладать малым или умеренным затуханием и стабильностью акустических свойств. Оргстекло не полностью удовлетворяет данным требованиям из-за изменения скорости УЗВ при изменении температуры и старения. Поэтому преобразователи с призмой из оргстекла нуждаются в регулярной тщательной проверке. Призмы для прецизионных наклонных преобразователей изготавливают из плавленого кварца.

Пьезопластина возбуждает в призме продольные волны, и время задержки рассчитывается с учетом их скорости. Продольная волна трансформируется в поперечную в объекте контроля. Угол призмы (равный углу падения) выбирают, как правило, больше первого критического $\beta_1 = 27^\circ$ и меньше второго критического $\beta_2 = 56^\circ$. В таком случае в ОК распространяется только одна поперечная волна с вертикальной поляризацией. Призму с углом 27° используют для возбуждения головной волны. Для возбуждения поверхностной рэлеевской волны применяют призмы с углом $\beta = 60 \dots 65^\circ$, т. е. несколько больше второго критического.

Звукопоглотитель 9 поглощает или рассеивает акустическое излучение, попавшее на боковые грани преобразователя. В некоторых конструкциях призма выполняет роль корпуса. Тогда переднюю и верхнюю грани призмы выполняют ребристыми, рассеивая, таким образом, паразитную часть излучения и уменьшая шумы в призме.

Разработаны наклонные преобразователи с переменным углом ввода. Одна из конструкций, разработанная в МГТУ, представлена на рис. 2.26. В призме есть горизонтально расположенное коническое отверстие, в котором размещена поворотная вставка. Конусность обеспечивает хороший акустический контакт и фиксацию угла ввода, а также снижает шумы.

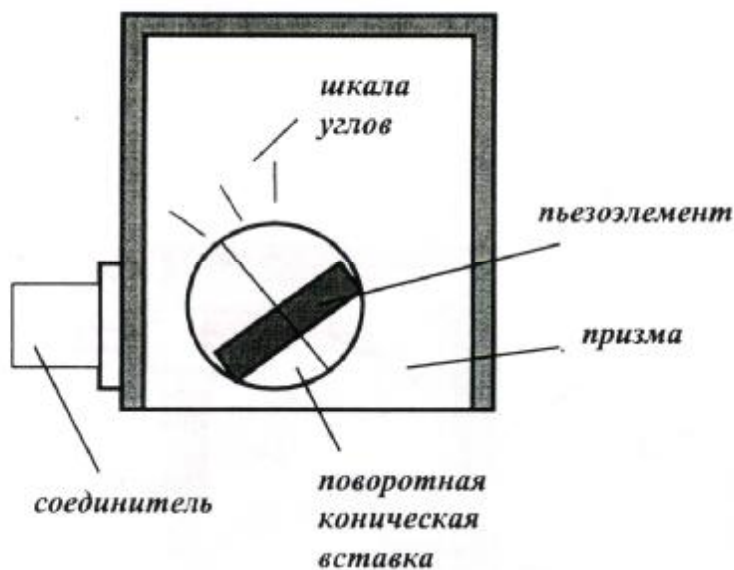


Рис. 2.26. Наклонный преобразователь с переменным углом ввода

2.7.8. Раздельно-совмещенные (Р-С) ПЭП

Раздельно-совмещенные ПЭП состоят из двух идентичных или почти идентичных частей. Конструкция прямых Р-С ПЭП показана на рис. 2.27, *а*, а Р-С наклонных ПЭП — на рис. 2.27, *б*. Р-С ПЭП состоит из конструктивно объединенных излучающей и приемной частей. Помимо упоминавшихся выше элементов, в конструкции Р-С ПЭП есть еще экран *10*, обеспечивающий экранировку излучающей и приемной частей ПЭП по электрическим наводкам и акустическим шумовым сигналам. Экран изготавливают, например, из медной фольги, помещенной между пластинами из пенополистирола. Призмы *8* изготовлены с наклонной верхней поверхностью, так что пучок акустического излучения, пройдя призму излучателя, объект контроля, призму приемной части, попадает на приемную пьезопластину. Угол между верхними плоскостями бывает обычно от $6—12^{\circ}$.

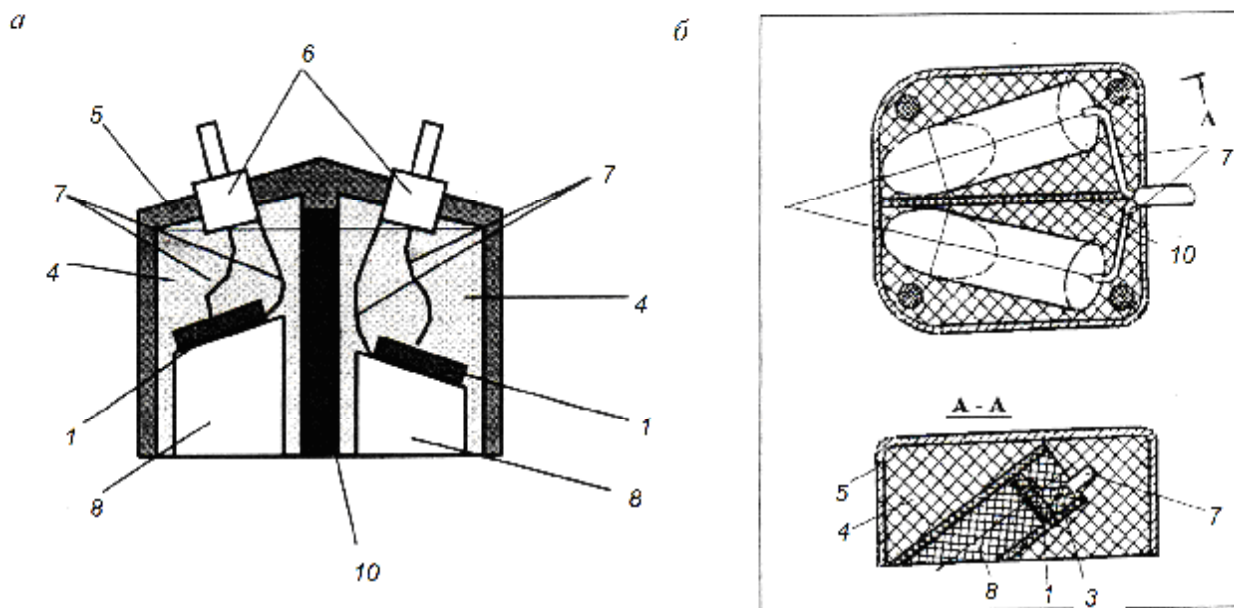


Рис. 2.27. Конструкция прямого (а) и наклонного (б) Р-С преобразователей

Благодаря наличию призм, создающих акустическую задержку, Р-С ПЭП имеют малую мертвую зону. Их основные применения: ультразвуковая толщинометрия и обнаружение подповерхностных дефектов. Применение Р-С ПЭП в толщиномерах уменьшает минимально измеряемую толщину с 3—4 мм (для прямых ПЭП без акустической задержки) до 0,3—0,5 мм.

2.7.9. Специальные виды преобразователей

1) Фокусирующие ПЭП.

Фокусирующие ПЭП применяют для повышения разрешающей способности, чувствительности, точности определения координат и размеров дефекта. Улучшение параметров достигается концентрацией энергии УЗВ в определенной (малой) области пространства — фокусе. Схемы нескольких типов фокусирующих систем показаны на рис. 2.28. Среди них различают активные концентраторы (а), в которых фокусирующее действие осуществляет сама пьезопластина, рефракторы (б), в которых фокусировка производится линзой, и рефлекторы (в), где отражение от криволинейного зеркала превращает плоскую волну в сходящийся пучок. Фокусирующие системы часто применяют в иммерсионном варианте контроля.

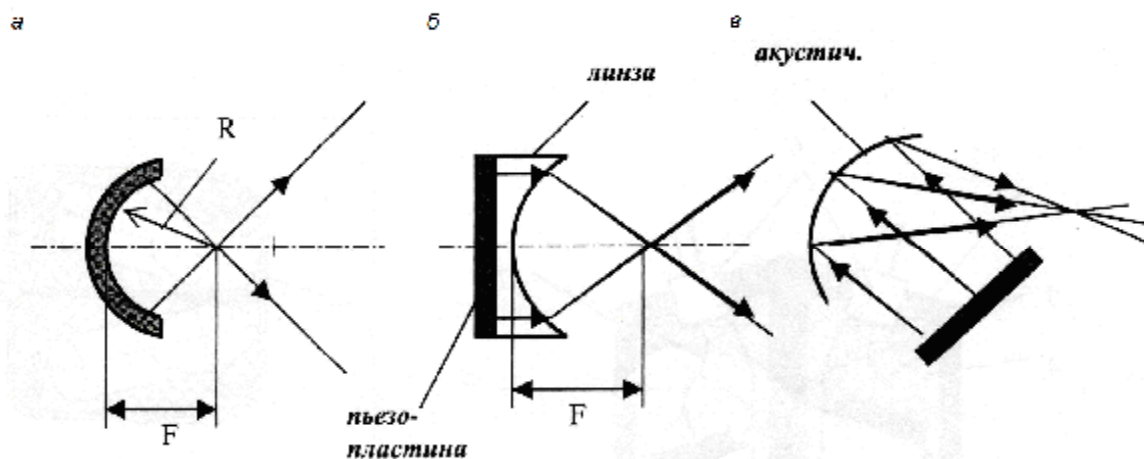


Рис. 2.28. Фокусирующие преобразователи

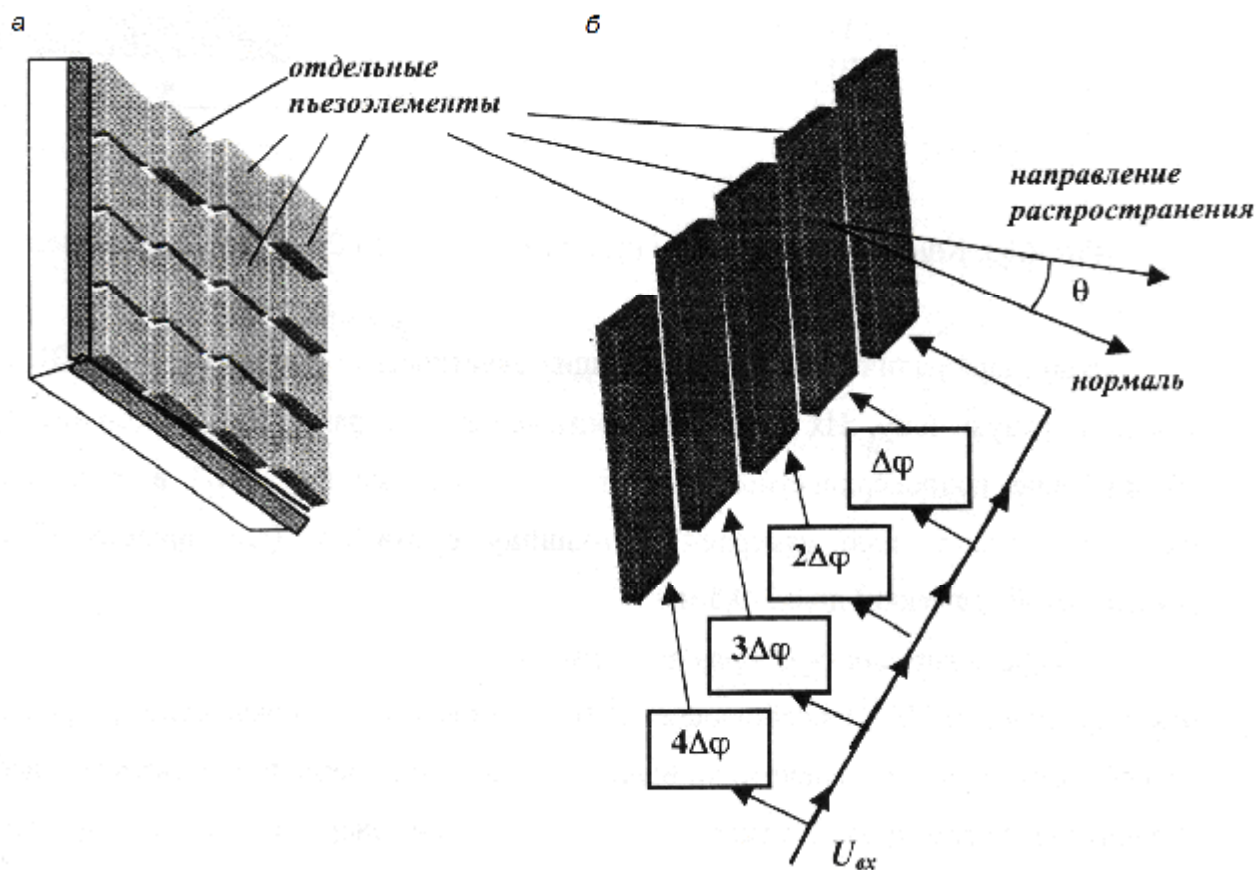


Рис. 2.29. Мозаичные преобразователи (а) и фазированные решетки (б)

2) *Мозаичные преобразователи и фазированные решетки* состоят из нескольких пьезоэлементов. Мозаичные ПЭП (см. рис.2.29, а) содержат отдельные пьезоэлементы, расположенные в одной плоскости и подключенные без какого-то сдвига фаз между элементами. По сравнению с целой пластиной, которая имеет размеры, равные суммарным размерам мозаичного ПЭП, последний имеет несколько больший ко-

эффицент преобразования и улучшенную структуру акустического поля.

Фазированные решетки содержат элементы, подключенные к электрической цепи с некоторым сдвигом фаз $\Delta\varphi$ между соседними элементами (см. рис. 2.29, б). За счет сдвига фаз возникает время задержки:

$$t = \Delta\varphi / 2\pi f. \quad (2.32)$$

Регулируя сдвиг фаз $\Delta\varphi$, можно управлять углом ввода луча. Угол, соответствующий максимуму излучения α определяется формулой:

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda t f}{d}, \quad (2.33)$$

где d – период решетки.

Преобразователи на основе фазированных решеток позволяют также управлять диаграммой направленности. Их применение эффективно в системах визуализации изображений, с использованием разверток типа *B* и *C*.

3) *Широкополосные преобразователи.* В некоторых методах акустического контроля (метод акустической эмиссии) важна широкая полоса преобразования с равномерной амплитудно-частотной характеристикой. В методе акустической эмиссии, в частности, заранее неизвестно, колебания каких частот будут иметь наибольшую амплитуду в спектре колебаний развивающейся трещины. Основным элементом, формирующим узкую полосу преобразования, в обычном ПЭП является плоскопараллельная пьезопластина. Для создания широкополосных ПЭП используется пьезопластина переменной толщины. На рис. 2.30, в показана зависимость коэффициента преобразования вогнутых (а) и выпуклых (б) сферических широкополосных ПЭП. Вместо рабочей частоты f_0 и полосы Δf для широкополосных ПЭП вводят начальную f_n и конечную f_k частоты преобразования. Соотношение между f_k и f_n обычно составляет 3...4 к 1. Следует учитывать, что коэффициент преобразования широкополосного ПЭП меньше, чем у ПЭП с плоскопараллельной пластиной.

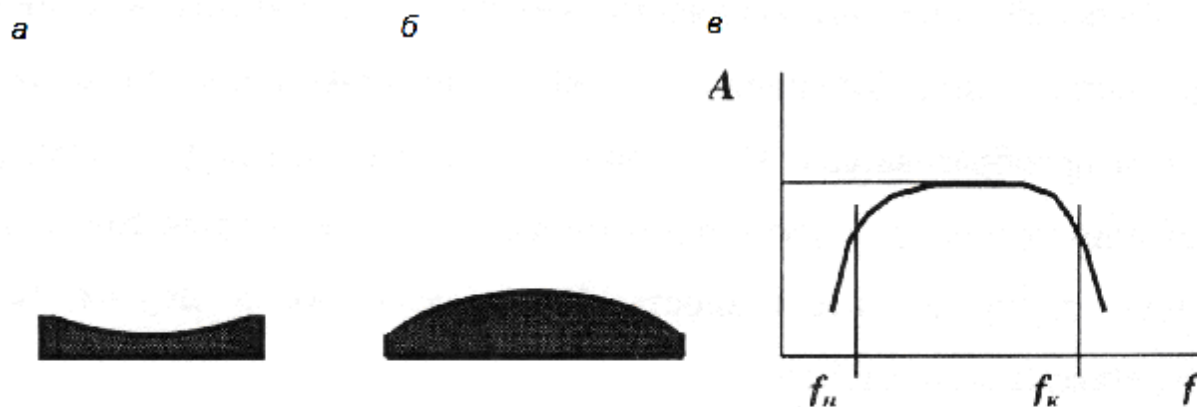


Рис. 2.30. Вогнутый (а) и выпуклый (б) широкополосные преобразователи и их амплитудно-частотная характеристика (в)

2.8. Акустическое поле преобразователя

Акустическое поле – это зависимость упругих смещений, давления или интенсивности от положения исследуемой точки в пространстве. Различают поля излучения, приема и излучения-приема.

Поле излучения, созданное преобразователем-излучателем, – это совокупность значений принятого пробным точечным приемным преобразователем сигнала, в каждой точке поля. *Поле приема* преобразователя — это совокупность значений принятого сигнала при помещении точечного излучателя в каждую точку поля. Величина сигнала, отраженного от дефекта и воспринятого преобразователем, определяется полем *излучения-приема*. Поле излучения-приема находится как произведение нормированных значений поля излучения и поля приема в каждой точке. Поля излучения и приема одного и того же пьезоэлектрического преобразователя обычно идентичны.

Акустическое поле преобразователя имеет сложную структуру. Сначала рассмотрим поле прямого преобразователя. Пусть преобразователь дисковой формы радиусом a возбуждает акустическое поле. Схематично акустическое поле представляется пучком (см. рис. 2.31, а). Линию, проходящую по центру пучка, называют *акустической осью излучения*. Структура поля пучка совершенно различна в двух областях, называемых ближней и дальней зонами излучения.

В *ближней зоне*, называемой еще зоной Френеля, пучок в поперечном сечении повторяет сечение пьезопластины. Волновой фронт в

пределах пучка приближенно можно считать плоским. Распределение интенсивности вдоль оси пучка показано на рис. 2.31, б. В ближней зоне интенсивность изменяется с сильными осцилляциями.

Причина осцилляций — интерференция сигналов, приходящих в данную точку среды, от разных участков преобразователя. Пути, проходимые от разных участков, различны, поэтому колебания от них приходят с разными фазами. В некоторых точках колебания ослабляют друг друга, и интенсивность близка к нулю, в других точках они складываются, образуя максимумы.

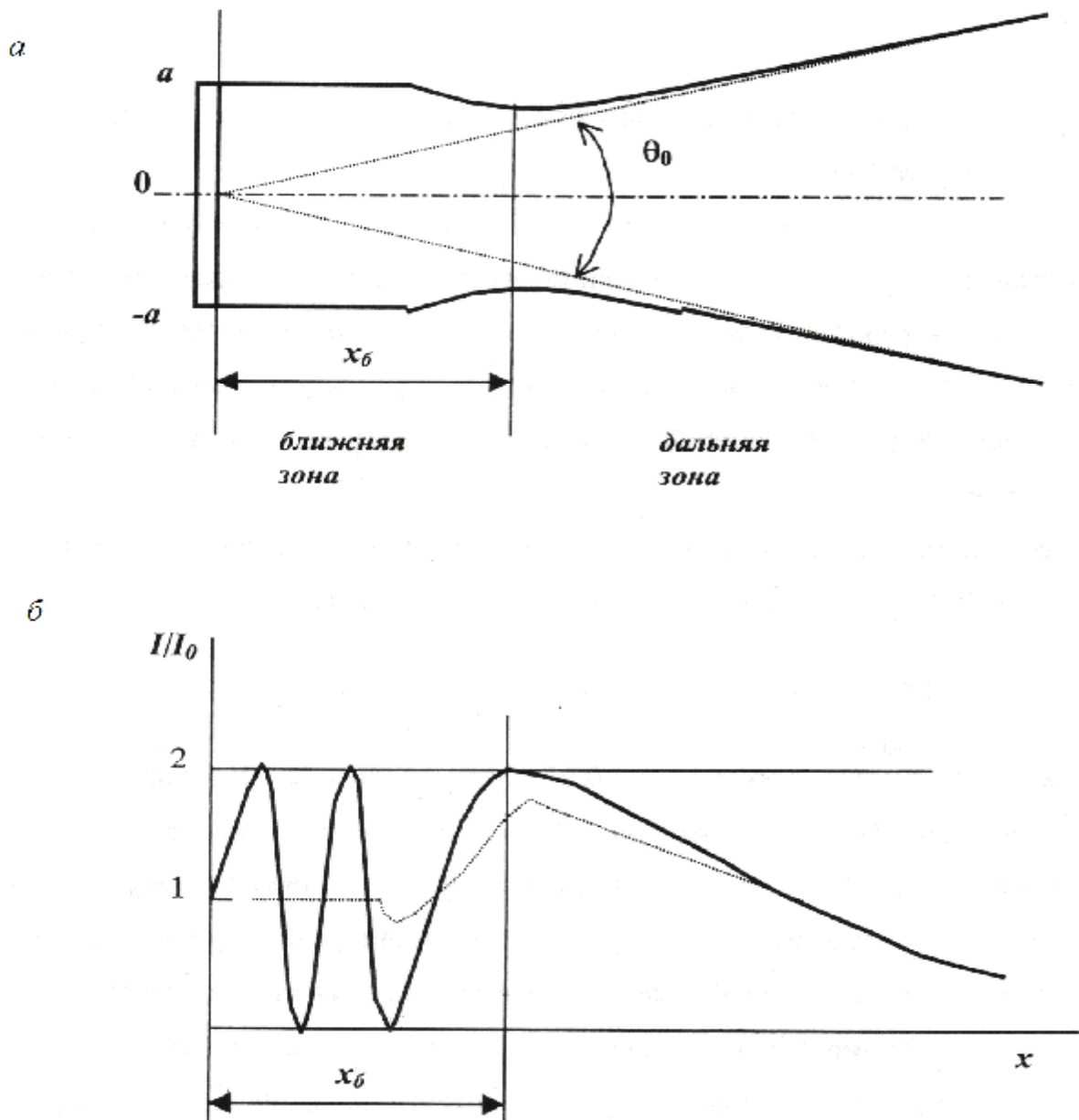


Рис. 2.31. Поле дискового излучателя:
форма пучка (а) и распределение интенсивности по оси (б)

Размер ближней зоны, т. е. расстояние от излучателя до последнего максимума интенсивности, вычисляется по формуле:

$$x_6 = \frac{S_{\text{изл}}}{\pi\lambda} \quad (2.34)$$

где S — площадь излучателя. Для пьезопластины в форме диска

$$S_{\text{изл}} = \pi a^2 \quad (2.35)$$

и

$$x_6 = \frac{a^2}{\lambda}. \quad (2.36)$$

Для излучателя в форме квадрата со стороной a выражение (2.34) дает для размера ближней зоны следующую формулу:

$$x_6 = \frac{a^2}{\pi\lambda}. \quad (2.37)$$

Если поле создается прямоугольным преобразователем со сторонами a_1 и a_2 , где a_1 — большая сторона, то при $a_1/a_2 \leq 2$ можно пользоваться формулой (2.37), где вместо a нужно подставить a_1 . Если $a_1/a_2 > 2$, то

$$x_6 = \frac{a_1^2}{2\lambda}. \quad (2.38)$$

Максимумы и минимумы в ближнем поле прямоугольного преобразователя сглажены по сравнению с круглым.

Дальняя зона излучения еще называется зоной Фраунгофера. В ней пучок становится расходящимся, его сечение увеличивается. Осцилляции интенсивности отсутствуют. Для любой точки в дальней зоне колебания от разных участков излучателя приходят с малым сдвигом фазы и не ослабляют друг друга. Между ближней и дальней зонами находится переходный участок, в котором сечение пучка несколько уменьшается.

В дальней зоне акустическое поле имеет вид лучей, исходящих из центра излучателя. Угол расхождения пучка θ_0 определяют по формуле:

$$\theta_0 = \arcsin\left(N \frac{\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(N \frac{c}{af_0}\right). \quad (2.39)$$

Коэффициент N имеет значение 0,61 для дискового излучателя и $N = 0,5$ для прямоугольного. Произведение af_0 (f_0 — резонансная частота) определяет угол расхождения пучка. Рис. 2.32 иллюстрирует различие условной $L_{\text{усл}}$ и истинной l протяженности отражателя для пуч-

ков с разными углами расхождения. Очевидно, применение преобразователей с малыми углами расхождения пучка предпочтительнее. Нормативами рекомендуются значения $af_0 = 12 \dots 30$ мм·МГц. Осцилляции интенсивности в ближней зоне затрудняют выявление и правильную идентификацию мелких дефектов. Из-за осцилляций вместо одного дефекта, например, могут быть ошибочно выявлены два. Осцилляции в ближней зоне сглаживаются при использовании квадратных и прямоугольных преобразователей вместо круглых. Эти осцилляции практически отсутствуют в эхо—импульсном методе контроля вследствие использования коротких импульсов. Импульсы содержат целый спектр частот. Для каждой частоты характерно свое расположение максимумов и минимумов. Сглаженная кривая интенсивности для импульсного сигнала показана на рис. 2.31, б штриховой линией.

Акустическое поле в дальней зоне характеризуют диаграммой направленности. *Диаграмма направленности* — это графическое изображение зависимости интенсивности излучения от угла между осью излучения и данным направлением при постоянном расстоянии от излучателя.

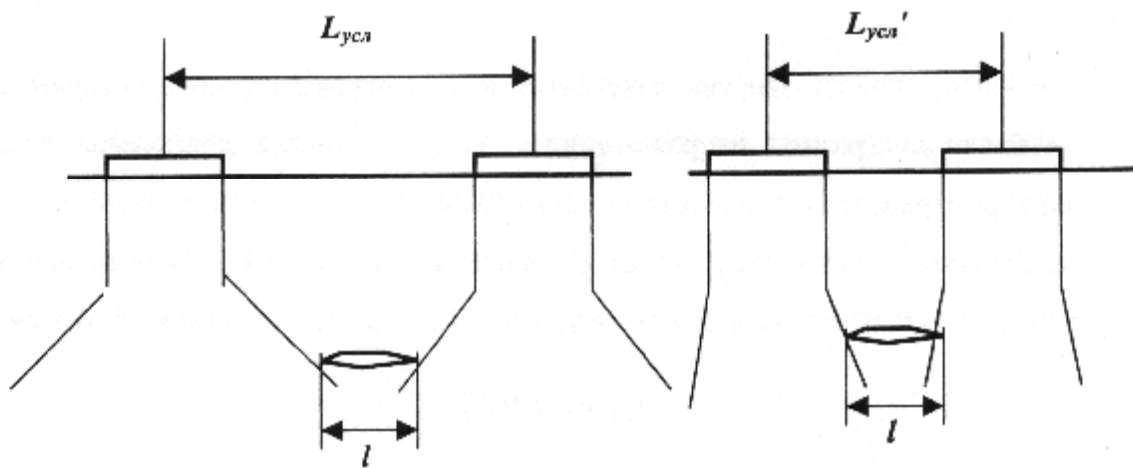


Рис. 2.32. Сравнение истинной (l) и условной (L_{ysl} , L_{ysl}') протяженностей дефекта при контроле пучками с разным углом расхождения

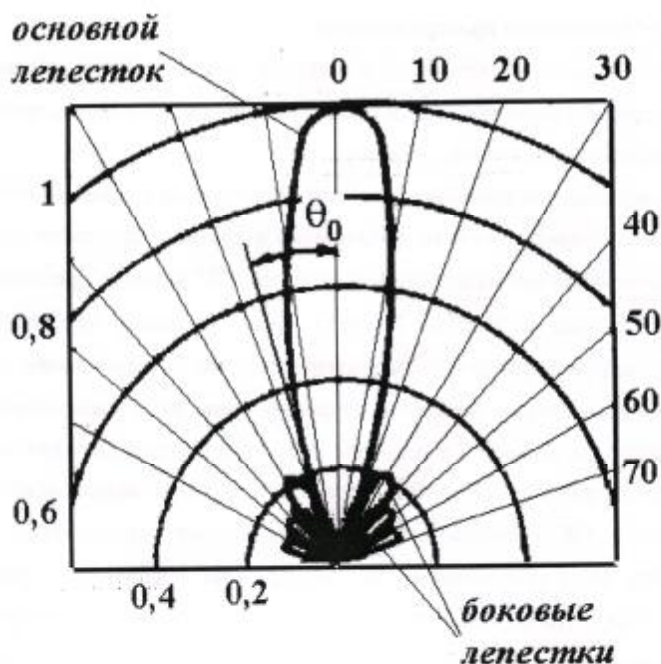


Рис. 2.33. Диаграмма направленности прямого преобразователя

Вид диаграммы направленности показан на рис. 2.33 в полярных координатах. Центральную часть диаграммы, в пределах которой интенсивность изменяется от 1 до нуля, называют *основным лепестком*. В его пределах заключено 80—85% энергии излучения. Кроме основного присутствуют еще *боковые лепестки* диаграммы направленности. Угол раскрытия диаграммы направленности можно определить несколькими способами. Угол θ_0 , измеренный по направлению касательной к основному лепестку, дается формулой (2.39). В практике УЗ контроля угол раскрытия часто измеряют по уровню 0,5 от максимума (или -6 дБ), рис. 2.33.

$$\theta_{0,5} = \arcsin\left(0,35 \frac{\lambda}{a}\right). \quad (2.40)$$

На практике измеряют ширину раскрытия диаграммы направленности, т. е. угол $2\theta_{0,5}$. Для измерения ширины раскрытия диаграммы направленности преобразователя можно использовать стандартный образец СО-2.

Поле наклонного преобразователя

В *наклонном* преобразователе упругие волны сначала распространяются в материале призмы, затем преломляются на границе призма—изделие, трансформируются в поперечные и попадают в объект контроля.

Проанализируем поле наклонного преобразователя в объекте контроля в дальней зоне. Это поле создается лучами, возникшими в призме и преломленными на границе. Акустической осью преобразователя в изделии ON назовем преломленную ось AO излучения в призме (см. рис. 2.34). Точка O — это точка ввода. Акустическая ось ON не совпадает с центральным лучом преломленного пучка, который начинается в точке O и соответствует максимуму диаграммы направленности. Угол преломления центрального луча называют *углом ввода*. Существует две основные причины отличия угла ввода от угла преломления (или отличия центрального луча от акустической оси). Первая доминирует в ОК небольшой толщины и вызвана зависимостью коэффициента прозрачности D от угла падения. Эта зависимость — уменьшение D с ростом угла β почти во всем интервале $\beta_1 < \beta < \beta_2$ приводит к смещению центрального луча в сторону меньших углов от преломленной акустической оси. В ОК значительной толщины к этому эффекту добавляется еще эффект *квазиискривления акустической оси*: лучи пучка, преломленные под меньшими углами, проходят меньший путь в изделии. Следовательно, они меньше затухают; результатом будет дополнительное уменьшение угла ввода по сравнению с углом преломления.

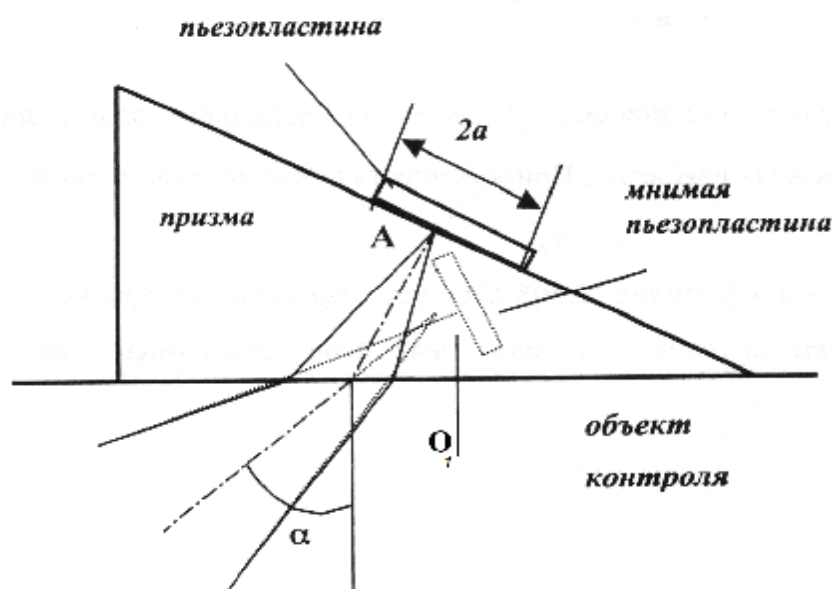


Рис. 2.34. Схема расчета поля наклонного ПЭП и мнимая пьезопластина

Угол преломления возрастает тем быстрее, чем больше угол падения. Поэтому диаграмма направленности наклонного ПЭП в плоскости падения становится *несимметричной*. *Ширина основного лепестка*

диаграммы направленности в данной плоскости *увеличена* по сравнению с прямым ПЭП. Это явление выражено тем сильнее, чем больше угол призмы. Ширина раскрытия поля наклонного ПЭП в плоскости падения определяется формулой:

$$\theta_0 = \arcsin(0,61 \frac{c \cos \beta}{a f_0 \cos \alpha}). \quad (2.41)$$

В плоскости, перпендикулярной плоскости падения, ширина раскрытия диаграммы направленности не зависит от угла призмы и практически совпадает с шириной раскрытия у прямого ПЭП.

Для расчета поля наклонного ПЭП вводят понятие мнимой пьезопластины. Точка O_1 на рис. 2.34 — это точка, где сходятся продолжения лучей пучка. Поле представляется как поле мнимого источника, расположенного в точке O_1 , и имеющему эллиптическую форму с полуосями $2a \cos \alpha / \cos \beta$ в плоскости падения и $2a$ в перпендикулярной плоскости. Размер ближней зоны x_6 может быть вычислен по формуле:

$$x_6 = \frac{a^2 \cos \alpha}{\lambda \cos \beta}. \quad (2.42)$$

Ближняя зона либо полностью лежит в призме ПЭП, либо частично попадает в ОК. Для расчета протяженности ближней зоны в изделии $x_6^{\text{изд}}$ сначала определяют приведенный путь ультразвука в призме r_Δ

$$r_\Delta \cong r_1 \frac{c_l^{\text{пр}} \cos \alpha}{c_t^{\text{изд}} \cos \beta}, \quad (2.43)$$

где r_1 — длина оси излучения в призме; $c_l^{\text{пр}}$ — скорость продольных волн в призме; $c_t^{\text{изд}}$ — скорость поперечных волн в изделии. Протяженность ближней зоны в изделии

$$x_6^{\text{изд}} = x_6 - r_\Delta, \quad (2.44)$$

где x_6 рассчитывается по формуле (2.42).

Следует отметить, что при увеличении угла ввода *растет интенсивность боковых лепестков* диаграммы направленности наклонного ПЭП.

2.9. Акустический тракт

Акустическим трактом называют путь ультразвукового сигнала от излучателя до отражателя и далее до приемника ультразвука. Расчет акустического тракта — это определение амплитуды сигнала от отражателя в зависимости от формы и размеров отражателя и ПЭП и определение расстояния между ними, акустических свойств материала ОК, частоты ультразвуковой волны. Обычно акустический тракт рассчитывается для модельных отражателей, имеющих простую форму. С ростом размера дефекта амплитуда эхо—сигнала возрастает, но до определенного предела. Как правило, амплитуда сигнала от дефекта убывает с увеличением глубины его залегания. Эта зависимость вызвана двумя обстоятельствами: расхождением пучка в дальней зоне и затуханием ультразвука. По тем же причинам происходит ослабление донного сигнала, только он ослабляется медленнее, чем сигналы от большинства отражателей. Так же медленно уменьшается амплитуда сквозного сигнала при контроле теньвым методом. Чем больше размер затеняющего дефекта, тем сильнее ослабляется амплитуда.

Рассмотрим влияние *формы, ориентации и заполнения отражателей* на амплитуду отраженного сигнала. При равной глубине залегания и площади отражателя наибольший отраженный сигнал получается от *дискового отражателя*, ориентированного по нормали к оси пучка (см. рис. 2.35, *а*). Такой отражатель можно приготовить, например, выполнив плоскодонное сверление нужного диаметра на заданную глубину. От отражателя округлой формы, сферического или цилиндрического (см. рис. 2.35, *б*) амплитуда отражения меньше.

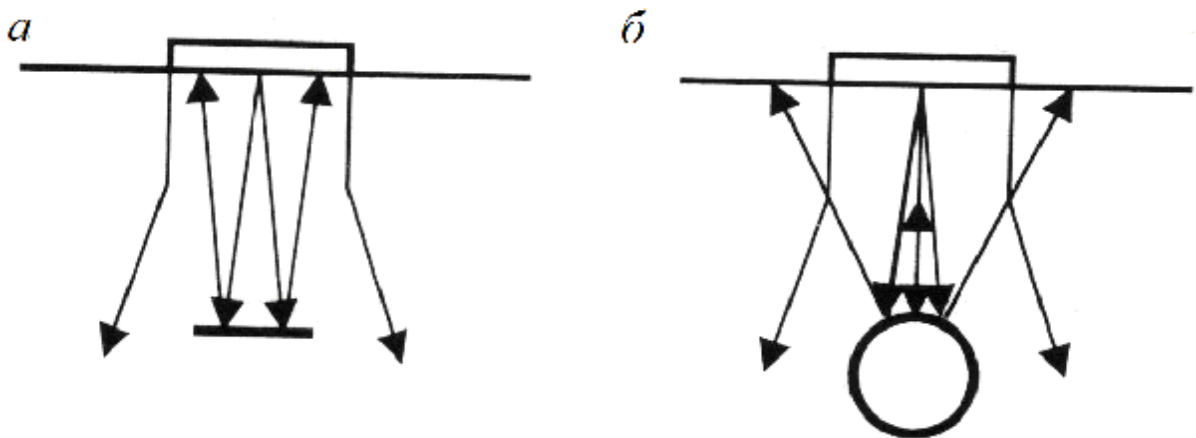


Рис. 2.35. Отражение от плоскостного (*а*) и округлого (*б*) отражателей

Амплитуда сигнала, отраженного от плоскостного отражателя, сильно зависит от ориентации пучка и плоскости отражателя. Сигнал наибольшей амплитуды получается при перпендикулярном расположении плоскости отражателя и оси пучка (рис. 2.36). Если отражатель сильно наклонен, то зеркально отраженные лучи не попадают на приемник. Отраженный сигнал создается более слабыми отражениями от кромок отражателя и полем дифракции.

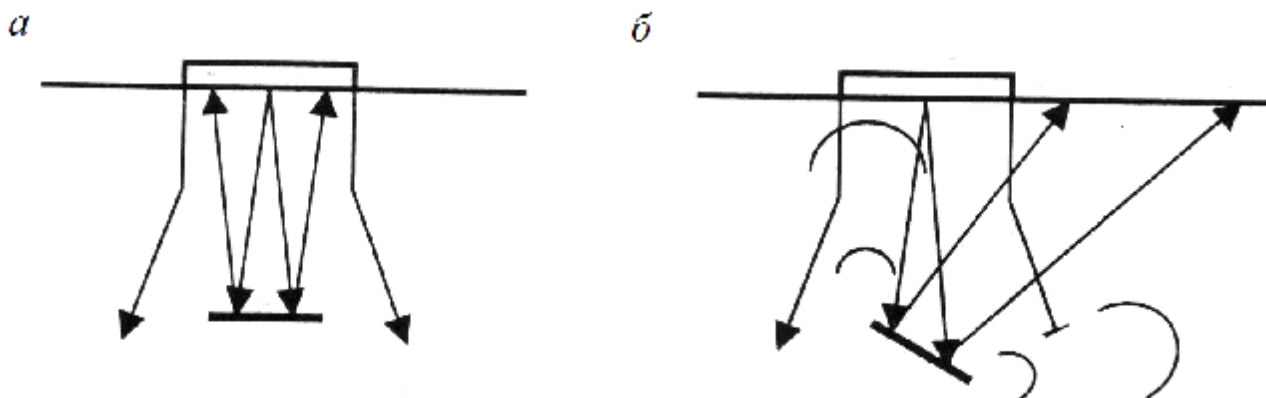


Рис. 2.36. Отражение от плоскостного отражателя, ориентированного нормально (а) и наклонно (б) к центральному лучу пучка

Указанная зависимость амплитуды сигнала от ориентации плоскостного отражателя характерна для отражателей больших размеров. Если размер отражателя меньше половины длины волны, то волна огибает дефект за счет дифракции, и отраженный сигнал резко уменьшается.

Коэффициент отражения ультразвука на границе дефекта, заполненного газом или воздухом, по модулю близок к единице. Для дефекта, заполненного шлаком, такой коэффициент существенно меньше. По этой причине амплитуда сигнала, отраженного от газовой поры больше, чем от шлакового включения. Слабый отраженный сигнал дают тонкие окисные пленки. Вблизи границы металла с раковиной иногда располагается большое количество пор, которые рассеивают ультразвук, из-за чего может получиться слабый отраженный сигнал даже от крупной раковины. Слабый отраженный сигнал дают и плоскостные дефекты (трещины, расслоения) с очень малым, в единицы и десятки микрон, раскрытием.

Теперь рассмотрим более подробно влияние размера отражателей и глубины их залегания. Приведем формулы для расчета акустического тракта для нескольких модельных отражателей.

В ближней зоне амплитуда отраженного сигнала сильно зависит от формы и длительности зондирующего импульса. Приближенно отношение амплитуд A/A_0 для плоского диска можно оценить по формуле

$$A / A_0 = (1 \dots 4) \frac{S}{S_n} e^{-2\alpha r}, \quad (2.45)$$

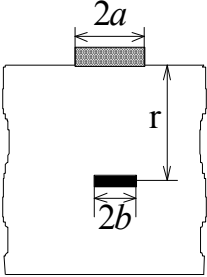
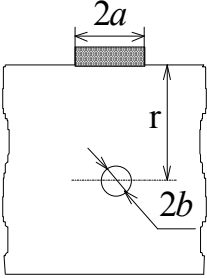
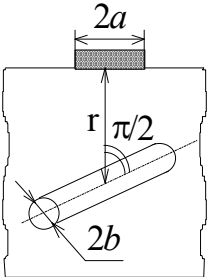
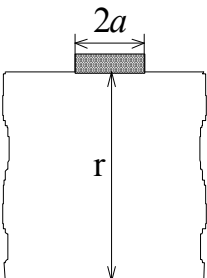
где S — площадь отражателя, S_n — площадь ПЭП, α - коэффициент затухания, r — расстояние между ПЭП и отражателем. Множитель 2 в показателе экспоненты — значение того, что волна проходит путь $2r$ — до дефекта и обратно. Из-за множителя $(1 \dots 4)$ амплитуду отражения в ближней зоне можно оценить лишь очень приближенно.

Для модельных отражателей, расположенных в дальней зоне, выведены формулы для отношения амплитуд. В табл. 2.3 приведены расчетные формулы для нескольких часто встречающихся модельных отражателей в акустическом тракте прямого преобразователя.

Благодаря двукратному отражению ультразвука от поверхности и близко к ней расположенного дефекта получается отраженный сигнал большей амплитуды. Ход лучей при этом так называемом угловом эффекте был рассмотрен ранее на примере двугранного угла. В качестве модельного отражателя для настройки чувствительности дефектоскопа часто используется зарубка (см. рис. 2.37). Амплитуда отраженного от нее сигнала зависит от угла падения и коэффициента отражения, приведенного на графике в ГОСТ 14782-86. Чаще всего зарубки применяют для углов ввода, больших 50° . Отношение глубины зарубки h к ширине b выбирают в интервале 0,5—4, причем $h, b > \lambda$. Площадь зарубки S_3 определяют по формуле (2.45).

Таблица 2.3

Формулы для определения давления в отраженной волне для различных модельных отражателей

Тип отражателя	Дальняя зона	Схема
1. Диск с $d = 2b$, перпендикулярный волновому вектору	$\frac{p'}{p_0} = \frac{S_a S_b}{\lambda^2 r^2} e^{-2\alpha r},$ где p_0 – давление в излучаемой волне; S_a, S_b – площадь преобразователя и отражателя; α – коэффициент затухания	
2. Сфера $d = 2b$	$\frac{p'}{p_0} = \frac{S_a b}{2\lambda r^2} e^{-2\alpha \cdot r}$	
3. Цилиндр бесконечной длины $d = 2b$	$\frac{p'}{p_0} = \frac{S_a}{2\lambda} \sqrt{\frac{b}{r^3}} e^{-2\alpha r}$	
4. Бесконечная плоскость	$\frac{p'}{p_0} = \frac{S_a}{2\lambda r} e^{-2\alpha r}$	

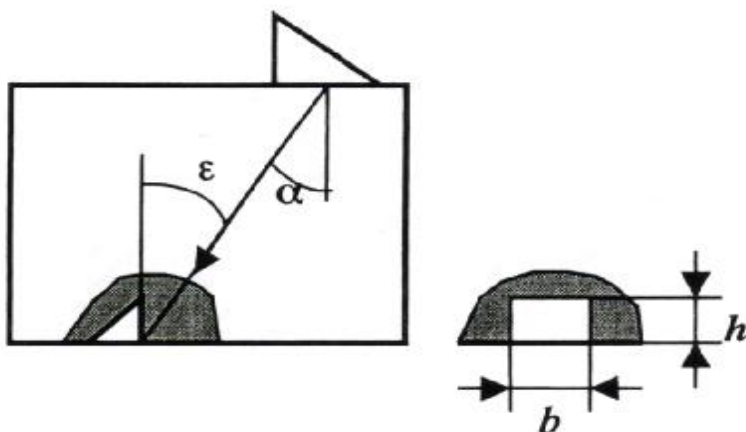


Рис. 2.37. Отражатель "зарубка"

2.9.1 АРД-диаграмма

Для сопоставления размеров несплошностей, выявленных УЗ дефектоскопией, их необходимо сравнивать с каким-либо модельным отражателем. Для прямых преобразователей чаще всего в качестве такого отражателя принимают плоский диск, ориентированный перпендикулярно оси УЗ пучка. *Эквивалентным диаметром (площадью) дефекта* называют диаметр (площадь) круглого плоскодонного отражателя, расположенного перпендикулярно акустической оси на том же расстоянии, что и дефект. При этом дефект и отражатель расположены в материалах с одинаковыми акустическими свойствами и дают эхо-импульсы одинаковой амплитуды.

АРД-диаграмму применяют для расчета амплитуды эхо-сигнала в зависимости от расстояния до отражателя и его размеров. Она устанавливает зависимость между амплитудой A эхо-сигнала от дискового отражателя, ориентированного перпендикулярно акустической оси ПЭП и отражающего 100 % падающей УЗ энергии, расстоянием r от излучателя до отражателя и диаметром D (или площадью) отражателя.

АРД-диаграммы бывают двух типов: обобщенные и рабочие. На *обобщенных* диаграммах (см. рис.2.38) по оси абсцисс отложено расстояние между ПЭП и отражателем, нормированное на размер ближней зоны излучателя x_6 . По оси ординат отложено ослабление в отрицательных децибелах. На поле АРД-диаграммы нанесена серия кривых, каждая из них соответствует своему диаметру (или площади) эквивалентного отражателя, отнесенного к диаметру (площади) пьезоэлемента. Область $r/x_6 < 1$ соответствует ближней зоне ПЭП. При

$r/x_0 > 1$ в дальней зоне амплитуда с ростом r убывает. Самая верхняя кривая соответствует донному сигналу.

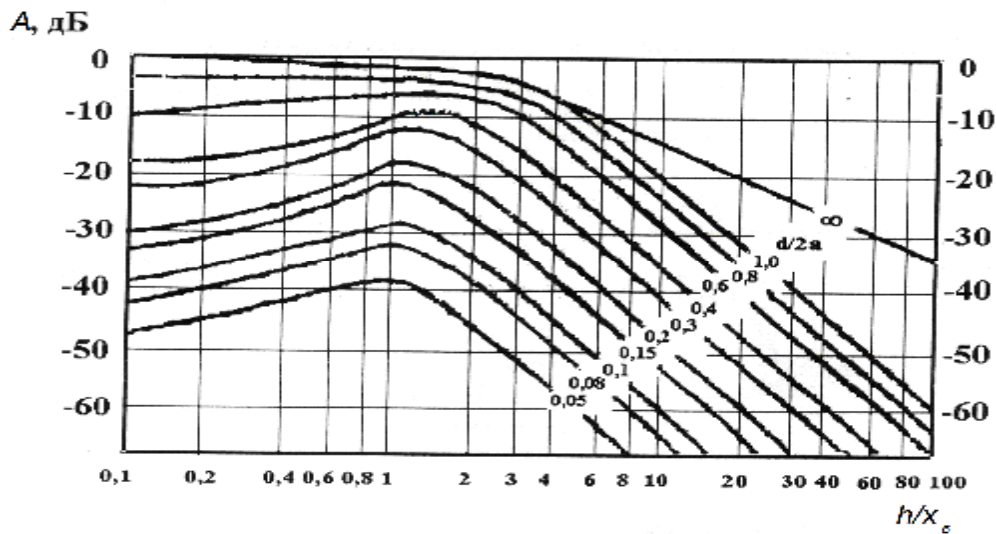


Рис. 2.38. Обобщенная АРД-диаграмма

Рабочие АРД-диаграммы строят для конкретного вида ПЭП с учетом его размеров, частоты и угла ввода. Для построения рабочих АРД-диаграмм используют несколько способов: на основе обобщенных АРД-диаграмм, расчетным путем с использованием формул акустического тракта, экспериментальным путем. На оси абсцисс рабочих АРД-диаграмм откладывают расстояние от ПЭП до отражателя в миллиметрах. Для наклонных ПЭП иногда по оси абсцисс указывается расстояние по горизонтальной (x) или вертикальной (y) координате.

В отечественных нормативных документах АРД-диаграммы часто приводятся в виде таблиц с поправками, а в комплект УЗ дефектоскопов иногда входят АРД-шкалы — прозрачные накладные шкалы, которые устанавливаются на экран дефектоскопа. На шкалах нанесены кривые изменения амплитуд в зависимости от размеров отражателя и расстояния до него.

Определение эквивалентного размера отражателя производится следующим образом. С помощью УЗ дефектоскопа измеряется расстояние r до отражателя и разность ΔA (дБ) между амплитудами сигналов от отражателя и донного сигнала, измеренного в изделии толщиной r_0 . Донный сигнал используется как опорный. По оси абсцисс откладывают расстояние r_0 и восстанавливают перпендикуляр к оси до пересечения с АРД-кривой донного сигнала (рис. 2.39).

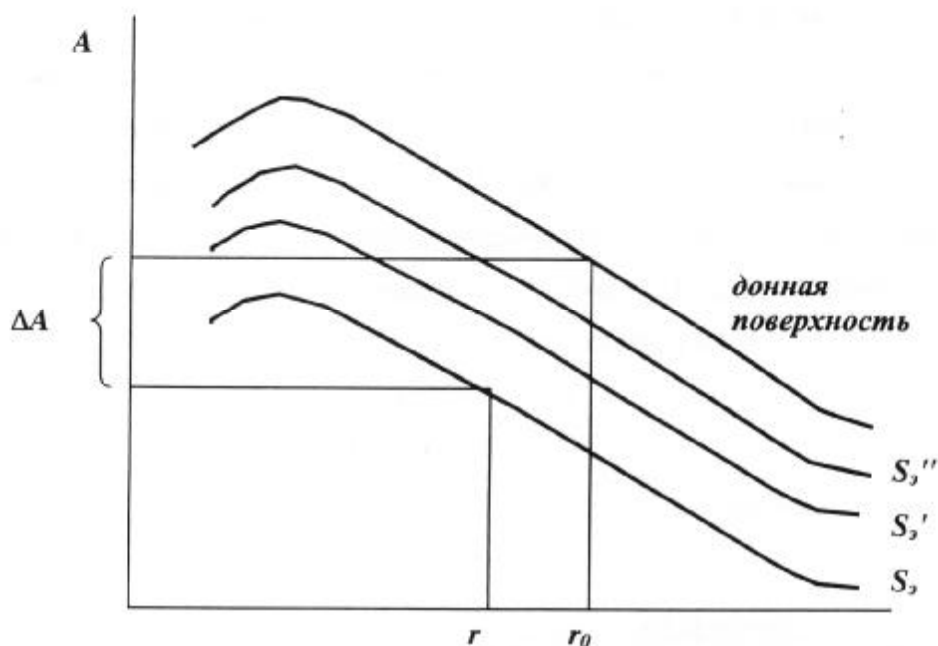


Рис. 2.39. Определение эквивалентной площади отражателя по АРД-диаграмме

Из точки пересечения проводят горизонтальную линию и значение по оси ординат принимают за точку отсчета, от которой вниз откладывают разность ΔA . Из получившейся точки на оси ординат проводят горизонтальную линию. По оси абсцисс откладывают расстояние r и восстанавливают перпендикуляр. Точка пересечения горизонтальной линии и этого перпендикуляра попадает на АРД-кривую эквивалентного отражателя площадью S_3 . Если точка пересечения оказалась между двумя линиями, то выбирается ближайшая кривая или производится интерполирование.

В практике УЗ дефектоскопии возникает необходимость оценить эквивалентный размер плоскодонного отражателя через эквивалентный размер отражателя другого типа. Пусть наклонным преобразователем выявлен дефект, эквивалентная площадь которого по плоскодонному отражателю S_3 . Определим эквивалентный диаметр отражателя "бесконечный цилиндр" (боковое сверление). Для пересчета используем формулы акустического тракта. Из табл. 2.3 выберем формулы плоскодонного отражателя и бесконечного цилиндра и приравняем отношение амплитуд A/A_0 . После упрощений можно получить формулу для эквивалентного радиуса цилиндра:

$$b_{\text{ц}} = \frac{4S_9^2}{\lambda^2(r + r_{\Delta})}. \quad (2.46)$$

В формуле (2.46) r_{Δ} — приведенный путь ультразвука в призме по формуле (2.43).

2.9.2. Расчет акустического тракта в теневом методе

Выполним расчет относительной амплитуды A/A_0 для волны, прошедшей путь сквозь изделие от излучателя до приемника. Амплитуда сквозного сигнала уменьшается из-за наличия дефекта. Пусть дефект представляет собой диск радиусом b , ориентированный перпендикулярно акустической оси излучателя. Дефект расположен на глубине h (см. рис. 2.40). Если A_0 — амплитуда принятого сигнала в изделии без дефекта, а A — амплитуда в изделии с дефектом, то получим выражение

$$\frac{A}{A_0} = 1 - \frac{SH}{\lambda h(H - h)}, \quad (2.47)$$

где $S = \pi b^2$ — площадь диска.

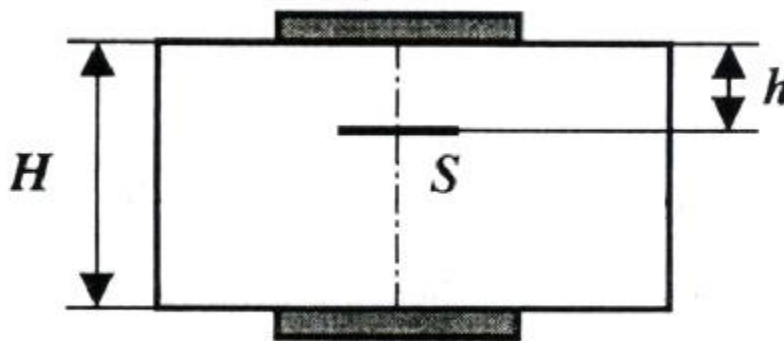


Рис. 2.40. Схема к расчету акустического тракта в методе прохождения

2.9.3. Влияние индикатрисы рассеяния дефекта на огибающие

Индикатрису вводят для описания угловой зависимости отражения от шероховатой поверхности и от дефектов. Индикатриса шероховатой поверхности с нерегулярной шероховатостью имеет один максимум, соответствующий зеркальному отражению. Зеркальное отражение сильно уменьшается, если размер шероховатости достигает порядка длины волны ультразвука. Если шероховатость регулярная, на-

пример, вызванная следами механической обработки, то индикатриса рассеяния может иметь несколько максимумов, соответствующих зеркальным отражениям от стенок неоднородностей.

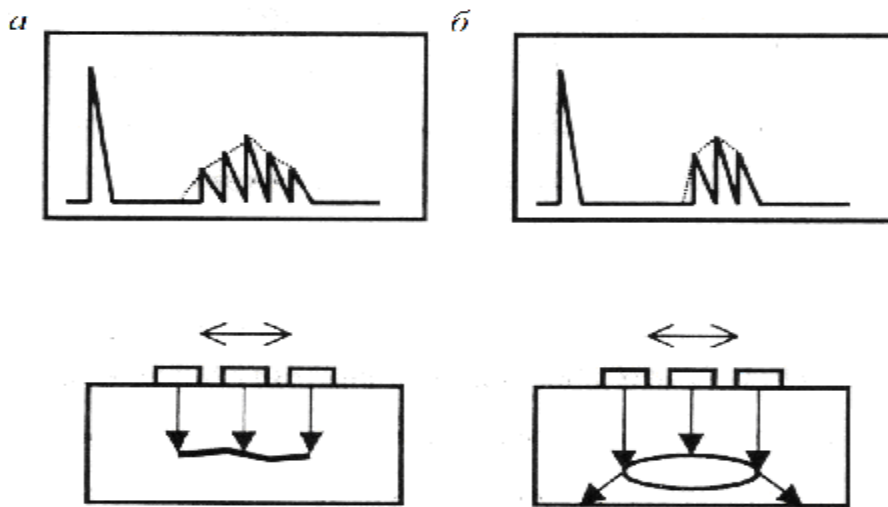


Рис. 2.41. Сканирование поверхности изделия прямым ПЭП: *а* — плоскостной дефект, *б* — округлый дефект

При сканировании преобразователем по поверхности изделия расстояние до отражателя изменяется, поэтому изменяется и амплитуда сигнала и время его задержки. На рис. 2.41 показаны случаи плоскостного (*а*) и округлого (*б*) дефектов при сканировании прямым ПЭП. Пространственная огибающая, полученная при перемещении ПЭП по изделию, позволяет судить об условной протяженности дефекта.

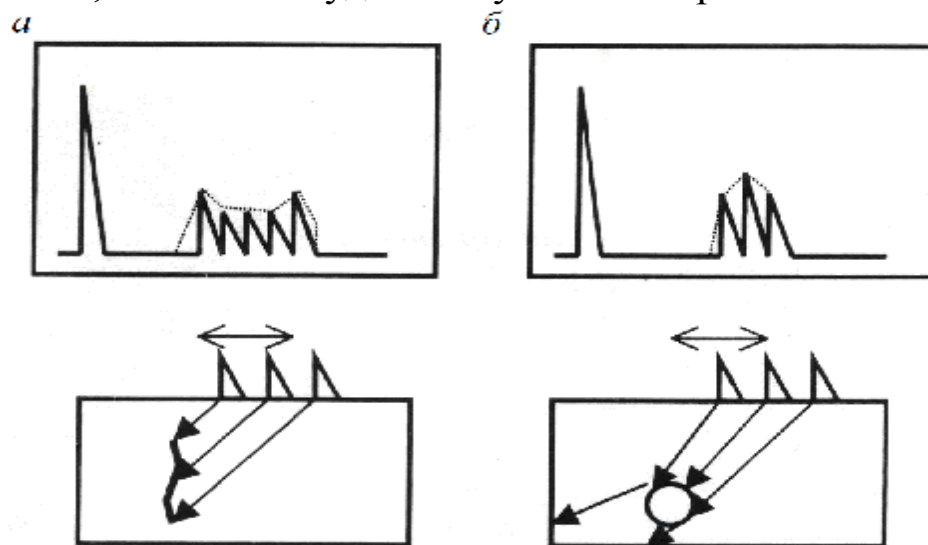


Рис. 2.42. Сканирование поверхности изделия наклонным ПЭП: *а* — плоскостной дефект, *б* — округлый дефект

Временные огибающие, полученные на экране дефектоскопа при сканировании наклонным преобразователем, показаны на рис. 2.42. В случае протяженного вертикально ориентированного дефекта амплитуда отраженного сигнала резко изменяется при сканировании. Поскольку расстояние до дефекта меняется, то изменяется и временное положение отраженного импульса.

2.9.4. Электроакустический тракт дефектоскопа

Электроакустический тракт включает электрические контуры генератора и приемника, пьезопреобразователь, промежуточные слои и изделие, служащее нагрузкой преобразователя. Схема электроакустического тракта показана на рис. 2.43. В контур генератора входят индуктивность L , сопротивление R , емкостью контура служит емкость преобразователя C . При расчете электроакустического тракта ставится задача достижения оптимального сочетания нескольких важных характеристик: чувствительности, полосы пропускания, мертвой зоны, разрешающей способности. Чем шире полоса пропускания ПЭП, тем меньшие искажения претерпевают импульсы в процессе преобразования из электрических в акустические и обратно.

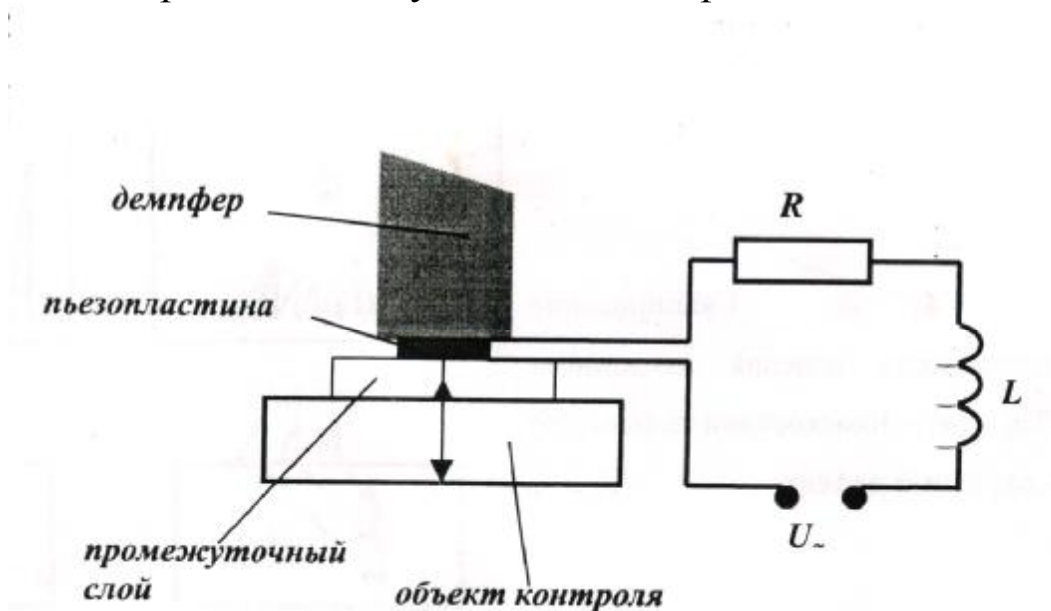


Рис. 2.43. Эквивалентная схема электроакустического тракта дефектоскопа

Для достижения максимальной разрешающей способности и минимальной мертвой зоны целесообразно использовать короткие зондирующие импульсы. Для их неискаженного преобразования относи-

тельная ширина полосы ПЭП $\Delta f / f_0$ должна быть 0,3—0,4. Резонансная частота электрического контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.48)$$

должна совпадать с резонансной частотой пьезопластины (C — электрическая емкость пьезопластины). Вид резонансной кривой, определяющей ширину пропускания, зависит от добротности Q . Добротность электрического контура вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{1}{2\pi f_0 CR} \quad (2.49)$$

Если $Q < 2$, то максимальная чувствительность достигается на резонансной частоте и растет с увеличением добротности. При $Q > 2$ на зависимости образуются два максимума, а на частоте f_0 появляется минимум. Максимальная полоса пропускания достигается при $Q \approx 2$.

В прямых ПЭП применение демпфера расширяет полосу пропускания, в наклонных ПЭП влияние демпфера на полосу меньше. Некоторые конструкции наклонных преобразователей вообще не используют демпфера. В современных УЗ дефектоскопах предусматривается возможность изменения сопротивления электрической нагрузки, изменяющей добротность.

3. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

3.1. Физические основы акустических методов контроля

3.1.1. Колебания и волны

Колебания — это такие процессы, при которых состояние системы воспроизводится через определенные промежутки времени. Колебания бывают различной физической природы: механические (например, колебания маятника), электромагнитные (например, напряжение сети переменного тока), световые, акустические. *Акустические колебания* — это механические колебания частиц упругой среды. Сила упругости возвращает частицы к положению равновесия. Инерция вызывает продолжение колебания после прохождения положения равновесия.

Все колебания делятся на два класса: *свободные и вынужденные*. Свободные колебания совершает система, выведенная из положения

равновесия и предоставленная самой себе. Свойства свободных колебаний определяются свойствами самой колеблющейся системы. Часто свободные колебания возбуждаются кратковременным воздействием, ударом. Вынужденные колебания совершаются под действием периодической силы, выводящей систему из положения равновесия. Свойства вынужденных колебаний определяются как свойствами системы, так и вынуждающей силой.

Колебания, возникнув в какой-то точке, распространяются в среде. *Процесс распространения колебаний в среде образует волну. Акустическая волна* — это процесс распространения механического возмущения.

По времени протекания процесса колебания и волны разделяются на *непрерывные и импульсные*. Непрерывные колебания возникли бесконечно давно, продолжают сейчас и будут продолжаться бесконечно долго. На практике непрерывными колебаниями считаются колебания, продолжительность которых превышает время выполняемых измерений. Импульсные колебания имеют конечную продолжительность.

Непрерывные колебания графически изображены на рис. 3.1. По оси абсцисс откладывают время, по оси ординат — ту величину, которая совершает колебания. В акустике — это давление p или упругое смещение u . *Периодом* называют время полного колебания.

Период обозначают буквой T , он измеряется в секундах и в микросекундах, $1 \text{ мкс} = 10^{-6} \text{ с}$. *Максимальное отклонение* от положения равновесия — это амплитуда колебания. Амплитуду обозначают буквой A или индексом "о" у колеблющейся величины, например, p_0 .

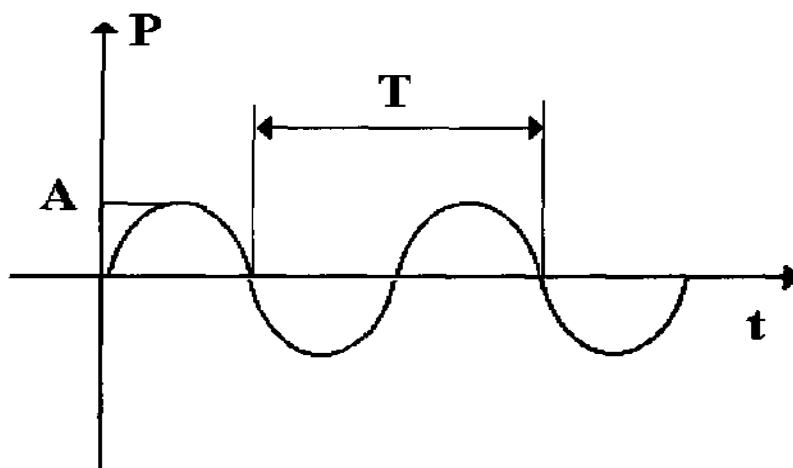


Рис. 3.1. График непрерывных колебаний

Величина, обратная периоду, называется *частотой* f

$$f = \frac{1}{T} . \quad (3.1)$$

Если период показывает, за сколько секунд (или микросекунд) совершается колебание, то частота показывает, сколько колебаний совершается за секунду. Единица измерения частоты — это герц; 1 Гц соответствует одному колебанию в секунду. Употребляются и кратные величины: килогерц 1 кГц = 1000 Гц и мегагерц 1 МГц = 10^6 Гц.

Импульсные колебания бывают двух видов: видеоимпульсы и радиоимпульсы. График периодической последовательности видеоимпульсов показан на рис. 3.1.2.

Видеоимпульсы характеризуют амплитудой A , периодом повторения T_n и длительностью τ . Длительности импульса измеряют на уровне половины амплитуды или по уровню - 6дБ от максимума, если по оси ординат отложена величина, измеренная в децибелах. По ГОСТ 14782-86 "Соединения сварные. Методы ультразвуковые" длительность зондирующего импульса измеряется на уровне 0,14 A , т. е. 1/10 от амплитуды. Длительность фронта τ_ϕ и длительность среза τ_{cp} измеряют по уровням от 0,1—0,9 A на переднем и заднем фронтах импульса. Величина, обратная периоду повторения, называется *частотой повторения*, или частотой следования импульсов

$$F = \frac{1}{T_n} . \quad (3.2)$$

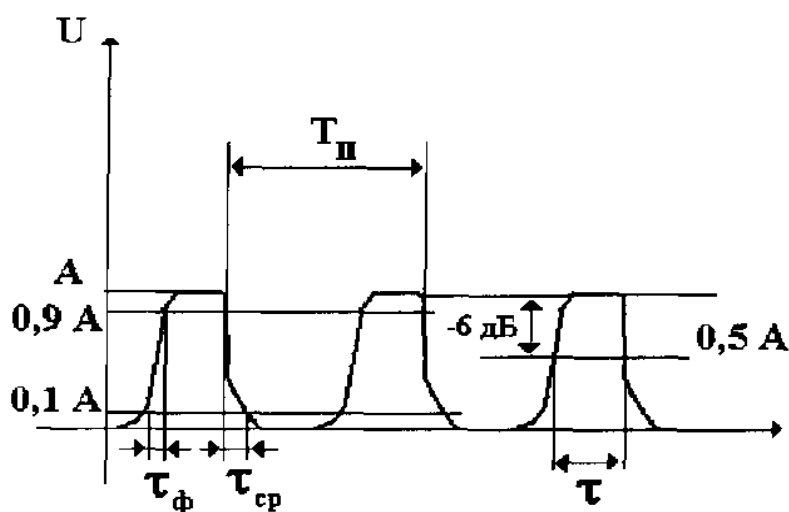


Рис. 3.2. Последовательность видеоимпульсов

Частота повторения измеряется в герцах. Типичные значения частоты повторения зондирующих импульсов ультразвукового дефектоскопа — это сотни герц или единицы килогерц.

График периодической последовательности *радиоимпульсов* изображен на рис. 3.3. Частоту высокочастотного заполнения называют несущей частотой радиоимпульса f_0 . Остальные параметры радиоимпульсов такие же, как видеоимпульсов: амплитуда A , период повторения T_{Π} и частота следования F , длительность импульса τ , длительность фронта $\tau_{\text{фр}}$ и среза $\tau_{\text{ср}}$.

Волны, как и колебания, могут быть *непрерывными и импульсными*. Частицы среды в каждой точке совершают колебания. Поэтому все параметры колебаний относятся и к волнам. В дополнение к ним вводится еще понятие *длины волны*, которое выражает пространственную периодичность волнового движения. Распределение упругих смещений частиц в волне показано на рис. 3.4, волна распространяется вдоль оси x .

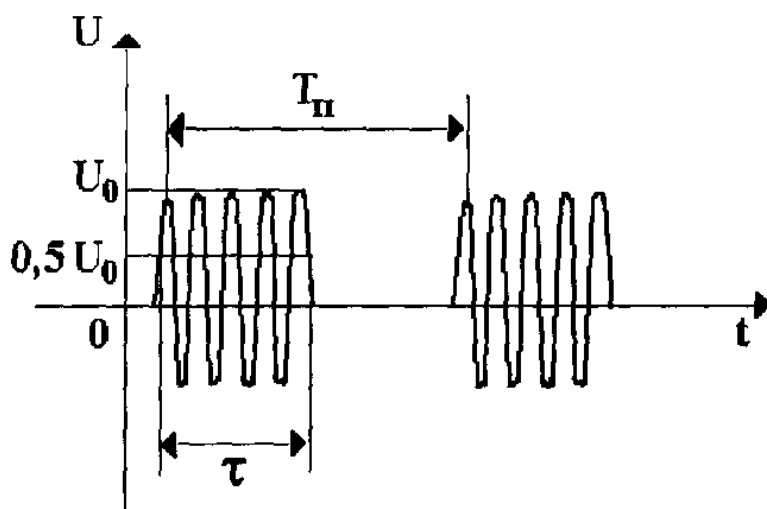


Рис. 3.3. График периодической последовательности радиоимпульсов

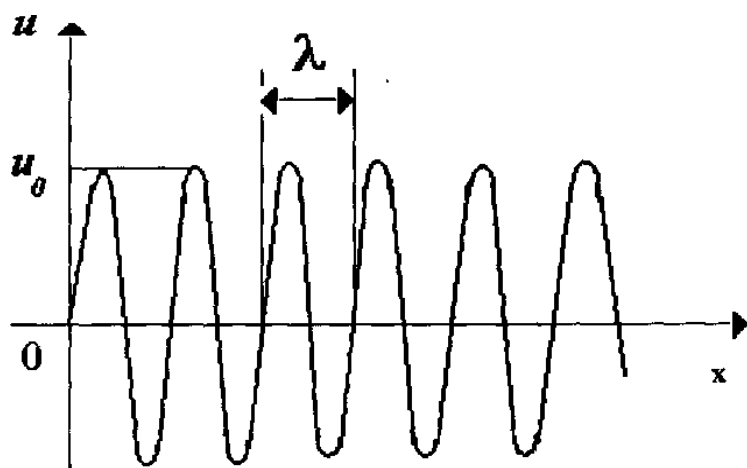


Рис.3.4. Распределение упругих смещений в волне

Длина волны λ — это расстояние между точками, колеблющимися в одной фазе, или это расстояние, проходимое волной за время, равное периоду

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}, \quad (3.3)$$

где c — скорость распространения упругих волн.

В зависимости от частоты, волны разделяют на инфразвук (частоты ниже 16 Гц), слышимый звук (частоты от 16 Гц—20 кГц), ультразвук (частоты от 20 кГц—300 МГц), гиперзвук (частоты свыше 300 МГц). Границы между этими диапазонами в значительной степени условны. В акустическом контроле в настоящее время используются частоты от 50 Гц—50 МГц.

3.1.2. Гармонические колебания

Одним из наиболее простых и часто встречающихся в природе и технике видов колебательного движения являются гармонические колебания. Колебания, совершающиеся по закону синуса или косинуса, называют *гармоническими*. Гармоническое колебание показано на рис. 3.1. Общий вид гармонического колебания выражается формулой

$$u = u_0 \sin(\omega t - \varphi_0), \quad (3.4)$$

где u — текущее значение колеблющейся величины, например упругого смещения, в произвольный момент времени t , u_0 — амплитуда колебания.

Гармонические колебания, распространяясь в среде, создают гармоническую упругую волну. Формула для упругих смещений гармонической волны записывается следующим образом

$$u = u_0 \sin(\omega t - kz - \varphi_0). \quad (3.4a)$$

Здесь k — это волновое число, $k = \omega / c$; z — это расстояние, пройденное волной.

Круговая, или циклическая, частота ω выражается через частоту f или период T :

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f. \quad (3.5)$$

В формуле (3.4) φ_0 — это начальная фаза колебаний, а аргумент функции синус — это фаза φ :

$$\varphi = \omega t - \varphi_0. \quad (3.6)$$

Фаза φ зависит от времени, а начальная фаза φ_0 показывает положение, от которого начался отсчет времени. Понятие начальной фазы иллюстрирует рис. 3.5. Начальная фаза — это выраженная в градусах или радианах доля периода, прошедшая с начала колебания до начала отсчета. Фаза φ и начальная фаза φ_0 измеряются в градусах или радианах, $1 \text{ рад} = 57,3 \text{ градуса}$.

Выражение в скобках в правой части (3.4a) — это фаза φ

$$\varphi = \omega t - kz - \varphi_0. \quad (3.7)$$

Она показывает изменение упругих смещений и в пространстве и во времени. Совокупность точек, колеблющихся в одинаковой фазе, образуют волновой фронт.

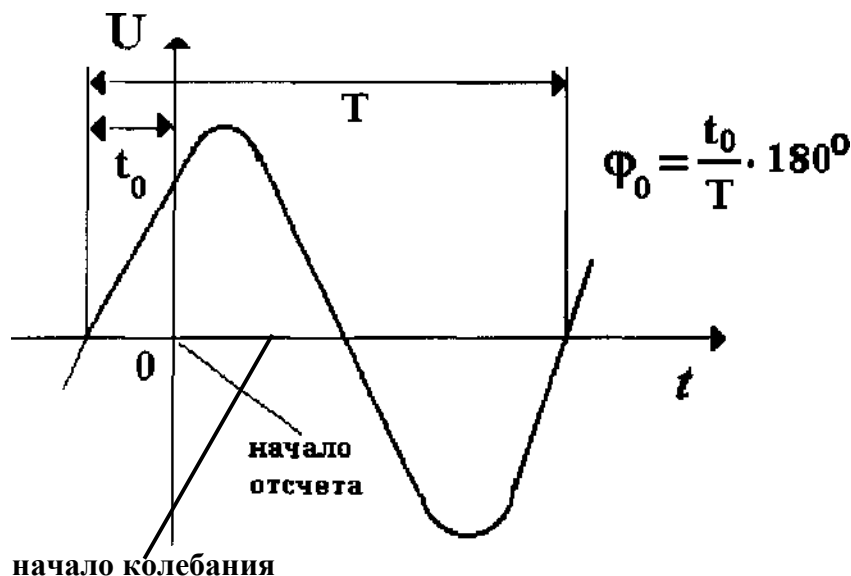


Рис. 3.5. Пример колебаний с ненулевой начальной фазой

Распространение волны происходит в направлении нормали к волновому фронту в каждой точке. Существует три основных вида

волнового фронта: *плоский, цилиндрический и сферический* (рис. 3.6). Соответственно и волны называются плоскими, цилиндрическими и сферическими по форме волнового фронта.

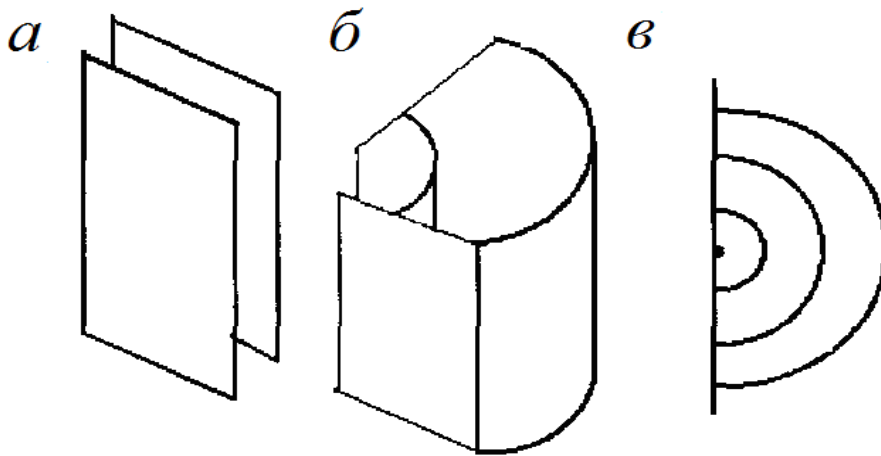


Рис. 3.6. Основные виды волнового фронта:
а – плоский; *б* – цилиндрический; *в* – сферический

Плоские волны образуются на малых расстояниях от плоского излучателя. Цилиндрические волны создает излучатель, удлинённый в одном направлении. Сферические волны получаются, если волна прошла расстояние, много большее радиуса излучателя.

Колебательная скорость

Колебательное движение частиц происходит со скоростью v

$$v = u_0 \omega \sin(\omega t - \varphi_0). \quad (3.8)$$

Величина $Z = \rho c$ называется характеристическим акустическим импедансом. Давление в упругой волне прямо пропорционально импедансу и колебательной скорости частиц:

$$p = Zv. \quad (3.9)$$

Волна, распространяясь в пространстве, переносит упругую энергию.

Интенсивность

Интенсивность I – это плотность потока (т. е. количество энергии через единицу площади), переносимая волной за период колебаний

$$I = \frac{Z \omega^2 u_0^2}{2}. \quad (3.10)$$

Интенсивности $I = 1 \text{ Вт/см}^2$ соответствует амплитуда $u_0 \approx 5 \cdot 10^4 \lambda$, что для частот в единицы мегагерц составляет миллионные доли миллиметра.

3.1.3. Шкала неперов и децибел

Различие между двумя уровнями интенсивности I_1 и I_2 оценивают в децибелах

$$L = 10 \lg(I_1 / I_2). \quad (3.11)$$

Если рассматривается отношение давлений P_1 и P_2 , или амплитуд упругих смещений, то

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2, \quad (3.12)$$

откуда

$$L = 20 \lg(P_1 / P_2). \quad (3.13)$$

Отношение давлений или интенсивностей можно выразить в *неперах* (Нп), если взять натуральный логарифм

$$L_1 = \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \quad (3.14)$$

Между непером и децибелом есть соотношение:

1 Нп = 8,68 дБ; 1 дБ = 0,115 Нп.

Соответствие некоторых значений шкалы децибел отношениям амплитуд и интенсивностей дано в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Соответствие значений шкалы децибел отношениям амплитуд и интенсивностей

Деци- белы	Отноше- ние ам- плитуд	Отноше- ние мощ- ностей	Деци- белы	Отноше- ние ам- плитуд	Отноше- ние мощ- ностей
-40	0,100	0,010	6	1,414	2
-20	0,316	0,100	10	1,780	3,16
-12	0,500	0,250	12	2	4
-10	0,562	0,316	20	3,160	10
-6	0,707	0,500	40	10	100
0	1	1	100	31,6	1000

3.1.4. Спектральный состав акустических импульсов

Колебания сложной формы можно выразить в виде суммы нескольких гармонических составляющих. Процесс нахождения гармонических составляющих сложного колебания называется *гармоническим анализом*. Эту процедуру выполняют приборы – анализаторы спектра. Она также может быть выполнена путем вычислений на ЭВМ. Результат гармонического анализа называют *спектром*. Он показывает, какие частоты и с какими амплитудами входят в состав данного колебания. Процесс разложения негармонического (прямоугольного) колебания на составляющие иллюстрирует рис. 3.7. Спектры периодических и шумовых процессов и одиночных импульсов сплошные, в них присутствуют все частоты из некоторого интервала.

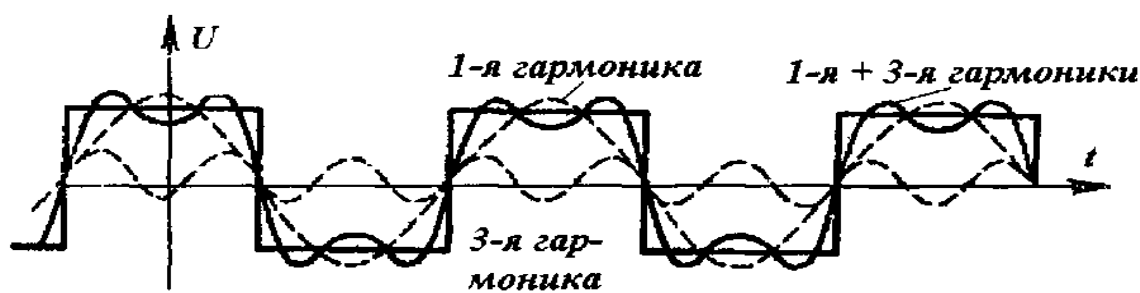


Рис. 3.7. Разложение колебания на гармонические составляющие

Спектры периодических процессов состоят из линий. Простейший спектр, состоящий одной линии, имеет гармоническое колебание. Такие колебания и их спектры называют монохроматическими. Для примера на рис. 3.8 показаны осциллограмма (а) и спектр (б) периодической последовательности радиоимпульсов. Самую большую амплитуду имеет линия с частотой высокочастотного заполнения радиоимпульса f_0 . Интервал между соседними линиями всегда одинаков и равен частоте следования импульсов $F = 1/T_n$. Огибающая спектра обращается в нуль на частотах $f_0 - 1/\tau$ и $f_0 + 1/\tau$, где τ - длительность радиоимпульса. Подсчитаем число спектральных компонент, лежащих в пределах этих частот. Пусть точка повторения F составляет 1 кГц, а длительность импульса 1 мкс. Число спектральных линий равно $\frac{2}{\tau F} = 2000$. Примерно такое число спектральных компонент содержит ультразвуковой импульс, распространяющийся в изделии.

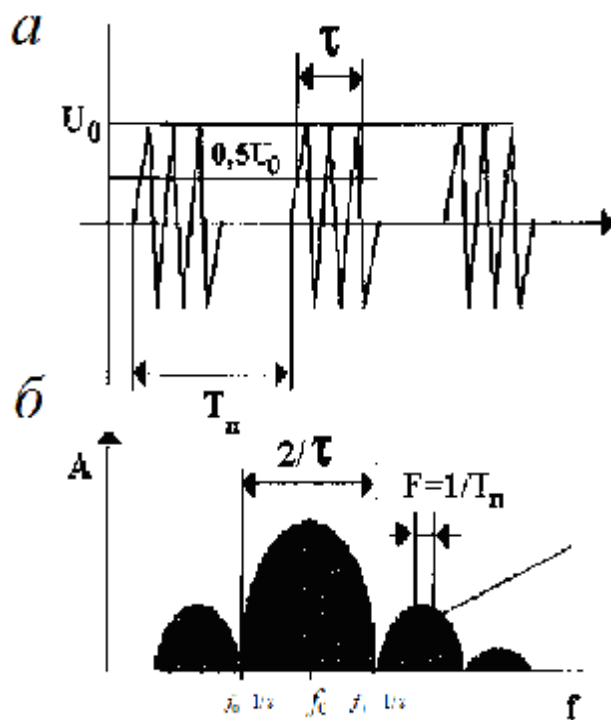


Рис. 3.8. Осциллограмма (а) и спектр периодической последовательности радиоимпульсов (б)

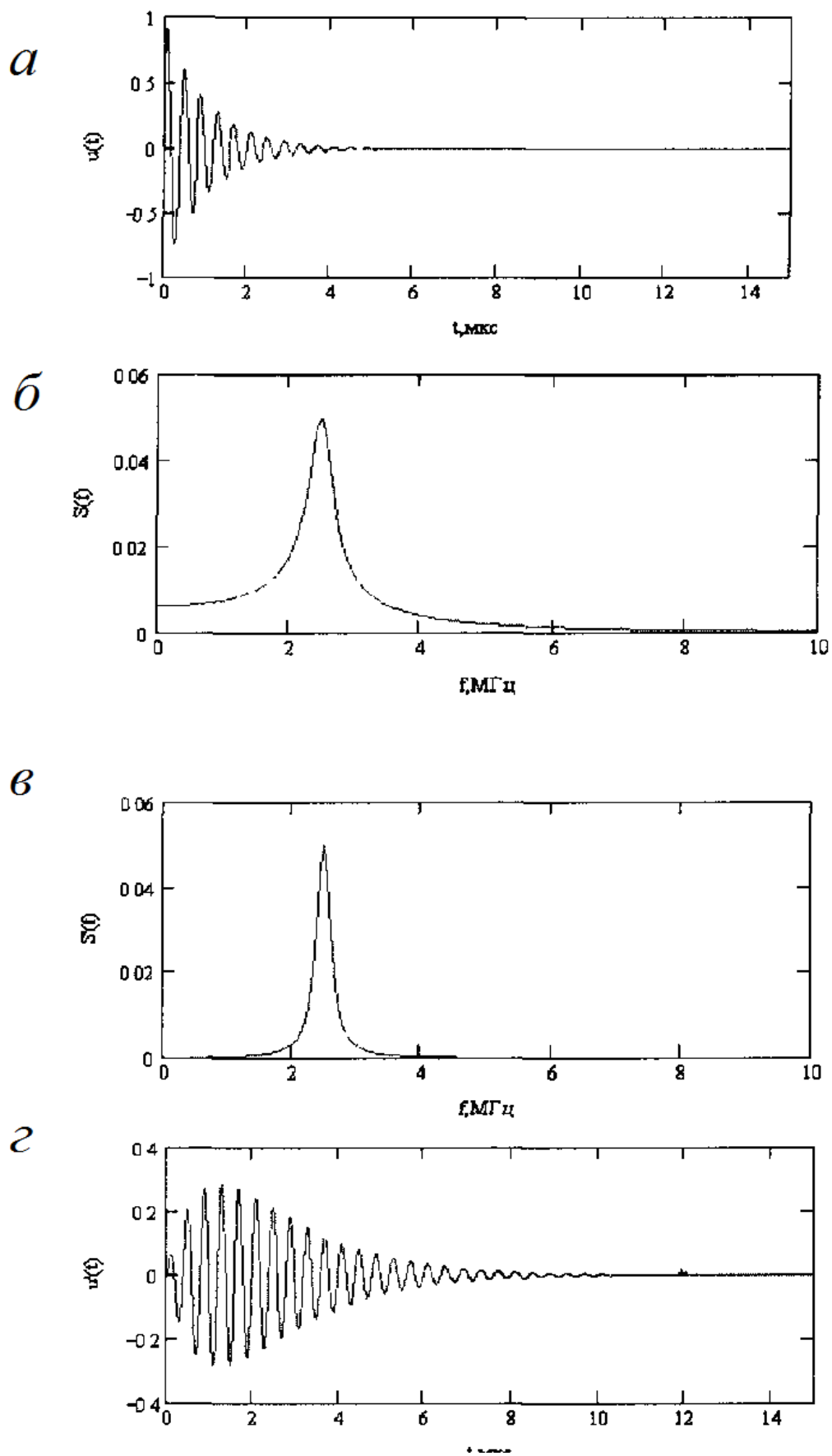


Рис. 3.9. Осциллограмма (*a*) и спектр зондирующего импульса (*б*), то же (*в* и *г*) для импульса, отраженного от дефекта

В качестве примера на рис. 3.9 приведены осциллограмма (а) и спектр (б) зондирующего импульса ультразвукового дефектоскопа, а также осциллограмма (в) и спектр (г) отраженного от дефекта сигнала. Высокочастотные компоненты спектра отраженного сигнала ослаблены по сравнению с зондирующим импульсом. Причиной тому является ограниченная полоса пропускания пьезопреобразователя и затухание в объекте контроля, возрастающее с частотой волны.

3.1.5. Типы и поляризация упругих волн

Все упругие волны различаются по типу на *объемные*, т. е. распространяющиеся в объеме тела, *поверхностные*, бегущие вдоль поверхности раздела двух сред, и *волны в ограниченных телах*. Поляризацией волны называется траектория и направление движения частиц упругой среды по отношению к направлению распространения.

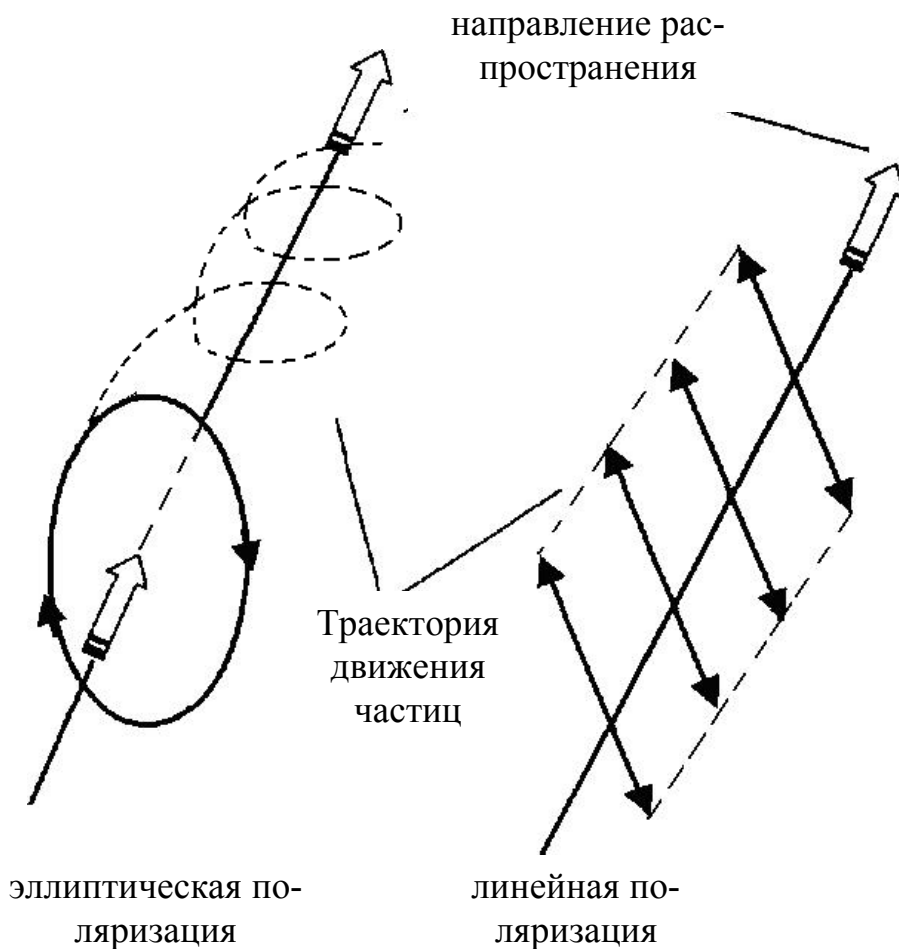


Рис. 3.10. Эллиптическая и линейная поляризация

В общем случае монохроматическая волна имеет эллиптическую поляризацию. Это означает, что частицы совершают движение по эллипсу. В частном случае эллипс вырождается в линию (см. рис. 3.10).

3.1.6. Типы волн

Говорят, что такие волны имеют линейную поляризацию, они относятся к объемным волнам. Среди объемных различают продольные и поперечные волны.

Продольной называется такая волна, у которой направление движения частиц происходит в том же направлении, в котором распространяется волна. При распространении продольной волны в среде образуются области растяжения и сжатия (рис. 3.11, а). Продольные волны могут распространяться как в твердых телах, так и в жидкостях и газах. Значения скоростей продольных волн приведены в Табл. 3.2.

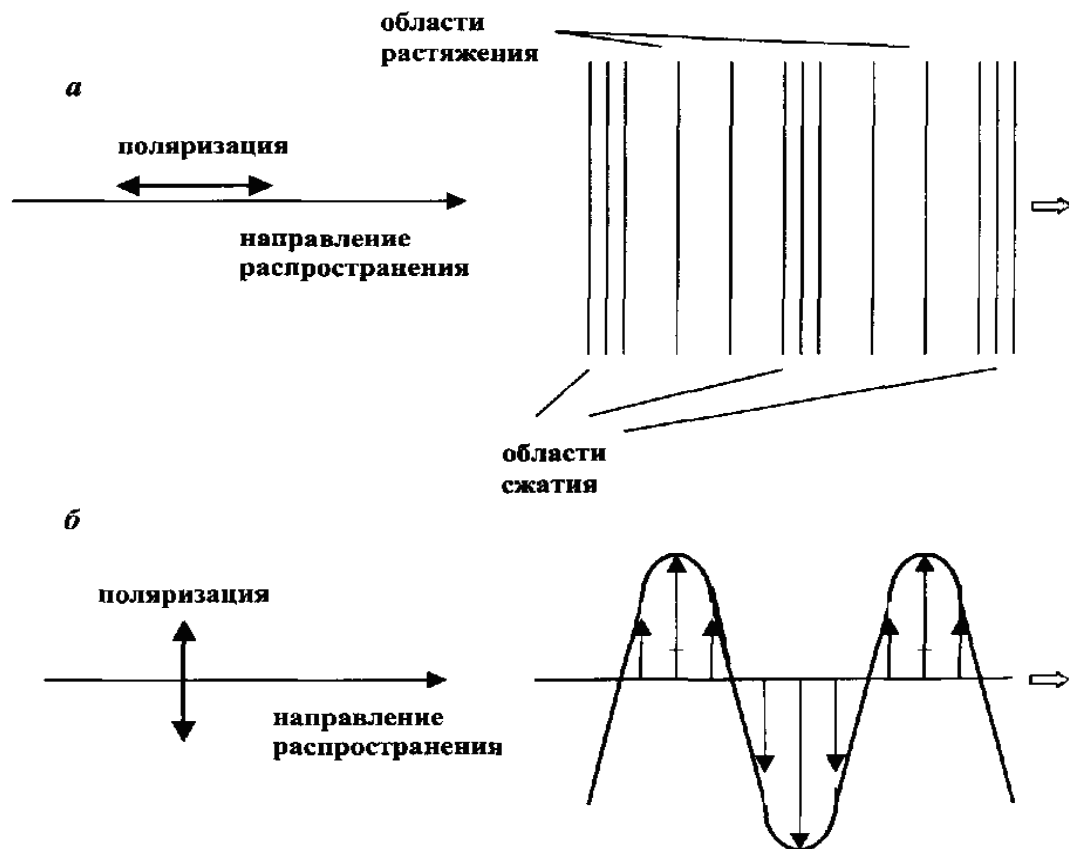


Рис. 3.11. Продольные (а) и поперечные (б) волны

Скорость продольной волны в изотропной среде можно рассчитать, если известны плотность материала ρ , модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν . *Модуль Юнга* – это отношение плотности силы к вызываемой этой силой деформации. *Коэффициент Пуассона* ν – это

отношение изменения ширины стержня к изменению его длины $\nu = \Delta y / \Delta x$, если растяжение производится по длине (рис. 3.12, а).

Для металлов $\nu \approx 0,3$. Скорость распространения продольной волны C_l определяется выражением

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (3.15)$$

в металлах $C_l \approx 1,16\sqrt{E/\rho}$.

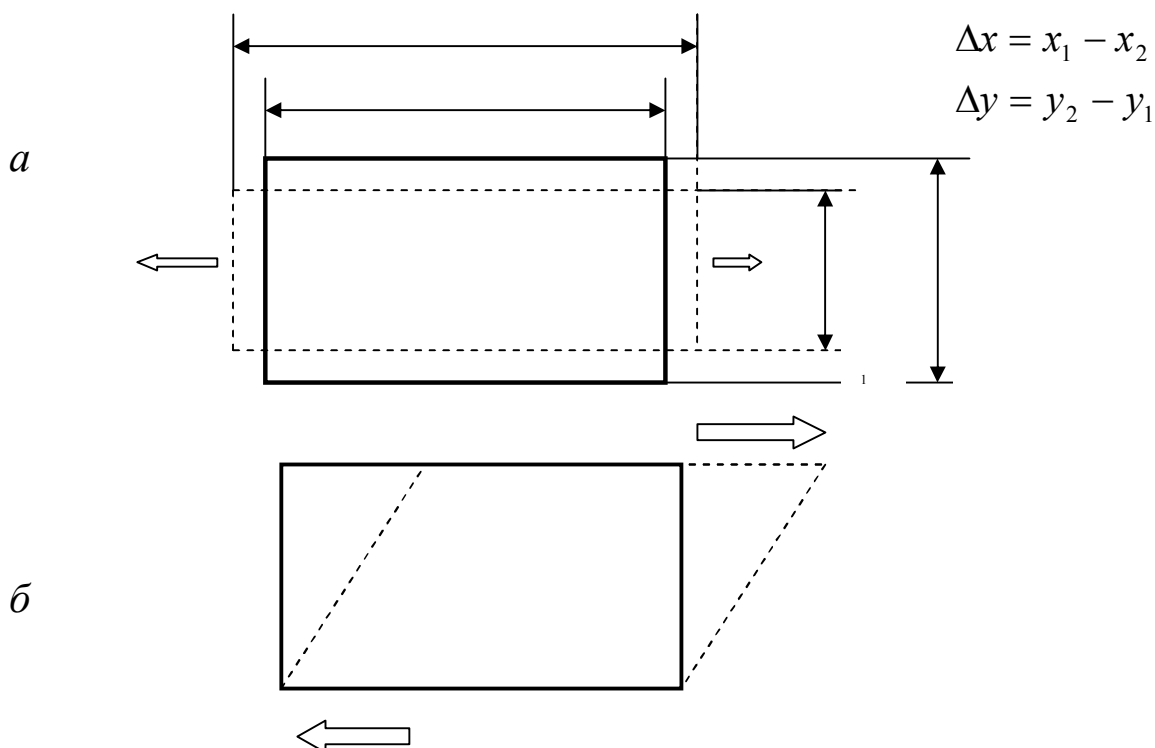


Рис. 3.12. Деформации растяжения (а) и сдвига (б)

Поперечной называют такую волну, направление колебания частиц в которой перпендикулярно направлению распространения (см. рис. 3.11, б). Поперечную волну также называют *сдвиговой*, поскольку в ней осуществляются деформации сдвига (см. рис. 3.12, б). Поперечные волны могут распространяться в твердых телах, а в жидкостях и газах они очень быстро затухают. Скорость поперечной волны C_t определяется модулем сдвига G и плотностью ρ :

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}. \quad (3.16)$$

Для металлов коэффициент Пуассона $\nu \approx 0,3$, поэтому

$$C_t \approx 0,55C_l . \quad (3.17)$$

Пусть поперечная волна распространяется под некоторым углом к поверхности тела. Если направление колебаний (поляризация волны) параллельно этой поверхности, то волну называют горизонтально поляризованной или *SH*-волной. Если волна поляризована в плоскости, перпендикулярной поверхности, то волну называют вертикально поляризованной или *SV*-волной. При возбуждении наклонным пьезоэлектрическим преобразователем в объекте контроля возникает *SV*-волна. Электромагнитно-акустический преобразователь или кварцевые пьезопластины возбуждают *SH*-волны.

Поверхностные волны

Мы рассмотрим волны Рэлея (*поверхностные*) и головные волны (*подповерхностные*). Поверхностными волнами называют упругие волны, распространяющиеся вдоль свободной границы твердого тела, и быстро затухающие с глубиной. Распространение волны Рэлея показано на рис. 3.13.

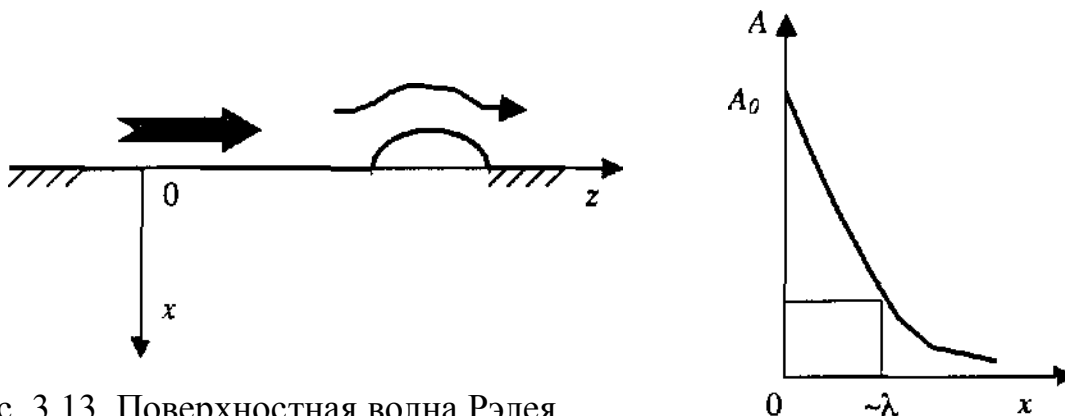


Рис. 3.13. Поверхностная волна Рэлея

Частицы в волне колеблются по эллиптической траектории. Большая ось эллипса перпендикулярна границе. Амплитуда волны быстро уменьшается с глубиной – координата x на рис. 3.13. Волна Рэлея сосредоточена в пределах слоя толщиной $\sim \lambda$ у поверхности. Скорость волны Рэлея C_R выражается формулой

$$C_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} C_t . \quad (3.18)$$

Для металлов эта формула сводится к

$$C_R = 0,93C_t.$$

Волна Рэлея способна огибать небольшие препятствия и распространяться не только по плоским, но и по выпуклым и вогнутым поверхностям. На выпуклой поверхности скорость волны несколько уве-

личивается, на вогнутой – уменьшается. Поверхностные волны имеют малое затухание. На вогнутых поверхностях возникает дополнительное затухание волны из-за излучения объемных волн в глубь среды.

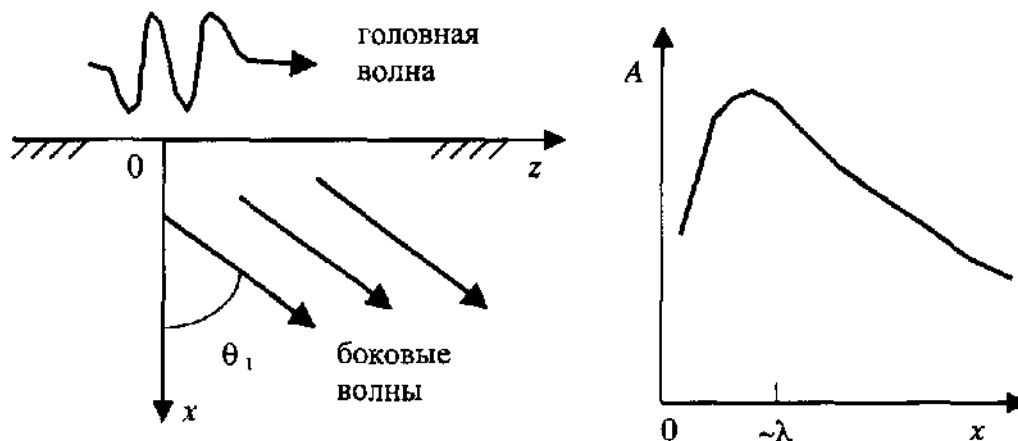


Рис. 3.14. Головная волна

Головная волна распространяется вблизи поверхности твердого тела. Ее скорость близка к скорости продольных волн. Головная волна быстро затухает, поскольку она порождает боковые вытекающие волны (рис. 3.14). Боковые волны под углом $\theta_1 \approx \arccos C_t/C_l$ распространяются в глубь среды. Максимум амплитуды головной волны приходится на некоторую глубину под поверхностью. Головная волна медленно затухает вглубь среды. Головная волна не чувствует выступы на поверхности и мелкие поверхностные дефекты. Однако с ее помощью можно обнаруживать подповерхностные дефекты. Углубления в поверхности глубже $1-2$ длин волн вызывают отражение головных волн и излучение их энергии в виде объемных волн.

Волны Лэмба

Волнами в пластинах (нормальными волнами) называют упругие волны, распространяющиеся в твердой пластине (слое) со свободными или слабо-нагруженными гранями. Нормальные волны бывают с двумя типами поляризации: горизонтальной, параллельной плоскости пластин (это поперечные нормальные волны) и с вертикальной, перпендикулярной плоскости пластин (это *волны Лэмба*). В практике ультразвуковой дефектоскопии волны Лэмба получили большое распространение.

Существует несколько типов волн Лэмба. Моды, колебания которых симметричны относительно оси пластины, называют *симметрич-*

ными (обозначение – S_H). Моды, колебания которых асимметричны относительно оси, называют асимметричными (обозначение a_H). Схематично колебание частиц в нескольких модах Лэмба показано на рис. 3.15. В симметричных модах смещения в эквивалентных точках по разные стороны от оси пластины направлены противоположно, а в асимметричных модах – в одну сторону.

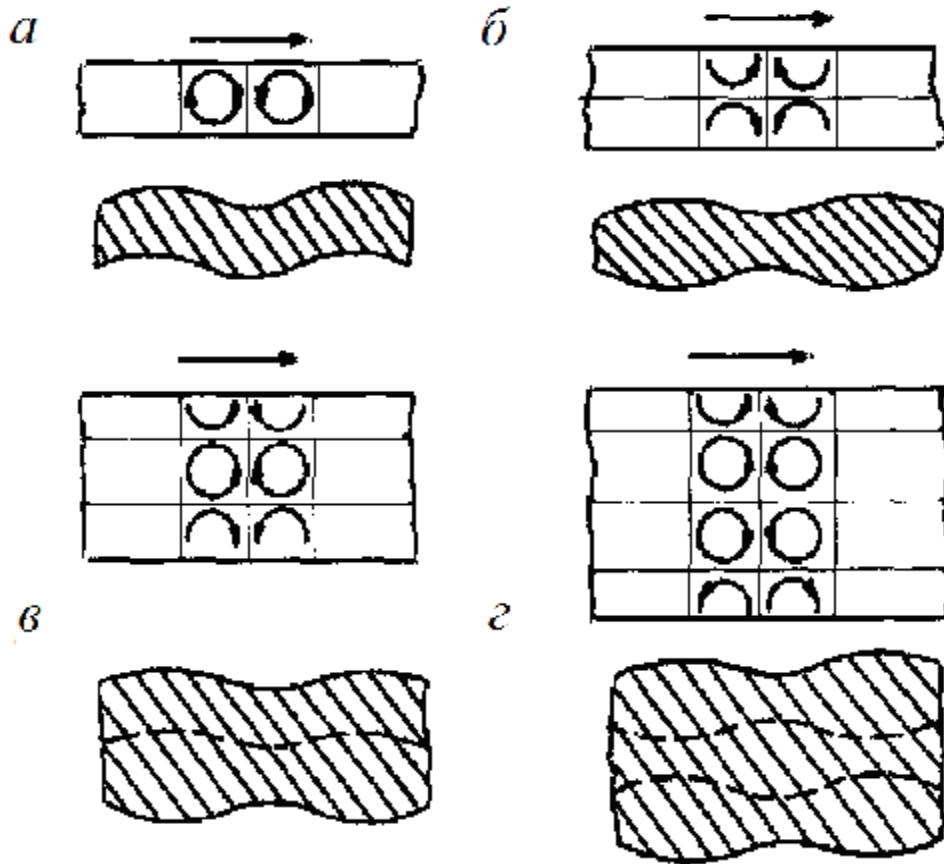


Рис. 3.15. Волны Лэмба в пластинах:

a – тип волны a_0 ; $б$ – волна s_0 ; $в$ – волна a_1 ; $г$ – волна s_1

Моды с нулевыми индексами a_0 и s_0 имеют наиболее простую структуру колебаний (см. рис. 3.15, a и $б$). Они существуют при любых значениях частоты и при увеличении толщины пластины переходят в поверхностные волны. Мода s_0 соответствует волне расширения – сжатия, а мода a_0 – изгибной волне.

В волнах Лэмба скорость распространения фазы волны вдоль пластины (фазовая скорость) не равна групповой скорости, с которой переносится энергия. Фазовая скорость волны Лэмба зависит от частоты УЗВ и от толщины пластины h

$$C_f = \frac{C_t}{\sqrt{1 - \left(\frac{2\pi n f}{C_t h}\right)^2}} \quad (3.19)$$

Зависимость скорости распространения волны от частоты называют дисперсией. Зависимость фазовой скорости мод в стали от произведения частоты УЗВ f на толщину пластины h приведена на рис. 3.16. Нормальные волны применяют для контроля листов, оболочек, труб толщиной 5 мм и менее. Изменение сечения объекта контроля или появления дефектов вызывает отражение нормальных волн. На свойства волн оказывают воздействие не только поперечные дефекты, но и продольные, например, расслоения. Эта особенность нормальных волн полезна при дефектоскопии листов.

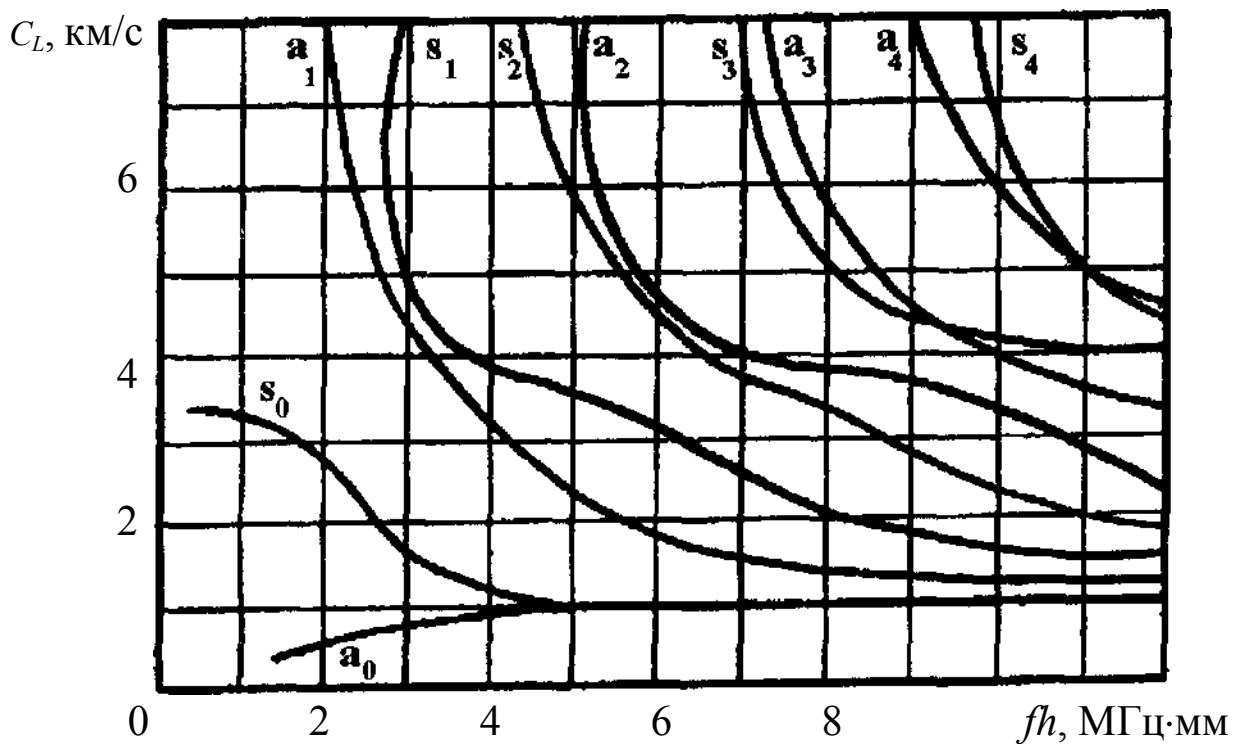


Рис. 3.16. Дисперсионные характеристики волн Лэмба

Волны в стержнях

В стержнях, как и в пластинах, существуют нормальные волны. Волны в круглых стержнях называют волнами Порхгаммера. Различа-

ют симметричные и несимметричные моды. Наиболее применяемые волны в стержнях:

- 1) волны изгиба со сдвигом (рис. 3.17, *а*)
- 2) волны расширения-сжатия (рис. 3.17, *б*). Их скорость $C_e \approx 0,86 \times C_t$.
- 3) крутильные волны (рис. 3.17, *в*). Они характеризуются поворотом частиц вокруг оси стержня.

Нормальные моды в стержне возбуждают наклонным падением продольной волны из внешней среды, а крутильную волну – электромагнитно-акустическими преобразователями или пьезоэлектрическими преобразователями, имеющими несколько сегментов. Волны в стержнях применяют для контроля прутков и проволок.

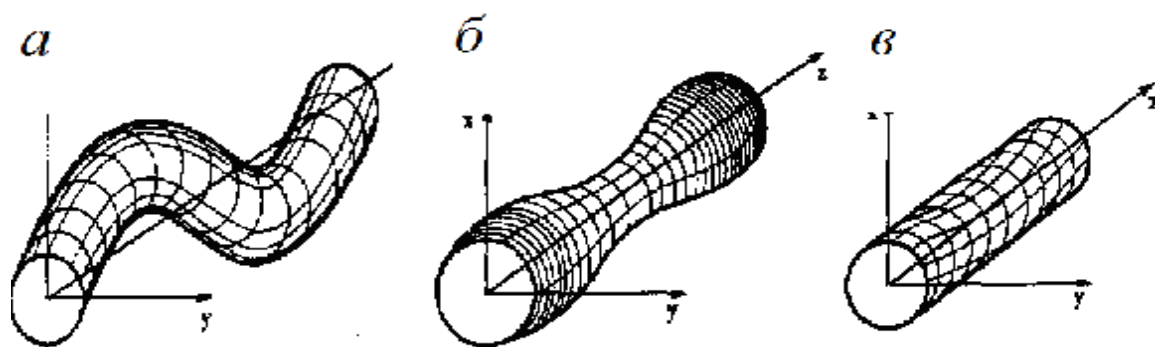


Рис. 3.17. Волны в стержнях изгиба со сдвигом (*а*), расширения–сжатия (*б*), крутильные (*в*)

3.1.7. Причины ослабления волн при распространении

Амплитуда и интенсивность упругих волн уменьшается по мере их распространения. Существуют следующие основные причины ослабления волн: расхождение лучей и затухание. Ослабление из-за *расхождения лучей* происходит потому, что часть лучей пучка не достигает приемника (см. рис. 3.18). Ослабление из-за расхождения лучей увеличивается с пройденным волной расстоянием. Уменьшение амплитуды сферических волн пропорционально $\frac{1}{Z}$, где Z - пройденное расстояние, а цилиндрических волн – пропорционально $\frac{1}{\sqrt{Z}}$. В плоских волнах расхождения лучей нет.

Ослабление амплитуды волн вследствие затухания пропорционально $e^{-\alpha z}$, где $e \approx 2,73$; α – коэффициент затухания. Коэффициент затухания складывается из коэффициента поглощения α_n и коэффициента рассеяния α_p : $\alpha = \alpha_n + \alpha_p$.

Поглощение – это преобразование энергии упругих волн в другие виды энергии, в первую очередь в тепло. *Рассеяние* связано процессами преломления, отражения волн на границах кристаллов, зерен или включений в неоднородных материалов, а также огибанием волнами этих внутренних неоднородностей. Коэффициенты α , α_n и α_p измеряются в Нп/м и Нп/см. В технике часто используют единицы дБ/м и дБ/см: $\alpha [\text{дБ/см}] = 8,69 \alpha [\text{Нп/см}]$.

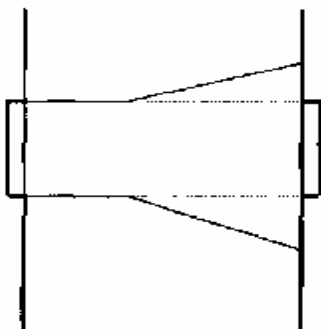
В табл. 3.3 сведены формулы для расчета амплитуды $A(z)$ и мощности $P(z)$ волны, прошедшей расстояние z . A_0 и P_0 – начальные амплитуда и мощность.

Таблица 3.3

Формулы для расчета

Характеристика	Тип волны		
	Плоская	Цилиндрическая	Сферическая
Амплитуда	$A(z) = A_0 e^{-\alpha z}$	$A(z) = \frac{A_0}{\sqrt{z}} e^{-\alpha z}$	$A(z) = \frac{A_0}{z} e^{-\alpha z}$
Мощность	$P(z) = P_0 e^{-2\alpha z}$	$P(z) = \frac{P_0}{z} e^{-2\alpha z}$	$P(z) = \frac{P_0}{z^2} e^{-2\alpha z}$

а



б

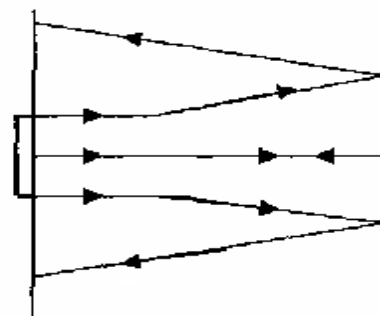


Рис. 3.18 Включение излучателя и приемника по отдельной (а) и совмещенной (б) схемам

3.1.8. Акустические свойства сред

Если для деформации тела требуется приложить силу F на единицу площади S , то в теле возникает напряжение $\sigma = F/S$. Согласно закону Гука, между деформациями u и напряжениями σ существует пропорциональная зависимость

$$\sigma = Eu. \quad (3.20)$$

Коэффициент пропорциональности – это модуль Юнга E для деформации растяжения (сжатия). Для деформации сдвига коэффициент пропорциональности в (3.20) – это модуль сдвига G . Скорости упругих волн определяются модулями упругости E или G и плотностью. Так, скорость продольных волн выражается формулой (3.15), а поперечных – формулой (3.16). Для сдвиговых напряжений σ_t можно записать формулу

$$\sigma_t = -2Zv, \quad (3.21)$$

где v – колебательная скорость; Z – характеристический упругий импеданс

$$Z = \rho c_t \quad (3.22)$$

Согласно (3.21), напряжение и колебательная скорость противоположны по знаку. Подобная формула для продольных волн была приведена ранее – см. (3.10).

Рассмотрим основные причины *затухания* упругих волн. Как указано в п. 3.1.7., коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения и рассеяния. В однородных жидкостях и газах рассеяние отсутствует, а коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. В аморфных твердых телах (например стекле) и монокристаллах рассеяние тоже отсутствует. В поликристаллических телах присутствует как поглощение, так и рассеяние.

Существует несколько причин поглощения упругих волн в твердых телах.

Поглощение обуславливается теплопроводностью среды и внутренним трением. В большинстве поликристаллических твердых тел основную роль в затухании играет *рассеяние*. Среда содержит зерна или включения, плотность и акустический импеданс которых отличается от окружения. Так, в чугунах содержатся включения графита. В стали зерна сохраняют кристаллическое строение. Скорость УЗВ зависит от направления падающей волны по отношению к осям кристалла. Чем сильнее эта зависимость, т. е. упругая анизотропия, тем сильнее

влияние рассеяния. Так анизотропия (и рассеяние) велики в медных сплавах (латуни), но значительно меньше в алюминиевых. В сталях рассеяние сильно сказывается на распространении волн в нержавеющей аустенитной стали, в аустенитных сварных швах.

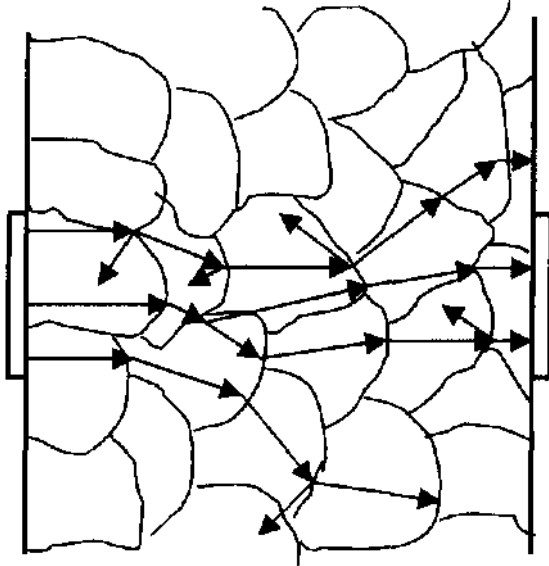


Рис. 3.19. Ход лучей в крупнозернистых материалах

При переходе луча из одного зерна в другое возникает отражение, преломление и трансформация волн (рис. 3.18). Коэффициент затухания α_p , вызванный рассеянием, зависит от соотношения между длиной волны λ и средним размером зерна D . Обычно выполняется условие $\lambda \ll D$. Рассеяние в этой области называется рэлеевским.

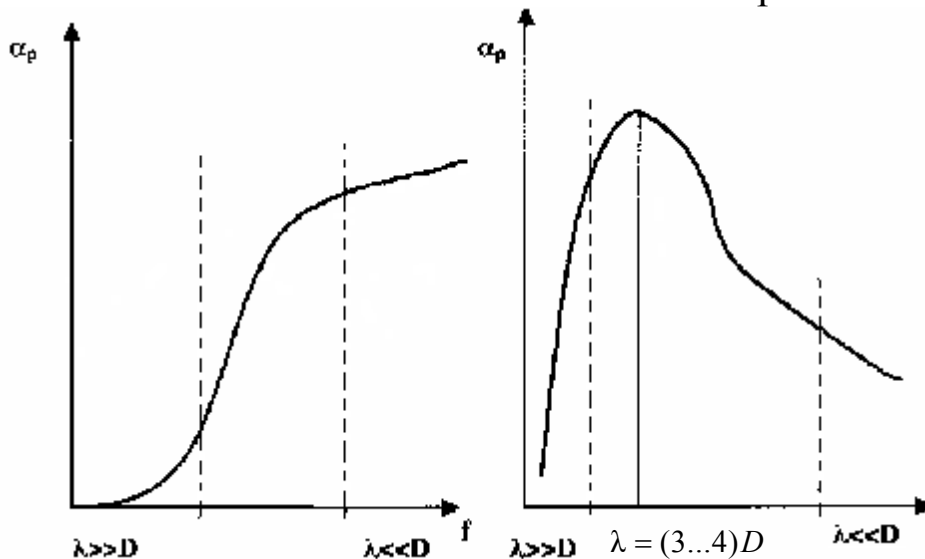


Рис. 3.20. Зависимость от среднего размера зерна

Зависимость коэффициента α_p от частоты f и от среднего размера зерна D показаны на рис. 3.20. В области рэлеевского рассеяния

$$\alpha_p \approx C_1 F_A D^3 f^4, \quad (3.23)$$

где C_1 -коэффициент, не зависящий от размера зерна и анизотропии; F_A — фактор анизотропии. В этой области рассеяние волны происходит на частицах, маленьких по сравнению с длиной волны.

При $\lambda \ll D$ затухание определяется выражением

$$\alpha_p \approx C_2 F_A / D, \quad (3.24)$$

где C_2 – коэффициент, не зависящий от размера зерна и от анизотропии. Особенно велико рассеяние при $\lambda \approx (3 \div 4)D$. На частотах, применяемых в ультразвуковой дефектоскопии, обычно $\lambda > 15D$ это область рэлеевского рассеяния, где влияние рассеяния возрастает с ростом частоты.

И поглощение и рассеяние приводят к уменьшению амплитуды УЗ сигналов. Кроме того, рассеяние создает многочисленные шумовые импульсы на экране дефектоскопа из-за отражений от зерен. Вид экрана с так называемыми структурными помехами показан на рис. 3.21.

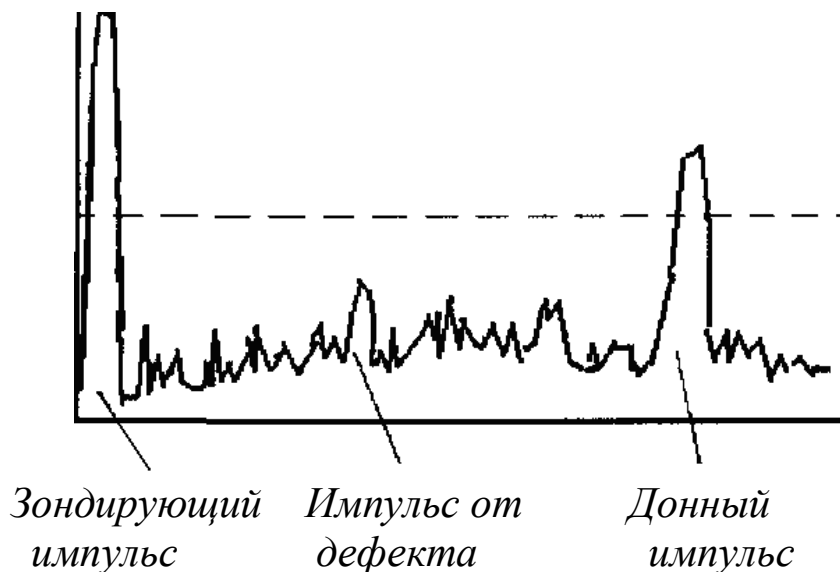


Рис. 3.21. Вид экрана дефектоскопа с шумами структурных помех

Сводная таблица, в которой приведены основные акустические свойства сред, приведена ниже.

Способы измерения скорости и коэффициента затухания

Измерение скорости и коэффициента затухания упругих волн состоит в измерении времени задержки и амплитуды импульсов, прошедших разное расстояние в объекте контроля. Методики обработки результатов измерения различны и зависят от того, какие волны используются, продольные или поперечные, и от типа волнового фронта. Для расчета коэффициента затухания следует выбирать формулу для ослабления волны с расстоянием из табл. 3.3 в соответствии с формой волнового фронта.

Таблица 3.4

Сводная таблица основных акустических свойств сред

Материал	Плотность, г/см ³	Скорости упругих волн, м/с		Характеристический импеданс, 10 ⁶ г/см ² с		Длина волны при f = 2,5 МГц, мм	
	ρ	c_l	c_t	Z_1	Z_2	прод.	попер.
Дюралюминий	2,7	6 260	3 100	1,69	0,84	2,5	1,24
Вода	1,0	1 490	-	0,15	-	0,6	-
Воздух	0,0 013	330	-	4-10-'	-	0,13	-
Масло	0,90	1 380	-	0,90	-	0,55	-
Медь	8,9	4 660	2 260	4,15	2,01	1,9	0,9
Оргстекло	1,18	2 670	1 121	0,32	0,13	1,1	0,45
Сталь углеродистая	7,8	5 900	3 260	4,6	2,54	2,4	1,3
Сталь коррозионно-стойкая	8,0	5 660	3 120	4,54	2,51	2,3	1,25

Рассмотрим сначала методику определения параметров плоских продольных волн. В этом случае используется прямой преобразователь, схема измерения и изображение которого на экране дефектоскопа показаны на рис. 3.22.

Между 1-м и 2-м эхо-импульсами волна прошла две толщины изделия. Разность времени $T_2 - T_1 = 2H/Ct$. Отсюда скорость продольных волн

$$C_l = \frac{2H}{T_2 - T_1} \cdot \quad (3.25)$$

Полученное значение скорости можно сравнить со справочными значениями из табл. 3.4.

Из табл. 3.3 выбираем формулу для ослабления амплитуды плоских волн. Амплитуда импульсов равна

$$A_2 = A_0 e^{-4H\alpha} \quad (\text{импульс прошел 4 толщины } H)$$

$$A_1 = A_0 e^{-2H\alpha} \quad (\text{импульс прошел 2 толщины } H)$$

Разделим A_2 на A_1 и прологарифмируем. Получаем

$$\alpha_1 = -\frac{1}{2H} \ln \frac{A_2}{A_1} \cdot \quad (3.26)$$

Здесь результат получается в Нп/см.

Для определения скорости и коэффициента затухания поперечных волн используют наклонный преобразователь. Можно в качестве отражателей использовать верхний и нижний двугранные углы пластины толщиной H .

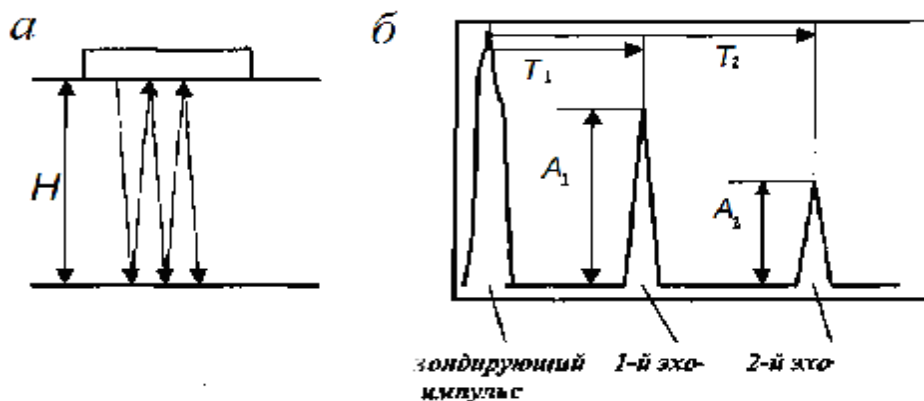


Рис.3.22. Схема измерения (а) и изображение прямого преобразователя на экране дефектоскопа (б) при измерении скорости продольных волн

Прямым лучом получают отраженный сигнал от нижнего угла и измеряют его амплитуду A_1 и время задержки T_1 . Волна в этом случае прошла по пластине расстояние $2H / \cos \alpha$, где α – угол ввода наклонного преобразователя. Амплитуда A_2 и время задержки T_2 получают однажды отраженным лучом от верхнего угла. В данном случае волна про-

шла расстояние $4H/\cos\alpha$. Для скорости поперечных волн получаем следующую формулу

$$C_t = \frac{2H}{\cos\alpha(T_2 - T_1)} \quad (3.27)$$

Для нахождения коэффициента затухания выберем из табл. 3.3 соответствующую формулу, например, для амплитуды сферической волны: $A_2 = \frac{A_0 \cos\alpha}{4H} e^{-\frac{4H}{\cos\alpha}\alpha_t}$; $A_1 = \frac{A_0 \cos\alpha}{2H} e^{-\frac{2H}{\cos\alpha}\alpha_t}$.

Если A_2 разделить на A_1 и прологарифмировать равенство, то получим формулу для коэффициента затухания α_e

$$\alpha_t = -\frac{\cos\alpha}{2H} \ln 2 \frac{A_2}{A_1} \quad (3.28)$$

При измерении скорости и коэффициента затухания поперечных волн рекомендуется использовать преобразователь с углом ввода 45–50°.

3.1.9. Отражение и прохождение волн на границах сред

Если упругая волна падает на границу раздела двух сред, то может происходить несколько явлений: отражение, преломление и трансформация волн.

Отражением называется изменение направления распространения волны на границе раздела, при котором волна не переходит в другую среду. *Преломлением* называется изменение направления и (или) скорости волны на границе раздела, при котором волна переходит в другую среду. *Трансформацией* называют преобразование волны или ее поляризации, происходящее на границе раздела двух сред. Например: падающая объемная волна может преобразоваться в поверхностную волну Рэлея (преобразование типа волны) либо продольная волна может преобразоваться в поперечную (преобразование поляризации).

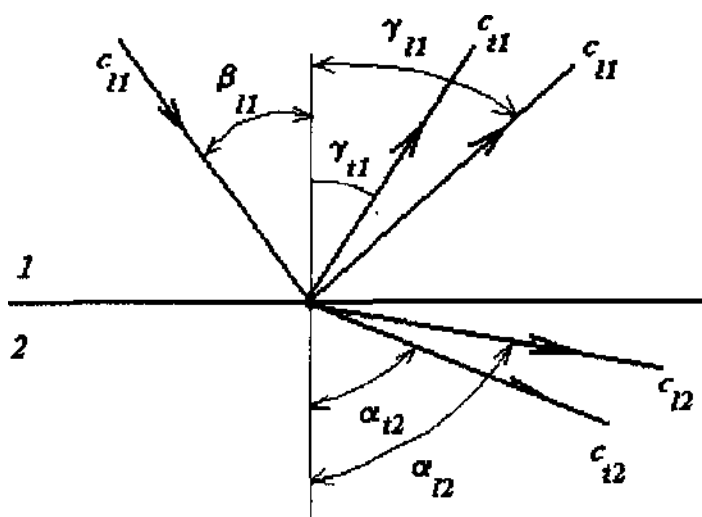


Рис. 3.23. Волны на границе раздела двух твердых сред

Сначала рассмотрим падение плоской объемной волны на плоскую гладкую границу двух сред (см. рис. 3.23). Пусть, для определенности, падающая из среды 1 волна имеет продольную поляризацию. В общем случае от границы раздела отражается две волны – продольная и поперечная, преломляется и проходит в среду 2 тоже две волны – продольная и поперечная. Введем *углы падения* β , *отражения* γ и *преломления* α . Каждый из этих углов измеряется между направлением распространения соответствующей волны и перпендикуляром, восстановленным в точке падения. Так, угол падения на рис. 3.23 – это β_{1l} , углы отражения γ_{1l} γ_{t1} , и углы преломления α_{l2} и α_{t2} .

Первый индекс означает тип или поляризацию волны, второй – номер среды. Скорости, с которыми распространяются волны, указаны на рис. 3.22 у падающего, отраженных и преломленных лучей. Задача, которую нам предстоит решить, заключается в следующем. Допустим, нам известны угол падения β_{1l} ; и амплитуда A_{1l} падающей волны. Требуется определить углы, под которыми распространяются отраженные и преломленные волны и их амплитуды.

Для падающей, отраженных и преломленных волн отношение синуса угла (между направлением распространения и нормалью к поверхности раздела) к скорости волны есть величина постоянная. Это закон отражения и преломления, или закон Снеллиуса. Его математическое выражение записывается так

$$\frac{\sin \beta_{1l}}{C_{1l}} = \frac{\sin \gamma_{1l}}{C_{1l}} = \frac{\sin \gamma_{t1}}{C_{t1}} = \frac{\sin \alpha_{l2}}{C_{l2}} = \frac{\sin \alpha_{t2}}{C_{t2}}. \quad (3.29)$$

Поскольку скорости продольных падающей и отраженной волн в первой среде равны, то из (3.29) равны и углы падения и отражения

$\beta_{\parallel} = \gamma_{\parallel}$. Отношение скоростей преломленной $c_{\text{пр}}$ и падающей $c_{\text{пад}}$ волн - это коэффициент преломления n

$$n = c_{\text{пр}} / c_{\text{пад}}. \quad (3.30)$$

Чем больше скорость прошедшей (преломленной) волны, тем больше угол преломления. Поэтому преломленная продольная волна отклонена от нормали больше, чем поперечная. Для того, каким образом реализуется явление преломления, очень важно соотношение между скоростями волн в первой и второй средах.

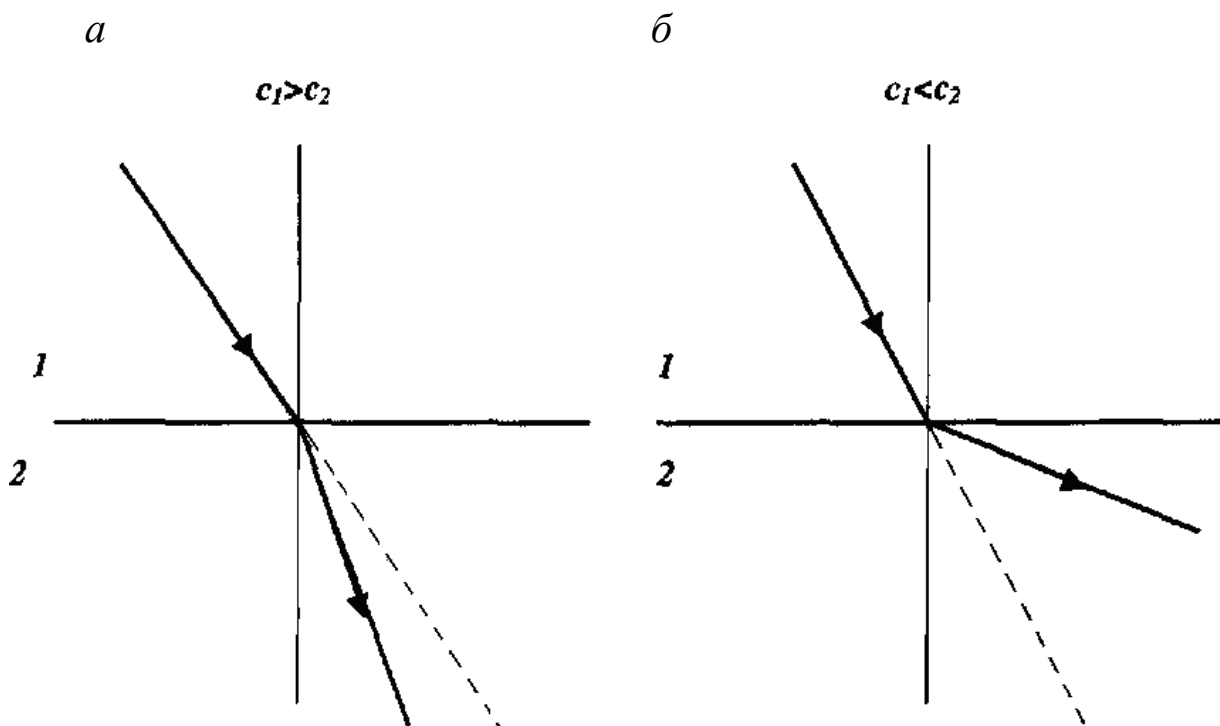


Рис. 3.24. Ход лучей при падении в случае $c_1 > c_2$ (а) и $c_1 < c_2$ (б)

Выберем для рассмотрения какую-либо одну из преломленных волн. Возможно три случая: $c_{\text{пр}} > c_{\text{пад}}$, $c_{\text{пр}} < c_{\text{пад}}$ и $c_{\text{пр}} = c_{\text{пад}}$. В последнем случае преломления луча на границе раздела не происходит. Первый и второй случаи иллюстрирует рис. 3.24. Пунктирной линией на рисунке показано мысленное продолжение падающего луча во вторую среду. Случай (а) соответствует падению волны из среды с большей скоростью в среду с меньшей скоростью (например, из стали в оргстекло). Луч преломленной волны всегда находится между пунктирной линией и нормалью к границе раздела. При увеличении угла паде-

ния β от нуля до 90° преломленная волна существует всегда. Иное положение в случае (б), когда волна падает из среды с меньшей скоростью в среду с большей (например, из оргстекла в сталь). В этом случае угол преломления α больше угла падения β . При увеличении β обязательно настанет момент, когда преломленная волна пойдет параллельно поверхности. Говорят, что в таком случае волна падает под критическим углом. В УЗ контроле вводятся три критических угла. Рассмотрим их более подробно.

Угол падения, при котором преломленная продольная волна выходит на поверхность раздела – сред, называется *первым критическим углом* β_1 . Преломленная волна при этом превращается в головную. При значениях угла падения, превышающих β_1 , во второй среде продольная волна отсутствует.

Угол падения, при котором преломленная поперечная волна выходит на поверхность раздела сред, называется *вторым критическим углом* β_2 . Преломленная поперечная волна при этом превращается в поверхностную волну Рэлея. При значениях угла падения, превышающих β_2 , объемные однородные волны во второй среде отсутствуют.

Значения критических углов можно найти из формулы (3.29) учитывая, что волна падает под критическим углом β_1 или β_2 . В первом случае $\alpha_{i2} = 90^\circ$ и $\sin \alpha_{i2} = 1$, во втором – $\alpha_{i2} = 90^\circ$ и $\sin \alpha_{i2} = l$. Отсюда

$$\beta_1 = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{l2}}, \quad \beta_2 = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{t2}}. \quad (3.31)$$

Значения критических углов для границы *оргстекло–сталь* таковы: $\beta_1 = 27,5^\circ$, $\beta_2 = 56...57^\circ$.

На рис 3.25 показано схематично, какие волны возникают во второй среде при падении продольной волны при $c_{np} > c_{nad}$. Случай нормального падения $\beta_{i1} = 0$ показан на рис. 3.25, а. В этом случае видимого преломления лучей нет; падающая, отраженная и преломленная волны направлены по нормали к поверхности раздела. Трансформации волн тоже нет. При значении угла падения, меньшем первого критического, во второй среде есть две преломленные волны, продольная и поперечная (см. рис. 3.25, б). Случай падения под первым критическим углом показан на рис. 3.25, в. Вместо вышедшей на поверхность продольной преломленной волны образуется головная. Если $\beta_1 < \beta < \beta_2$ то во второй среде есть только поперечная волна (рис. 3.25, г). Наконец,

при $\beta > \beta_2$ (см. рис. 3.25, д) объемных волн во второй среде нет, а вдоль границы раздела бежит поверхностная волна.

Пусть теперь на границу раздела падает *поперечная* волна. Рассмотрим случай, когда твердое тело (первая среда) граничит с вакуумом (или воздухом).

Будем считать, что преломленных волн во второй среде нет (рис. 3.26). При наклонном падении отражаются две волны: поперечная и трансформированная продольная. Закон Снеллиуса запишется так

$$\frac{\sin \gamma_{l1}}{C_{l1}} = \frac{\sin \gamma_{t1}}{C_{t1}} = \frac{\sin \beta_{t1}}{C_{t1}} . \quad (3.32)$$

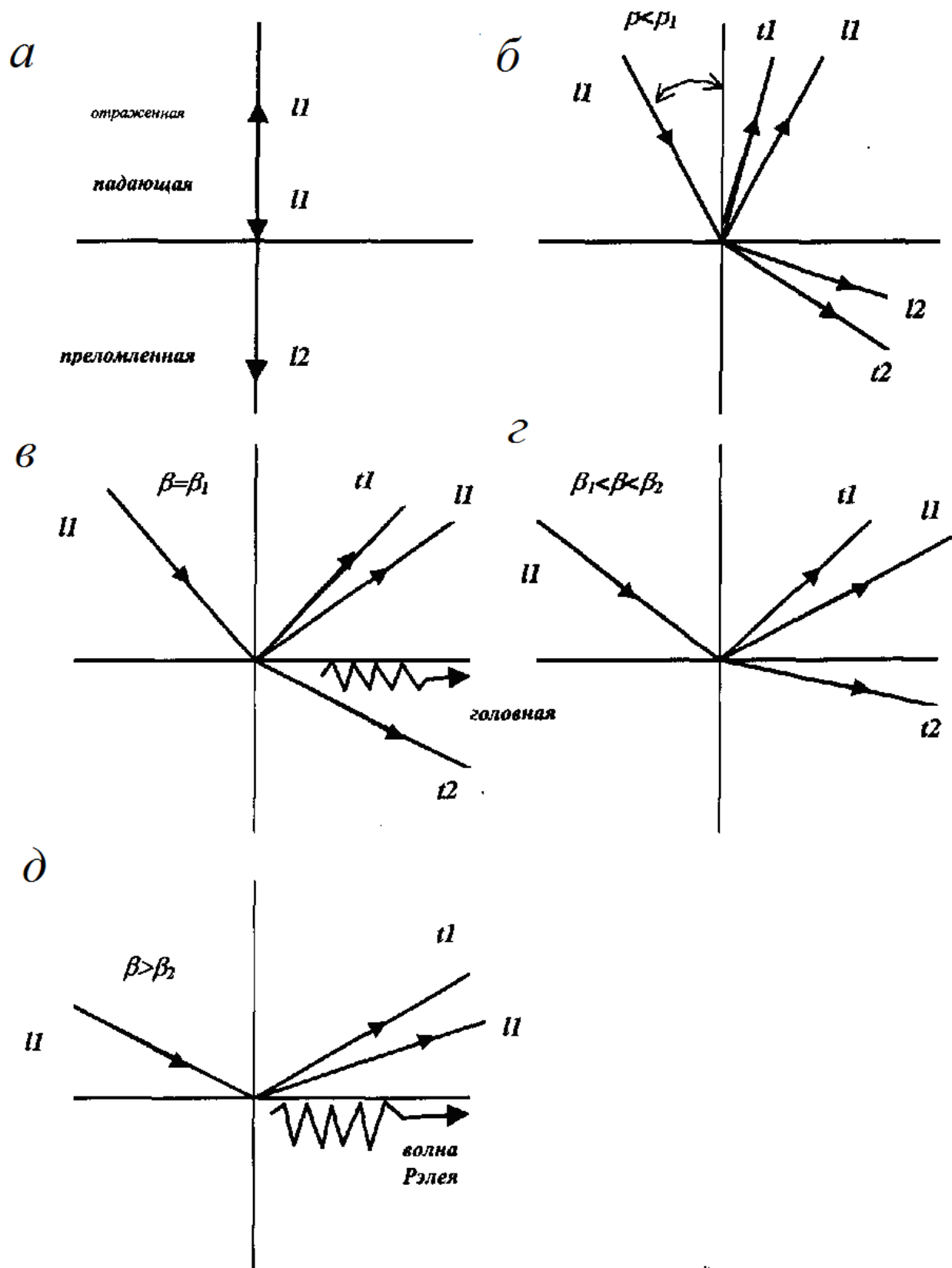


Рис. 3.25. Отражение, преломление и трансформация волн при разных углах падения

Углы падения и отражения для поперечных волн равны, $\beta_{II} = \gamma_{II}$. Угол отражения продольной волны γ_{II} больше угла отражения поперечной γ_{II} , поскольку $c_{II} > c_{II}$.

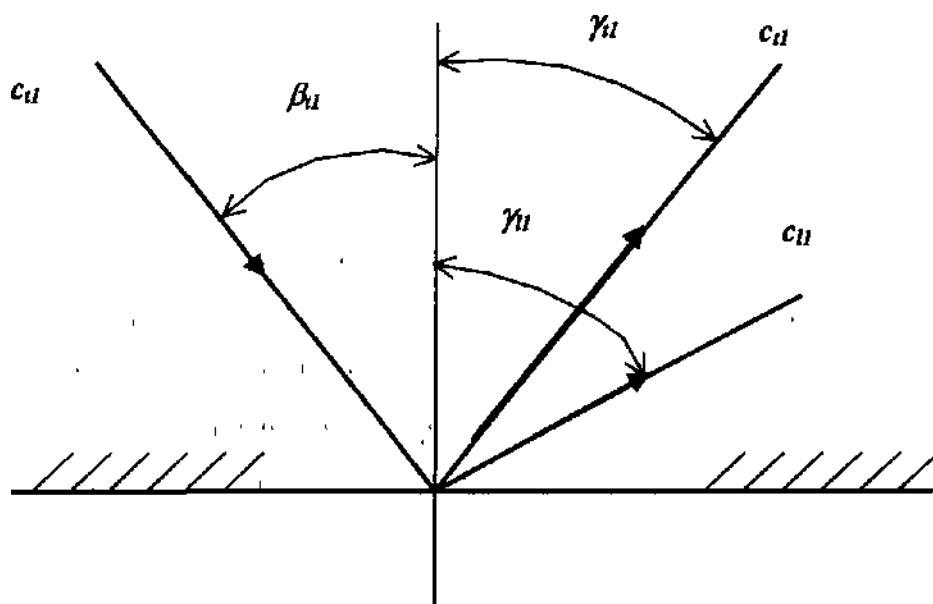


Рис. 3.26. Падение поперечной волны на границу твердое тело–вакуум.

В результате увеличения угла падения угол отражения продольной волны увеличивается вплоть до того, что отраженная волна скользит вдоль поверхности. Угол падения поперечной волны, при котором отраженная продольная волна выходит на поверхность, называется *третьим критическим углом* β_3 . Для стали такой угол равен 33°

$$\beta_3 = \arcsin \frac{c_{II}}{c_{II}}. \quad (3.33)$$

Расчет коэффициентов и прозрачности при нормальном падении

Падение волны на границу раздела называется *нормальным*, если угол падения β равен нулю. В этом случае не происходит видимого преломления луча. *Все три волны: падающая, отраженная и преломленная – направлены вдоль прямой, перпендикулярной поверхности.* Углы преломления α и отражения γ равны нулю. *Трансформации волн при нормальном падении не происходит.*

Для количественной характеристики амплитуд и интенсивностей отраженных и преломленных волн вводят коэффициенты отражения и прохождения. *Коэффициентом отражения R* называют отношение амплитуды отраженной волны $A_{отр}$ к амплитуде падающей $A_{пад}$

$$R = \frac{A_{\text{отр}}}{A_{\text{пад}}} . \quad (3.34)$$

Коэффициентом прохождения (или прозрачности) D называют отношение амплитуды прошедшей волны $A_{\text{пр}}$ к амплитуде падающей

$$D = \frac{A_{\text{пр}}}{A_{\text{пад}}} . \quad (3.35)$$

Коэффициенты R и D – это амплитудные коэффициенты отражения и прозрачности. Их можно определить, зная характеристические импедансы Z сред 1 (из которой падает волна) и 2 (куда проходит волна). В случае нормального падения

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad D_1 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad D_2 = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.36)$$

где $Z_2 = \rho_2 c_2, Z_1 = \rho_1 c_1$. Например, при падении продольной волны на границу сталь–вода коэффициент отражения $R = -0,94$. Знак "-" указывает на смену фазы отраженной волны на противоположную к падающей. Коэффициент прозрачности $D = 0,34$.

Коэффициентом отражения по интенсивности называют отношение интенсивностей отраженной и падающей волн

$$\tilde{R} = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} . \quad (3.37)$$

Коэффициент прохождения (прозрачности) по интенсивности D – это отношение интенсивностей прошедшей и падающей волн

$$\tilde{D} = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}} . \quad (3.38)$$

При нормальном падении коэффициенты $\tilde{R}$ и $\tilde{D}$ выражаются через импедансы сред Z_1 и Z_2 следующим образом

$$\tilde{R} = R^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad \tilde{D} = D_1 D_2 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} . \quad (3.39)$$

Коэффициенты R и D , $\tilde{R}$ и $\tilde{D}$ связаны соотношениями, вытекающими из закона сохранения энергии

$$R^2 + D^2 = 1 \text{ и } \tilde{R} + \tilde{D} = 1 . \quad (3.40)$$

Чем больше отличаются характеристические импедансы сред, тем большая часть энергии отражается и меньшая проходит во вторую среду.

Зависимость коэффициентов отражения и прохождения от угла падения

Эту зависимость рассмотрим на примере границы *оргстекло–сталь*. Коэффициенты прохождения продольных D_l и поперечных D_t волн зависят от угла падения β продольной волны (рис. 3.27). При нормальном падении и при малых $\beta < 10^\circ$ коэффициент прохождения поперечных волн равен или близок к нулю. Поэтому преобразователи упругих волн, работающие при нулевых (прямых) и малых (раздельно-совмещенных) преобразователях используют продольные волны. При значении угла падения, равном первому критическому углу β_1 , коэффициенты D_l и D_t близки к нулю. Значительная часть энергии излучения переносится головной волной. Падение волны под первым критическим углом используют для возбуждения головных волн. При углах падения, больших первого критического, продольной преломленной волны нет. В интервале углов $\beta_1 < \beta < \beta_2$ во второй среде (стали) распространяется только поперечная волна. Этот интервал углов падения, приблизительно от $30\text{--}55^\circ$, используется в преобразователях, поперечных волн. Пластина преобразователя возбуждает в призме наклонного преобразователя продольную волну. После преломления и трансформации в объекте контроля распространяется поперечная волна.

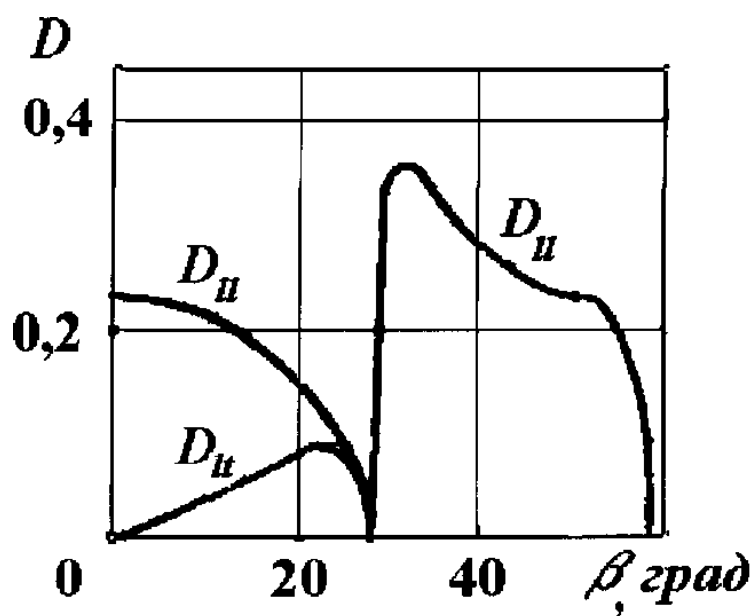


Рис. 3.27. Зависимость коэффициента прозрачности от угла падения продольной волны на границу оргстекло–сталь

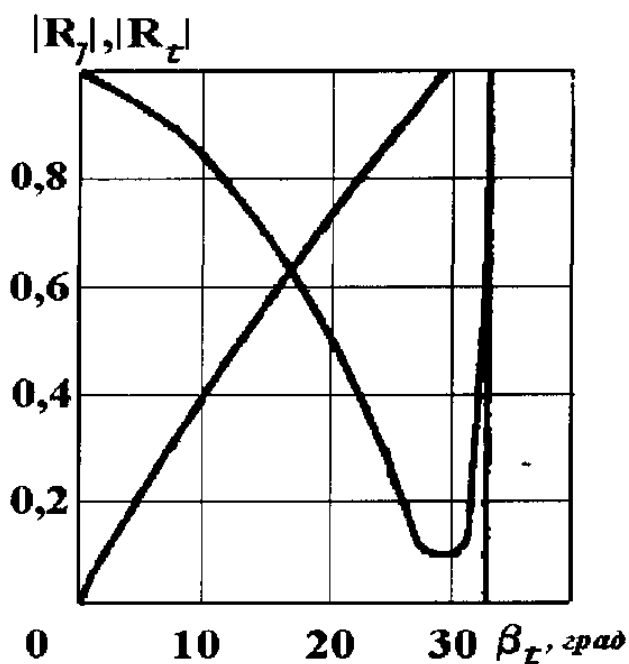


Рис. 3.28. Зависимость модуля коэффициента отражения от угла падения на границе сталь–воздух

Поперечная волна исчезает при величине угла падения $\beta \geq \beta_2$. Если угол падения равен или немного превышает второй критический, то возбуждается и распространяется вдоль поверхности поверхностная волна. Угол падения $\beta = 65^\circ$ используют для возбуждения поверхностной волны Рэлея.

Рассмотрим теперь падение поперечной волны на границу *сталь–воздух*. Прошедшими волнами будем пренебрегать ввиду их малой амплитуды из-за сильного различия импедансов стали и воздуха. На рис. 3.28 изображена зависимость модулей коэффициентов отражения продольных $|R_l|$ и поперечных $|R_t|$ волн от угла падения β_t поперечной волны. При значениях угла от 25° коэффициент отражения продольной волны значительно превосходит коэффициент отражения поперечной. Основная часть энергии поперечных волн в этих условиях трансформируется в продольную. Третий критический угол для стали – это $\beta_3 = 33^\circ$. При углах падения $\beta > \beta_3$ отраженная продольная волна пропадает.

Если угол падения поперечной волны β превышает третий критический, то наблюдается явление *незеркального отражения* (см. рис. 3.29). Энергия волны переносится на некоторое расстояние Δs головной волной. Смещение Δs зависит от угла падения β . Это явление выражено тем сильнее, чем ниже частота волны и чем ближе угол паде-

ния к третьему критическому. Явление незеркального отражения возникает из-за отклонения свойств упругих волн от законов геометрического отражения.

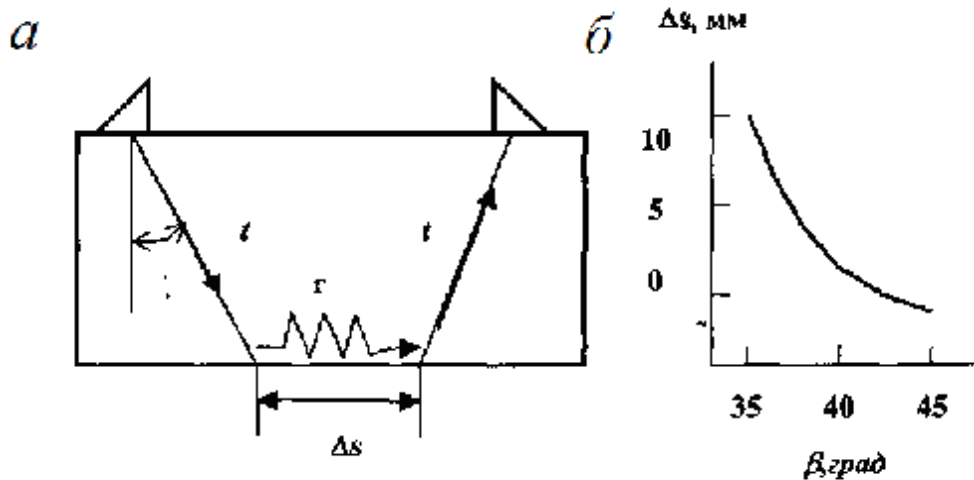


Рис. 3.29. Явление незеркального отражения: *а* – ход лучей; *б* – зависимость смещения Δs от угла падения

Влияние тонкого слоя на прохождение волн

Очень тонкий промежуточный слой слабо влияет на коэффициенты отражения и прозрачности, если его толщина h много меньше четверти длины волны – $\lambda_{\text{сл}}$ в слое. При нормальном падении коэффициент отражения $\tilde{R}$ от слоя, помещенного в среду I , выражается формулой

$$\tilde{R} = \frac{(Z_1^2 - Z_{\text{сл}}^2)^2}{4Z_1^2 Z_{\text{сл}}^2 \operatorname{ctg} \frac{2\pi h}{\lambda_{\text{сл}}} + (Z_1^2 + Z_{\text{сл}}^2)^2}, \quad (3.41)$$

где Z_I , $Z_{\text{сл}}$ упругие импедансы среды I и слоя, $Z_I > Z_{\text{сл}}$. Если при увеличении толщины слоя достигается условие $h = \lambda_{\text{сл}}/4$, то $\left| \operatorname{ctg} \frac{2\pi h}{\lambda_{\text{сл}}} \right| \rightarrow 0$, коэффициент отражения $\tilde{R}$ принимает максимальное значение, а коэффициент прохождения $\tilde{D}$ – минимальное. При дальнейшем увеличении h достигается условие $h = \lambda_{\text{сл}}/2$. Тогда $\left| \operatorname{ctg} \frac{2\pi h}{\lambda_{\text{сл}}} \right| \rightarrow \infty$ и коэффициент отражения $\tilde{R}$ стремится к нулю.

Пусть теперь слой толщиной h с импедансом $Z_{\text{сл}}$ находится между средами 1 и 2, причем $Z_1 < Z_{\text{сл}} < Z_2$. Тогда максимально возможное прохождение $\tilde{D} = 1$ достигается при выполнении условий

$$h = \lambda_{\text{сл}} / 4; \quad Z_{\text{сл}} = \sqrt{Z_1 Z_2}. \quad (3.42)$$

Это так называемое *просветление* при прохождении волны через *четвертьволновую пластину*.

Наличие контактного слоя жидкости между призмой преобразователя и изделием приводит к уменьшению коэффициентов прозрачности D_t , D_r . Влияние промежуточного слоя показано на рис. 3.30. Влияние контактного слоя возрастает с увеличением его толщины.

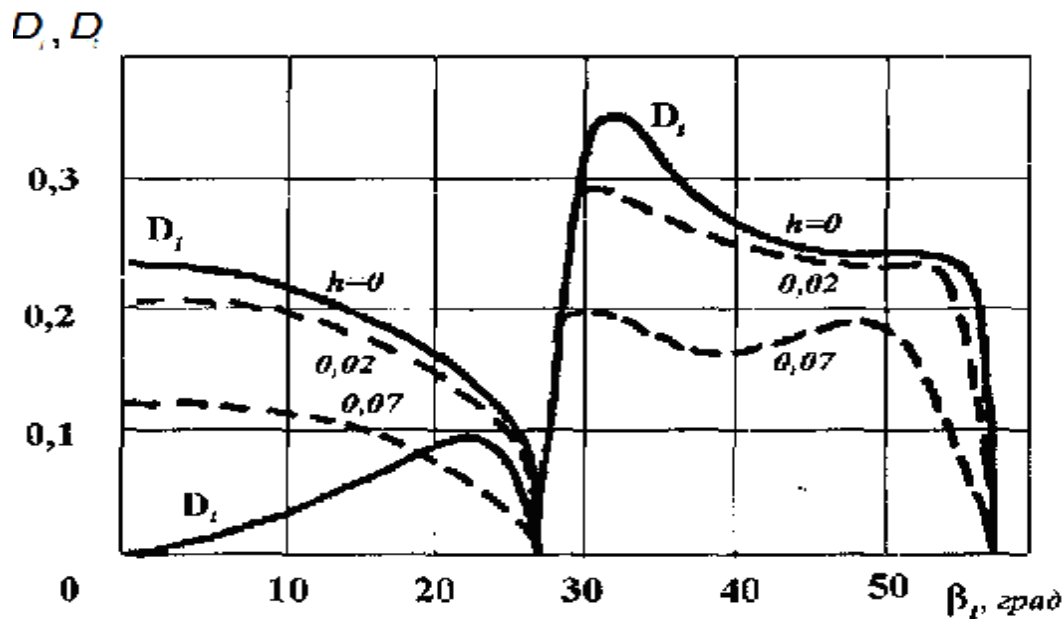


Рис. 3.30. Влияние тонкого слоя на коэффициент прозрачности при падении продольной волны на границу оргстекло–сталь

Отражение от двугранного угла

Ход лучей при отражении от двугранного угла показан на рис. 3.31. Если рассматривается отраженная волна той же поляризации, то ее луч смещен на некоторое расстояние. Если на двугранный угол падает сферическая волна от источника в точке O , то можно представить, что отраженные лучи излучаются мнимым источником, расположенным в точке O_1 . При этом нижние лучи становятся верхними и наоборот.

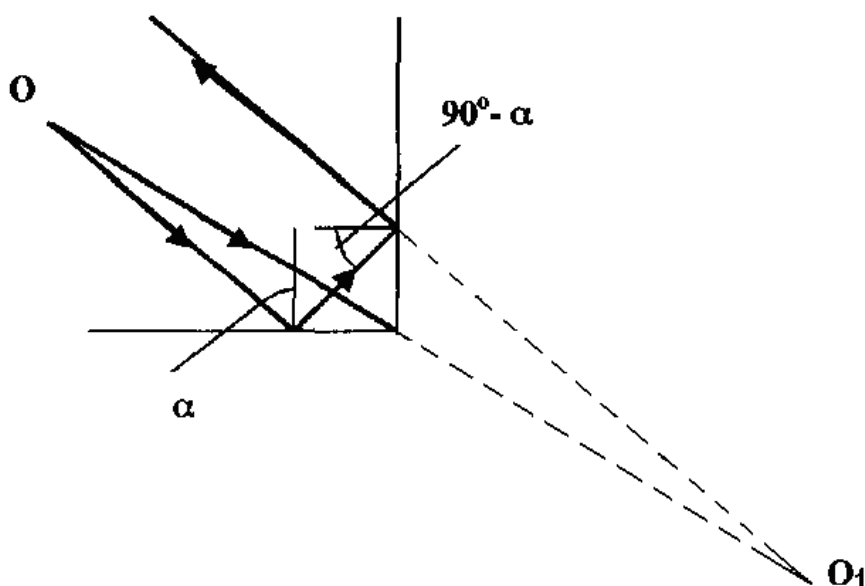


Рис. 3.31. Ход лучей при отражении от двугранного угла

Из-за трансформации волн амплитуда отраженной волны зависит от угла падения, т. к. энергия падающей волны частично превращается в энергию волны с другой поляризацией. Для поперечной волны коэффициент отражения будет равен единице, если углы падения на обе грани (это углы α и $90^\circ - \alpha$) больше третьего критического. Данный интервал углов равен $33,5-56,5^\circ$.

Зависимость коэффициента отражения от угла падения волны на двугранный угол используется для настройки чувствительности дефектоскопа при контроле наклонным преобразователем. В ГОСТ 14782-86 “Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые” (см. прил. 5) приводится зависимость коэффициента N от угла $\varepsilon = 90^\circ - \alpha$ (см. рис. 3.32). Коэффициент, вводится для изделий из стали, алюминия и его сплавов, титана и его сплавов с целью определить предельную чувствительность S_{Π} . Предельная чувствительность (мм^2), измеренная по стандартному образцу с угловыми отражателями площадью $S_l = hb$ (h – высота отражателя; b – ширина отражателя), вычисляется по формуле

$$S_{\Pi} = NS_l . \quad (3.43)$$

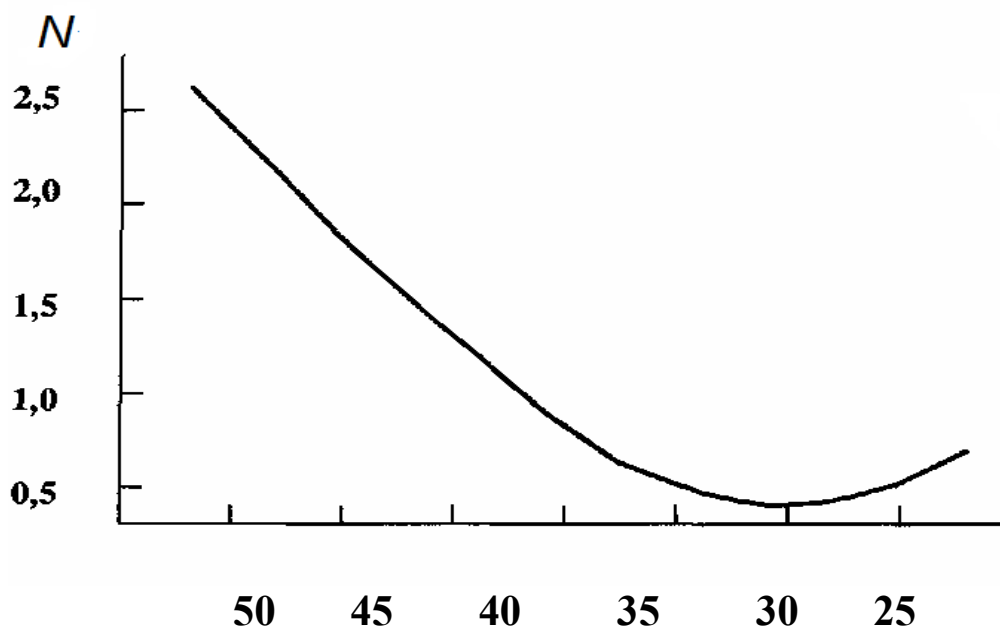


Рис. 3.32. Зависимость коэффициента N от угла $\varepsilon = 90^\circ - \alpha$ для стали, алюминия, титана

Зеркальное и диффузное отражение. Индикатриса рассеяния

Отражение упругих волн следует закону Снеллиуса при условии, что на границу раздела падает плоская волна и шероховатость на границе отсутствует. В таком случае наблюдается *зеркальное* отражение: параллельный пучок лучей после отражения остается параллельным и угол падения равен углу отражения, если не происходит трансформации волн. Если шероховатость поверхности велика и высота неровностей Δh больше длины волны λ , то волна отражается *диффузно*.

3.2. Методы акустического контроля

3.2.1. Классификация методов

Акустические методы разделяют на две большие группы. Одна из них использует излучение и прием акустических колебаний и волн (*активные методы*). Вторая группа (*пассивные методы*) использует только прием колебаний или волн. Классификационная схема акустических методов по ГОСТ 18353-79 приведена на рис. 3.33. В каждой из групп различают методы, основанные на распространении в объекте контроля бегущих волн и колебаний.

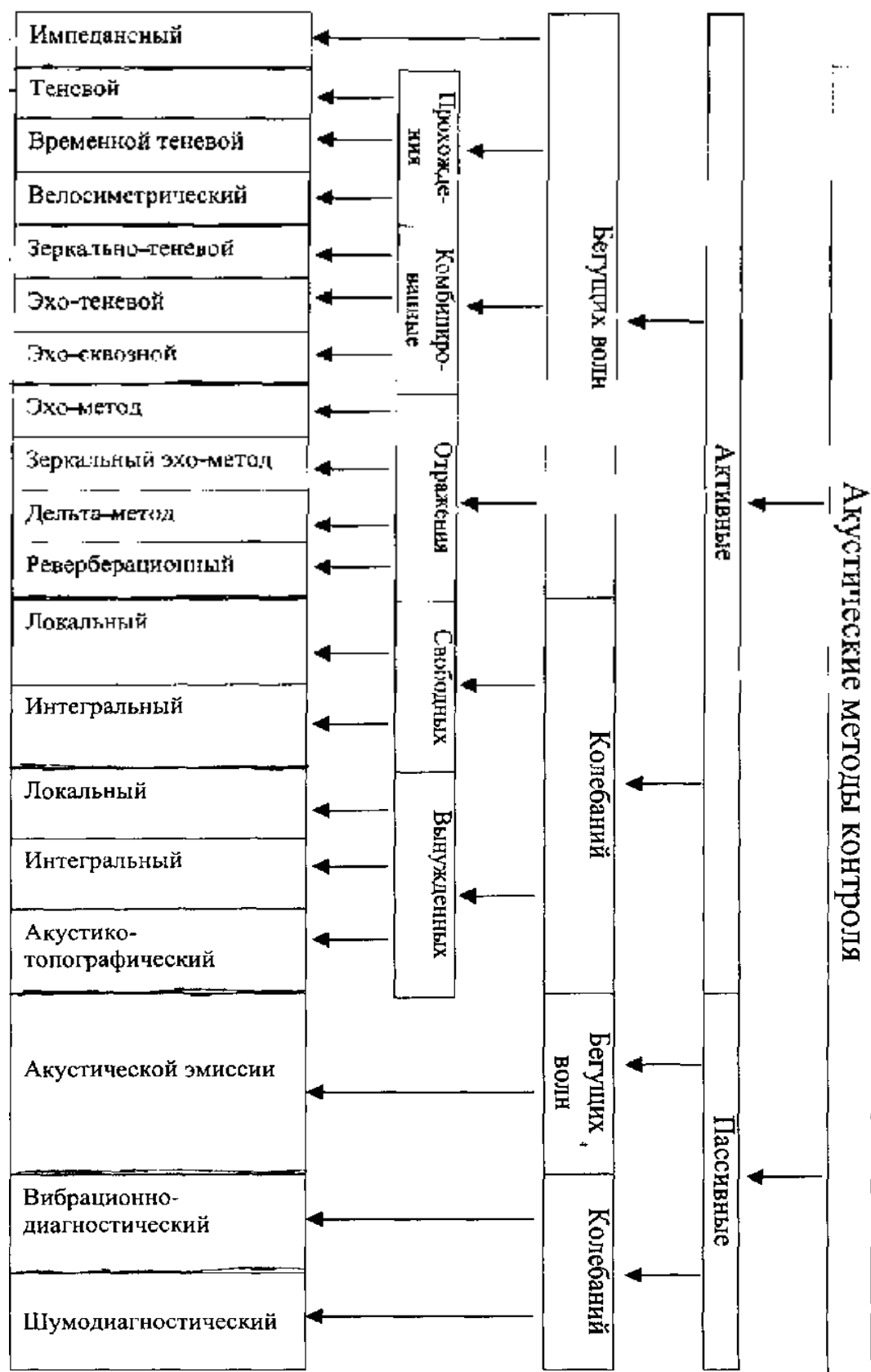


Рис. 3.33. Классификационная схема акустических методов по ГОСТ 18353-79

Активные методы подразделяют на следующие основные группы методов:

- методы отражения, регистрирующие сигналы, отраженные от дефектов;
- методы прохождения, в которых регистрируют изменения параметров волн, прошедших объект контроля;
- комбинированные методы, использующие совместно элементы методов отражения и прохождения;
- импедансный метод;
- методы свободных колебаний;
- резонансные методы.

Последние две группы используют акустические колебания. В них длина волны сравнима с размерами объекта контроля. Остальные методы применяют волны. Каждый из методов акустического контроля имеет свои информативные параметры—параметры волны, свидетельствующие о существовании, размерах, местонахождении или других характеристиках дефектов.

Типичный пример методов отражения – это эхо–метод. Он использует волны, отраженные от дефектов. Информативные параметры метода следующие: амплитуды отраженных волн (параметр свидетельствует об эквивалентной площади дефектов) и время задержки отраженных волн (свидетельствует о координатах или глубине залегания дефектов).

Среди пассивных методов различают акустико-эмиссионный, который использует упругие волны, возникающие при появлении и росте трещины, и два метода, использующие вибрации и колебания: вибрационно-диагностический и шумодиагностический методы. Первый метод использует параметры вибрации объекта (подшипника, ротора). Второй анализирует спектр шумов работающего агрегата.

3.2.2. Методы отражения

Методы отражения используют сигналы, отраженные от дефектов-несплошностей. Информативными параметрами может быть амплитуда волны, время прихода импульса, фаза колебаний. Методы отражения включают в себя следующие: эхо–метод, зеркальный эхо-метод, дельта-метод, реверберационный метод. В методах отражения применяют, как правило, импульсное излучение.

Эхо-метод

Эхо-метод основан на регистрации эхосигналов от дефектов. Дефектоскоп работает в импульсном режиме. Схема эхо-метода приведена на рис. 3.34.

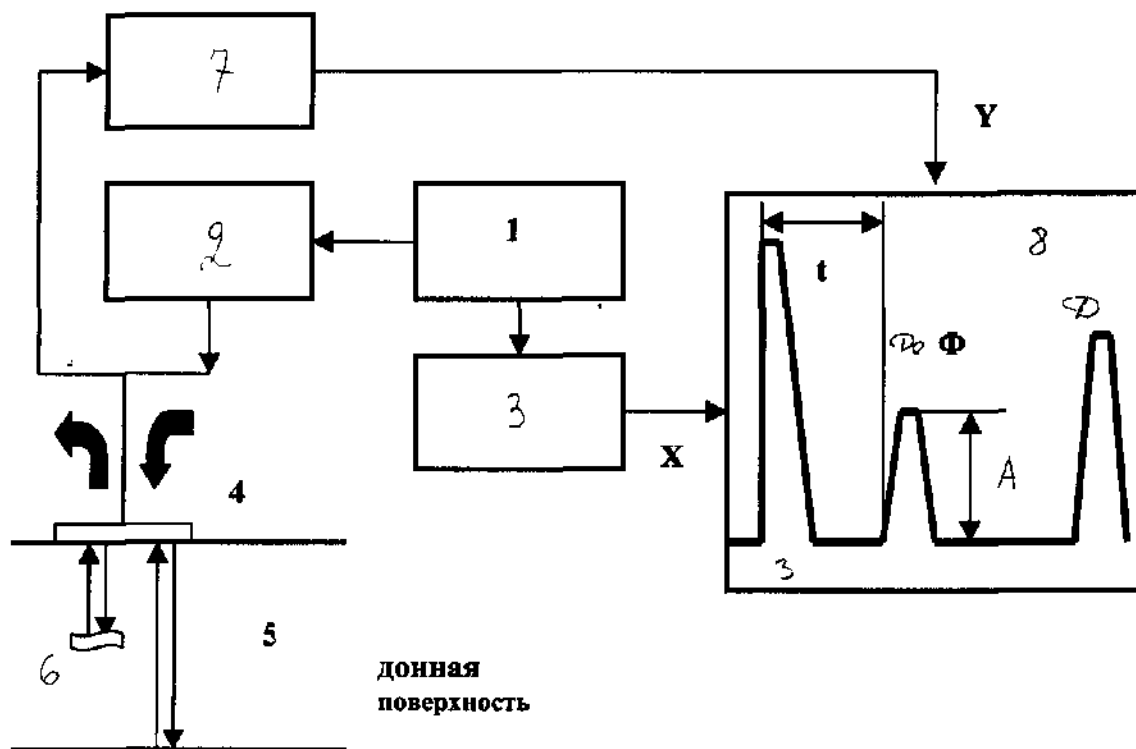


Рис. 3.34. Схема эхо-импульсного метода

Синхронизатор 1 вырабатывает короткие электрические импульсы через определенные промежутки времени. Эти импульсы запускают генератор зондирующих импульсов 2 и генератор развертки 3. Генератор зондирующих импульсов вырабатывает либо радио-, либо видео-импульсы, которые поступают на преобразователь 4 и превращаются в нем в упругие колебания. Такие колебания, распространяясь в объекте контроля 5, образуют волны. Волны отражаются от препятствий на своем пути, таких как дефекты 6 и донная поверхность объекта контроля. Отраженные импульсы возвращаются на преобразователь и превращаются в электрические сигналы. Принятые сигналы после усиления и детектирования в приемно-усилительном блоке 7 подаются на Y-отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки 8 или другого индикатора. Генератор развертки 3 вырабатывает напряжение, зависящее от времени по пилообразному закону. Это напряжение поступает на X-отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. На экране

УЗ эходефектоскопа видна линия развертки (горизонтальная линия в нижней части экрана) и один или несколько пиков. Высокий пик в левой начальной части экрана (3) соответствует зондирующему импульсу. Пик "Д" соответствует донному сигналу, отраженному от дна объекта контроля. Пик "ДЕФ" соответствует эхосигналу от дефекта.

Эхо-метод использует два *информативных* параметра : 1) *амплитуда* эхосигнала A характеризует отражательную способность дефекта, она пропорциональна его эквивалентной площади; 2) *время прихода* эхосигнала t позволяет рассчитать глубину залегания или координаты дефекта. Варианты применения преобразователей различных типов в эхо-методе иллюстрирует рис. 3.35.

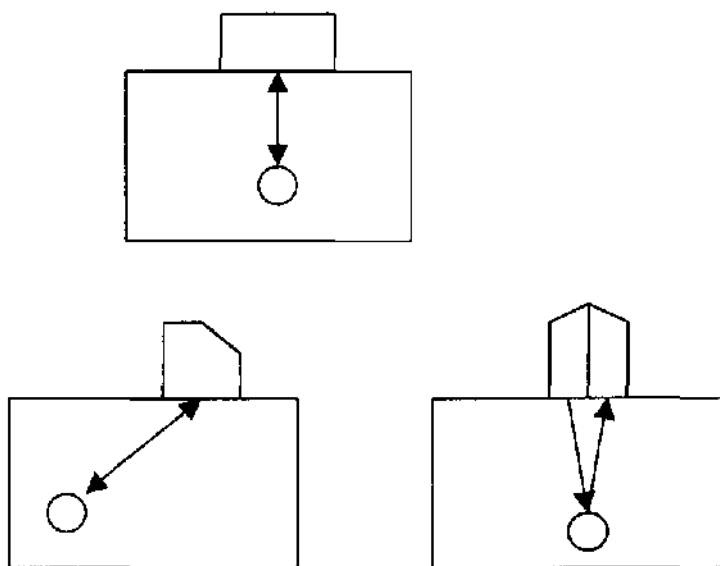


Рис. 3.35. Применение преобразователей различных типов в эхо-импульсном методе

Благодаря универсальности, надежности, высокой чувствительности к выявлению дефектов, возможности применения к различным материалам эхо-метод получил наибольшее распространение среди акустических методов контроля. Он применяется в разных отраслях промышленности на самых разных этапах технологического процесса.

Э х о – з е р к а л ь н ы й м е т о д

В эхо-зеркальном методе анализируют сигналы, отраженные от дефекта и донной поверхности изделия. Существует несколько вариантов этого метода. Вариант, называемый "тандем", предназначен для выявления вертикально ориентированных дефектов (рис. 3.36). Для реализации метода используют два преобразователя, расположенные

один за другим, или наклонный раздельно-совмещенный преобразователь. Сумма $l_1 + l_2 = 2Htg\alpha$ поддерживается постоянной (H – толщина изделия; α – угол ввода). Для оптимального выявления неперпендикулярных дефектов значение $l_1 + l_2$ варьируют. Совместно с эхо-методом тандем применяют для того, чтобы различать округлые и плоскостные дефекты.

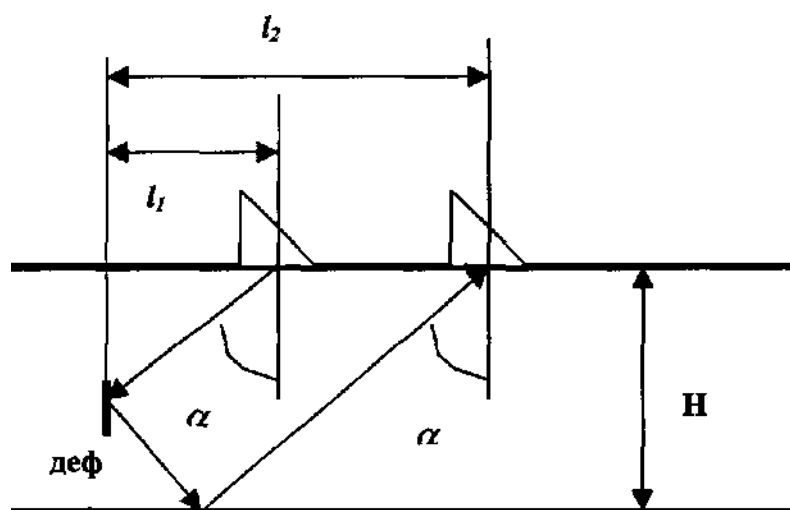


Рис. 3.36. Схема контроля по способу тандем

Вторая разновидность эхо-зеркального метода – дуэт ("стредл" в иностранной литературе). Схема данного метода показана на рис. 3.37. Излучатель и приемник располагают по разные стороны от сварного шва и в разных плоскостях, но так, чтобы принимать зеркально отраженное отражение от дефекта и донной поверхности.

Признаком наличия дефекта в эхо-зеркальном методе является появление импульса на заданном участке развертки. *Информативный параметр* — амплитуда этого импульса. Эхо-зеркальный метод используют для выявления вертикально ориентированных дефектов, когда он имеет более высокую чувствительность, по сравнению с эхо-методом.

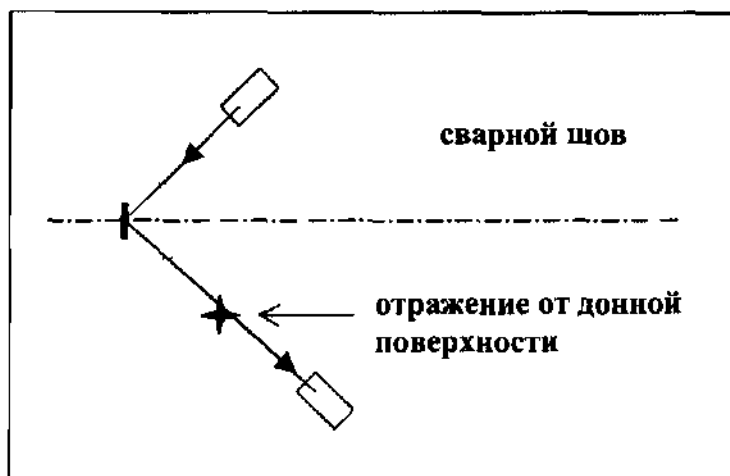


Рис. 3.37. Схема контроля по способу дуэт

Д е л ь т а – м е т о д

Дельта-метод основан на дифракции волн на дефекте (см. рис. 1.6). Излучатель возбуждает падающую на дефект поперечную волну. Часть ее энергии дифрагирует и излучается во все стороны на краях дефекта, частично трансформируется в энергию продольной волны. Приемник продольных волн, расположенный над дефектом, воспринимает два сигнала: один от верхнего края дефекта, а второй, пришедший позже, излучается нижним краем, отражается донной поверхностью и попадает на приемник.

Информативный параметр метода — *амплитуда импульса продольных волн*. Область применения – выявление вертикально ориентированных плоскостных дефектов. Его недостаток – сложная схема сканирования: сначала устанавливается излучатель и проводится сканирование приемником, потом излучатель перемещается в следующую позицию и сканирование проводится вновь и т.д.

Р е в е р б е р а ц и о н н ы й м е т о д

Реверберационный метод применяется для контроля сложных, паяных или клееных объектов. Слово "реверберация" означает многократные отражения. Схема метода приведена на рис. 3.39.

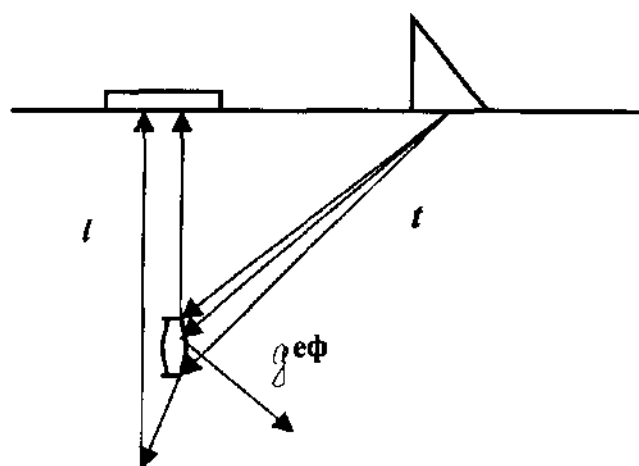


Рис. 3.39. Схема контроля дельта-методом

Преобразователь включен по совмещенной схеме, он является и излучателем, и приемником. Возбуждение производится импульсами и измеряется время затухания импульсов t_r , т.е. время объемной реверберации.

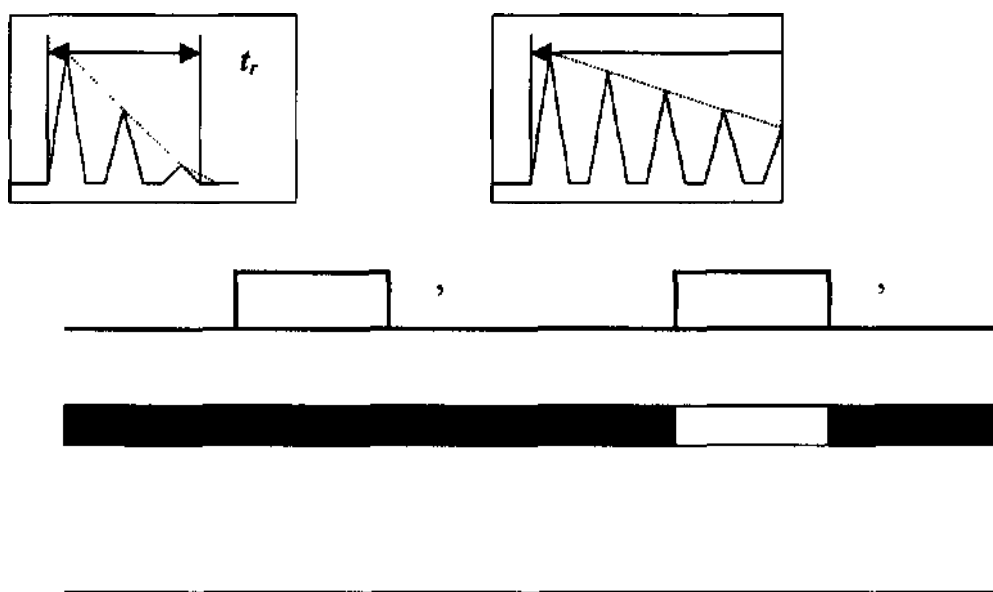


Рис. 3.39. Схема контроля реверберационным методом

Информативный параметр метода – время объемной реверберации. При качественном соединении слоев оно меньше, чем при наличии дефекта.

3.2.3. Методы прохождения

Методы прохождения основаны на возбуждении в изделии упругой волны и анализе свойств волн, прошедших объект контроля. В методе используют два преобразователя, включенных по раздельной схеме. Один преобразователь – это излучатель, второй – приемник. Методы прохождения применяются при контроле объектов простой геометрической формы (например, листы, прокат). В число методов прохождения входят теневой (амплитудный), временной теневой и велосимметрический методы. Общим недостатком первых двух методов прохождения является низкая чувствительность к небольшим дефектам. Часто методы прохождения используются в иммерсионном варианте для стабилизации акустического контакта.

Теневой метод

Он называется также амплитудным теневым методом, т.к. *информативным параметром* является *амплитуда сигнала прошедшей волны*. Схема метода приведена на рис. 3.40. Дефект загромождает путь части лучей, создавая акустическую тень на донной поверхности, поэтому метод называют теневым. Изображение на экране дефектоскопа показано на рис. 3.41 как при наличии, так и при отсутствии дефекта.

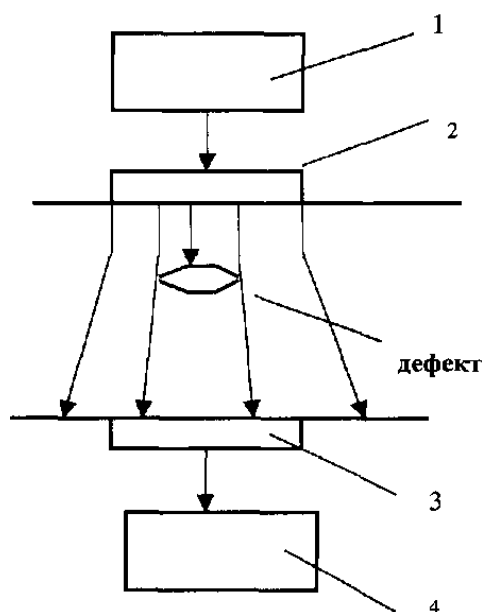


Рис. 3.40. Схема контроля теневым методом: 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – приемник; 4 – измеритель амплитуды



Рис. 3.41. Вид экрана дефектоскопа при контроле теневым методом

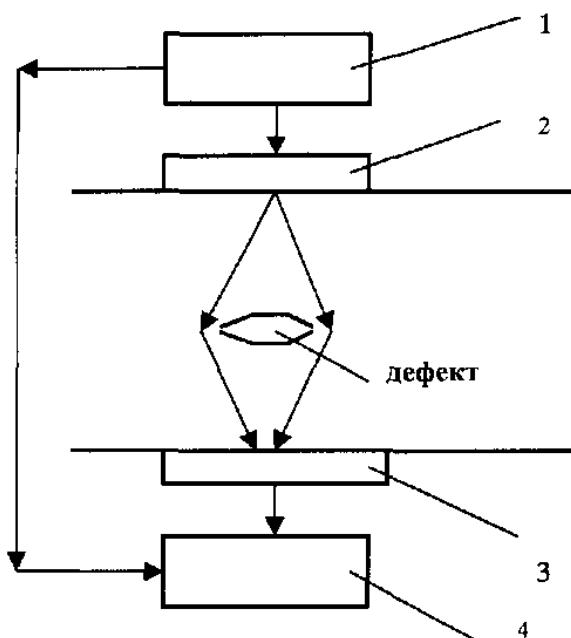
При отсутствии дефекта приемный преобразователь фиксирует определенную амплитуду прошедшего сигнала. При постоянной тол-

щине изделия, заданной степени шероховатости и параллельности верхней и нижней поверхностей изделия амплитуда прошедшей волны во время контроля изменяется в небольших пределах. В дефектном изделии амплитуда уменьшается. Недостатки метода: 1) низкая чувствительность к дефектам маленьких размеров; 2) чувствительность к качеству акустического контакта. Метод применяется при контроле листов и многослойных изделий, в которых многократные отражения между слоями мешают использовать эхо-метод.

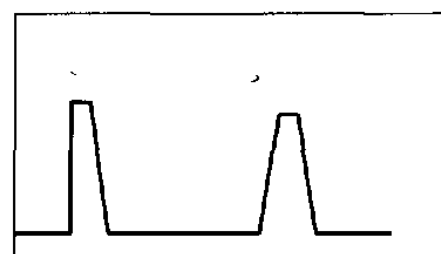
Временной теневой метод

Временной теневой метод основан на измерении времени запаздывания t импульса прошедшей волны в изделии с дефектом. Схема метода и изображение на экране приведены на рис. 3.42, а, б. Время t – это *информативный параметр* метода. В дефектном изделии время запаздывания увеличивается, т.к. волна вынуждена огибать дефект. Временной теневой метод менее чувствителен к стабильности акустического контакта, поскольку задержка определяется ходом лучей в дефектном изделии. Все же низкая чувствительность к мелким дефектам ограничивает применимость метода. В основном он применяется к изделиям, однородным по сечению, таким как листы, бруски.

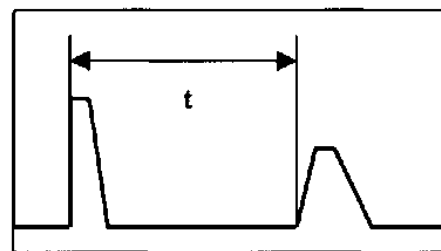
а



б



изделие без дефекта



изделие с дефектом

Рис. 3.42. Схема контроля временным теневым методом (а) и вид экрана дефектоскопа для изделия с дефектом и без дефекта (б)

Велосимметрический метод

Скорость упругих волн, бегущих в изделии вдоль дефекта, изменяется по сравнению со скоростью волн в бездефектном изделии. Это используется в велосимметрическом методе контроля (от англ. velocity – скорость). Метод применяется при контроле тонких объектов, например, листов. Выявляются дефекты типа трещин и расслоений. Схема метода приведена на рис. 3.43.

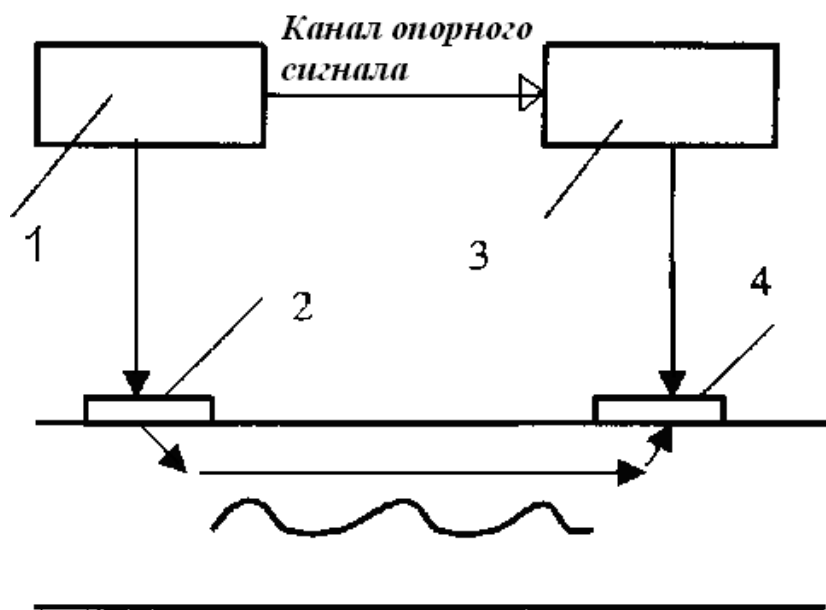


Рис. 3.43. Схема контроля велосимметрическим методом

Генератор 1 вырабатывает сигнал, а излучающий преобразователь 2 возбуждает упругую волну в изделии. В этом методе используются непрерывные волны. Приемный преобразователь 4 преобразует упругую волну в электрические колебания, которые после усиления поступают на измерительный блок 3. Генератор 1 также вырабатывает опорный сигнал, который поступает на измерительный блок. Скорость волны в изделии с дефектом уменьшается, что приводит к изменению фазы прошедшего сигнала по сравнению с опорным. *Изменение фазы p прошедшего сигнала – информативный параметр метода.*

Зеркально-теневой метод

Зеркально-теневой метод (ЗТМ) основан на измерении амплитуды донного сигнала. Схема метода показана на рис. 3.44, причем отраженный луч показан смещенным. Контроль обычно проводят совмещенными ПЭП (пьезоэлектрическими преобразователями). Наличие дефекта приводит к уменьшению амплитуды донного сигнала. Зер-

кально-теневой метод по технике выполнения сходен с методами отражения, в то время как принцип выявления дефекта по ослаблению сигнала, дважды прошедшего изделие в зоне дефекта, близок к теневому.

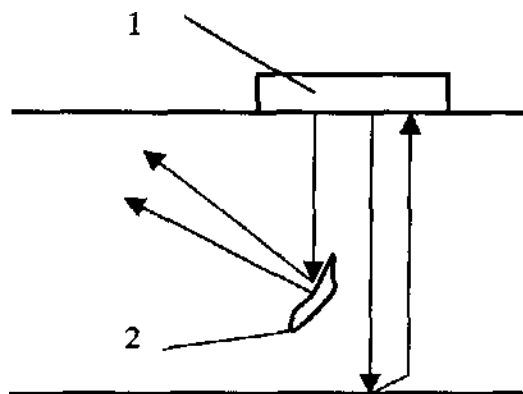


Рис. 3.44. Схема контроля зеркально-теневым методом: 1 – излучатель и приемник, 2 – дефект

Информативный параметр — амплитуда донного сигнала. *Коэффициент выявляемости* дефекта K_d вводят для количественной характеристики выявляемости дефекта при ЗТМ

$$K_d = A_{min}/A_0, \quad (3.44)$$

где A_{min} — минимальная амплитуда донного сигнала при наличии дефекта на пути УЗ пучка; A_0 — амплитуда донного сигнала в изделии без дефекта. Чем больше размер дефекта, тем меньше коэффициент выявляемости. Его значения лежат между 0 и 1. ЗТМ эффективен при выявлении скопления мелких дефектов, часто применяется совместно с эхо-методом.

Недостатки зеркально-теневого метода следующие: 1) невысокая чувствительность к мелким дефектам; 2) он требует стабильного акустического контакта; 3) шероховатость объекта снижает достоверность контроля.

3.2.4. Комбинированные методы

В комбинированных методах используют как отражение волной дефекта, так и изменение характеристик волн при прохождении ОК с дефектом. К числу комбинированных методов относят эхо-теневой,

эхосквозной, а также метод многократной тени. Информативным параметром комбинированных методов обычно служит амплитуда отраженных от дефекта или прошедших изделие импульсов. Благодаря совместному применению методов отражения и прохождения достигается повышение надежности контроля.

Метод *многократной тени* использует многократные отражения между параллельными поверхностями изделия. Он сходен с зеркально-теневым методом, но более чувствителен, т.к. упругие волны проходят дефектную зону несколько раз. Метод многократной тени используется при контроле листов и других объектов простой формы. *Информативный параметр* – амплитуда прошедшего сигнала, дефекты ее уменьшают. Недостаток метода – низкая помехоустойчивость.

Э х о – т е н е в о й м е т о д

Эхо–теневой метод основывается на анализе как прошедших, так и отраженных волн (см. рис.3.45). Один ПЭП включен по совмещенной схеме, как в эхо–методе.

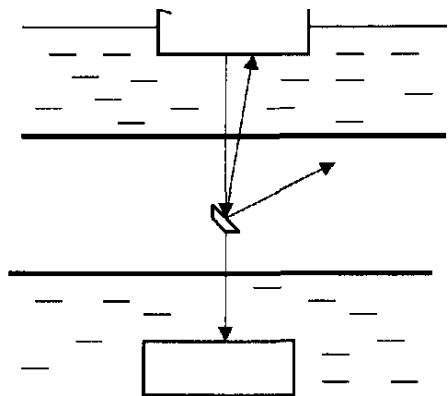


Рис. 3.45. Схема эхо–теневого метода

Он регистрирует отраженные от дефекта волны. *Информативные параметры* по этому каналу — *амплитуда и время прихода* отраженных импульсов. Второй ПЭП расположен по другую сторону изделия, он только принимает прошедшие сигналы.

Эхо–теневой метод применяют в автоматизированных установках УЗ контроля. Для реализации метод требует аппаратуры с двумя приемными каналами.

Эхо-сквозной метод

Метод использует несколько сигналов, прошедших через изделие, в т.ч. отраженные от дефекта. Преобразователи, один излучающий, другой приемный, расположены по разные стороны изделия соосно друг другу. Схема метода показана на рис. 3.46. Фиксируются сигналы: прошедший I и двукратно отраженный II. В изделии с дефектом возникают еще сигналы III и IV, отраженные от дефекта и одной из границ контролируемого листа. В изделии с дефектом возникают еще сигналы III и IV, отраженные от дефекта и одной из границ контролируемого листа.

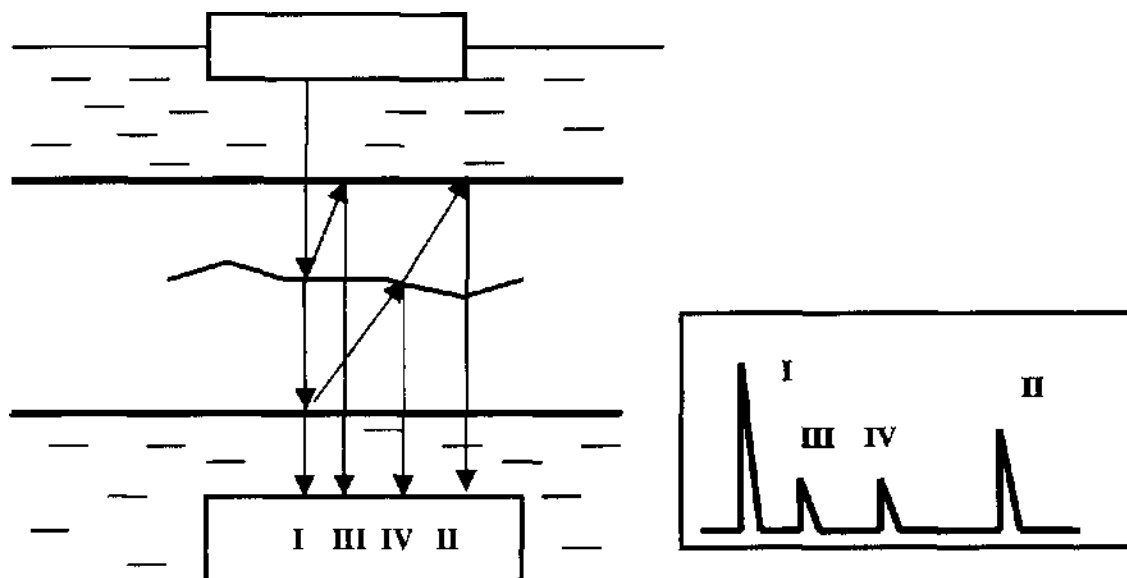


Рис. 3.46. Схема контроля эхо-сквозным методом и изображение на экране

Крупные дефекты можно легко обнаружить по уменьшению амплитуды сигналов I и II (их амплитуда – *первый информативный параметр*). Мелкие дефекты можно обнаружить по возникновению сигналов III и IV. Амплитуда этих сигналов – *второй информативный параметр*. Зона контроля настраивается по сигналам I и II. Сигнал II может быть использован для оценки качества акустического контакта. Аппаратура должна иметь две зоны АСД для реализации метода.

Эхосквозной метод часто применяется в иммерсионном варианте для контроля изделий простой формы, например, листов. Время прихода сигналов в этом варианте не зависит от смещения листа к одному из ПЭП, поэтому волнистость объекта контроля не сказывается сильно на работе аппаратуры. Важное свойство эхо-сквозного метода – это практически полное отсутствие "мертвой зоны" в приповерхностной области изделия.

3.2.5. Импедансный метод

Импедансный метод основывается на анализе изменения механического или входного акустического импеданса участка поверхности объекта контроля.

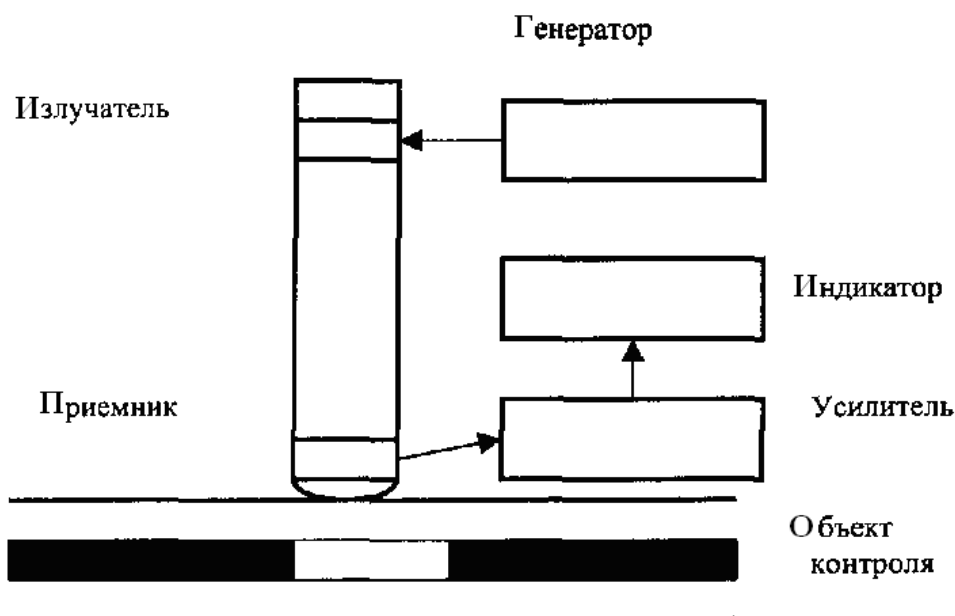


Рис. 3.47. Схема контроля импедансным методом

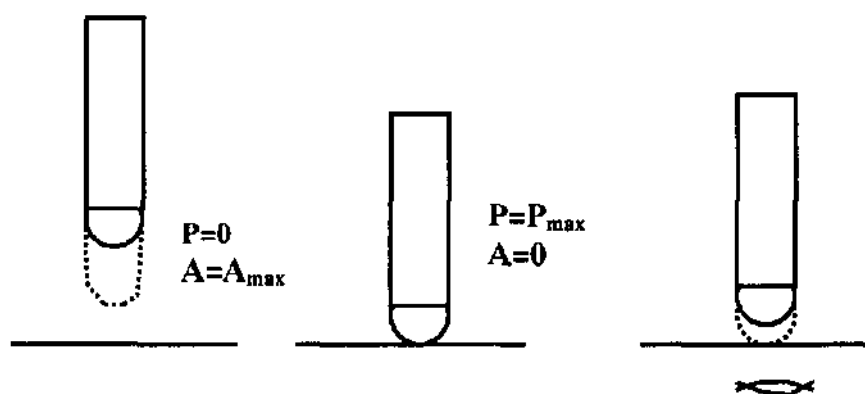


Рис. 3.48. Амплитуда A и давление P на конце импедансного преобразователя

Преобразователем служит колеблющийся стержень, прижатый к объекту контроля. Как правило, используется сухой контакт, без контактной жидкости. Схема контроля импедансным методом приведена на рис. 3.47. Для понимания принципа действия импедансного метода важное значение имеет понятие механического импеданса Z ,

$$Z = \frac{F}{V} \quad (3.44)$$

где F – сила, действующая на объект контроля со стороны преобразователя и вынуждающая колебания; v – скорость, с которой колеблются частицы вещества в поверхностном слое ОК. Подповерхностный дефект снижает механический импеданс. Сравнение амплитуд A и давления P на конце стержня, прижатого к объекту контроля, показано на рис. 3.48. Информативными параметрами метода могут быть амплитуда и фаза колебаний, или резонансная частота стержня.

В высокочастотных импедансных дефектоскопах преобразователем служит обычная пьезопластина. Появление дефекта, например, расслоения, изменяет входной акустический импеданс и изменяет режим работы генератора. Метод применяется при контроле сложных изделий для выявления непрочности, непропая. Кроме того, он используется в приборах для контроля твердости металлов.

3.2.6. Методы собственных частот (колебаний) и резонансные методы

Методы *собственных частот* используют *свободные колебания*, а *резонансные методы* – *вынужденные*. И те и другие подразделяются на *интегральные* и *локальные*. В интегральных методах колеблется все изделие целиком и выявляются дефекты, расположенные в любой его части. Интегральный метод позволяет быстро оценить качество всего изделия, но, как правило, не дает возможности определить местонахождение дефекта. Интегральные методы применяют для выявления дефектов, оценки геометрических размеров и свойств материалов. В локальных методах колебания возбуждаются лишь в части изделия за счет применения индуктора специальной конструкции. Это позволяет локализовать местонахождение дефекта в изделии. Свободные колебания возбуждают путем кратковременного внешнего воздействия на объект контроля, например с помощью удара, после чего он колеблется свободно. Схема контроля локальным методом свободных колебаний приведена на рис. 3.49.

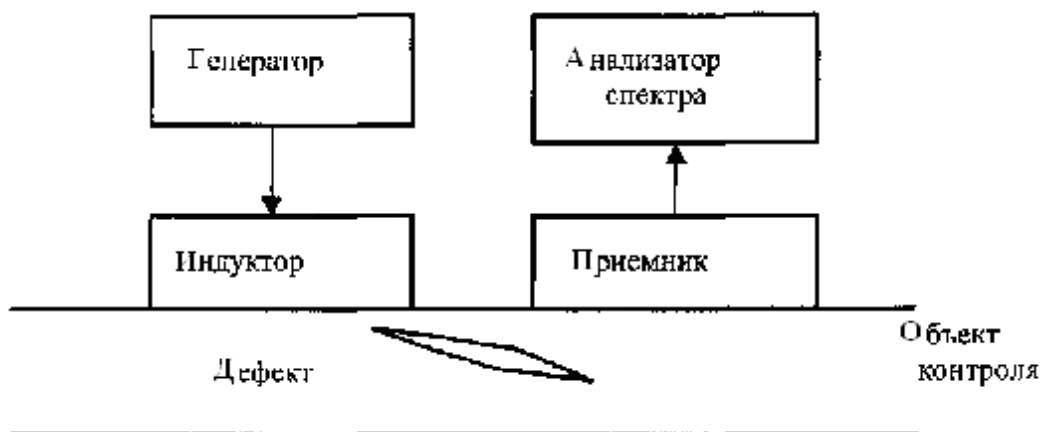


Рис. 3.49. Схема контроля методом свободных колебаний

Анализируется спектр возбуждаемых частот. *Информативные параметры* – значения частот свободных колебаний и спектр в целом. В дефектных изделиях спектр смещен в сторону высоких частот.

В резонансных методах в изделии с помощью преобразователя возбуждают стоячие волны. Частоту колебаний модулируют и фиксируют частоты, на которых возбуждаются резонансные колебания. Схема метода показана на рис. 3.50. Резонансные частоты определяются толщиной стенки изделия и наличием и месторасположением дефектов. Дефекты, расположенные под углом к поверхности, приводят к исчезновению резонансов.

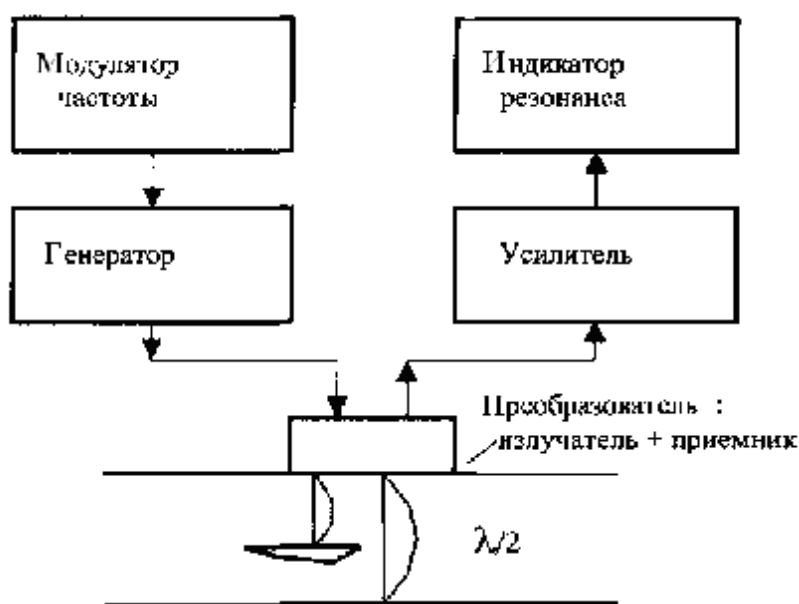


Рис. 3.50 Схема контроля резонансным методом

Информативные параметры резонансных методов – резонансные частоты, а также добротность или ширина резонансного пика.

Локальный резонансный метод применяют для измерения малых толщин стенок изделия. Резонансы возникают на тех частотах, когда на толщине изделия укладывается целое, как правило, нечетное, число полуволн. Недостаток резонансных методов состоит в том, что связь колеблющегося объекта с возбуждающей системой приводит к смещению резонансных частот от собственных частот изделия. Ослабление связи уменьшает этот вредный эффект, но снижает чувствительность метода.

3.2.7. Акустико-эмиссионный метод

Акустическая эмиссия (АЭ) – это генерация упругих волн в результате внутренней динамической локальной перестройки структуры материала. Основные источники АЭ следующие: возникновение и рост трещин, перестройка кристаллической решетки при фазовых превращениях, движение скоплений дислокаций. Акустико-эмиссионный метод – один из основных пассивных методов. Схема метода приведена на рис. 3.51.

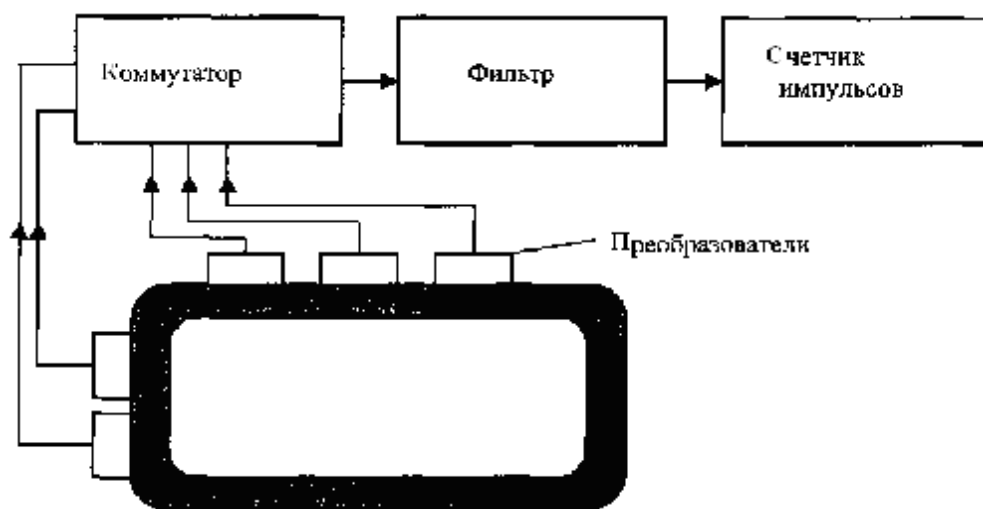


Рис. 3.51. Схема контроля акустико-эмиссионным методом

При росте и развитии трещин образуются волны АЭ с широким спектром значений, от единиц килогерц до сотен мегагерц. Приемные ПЭП для акустической эмиссии должны быть широкополосными. Часто приборы для контроля методом АЭ делают многоканальными. Обработка сигналов от нескольких преобразователей позволяет определить местоположение дефекта.

Выделяют два основных *информативных параметра* метода: 1) число зарегистрированных импульсов АЭ, превышающих установленный порог, за время наблюдения (*суммарный счет*); 2) число импульсов АЭ, превышающих установленный порог, в единицу времени (*скорость счета*).

В современных системах АЭ для обработки информации применяют ЭВМ. Это позволяет находить координаты дефектов, сравнивать количественные характеристики АЭ в объекте контроля с установленными браковочными критериями, вырабатывать решения о браковке изделия. Метод применяется при анализе работы сосудов высокого давления, узлов атомных реакторов, конструкций работающих под механическими напряжениями.

В и б р о - и ш у м о д и а г н о с т и к а

Относятся к пассивным акустическим методам. Первый из них анализирует параметры вибрации какой-либо отдельной детали или узла, например подшипника, ротора. Используются преобразователи как контактного типа, так и работающие на воздушно-акустической связи. Спектр периодических вибраций состоит из системы линий.

Второй метод состоит в следующем: шумодиагностика изучает спектр шумов работающего механизма с помощью микрофонных приемников. Спектр шумов имеет непрерывную составляющую.

В состав аппаратуры вибро- и шумодиагностики входят широкополосные приемники, например: микрофоны, усилители и анализаторы спектра (рис. 3.52). Целью этих методов диагностики является не только обнаружение неисправной детали или узла, но и определение ресурса механизма в целом.

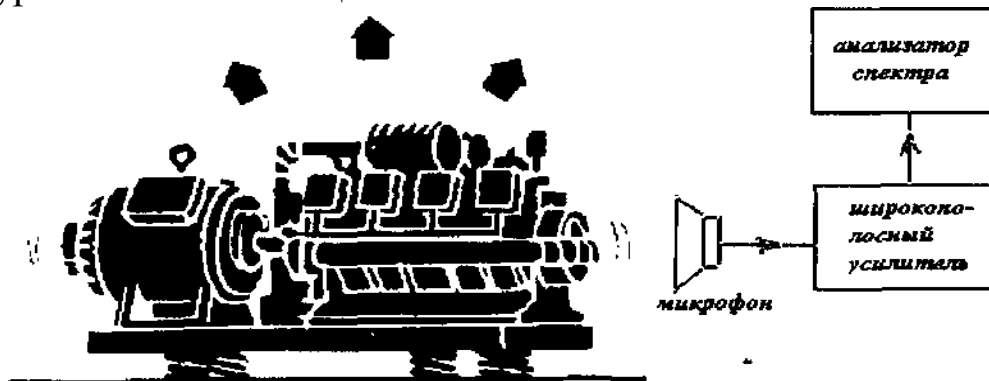


Рис. 3.52. Принципиальная схема методов вибро- и шумодиагностики

3.2.8. Способы акустического контакта

Существует 4 основных способа акустического контакта.

1. Контактный способ, он наиболее распространен. Упругие волны от излучателя в объект контроля передаются через контактную среду. Толщина контактной среды составляет меньше половины длины волны, лучше если меньше десятой доли длины волны.

2. Иммерсионный способ. Толщина слоя контактной среды составляет несколько длин волн. Различают несколько вариантов иммерсионного способа: все изделие целиком помещается в иммерсионную ванну (см. рис. 3.53,*а*); локальная иммерсионная ванна для части ОК (рис.3.53,*б*); струйный контакт (рис. 3.53,*в*); контакт через эластичную мембрану (рис.3.53,*г*). Иммерсионный способ используется в тех методах контроля, в которых особенно важна стабильность акустического контакта (таких как амплитудный теневой, эхосквозной методы). Кроме того, иммерсионный способ применяют в томографических системах, где облучение объекта ведется из нескольких позиций или под разными углами, а также в акустическом микроскопе.

3. Щелевой способ (см. рис. 3.54), когда толщина зазора между ОК и преобразователем заполнена контактной средой (способ "мениск"). Жидкость удерживается в зазоре силами поверхностного натяжения.

4. Бесконтактный способ. Акустические колебания в ОК либо передаются через слой воздуха, либо создаются в ОК с помощью действия электромагнитных, оптических, тепловых и других явлений. Как правило, бесконтактные способы обеспечивают низкую чувствительность, в сотни раз худшую, чем контактный.

Иногда применяют преобразователи с эластичным протектором (см. рис. 3.55). Защитная прослойка – протектор – изготовлена из резины или другого эластичного материала.

Контактная среда чаще всего бывает жидкой, например, трансформаторное масло, глицерин, обойный клей. Разработаны специальные составы для обеспечения акустического контакта (смазки "Циатим", коупланты импортного производства).

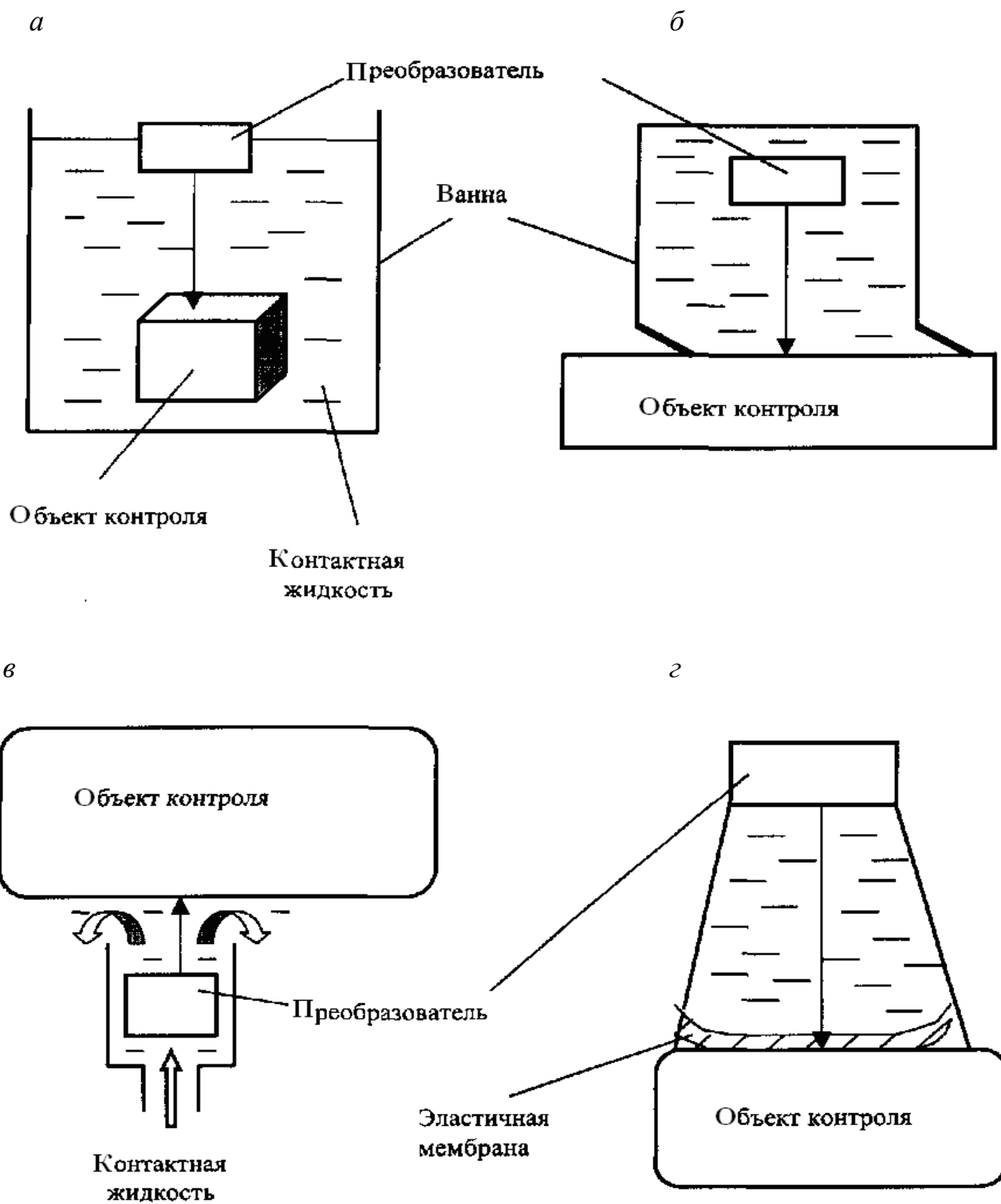


Рис. 3.53. Варианты иммерсионного контроля



Рис. 3.54. Щелевой контакт протектором

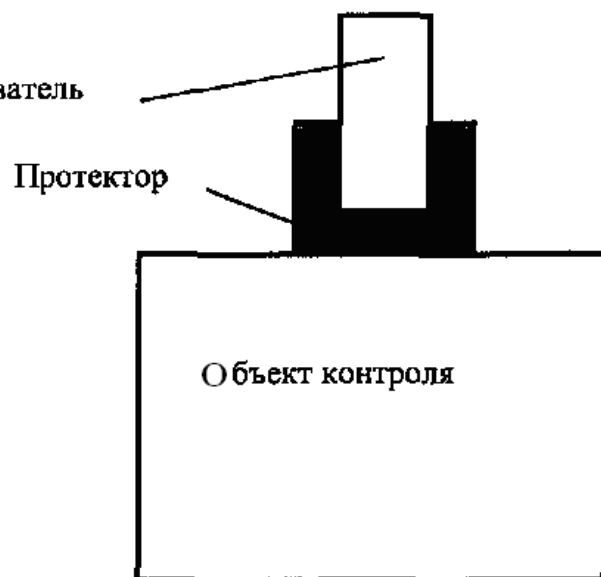


Рис. 3.55. Преобразователь с эластичным протектором

Основные требования к контактным средам таковы:

- по возможности малое поглощение акустических волн;
- хорошая смачиваемость поверхности ОК и поверхности ПЭП;
- безвредность для дефектоскописта;
- контактная среда не должна вызывать коррозии ОК. В связи с этим вода, вызывающая коррозию, применяется как контактная среда только с антикоррозийными добавками;
- контактная среда не должна быть дорогостоящей. Это особенно важно для иммерсионного способа контакта.

Свойства контактной среды должны сохраняться во всем рабочем интервале температур и не должны ухудшаться при небольшом загрязнении.

Жидкая контактная среда не передает поперечных волн. Если последнее необходимо, то применяют контактные среды типа клеев. Их применяют и для постоянного крепления ПЭП, например, в методе акустической эмиссии.

4. МАГНИТНЫЙ И ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ

4.1. Физические основы и классификация методов

Магнитное поле существует вблизи проводника с током и постоянных магнитов. Причиной его возникновения является упорядоченное движение зарядов в проводнике или электронов в атомах вещества магнита. Магнитная стрелка, находящаяся в пределах действия этого поля, всегда занимает определенное положение, а железные опилки располагаются строго вдоль линий, называемых магнитными силовыми линиями.

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$. Вектор $\vec{B}$ направлен по касательной к магнитным силовым линиям, поэтому по виду силовых линий можно судить о направлении вектора индукции. Вектор $\vec{B}$ имеет смысл плотности магнитного потока Φ , причем последний уже является скалярной величиной. Для наглядности представления магнитного поля линии магнитной индукции условились проводить так, чтобы их число, приходящееся на единицу площади перпендикулярной к ним поверхности, было пропорционально значению B , поэтому значение магнитного потока Φ через какую-либо поверхность пропорционально общему числу силовых линий, пронизывающих эту поверхность. В однородном магнитном поле магнитный поток равен произведению магнитной индукции на площадь замкнутого контура S и косинус угла α между направлением поля и нормалью $\vec{n}$ к поверхности контура (см. рис. 4.1), Вб:

$$\Phi = BS \cos \alpha . \quad (4.1)$$

Другой важной характеристикой является вектор напряженности магнитного поля $\vec{H}$. Он определяет поле, создаваемое внешним по отношению к данному телу источником. На практике эти поля чаще всего создаются различными намагничивающими катушками (соленоидами). Между индукцией и напряженностью магнитного поля существует следующая зависимость

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} , \quad (4.2)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, Гн/м, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; μ — относительная магнитная проницаемость материала (среды); H — напряженность магнитного поля, А/м.

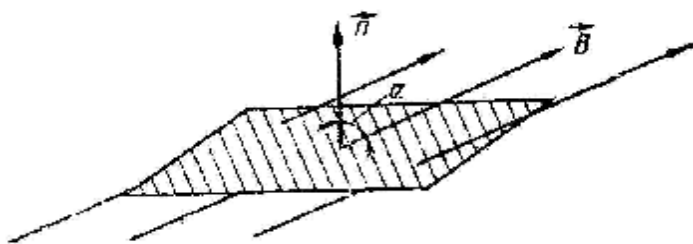


Рис. 4.1. Прохождение магнитного потока через площадку площадью S

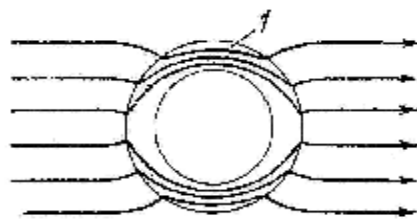


Рис. 4.2. Схема магнитной защиты

Магнитные свойства материалов. Все вещества в той или иной степени обладают магнитными свойствами. Магнитные свойства проявляются, во-первых, в том, что тела испытывают силы и моменты сил, создаваемые магнитным полем, и, во-вторых, в том, что магнитное поле искажается, если поместить в него любое вещество. Магнитные свойства вещества характеризуются магнитной проницаемостью μ . По значениям μ вещества можно подразделить на три класса: ферромагнетики, обладающие относительной магнитной проницаемостью, намного большей единицы; парамагнетики — вещества с проницаемостью, немного большей единицы; и диамагнетики, у которых магнитная проницаемость чуть меньше единицы.

Искажение магнитного поля, происходящее при внесении в него диамагнитных и парамагнитных тел, незначительно. Напротив, магнитное поле искажается весьма существенно, если в него будут помещены ферромагнитные тела. Железный образец, обладающий проницаемостью, в сотни и тысячи раз большей μ_0 (абсолютной магнитной проницаемости вакуума), вбирает в себя магнитное поле. На данном явлении основана магнитная защита. В пространство, огражденное железом 1 , магнитный поток не пройдет: магнитные линии будут проходить внутри железа (рис. 4.2). Магнитное поле при этом становится неоднородным. Однородное магнитное поле имеет место в тороиде — кольцевом магнитопроводе 1 с равномерно распределенной намагничивающей обмоткой 2 (см. рис. 4.3.). Обмотка создает поле напряженностью $H = I\omega/l$, где I — сила тока, А; ω — число витков; l — длина катушки, м. Напряженность поля не зависит от вещества тороида (без тороида значение H , можно определить по той же формуле). Совсем иначе обстоит дело с магнитным потоком. Величина B зависит от магнитной проницаемости. Если магнитопровод катушки (тороид) выполнен из железа, обладающего

высокой магнитной проницаемостью, то индукция возрастает в сотни и тысячи раз. Это связано с явлением дополнительного намагничивания. Мерой интенсивности намагничивания является вектор намагниченности, который определяют из уравнения

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}), \quad (4.3)$$

где $\vec{M}$ — вектор намагниченности, А/м.

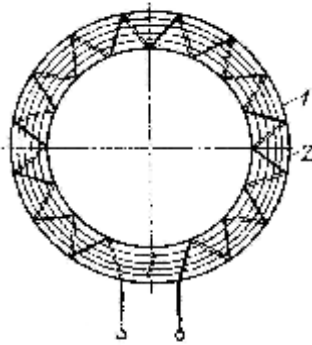


Рис. 4.3. Магнитный поток в тороиде

Это уравнение легко привести к уравнению (4.2), если принять $\vec{M} = \chi \vec{H}$, а $\mu = 1 + \chi$, где χ — магнитная восприимчивость вещества.

Принципиальное отличие ферромагнетиков от других веществ заключается в отсутствии линейной и, более того, однозначной зависимости магнитного состояния вещества от напряженности намагничивающего поля. Поэтому понятие магнитной проницаемости для ферромагнетиков носит весьма условный характер. Правильное представление о магнитных свойствах железа можно получить, рассматривая зависимости намагниченности или магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

Измерим магнитную индукцию предварительно размагниченного железного образца с сечением площадью S как функцию напряженности поля. Сначала индукция растет медленно, затем быстро и, наконец, при H_s наступает магнитное насыщение B_s (см. рис. 4.4,а). Кривую $B(H)$ называют кривой первоначального намагничивания (индукции).

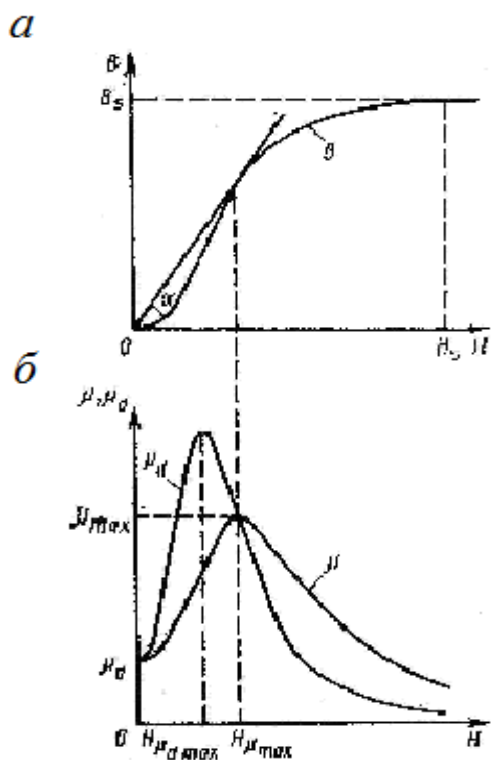


Рис. 4.4. Зависимости магнитной индукции B (а), нормальной μ и дифференциальной μ_d магнитных проницаемостей (б) от напряженности магнитного поля H

Если в каждой точке кривой индукции найти отношение $B/(\mu_0 H)$, т. е. определить значение μ , то можно будет построить зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля. На рис. 4.4,б показано, что μ при определенных значениях H достигает максимального значения. Для разных марок сталей этот максимум различен и достигается при разных значениях напряженности поля. Максимум проницаемости $\mu_{\max}$ не трудно найти графическим путем. Для этого необходимо из начала координат провести касательную к кривой $B(H)$ (рис. 4.4,а). Тангенс максимального угла наклона a соответствует значению $\mu_0 \mu_{\max}$.

Кроме относительной магнитной проницаемости различают относительную дифференциальную μ_d и начальную μ_a проницаемости, которые являются важными характеристиками с точки зрения дефектоскопии. Если магнитное состояние вещества фиксировать в какой-либо точке на основной кривой индукции, то при увеличении магнит-

ного поля на величину ΔH индукция возрастает на величину ΔB . Предел отношения $\Delta B / (\mu_0 \Delta H)$ при $\Delta H \rightarrow 0$ называется относительной дифференциальной проницаемостью: $\mu_d = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \Delta B / (\mu_0 \Delta H)$.

Начальная проницаемость при отсутствии внешнего поля H выражена формулой:

$$\mu_a = \lim_{H \rightarrow 0} B / (\mu_0 H).$$

На рис. 4.4,б показана кривая $\mu_d(H)$, которая также имеет максимум, характеризующий соответствующий ферромагнитный материал.

Наилучшими условиями выявления дефектов являются такие, при которых магнитная проницаемость мала, а индукция велика. Такое магнитное состояние может быть достигнуто в магнитных полях, превышающих поле $H_{\mu \max}$, т. е. на участке кривой $\mu(H)$, где проницаемость μ убывает.

Отметим еще одно своеобразие поведения ферромагнетиков. Предположим, что железо доведено до магнитного насыщения. Начнем плавно уменьшать напряженность магнитного поля (см. рис. 4.5). Окажется, что индукция будет убывать теперь по другой кривой, лежащей выше кривой первоначального намагничивания. Напряженность поля может быть доведена до нуля, но намагниченность не будет снята. Соответствующие значения намагниченности и индукции называются остаточными и обозначают M_r и B_r .

Чтобы снять остаточную намагниченность, необходимо сменить направление поля. Полное размагничивание произойдет при условии, что напряженность поля достигнет некоторой величины H_c , называемой коэрцитивной силой. Коэрцитивная сила численно равна напряженности поля, (см. рис. 4.4,б), при которой дифференциальная проницаемость достигает максимума: $H_c = H_{\mu d \max}$.

При дальнейшем увеличении поля тело намагничивается в обратном направлении до той же степени насыщения, что и в начальном процессе. Достигнув отрицательного максимума, можно вести процесс в обратную сторону и получить изображенную на рис. 4.5 петлю гистерезиса. Петля, построенная при условии, что ферромагнитное тело доводится до магнитного насыщения B_s , называется предельной петлей гистерезиса.

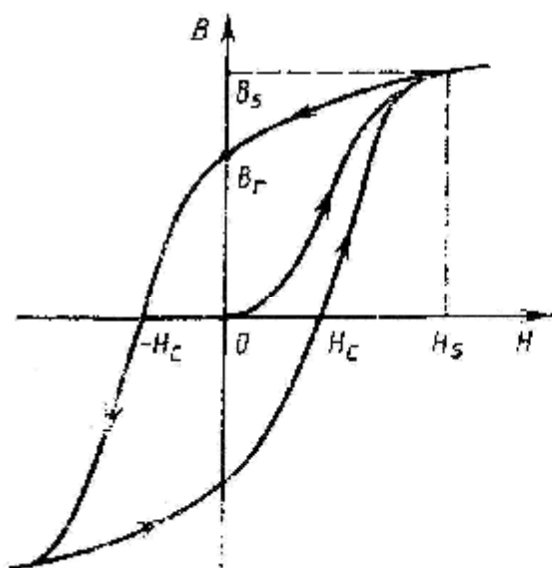


Рис. 4.5. Петля гистерезиса при перемагничивании образца

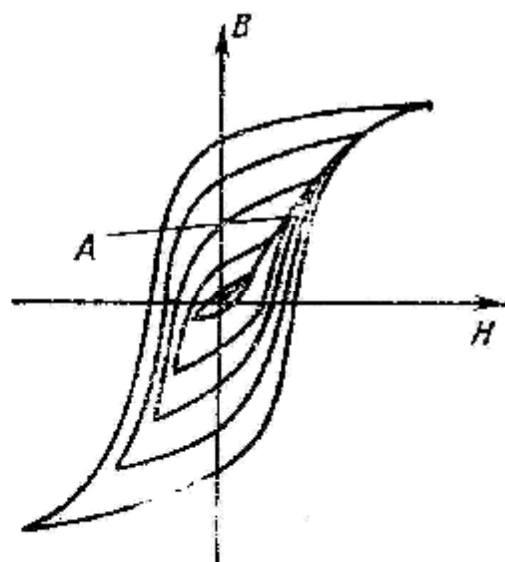


Рис. 4.6. Семейство симметричных петель Гистерезиса

Если перемагничивание образца начинать не доходя до магнитного насыщения, то может быть получено семейство симметричных петель гистерезиса. В этом случае кривая A , совпадающая с геометрическим местом вершин симметричных петель гистерезиса, будет называться основной кривой индукции $B(H)$ (рис. 4.6).

Магнитные свойства железа и его сплавов могут меняться в широких пределах в зависимости от структуры, фазового состава, величины зерна металла, интенсивности пластических деформаций и т. д. Различают ферромагнитную (феррит) и парамагнитную (аустенит) фазы железа. Безуглеродистые сплавы железа, а также аустенитные стали обычно парамагнитны; они содержат лишь небольшое количество феррита (α -фазы), поэтому для их магнитного насыщения требуются большие намагничивающие поля (до 1 000 000 А/м). Для обычных конструкционных мало- и среднелегированных сталей, у которых преобладает ферромагнитная фаза (мартенсит, феррит), а количество аустенита не превышает 10—15 %, магнитное насыщение достигается уже в полях $H \cong 100\,000$ А/м. Определяя изменение магнитных характеристик сталей, можно определить количественное соотношение их фаз, например содержание аустенита и феррита, а также исследовать состояние сталей после термообработки, сварки, прокатки и т. д.

Размагничивающее действие полюсов образца. Следует отметить, что приведенные выше магнитные характеристики рассмотрены при отсутствии размагничивающего поля, обу-

словленного геометрической формой образца. Размагничивающее поле возникает в ферромагнетике вследствие поляризации в разомкнутом магнитопроводе: на разомкнутых концах магнитопровода образуются магнитные заряды противоположного знака (магнитные полюсы), которые и создают размагничивающее поле напряженностью H_p , направленное в ферромагнетике навстречу намагничивающему полю H_0 (рис. 4.7). В результате в магнитопроводе образуется внутреннее поле напряженностью $H_i = H_0 - H_p$.

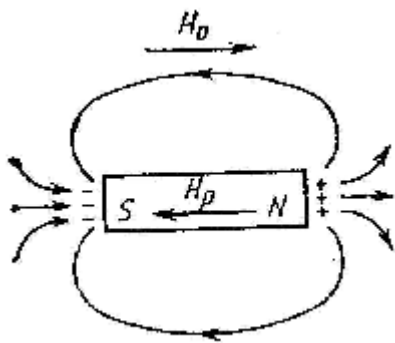


Рис. 4.7. Размагничивающее действие полюсов при продольном намагничивании образца

Напряженность размагничивающего поля пропорциональна намагниченности разомкнутого образца и может быть определена расчетным путем, если известен коэффициент пропорциональности N , называемый размагничивающим фактором, из выражения $H_p = N M$.

Размагничивающий фактор зависит от формы тела и его положения в магнитном поле. Для цилиндров и эллипсоидов N уменьшается с увеличением отношения длины к диаметру и в пределе равен нулю. В однородном поле для шара $M = 1/3$, для кольцевых или тороидальных образцов $N = 0$ (см. рис. 4.2), а для тонкой пластины $N = 1$. Отсюда следует, что плоские ферромагнитные изделия (тонкие пластины) бессмысленно намагничивать перпендикулярно поверхности, т. к. при любых значениях полей они не намагничиваются (строго говоря, это справедливо для пластин из материала с $\mu \gg 1$, поскольку при $N = 1$ $H_i = H_0 / \mu$). При произвольной ориентировке в поле пластина намагничивается только составляющей поля, направленной вдоль ее поверхности (тангенциальной составляющей H_i), перпендикулярная же составляющая (нормальная составляющая H_n) не оказывает намагничивающего действия.

Особенности поведения ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях.

При внесении ферромагнетика в переменное магнитное поле в нем возникают вихревые токи, создающие свое собственное электромагнитное поле. Вихревые токи по правилу Ленца стремятся противодействовать изменению внешнего магнитного поля. Это приводит к неравномерному распределению индукции и напряженности магнитного поля, а также электрического поля по сечению образца. Амплитуда B и H убывает с удалением от его поверхности по экспоненциальному закону $H_z = H_0 e^{-kz}$, где H_z — амплитуда напряженности магнитного поля на некотором расстоянии z от поверхности образца, в которой $H_z = H_0$; k — коэффициент затухания, м^{-1} , $k = \sqrt{\mu_0 \mu \pi f \sigma}$, здесь f — частота электромагнитных колебаний; Гц; σ — удельная электрическая проводимость, См/м ; μ — магнитная проницаемость, Гн/м.

По мере увеличения частоты, электрической проводимости и магнитной проницаемости и удаления вглубь от поверхности образца электромагнитного поля происходит затухание последнего. Высокочастотные электромагнитные поля распространяются фактически в тонком поверхностном слое, а в глубине ферромагнетика они пренебрежимо малы. Это явление носит название скин-эффекта.

Переменное поле обычно создают с помощью катушек (соленоидов), питаемых переменным током. Ток в катушке по закону Ома зависит от приложенного напряжения, активного R и реактивного ωL , сопротивления катушки (ω — круговая частота, Гц, $\omega = 2\pi f$; L — индуктивность, Гн). Общее сопротивление, Ом, $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, а амплитудное значение напряжения на зажимах катушки, В; $U_m = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, где I_m — амплитуда намагничивающего тока, А.

При внесении в поле катушки ферромагнитного тела с σ , отличной от нуля, активное и реактивное сопротивления катушки изменяются. Изменение R и L приводит к изменению силы тока в катушке. Значения R и L зависят от физических свойств внесенного тела, а также от его геометрии и степени дефектности (наличия нарушений сплошности), поэтому изменение амплитуды и фазы намагничивающего тока I_m содержит информацию о качестве изделия и может быть

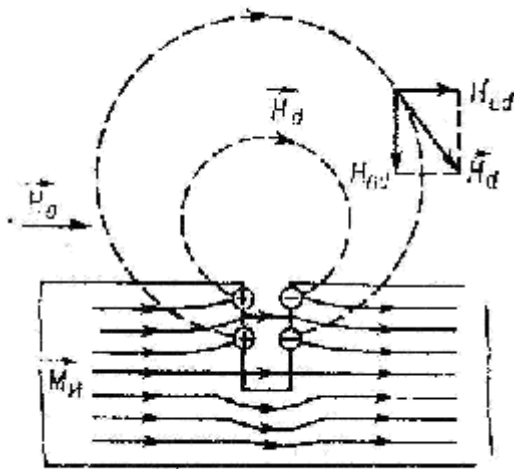
использовано для контроля его физико-механических свойств или контроля сплошности изделий.

И с к а ж е н и е м а г н и т н о г о п о л я д е ф е к т а м и .

Все магнитные методы неразрушающего контроля сплошности металла основаны на обнаружении локальных возмущений поля, создаваемых дефектами в намагниченном ферромагнетике. Рассмотрим характер изменения однородного магнитного поля в ферромагнитной среде с проницаемостью $\mu_1 \gg 1$ при наличии в ней дефекта типа нарушения сплошности, заполненного веществом, магнитная проницаемость которого μ_2 меньше μ_1 (например, окалиной, пылью или просто воздухом) или, наоборот, больше μ_1 (например, феррит в чугунах). В однородном магнитном поле H_0 ферромагнетик приобретает намагниченность M_u , значительно большую намагниченности материала, заполняющего трещину. По этой причине часть линий намагниченности обрывается на одной грани дефекта и снова начинается на другой. Конец каждой линии можно рассматривать как некоторый положительный магнитный заряд, поэтому на одной грани будут положительные, а на другой – отрицательные магнитные заряды. Такие заряды обязаны своим появлением размагничивающему действию граней дефекта. Каждый магнитный заряд создает магнитное поле, направленное из него, как из центра. Суммарное поле магнитных зарядов H_d называют полем дефекта. Поле H_d имеет сосредоточенный характер, поэтому результирующее поле, которое является суперпозицией внешнего намагничивающего поля H_0 и поля дефекта H_d , становится неоднородным и имеет сложную картину (топографию).

На рис. 4.8, а пунктирными линиями показано типичное поле рассеяния над поверхностным дефектом в виде прямоугольной канавки шириной $2b$ и глубиной h , а на рис. 4.8,б — топография тангенциальной H_{td} и нормальной H_{nd} составляющих напряженности поля этого дефекта. Кружочки с плюсами и минусами обозначают положительные и отрицательные магнитные заряды, возникающие на гранях дефекта.

а



б

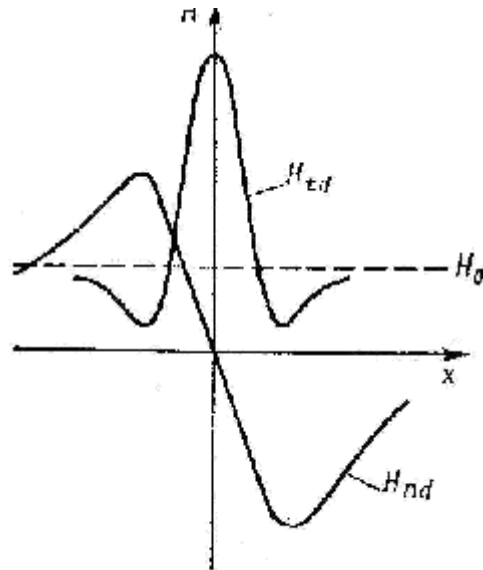


Рис. 4.8. Распределение намагниченности $\vec{M}_и$ в ферромагнитном изделии и поля рассеяния $\vec{H}_d$ над поверхностным дефектом (а), а также топография тангенциальной H_{td} и нормальной H_{nd} составляющих напряженности поля поверхностного дефекта (б)

Поле H_d появляется при очень малой намагниченности и с увеличением H_0 растет. Вид зависимости $H_d(H_0)$ определяется размерами и формой дефекта, магнитными свойствами материала контролируемого изделия, а также координатами x, y точки наблюдения

$$H_d = F_1(H_0, \mu, \mu_d, b, h) \bullet F_2(b, h, x, y),$$

где $F_1(H_0, \mu, \mu_d, b, h)$ — функция, определяющая магнитное состояние ферромагнетика при данном намагничивающем поле H_0 в зависимости от геометрии дефекта; $F_2(b, h, x, y)$ — функция, зависящая от геометрии дефекта и координат точки наблюдения.

В некоторых случаях значение функции F_1 может быть выражено через отношение $B_{\text{мат}}/(\mu_0\mu_d)$ ($B_{\text{мат}}$ — магнитная индукция материала контролируемого изделия, соответствующая полю H_0), тогда

$$H_d = \frac{B_{\text{мат}}}{\mu_0\mu_d} F_2(b, h, x, y). \quad (4.4)$$

Заметим, что такая замена допустима только для полей напряженностью $H_0 > H_{\mu\text{max}}$, соответствующих области за точкой перегиба кривой индукции $B(H)$, и только для определенного типа дефектов, на-

пример, поверхностных дефектов типа прямоугольной канавки (см. рис. 4.8,б).

Формула (4.4) дает лишь качественное описание поля H_d , на практике его непосредственно измеряют. Замечено, что для дефектов с малым раскрытием $2b < 0,02$ мм вид кривой $H_d(H_0)$ примерно повторяет вид основной кривой намагничивания $B(H)$, с увеличением ширины дефекта до $2b = 0,2$ мм зависимость приближается к линейной.

Амплитудные значения составляющих поля H_{td} и H_{nd} зависят от размеров дефектов, их ориентации по отношению к внешнему полю, соотношения проницаемостей среды и дефекта, а также от расстояния до точки наблюдения. Чем больше размеры дефекта, ближе к нему точка наблюдения и чем больше различие проницаемостей, тем больше амплитудные значения составляющих полей дефектов.

Вектор намагничивающего поля должен быть направлен перпендикулярно плоскости дефекта, тогда поле дефекта по направлению совпадает с внешним полем и будет иметь максимальное значение. В противном случае поле H_d ориентируется в направлении нормали к стенкам трещины, а интенсивность его быстро убывает с увеличением угла между нормалью и направлением намагничивания. Следует подчеркнуть, что магнитное поле рассеяния возникает не только над дефектами, но и над любыми локальными изменениями однородности магнитных свойств. Интенсивность поля рассеяния в этом случае зависит от соотношения проницаемостей.

Поле внутреннего дефекта, моделью которого обычно служит цилиндрическое отверстие диаметром D показано на рис. 4.9.

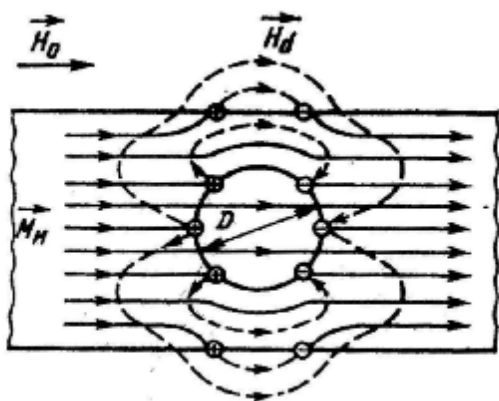


Рис. 4.9. Распределение намагниченности $\vec{M}_и$ в ферромагнитном изделии и поля рассеяния $\vec{H}_d$ над внутренним дефектом

По сравнению с поверхностным дефектом форма тангенциальной и нормальной составляющих напряженности поля принципиально не меняется, только показанные на рис. 4.8,б отрицательные экстремумы тангенциальной составляющей практически исчезают. В отличие от наружного дефекта, поле внутреннего дефекта становится заметным только при некотором пороговом значении H_0 , тем большем, чем толще покрывающий несплошность слой металла. Амплитудное значение поля дефекта определяется режимом намагничивания (величиной H_0), размерами дефекта и глубиной залегания. При неизменной глубине залегания отверстия поле меняется обратно пропорционально квадрату диаметра D в слабых магнитных полях и обратно пропорционально квадрату диаметра D в сильных.

В переменном магнитном поле дефекты сплошности среды вызывают локальное изменение вектора напряженности магнитного поля, аналогичное в первом приближении рассмотренному выше для постоянного магнитного поля. Однако из-за скин-эффекта информация может быть получена только о дефектах, залегающих сравнительно неглубоко (как правило, на глубине, не более 1 мм).

Структура поля рассеяния над сварным соединением

Контроль сварных соединений имеет ряд особенностей, для понимания которых необходимо рассмотреть структуру поля рассеяния, возникающего над сварным соединением при его намагничивании в поперечном направлении. Поле рассеяния над сварным соединением является суперпозицией полей шва, поверхностных неровностей, а также поля выпуклости шва, или внутреннего грата. Магнитная проницаемость шва обычно ниже проницаемости основного металла, поэтому поле шва совпадает по направлению с намагничивающим полем, т. е. оно ведет себя так же, как и поле поверхностного дефекта (см. рис. 4.8). Различие заключается в том, что топография поля H_d значительно уже и, кроме того, амплитуда H_d гораздо больше, т. к. различие в магнитных проницаемостях более существенное.

Выпуклость шва (внутренний грат) уменьшает уровень результирующего поля (см. рис. 4.10, а).

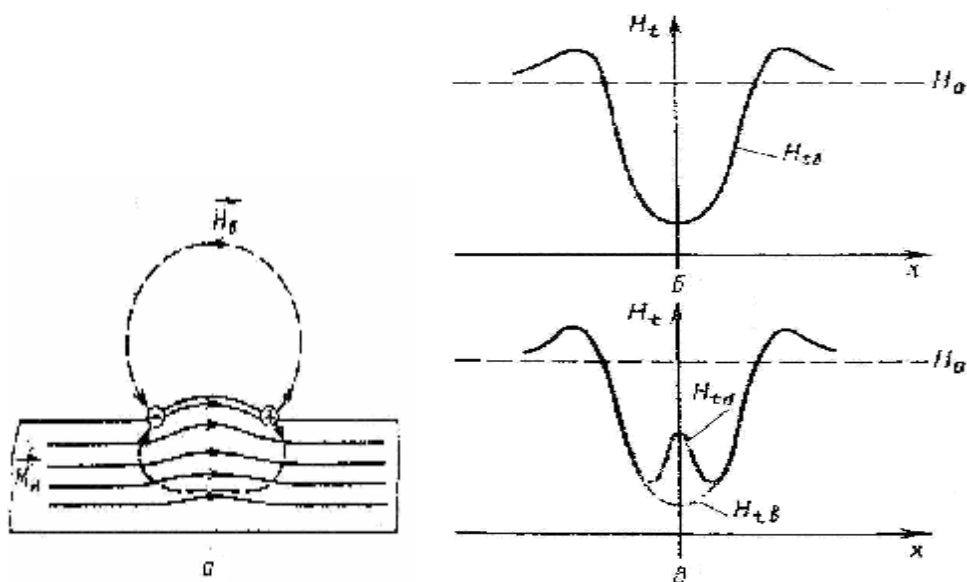


Рис. 4.10. Распределение намагниченности в сварном соединении и поля рассеяния над ним (а), а также топография тангенциальной составляющей напряженности поля шва без дефекта H_{tb} (б) и с дефектом H_{td} (в)

При намагничивании здесь образуются магнитные заряды, которые создают поле рассеяния H_b обратного по отношению к намагничивающему полю H_0 знака. В результате того, что поверхность выпуклости шва расположена намного ближе к точке наблюдения, поле рассеяния сварного соединения определяется тангенциальной составляющей поля выпуклости H_b (рис. 4.10, б). Поле самого же шва практически не чувствуется на фоне поля выпуклости. Если в шве имеется внутренний дефект, то он может быть выявлен при условии, что дефект достаточно большой, по локальному максимуму, различимому на фоне поля выпуклости шва (рис. 4.10, в). Неровности поверхности выпуклости шва также существенно влияют на поля дефектов и создают трудности распознавания последних.

Методы регистрации и измерения магнитных полей. В зависимости от способа индикации магнитных полей различают методы с непосредственным преобразованием магнитного поля в электрический сигнал и методы без преобразования в электрический сигнал.

Для регистрации и измерения магнитных полей и их неоднородностей в промышленной дефектоскопии чаще всего применяют плоские катушки поля, феррозонды, индукционные головки, магнитные ленты и магнитные порошки.

Определение напряженности магнитного поля в исследуемом образце с помощью катушек поля основано на неизменности тангенциальной составляющей напряженности поля на границе двух сред (ферромагнетик — воздух). На поверхности образца (в воздухе) и непосредственно в поверхностном слое ферромагнетика величины тангенциальных составляющих напряженности поля равны. Из этого ясно, что об определении напряженности поля в образце по величине поля на его поверхности можно говорить только в том случае, если поле в ферромагнетике однородно. В противном случае можно говорить только об измерении тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля.

С помощью катушек поля проще всего измерять переменное магнитное поле. В соответствии с законом электромагнитной индукции в катушке наводится электродвижущая сила (ЭДС), пропорциональная изменению магнитного потока в единицу времени, B ,

$$(4.5)$$

где n — число витков катушки; S — площадь сечения измерительных витков катушки; H_m — амплитудное значение напряженности магнитного поля; ω — круговая частота переменного поля.

Для измерения переменных магнитных полей используют милливольтметры типов Ф-517 и Ф-564, а для измерения постоянных — микровеберметры типов Ф-190 и Ф-199. Катушку поля устанавливают на контролируемый участок детали так, чтобы магнитные силовые линии при создании поля проходили перпендикулярно плоскости витков катушки, т. е. пересекали плоскость витков. Концы катушки подключают к зажимам прибора.

Измерение постоянного магнитного поля осуществляется методом сдвигания измерительной катушки с поверхности детали либо методом включения (переключения) намагничивающего поля. При этом наблюдается отклонение стрелки прибора. Показания прибора используют для расчета напряженности магнитного поля

$$(4.6)$$

где C_Φ — цена деления прибора соответствующего предела измерения, Вб; a_n — отклонение прибора в делениях; K — постоянная катушки, м^2 .

Для измерения постоянных и переменных, однородных и неоднородных полей применяют феррозонды. Наиболее распространены дифференциальные феррозонды с продольным возбуждением. Прин-

цип работы феррозонда состоит в следующем. Если магнитопровод из магнитомягкого материала (пермаллоя) поместить в соленоид с первичной и вторичной обмотками и намагничивать его синусоидальным полем $H_{\sim}$, одновременно наложив на него постоянное поле H , то во вторичной обмотке появится пропорциональная продольной составляющей этого поля ЭДС, которая имеет удвоенную частоту по сравнению с частотой возбуждения.

Феррозонд состоит из двух полузондов — двух одинаковых пермалловых магнитопроводов, каждый из которых окружен первичной и вторичной обмотками, распределенными по его длине. В феррозонде-полимере первичные обмотки n_1 и n'_1 , соединенные дифференциально (навстречу друг другу), образуют цепь возбуждения (рис. 4.11, а).

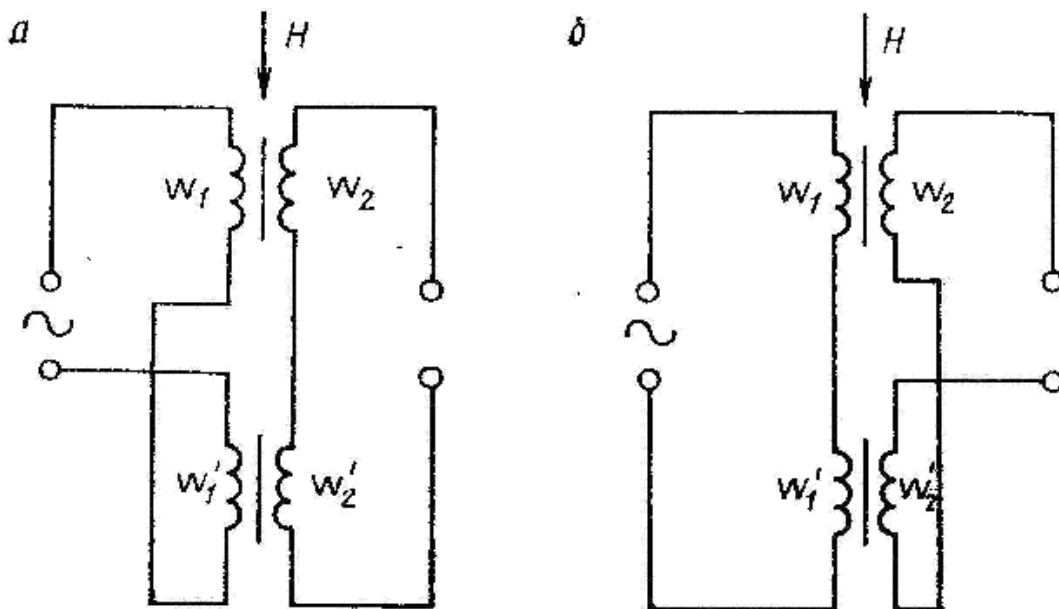


Рис. 4.11. Схемы феррозонда-полимера (а) и феррозонда-градиентометра (б)

Эти обмотки питаются переменным током с такой амплитудой, что материал магнитопровода периодически доводится полем возбуждения до состояния, соответствующего магнитному насыщению. Вторичные обмотки n_1 и n'_1 , образующие индикаторную цепь, включены последовательно так, что индуцируемые в них ЭДС при отсутствии постоянного магнитного поля H , подмагничивающего магнитопровод, взаимно компенсируются. При наличии постоянной составляющей поля в результирующей ЭДС в индикаторной цепи появляются четные относительно частоты возбуждения гармоники. Их амплитуда пропор-

циональна величине постоянного измеренного поля. Это позволяет, выделив с помощью фильтра четные гармоники (обычно используют сигнал с частотой $2f$ — вторую гармонику), измерять напряженность магнитного поля.

В схеме феррозонда-градиентометра (рис. 4.11,б), первичные обмотки соединяются последовательно, образуя цепь возбуждения; вторичные обмотки включаются настречу друг другу, образуя индикаторную цепь. Если на феррозонд-градиентометр наряду с одинаковыми переменными полями будут действовать и одинаковые постоянные намагничивающие поля, то ЭДС на выходе индикаторных обмоток равна нулю. Если постоянные поля не одинаковы, то во вторичной обмотке возникает переменная ЭДС, частота которой в два раза больше частоты возбуждения и является мерой разности средних напряженностей магнитных полей двух различных областей пространства, в которых расположены магнитопроводы полузондов.

Измерительные схемы с феррозондами, несмотря на их разнообразное применение, имеют общую структуру. Для периодического перемагничивания магнитопроводов феррозонда служит схема возбуждения, включающая задающий генератор. С индикаторных обмоток феррозонда сигнал поступает на вход избирательного резонансного усилителя, настроенного на частоту второй гармоники, амплитуда которой в определенных для каждого феррозонда пределах линейно связана с измеряемым магнитным полем. Выделяемый сигнал фиксируется регистратором, отмечающим не только величину, но и фазу измеряемого поля.

Для регистрации постоянного магнитного поля без преобразования в электрический сигнал широкое распространение получила тонкая ферромагнитная лента, аналогичная применяемой в звукозаписи. Магнитные ленты, как правило, состоят из слоя магнитного порошка оксида железа, взвешенного в лаке, и немагнитной основы из ацетилцеллюлозы, полиэфиров или лавсана. При внесении ленты конечной ширины в постоянное магнитное поле происходит ее намагничивание под действием составляющей поля H_x , направленной вдоль поверхности ленты. После прекращения действия намагничивающего поля магнитоактивный слой ленты сохраняет информацию о величине и однородности этого поля в виде остаточной намагниченности ленты и остаточного магнитного потока от магнитных зарядов, возникающих на краях ленты, а также на участках ленты, располагавшихся в областях с

большей неоднородностью магнитного поля. Рассмотрим этот процесс на примере записи поля дефекта H_d .

На рис. 4.12,а показана зависимость остаточной намагниченности ленты M_r от величины намагничивающего поля, на рис. 4.12,б — топография касательной к ленте, которая составляет поле дефекта, действующего на ленту, уложенную на поверхность ферромагнитного изделия. Неоднородность магнитного поля над дефектом приводит к появлению на ленте магнитных зарядов, плотность ρ которых пропорциональна градиенту намагниченности АМГ (рис. 4.12,а). Если считать полученную на ленте запись, например, с помощью феррозонда-полимера, то магнитограмма будет иметь вид, показанный на рис. 4.12,в. Чем больше неоднородность исходного поля $\Delta H = H_d - H_0$, тем больше амплитуда записи поля дефекта на ленте H_{rtd} . Кривая $M_r(H)$ в широком диапазоне полей представляет собой ярко выраженную линейную зависимость. Это предъявляет определенные требования к выбору режимов намагничивания. Наибольший интерес представляет линейный участок АБ кривой $M_r(H)$, для которого характерна максимальная крутизна, определяющая чувствительность ленты к неоднородности регистрируемого поля. Для магнитных лент различных типов, выпускаемых промышленностью, линейный участок находится в интервале полей 10 000 – 60 000 А/м, что соответствует оптимальным условиям контроля ферромагнетиков.

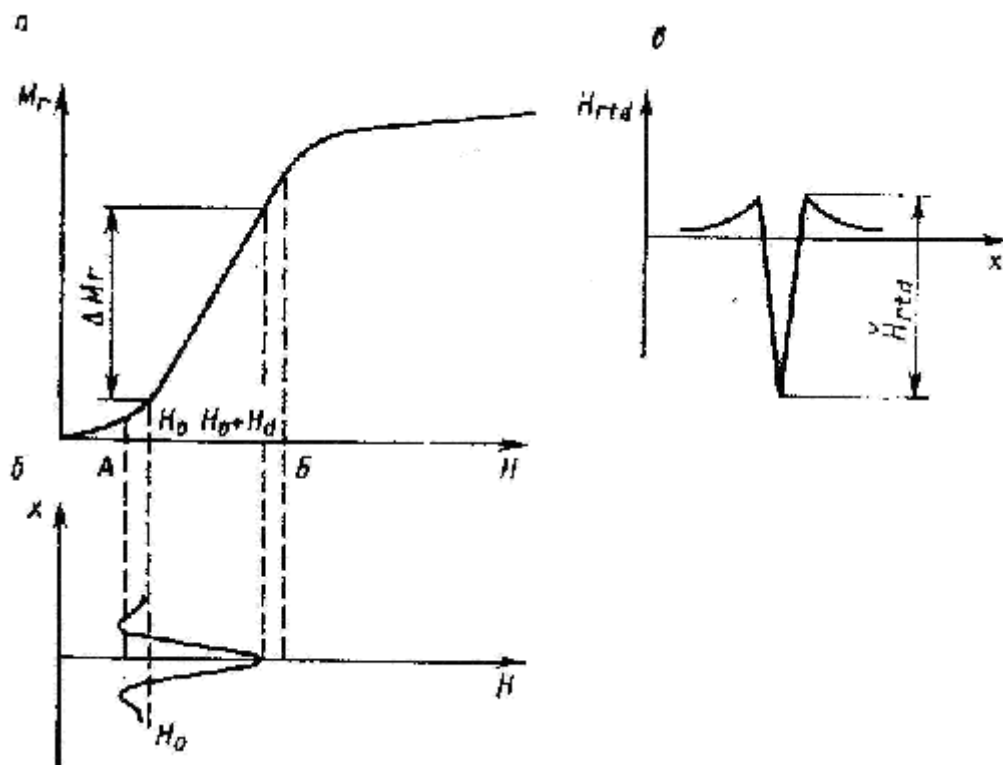


Рис. 4.12. Схема процесса записи поля дефекта на магнитную ленту

Особенность работы с лентами заключается в необходимости вторичного преобразования информации, записанной на ленте, в электрический сигнал. Считывание полей записи ленты обычно производят с помощью феррозондов либо с помощью индукционной головки. На магнитопровод из материала с высокой магнитной проницаемостью намотана обмотка с большим количеством витков. Магнитопровод имеет немагнитный зазор Δ , образованный прокладкой из тонкой (10-20 мкм) бронзовой фольги. В процессе считывания положение магнитной ленты относительно головки должно непрерывно изменяться. Для этого индукционная головка перемещается относительно поверхности ленты либо, наоборот, лента перемещается относительно неподвижной головки. При постоянной скорости перемещения U в обмотке головки наводится ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного потока в единицу времени. Так же, как и феррозонд, собранный по градиентометрической схеме, индукционная головка реагирует на неоднородности магнитного поля.

Другим способом индикации неоднородностей магнитного поля является метод с использованием магнитного порошка, заключающийся в эффекте взаимодействия неоднородного магнитного поля с ферромагнитными частицами. Этот метод, несмотря на отсутствие преобразования в электрический сигнал, обладает большой наглядностью и очень высокой чувствительностью. Принцип метода будет рассмотрен ниже.

К л а с с и ф и к а ц и я м е т о д о в . Магнитный и вихретоковый контроль, как правило, осуществляется по следующей схеме.

Исследуемый объект подвергается воздействию постоянного или переменного электромагнитного поля, которое в результате взаимодействия с ним меняет свою структуру. Полученное таким образом результирующее поле содержит информацию о качестве изделия. Эту информацию получают с помощью регистраторов магнитного поля, устройство которых было рассмотрено выше.

Вихретоковые методы подразделяют по полезадающим системам, т. к. регистратором результирующего поля в большинстве случаев является индукционная измерительная катушка. Различают проходные полезадающие системы, когда катушка с током охватывает деталь или вставляется в нее, и накладные, когда катушка с током устанавливается на деталь торцом. Измерительные катушки также бывают накладные и проходные и могут быть выполнены отдельно от генераторных

(полездающих) катушек. Иногда функции полездающей и измерительной катушек удается совместить в одной катушке.

С практической точки зрения магнитные методы удобно подразделять по двум признакам: способу возбуждения магнитного поля и способу его регистрации. По методам регистрации магнитных полей и неоднородностей, обусловленных дефектами типа нарушений сплошности, магнитные методы контроля подразделяют на магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, индукции-онный, метод эффекта Холла.

4.2. Магнитопорошковая дефектоскопия

Магнитопорошковая дефектоскопия (МПД) в системе неразрушающих методов контроля занимает одно из ведущих мест. Это связано с ее высокой чувствительностью к поверхностным и подповерхностным дефектам, простотой, универсальностью и наглядностью представления результатов контроля. Магнитопорошковый метод применяют для контроля изделий, деталей, сварных соединений конструкций из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью не менее 40 для выявления невидимых невооруженным глазом поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности типа трещин, непроваров.

Магнитопорошковый метод основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами в детали при ее намагничивании, с помощью ферромагнитных частиц (магнитного порошка), которые находятся во взвешенном состоянии в дисперсионной среде или воздухе. На магнитную частицу в неоднородном магнитном поле дефекта действует сила F , стремящаяся затянуть ее в места наибольшей концентрации силовых линий и приблизить к месту дефекта,

$$F = \mu_0 \chi V H \Delta H / \Delta x \quad (4.7)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; χ — магнитная восприимчивость частицы (как тела); V — объем частицы, м³; $\Delta H / \Delta x$ — градиент поля, А/м². Кроме этой силы на частицу действует вес, выталкивающая сила жидкости (сила Архимеда) и сила трения. Под действием результирующей силы происходит перемещение частицы и образование валика порошка над дефектом. Таким образом, эффективность выявления дефекта находится в тесной связи с интенсивностью поля рассеяния и его гра-

диентом, а также зависит от магнитных свойств и размеров используемых частиц.

Величина поля рассеяния и его градиент максимальны, когда дефект выходит на поверхность изделия. В данном случае значительная часть силовых линий выходит на поверхность изделия в окрестности дефекта. Если дефект подповерхностный, то часть вытесненных силовых линий будет принята наддефектной частью изделия и поток рассеяния будет небольшим.

Для обнаружения дефекта с помощью магнитного порошка необходимо, чтобы поле рассеяния H_d превышало некоторое критическое значение $H_{d\text{ кр}}$, начиная с которого частицы порошка хорошо втягиваются в дефект и осаждаются над ним. Из выражения (4.4) видно, что H_d определяется отношением индукции материала контролируемого изделия $B_{\text{мат}}$ к дифференциальной магнитной проницаемости, а также геометрическими параметрами дефекта. Согласно ГОСТ 21105-75 все выявляемые поверхностные дефекты подразделяют на три группы, которым соответствуют условные уровни чувствительности А, Б и В, указанные ниже.

	А	Б	В
Размеры эталонного дефекта, мкм:			
длина.....	>0.5	>0.5	>0.5
глубина.....	25	100	250
ширина.....	2.5	10	25

Каждому уровню соответствует определенное значение $B_{\text{мат}}/\mu_d$, при котором выполняется условие выявления дефекта указанных выше размеров, т. е. условие $H_d > H_{d\text{ кр}}$. Причем это отношение тем больше, чем меньше размеры дефекта, который необходимо обнаружить (чем выше требуемая чувствительность контроля). Допускается проведение магнитопорошковой дефектоскопии с чувствительностью не ниже условного уровня В. Этому уровню соответствует магнитное состояние материала контролируемого изделия в области перегиба кривой индукции $B(H)$. Условному уровню чувствительности А соответствует состояние, близкое к техническому насыщению, когда $\mu \rightarrow 1$. Однако следует помнить, что по мере приближения к состоянию технического насыщения μ_d быстро уменьшается, в связи с чем уже на незначительных неровностях поверхности изделия появляются поля рассеяния, которые затрудняют выявление самого дефекта. Поэтому важное значе-

ние имеет чистота обработки поверхности. Уровень чувствительности А достижим при шероховатости поверхности не грубее $R_a = 1,6$ мкм, а уровни чувствительности Б и В — не грубее $R_a = 6,3$ мкм.

Для всех уровней чувствительности введены оптимальные режимы намагничивания (оптимальные значения напряженности намагничивающего поля на поверхности изделия $H_{пр}$, соответствующие требуемым значениям $B_{\text{мат}}/\mu_d$), которые рекомендуется рассчитывать по предложенным в ГОСТ 21105-75 формулам в зависимости от магнитных характеристик материала контролируемого изделия. Например, необходимое намагничивающее поле для режима чувствительности В рассчитывают по формуле $H_{пр} = 21 + 1.1 H_c$.

Режимы необходимо опробовать в производственных условиях и оценивать, является ли напряженность поля достаточной для проведения контроля. Если поле мало, магнитный порошок не будет оседать в местах расположения дефектов. Наоборот, при слишком большой напряженности поля он будет скапливаться на неровностях поверхности, а также на выступах или углах деталей, давая ложные следы. В этом случае, чтобы улучшить условия выявления дефектов, необходимо корректировать режимы намагничивания.

Выше говорилось об определении оптимальной напряженности поля, необходимой для контроля с нужной чувствительностью. Не менее важным является вопрос о том, как эту напряженность поля на контролируемой поверхности получить и измерить.

Намагничивание детали является одной из основных операций контроля. От правильного выбора способа, направления и вида намагничивания во многом зависит чувствительность и возможность обнаружения дефектов. При МПД применяют три способа намагничивания: циркулярное, продольное (полюсное) и комбинированное. При намагничивании циркулярным способом ток (переменный, выпрямленный или импульсный) пропускают через изделие или сварной шов, или через их участки (рис. 4.13).

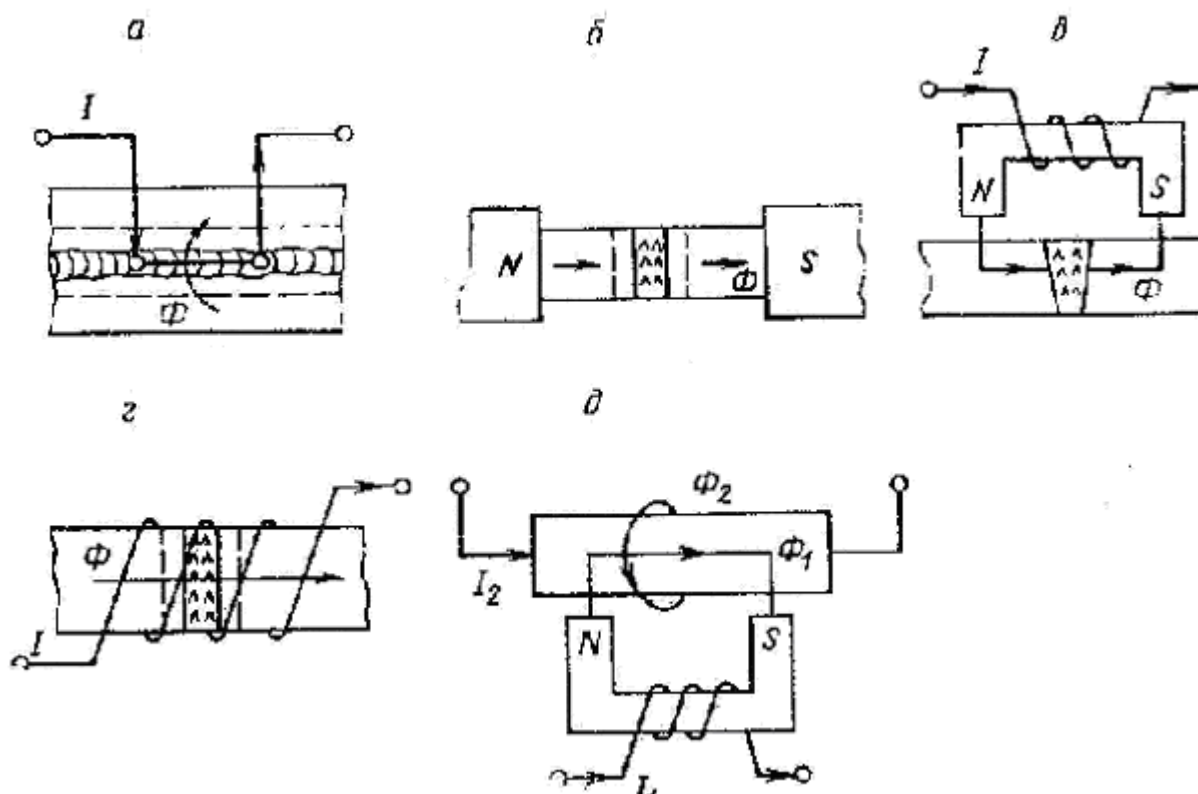


Рис. 4.13. Схемы намагничивания при МПД:

а – циркулярное; *б* – продольное полем постоянного магнита;
в – продольное электромагнитом; *г* – продольное в соленоиде;
д – комбинированное

Для продольного намагничивания изделие, сварной шов или их участки помещают в магнитное поле электромагнита, соленоида или (реже) постоянного магнита.

При комбинированном намагничивании магнитное поле возбуждается одновременно двумя полями: продольным полем электромагнита или соленоида и циркулярным магнитным полем.

Величину намагничивающего тока, необходимого для создания требуемой напряженности циркулярного поля, в ряде случаев можно рассчитать. При циркулярном намагничивании участков корпусных изделий выпрямленный ток рассчитывают по формуле

$$I = 1,2 H_{\text{пр}} \sqrt{l^2 + b^2}, \quad (4.8)$$

где l — расстояние между электродами, или длина контролируемого участка, м; b — ширина контролируемого участка, м.

При намагничивании участков переменным током

$$I = 1,5 H_{\text{пр}} \sqrt{l^2 + b^2}. \quad (4.9)$$

Для циркулярного намагничивания изделий, имеющих в сечении круг, шестигранник или квадрат, значение I определяется по формуле

$$I = \pi d H_{\text{пр}}, \quad (4.10)$$

где d — диаметр или приведенный диаметр сечения $d = 2\sqrt{S/\pi}$. Здесь S — площадь сечения, м^2 .

4.3. Магнитографический метод

Сущность магнитографического метода заключается в следующем: производится запись магнитных полей рассеяния над дефектами на магнитную ленту путем намагничивания контролируемого участка сварного шва и околошовной зоны вместе с прижатой к его поверхности магнитной лентой (см. рис. 4.14,а). Далее производится считывание сигналов с ленты с помощью специальных воспроизводящих устройств — магнитографических дефектоскопов, оснащенных вторичными преобразователями в виде феррозонда или индукционной головки. Этот сигнал преобразуется и наблюдается на экране электронно-лучевой трубки дефектоскопа или фиксируется самопишущим вольтметром (см. рис. 4.14,б).

Поскольку поля дефектов обычно фиксируют на ленту в приложенном магнитном поле, а считывание информации в виде остаточного магнитного потока намагниченной ленты производят вне поля, то такой двухступенчатый процесс улучшает выявляемость дефектов.

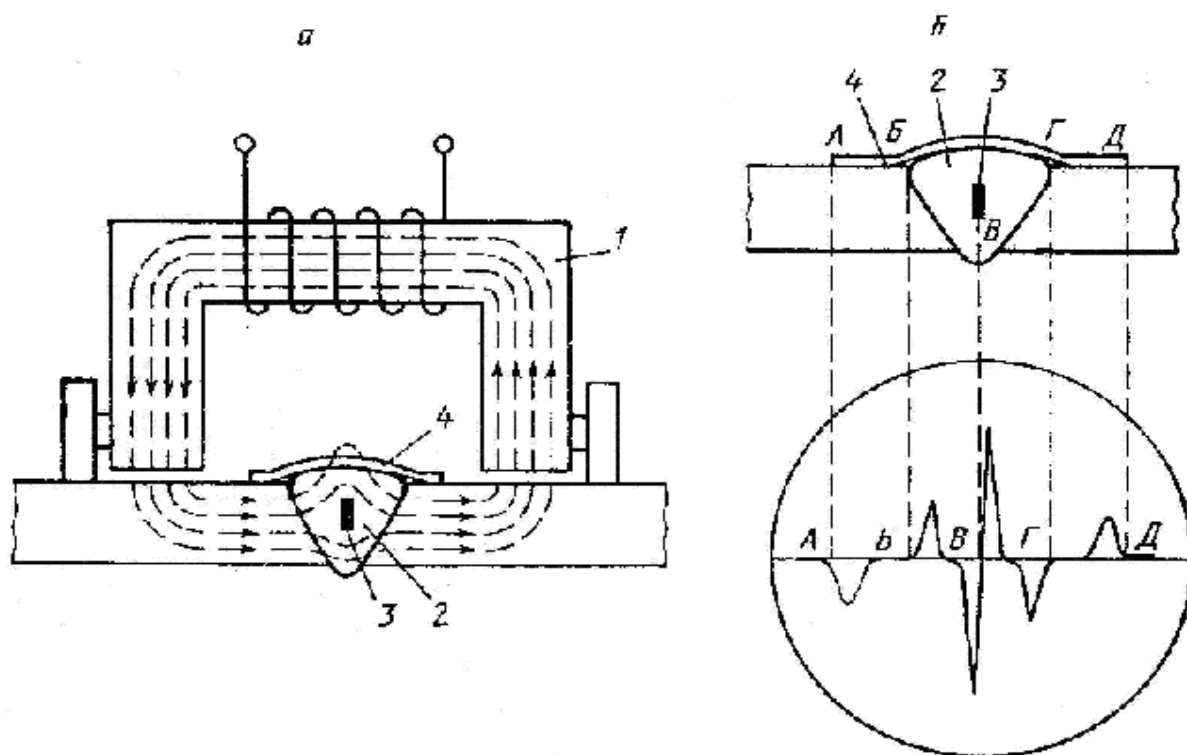


Рис. 4.14. Схема магнитографического контроля сварного шва:
 1 – намагничивающее устройство; 2 – сварной шов; 3 – дефект; 4 – магнитная лента

Магнитографический метод позволяет уверенно выявлять поверхностные или подповерхностные протяженные дефекты типа трещин, непроваров, а также скопления шлаковых включений и газовых пор, ориентированных преимущественно поперек направления намагничивающего поля. Значительно хуже выявляются одиночные шлаковые включения и поры, имеющие округлую форму, а также трещины и непровары, залегающие на глубине свыше 3 мм.

Чувствительность магнитографического метода определяется отношением вертикального размера минимального выявленного дефекта к толщине контролируемого металла и выражается в процентах. Критерием выявляемости служит допустимое отношение амплитуды сигнала A_d от этого дефекта к уровню сигнала от случайных помех шума $A_{ш}$. При уменьшении допустимого отношения $A_d/A_{ш}$ чувствительность увеличивается, однако уменьшается вероятность уверенного выявления дефекта. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо оптимизировать величину такого критерия в зависимости от вида дефекта, положения его внутри шва, режима намагничивания и типа применяемой ленты.

На чувствительность магнитографического метода сильно влияют высота и форма выпуклости шва, а также состояние его поверхности. Наилучшие результаты получают при контроле сварных швов, выполненных автоматической сваркой под флюсом. При контроле сварных швов с грубой чешуйчатостью требуются предварительные зачистка и устранение недопустимых неровностей.

Геометрия шва оказывает значительное влияние на чувствительность метода. Коэффициент формы выпуклости шва $\Psi = e/h$ (e — ширина выпуклости; h — высота выпуклости), при котором дефекты любых размеров, не выходящие на поверхность, не могут быть выявлены; $\Psi_{\max} = 7$.

Н а м а г н и ч и в а ю щ и е у с т р о й с т в а .

При магнитографической дефектоскопии сплошности сварных соединений используют специальные намагничивающие устройства, обеспечивающие намагничивание сварного шва в поперечном направлении. Чаще всего применяют электромагниты постоянного тока, так называемые передвижные намагничивающие устройства (ПНУ). Они состоят из П-образного магнитомягкого магнитопровода и обмотки, содержащей 500—600 витков толстого медного провода. Намагничивающая система опирается на четыре колеса из немагнитного материала, которые расположены так, что при установке намагничивающего устройства на контролируемое изделие между его поверхностью и полюсами образуется воздушный зазор, позволяющий легко перемещать ПНУ по контролируемой поверхности. ПНУ являются универсальными устройствами, которые позволяют контролировать кольцевые сварные швы труб, сосудов, емкостей различного диаметра и плоских сварных конструкций. Для этой цели их комплектуют сменными полюсными наконечниками. Промышленность выпускает несколько типоразмеров намагничивающих устройств ПНУ (ПНУ-М1, ПНУ-М2 и т. д.), предназначенных для контроля сварных стыков труб диаметром 150—1 200 мм и плоских изделий со стенками толщиной до 16 мм. ПНУ обладают намагничивающей силой до 20 000 ампер-витков, достаточной для намагничивания до состояния технического насыщения сварных соединений указанной толщины. Все перечисленные ПНУ питаются от источников постоянного тока. В заводских условиях могут быть использованы выпрямители с выходным напряжением 60 В, рассчитанные на ток нагрузки 40—50 А.

Магнитные ленты.

Для магнитографического контроля применяют специальные магнитные ленты типов МК-1 (на триацетатной основе) и МК-2 (на лавсановой основе). Эти ленты имеют низкую коэрцитивную силу ($H_c \approx 8000$ А/м), поэтому их используют при контроле сварных швов изделий из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Для изделий из высоколегированных и углеродистых сталей лучше использовать магнитные ленты типов 2 и 6, обладающие большей коэрцитивной силой. Их использование обусловлено значительным уровнем намагничивающих полей, применяемых для контроля таких изделий, что приводит к насыщению и потере чувствительности низкокоэрцитивных лент.

Магнитографические дефектоскопы.

Для воспроизведения магнитной записи сварных швов применяют магнитографические дефектоскопы, состоящие из считывающего устройства — вращающегося барабана с индукционными головками или феррозондами, из электронного усилителя, генератора развертки и электронно-лучевой трубки, служащей индикатором. Промышленность выпускает дефектоскопы, имеющие два вида индикации: импульсную и телевизионную. Наиболее совершенными являются дефектоскопы типов МДУ-2У и МГК-1, обеспечивающие одновременно импульсную и телевизионную индикации на одном экране двухлучевой трубки.

Магнитографический контроль предусматривает следующую последовательность технологических операций:

1) подготовка изделия к контролю, которая заключается в удалении с поверхности контролируемого шва остатков шлака, брызг расплавленного металла, грязи, снега и т. д.;

2) наложение ленты на поверхность сварного соединения: при контроле кольцевых швов ленту накладывают магнитным слоем вниз и плотно прижимают к поверхности шва по всему периметру трубы с помощью эластичного резинового пояса; при контроле сварных швов плоских изделий ленту прижимают ко шву специальной эластичной подушкой;

3) намагничивание, для чего на поверхность изделия помещают намагничивающее устройство и обеспечивают необходимый режим намагничивания. При намагничивании необходимо следить, чтобы по-

люса электромагнита во время перемещения вдоль шва были расположены относительно его оси симметрично;

4) воспроизведение: по окончании намагничивания ленту снимают с поверхности шва и воспроизводят полученную на ней магнитную запись с помощью магнитографического дефектоскопа. Перед воспроизведением дефектоскоп настраивают по эталонной магнитограмме с записью магнитного поля дефекта минимально допустимых размеров. Во время воспроизведения регистрируются все дефекты, амплитуда импульса от которых на экране осциллографа превышает амплитуду импульса от эталонного дефекта.

При использовании выпускаемых промышленностью намагничивающих устройств метод позволяет контролировать сварные изделия и конструкции из листовой стали толщиной до 20 мм. Магнитографический метод применяют в основном для контроля стыковых сварных швов при строительстве газонефтепроводов. В настоящее время ведутся работы по внедрению метода в других отраслях промышленности. В теплоэнергетике магнитографический метод в комплексе с ультразвуковым находит ограниченное применение.

4.4. Феррозондовый метод

Феррозондовый метод является одним из наиболее чувствительных и наиболее легко поддающихся автоматизации методов. Его принцип основан на обнаружении полей дефектов с помощью магниточувствительных элементов — феррозондов. Для магнитной дефектоскопии обычно применяют феррозонды, собранные по градиентометрической схеме. По сравнению с феррозондом-полимером градиентометр имеет преимущество в том, что на его показания не влияют посторонние магнитные поля, имеющие гораздо меньший градиент, чем поле дефекта.

В магнитной дефектоскопии применяют обычно феррозонды длиной 0,5—2 мм, что связано с необходимостью выявления дефектов малых размеров. Частота тока возбуждения — 100—300 кГц. С помощью таких феррозондов могут выявляться поверхностные дефекты глубиной 0,1 мм и более, а также дефекты, залегающие на глубине 8—15 мм. Контроль проводят как в процессе намагничивания, так и на остаточной намагниченности. Контроль в режиме остаточной намагниченности более прост и удобен, но возможен только для изделий из магнитотвердых сталей.

Феррозондовый метод широко применяют для контроля сплошности стальных труб, прутков, заготовок и др. Разработаны и введены в эксплуатацию феррозондовые установки типа МДСШ, предназначенные для контроля качества продольных швов сварных труб. Перспективно применение данного метода для контроля протяженных сварных швов стальных изделий или конструкций с небольшой кривизной поверхности. В этом плане особенно привлекательны высокая чувствительность метода и возможность автоматизации контроля.

Для механизированного контроля поверхности и сварных соединений толстостенных ферромагнитных изделий типа обечаек, барабанов котлов, корпусов реакторов на наличие поверхностных дефектов и дефектов на глубине до 5 мм применяют установку «Радиян-1М». Действие установки основано на намагничивании изделия переменным магнитным полем и считывании градиентов магнитных полей рассеяния феррозондами-градиентометрами.

Кроме дефектоскопии, феррозонды используют для магнитных измерений, толщинометрии, структуроскопии, а также для контроля степени размагниченности деталей после магнитного контроля.

4.5. Магнитный контроль структуры и физико-механических свойств

В основу магнитной структуроскопии положена корреляция (однозначная взаимосвязь) между магнитными и механическими свойствами, которая существует для многих ферромагнитных сплавов и сталей. Режим термической обработки одновременно влияет как на магнитные, так и на механические свойства сталей. Поэтому в большинстве случаев, когда магнитные свойства коррелируют с твердостью или другими механическими свойствами, они также однозначно связаны с режимом термообработки.

Коэрцитивная сила H_c является одной из наиболее структурно-чувствительных характеристик магнитных свойств ферромагнетиков. По значению H_c можно определить твердость, глубину цементованного слоя, глубину активного слоя, закаливаемого токами высокой частоты.

Разбраковку изделий осуществляют с помощью специальных приборов — коэрцитиметров. Наибольшее применение нашли коэрцитиметры с приставным П-образным электромагнитом типа КИФМ-1.

Принцип работы коэрцитиметра заключается в перемагничивании изделия по предельной петле гистерезиса путем изменения значения величины тока в обмотках электромагнита и регистрации момента перехода намагниченности изделия через ноль. Значение величины тока в обмотках электромагнита при этом пропорциональна H_c . Для определения момента полной компенсации магнитного потока на контролируемом участке изделия применяют феррозондовые преобразователи. Коэрцитивная сила неоднозначно характеризует структуру и твердость некоторых сталей, например, закаленных сталей У8, ШХ15. В этом случае может быть применен способ магнитной проницаемости, основанный на том, что для большей части термически обработанных сталей наблюдается корреляция между магнитной проницаемостью и твердостью. Градуировка приборов обычно основана на сравнении параметров контролируемой и эталонной детали. Твердость последней определяется механическим способом по Роквеллу. Разность магнитных проницаемостей испытуемой и эталонной деталей преобразуется с помощью специального датчика в электрический сигнал, который поступает на исполнительный механизм, осуществляющий автоматическую разбраковку деталей в зависимости от значения величины и фазы сигнала. Данный принцип заложен в основу действия дифференциального магнитного прибора ПМПК-2, предназначенного для контроля структуры и твердости деталей после термической обработки по магнитной проницаемости.

Другой областью применения магнитных методов неразрушающего контроля является ферритометрия — определение содержания ферритной фазы (а-фазы) в сварных швах и изделиях из сталей аустенитного и ферритно-аустенитного классов. При содержании ферритной фазы выше нормы резко снижается пластичность сталей при механической обработке, образуются трещины и другие нарушения сплошности. При повышенном содержании ферритной фазы в сварных соединениях резко уменьшается их прочность.

Для определения содержания а-фазы могут быть использованы приборы, действие которых основано на относительном измерении магнитной проницаемости испытуемого материала. Их калибровка осуществляется по эталонным образцам из стали контролируемой марки с известным содержанием ферритной фазы.

Для контроля содержания а-фазы в сварных швах изделий из сталей аустенитного класса применяют прибор МФ-10Ф, а для контроля

а-фазы в сварочной проволоке — прибор ФЦ-2. Прибор обеспечивает непрерывное локальное измерение объемного содержания а-фазы в стали при сканировании поверхности изделия датчиком. Содержание этой фазы оценивается по показаниям стрелочного индикатора (в процентах по объему). В качестве намагничивающего элемента датчика использован постоянный магнит, а в качестве измерителя магнитного поля — дифференциальный феррозонд. Оба элемента совмещены в конструкции (накладном датчике), обеспечивающей отстройку от начального сигнала. Магнитопроводы феррозонда расположены у полюса магнита таким образом, что результирующее поле, действующее вдоль каждого магнитопровода, равно нулю до тех пор, пока магнит не взаимодействует с материалом, обладающим ферромагнитными свойствами. В результате взаимодействия с ферритной фазой появляется продольная относительно магнитопровода составляющая поля и пропорциональный ей электрический сигнал феррозонда, величина которого зависит от содержания а-фазы.

4.6. Вихревой контроль

Методы вихревого контроля основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем. Интенсивность и распределение вихревых токов в объекте зависят от его геометрических и электромагнитных параметров, а также от взаимного расположения измерительного преобразователя и объекта. В качестве преобразователей используют индуктивные катушки. Обычно применяют одну генераторную и одну или несколько измерительных (приемных) катушек (трансформаторный преобразователь) либо одну катушку, выполняющую функции генераторной и приемной (параметрический преобразователь).

Для контроля все изделие или его часть помещают в поле генераторной катушки (см. рис. 4.15) и переменным магнитным потоком Φ_0 возбуждают вихревые токи (ВТ). Информацию о свойствах изделия датчик получает через магнитный поток $\Phi_{\text{в}}$, созданный ВТ с плотностью $j_{\text{в}}$. Векторы напряженности возбуждающего поля H_0 и поля вихревых токов $H_{\text{в}}$ направлены навстречу друг другу. ЭДС в обмотке датчика в каждый момент времени пропорциональна разности потоков $\Phi_0 - \Phi_{\text{в}}$.

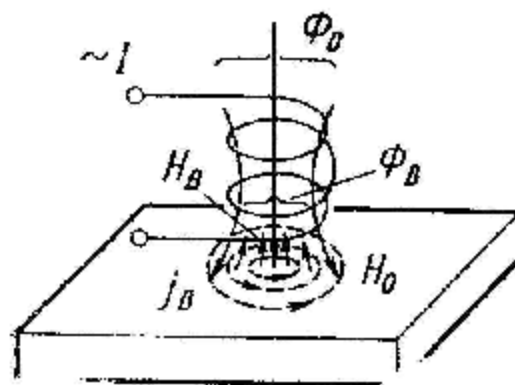


Рис. 4.15. Электромагнитное поле вихретокового датчика

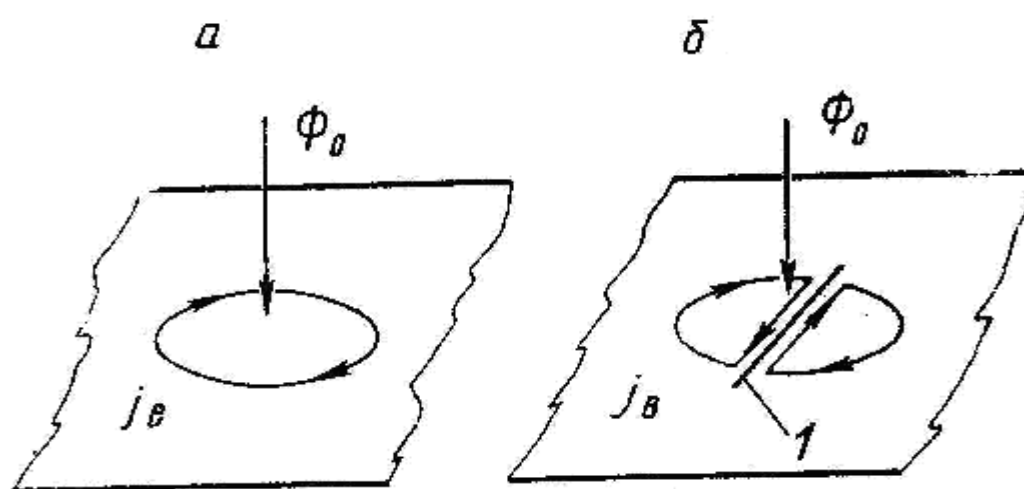


Рис. 4.16. Схемы формирования поля вихревых токов в месте дефекта типа трещины

Регистрируя приращение комплексного сопротивления параметрической катушки или приращение комплексного напряжения на выходе трансформаторного преобразователя, судят о результатах испытаний.

Нарушения сплошности являются препятствием для вихревых токов, их действие эквивалентно увеличению сопротивления поверхностного слоя металла и приводит к изменению сигнала датчика. Если под датчиком окажется длинная глубокая трещина l , то контур ВТ, представляющий собой при отсутствии трещины окружность (рис. 4.16,а), разделится ею на две части (рис.4.16,б). ВТ вдоль трещины идут в противоположных направлениях, образуя дополнительное магнитное поле дефекта, которое и обуславливает приращение сигнала

датчика. По изменению амплитуды и фазы тока в катушке можно определить наличие дефекта.

На сопротивление поверхностного слоя металла большое влияние оказывает также его электрическая проводимость, а у ферромагнитных материалов — еще и магнитная проницаемость, поэтому вихретоковый контроль можно применять для бесконтактного измерения электрической проводимости материала изделия. Поскольку электрическая проводимость металлов зависит от их химического состава, структуры и т. д., то метод может быть использован для сортировки сплавов по маркам и для определения качества термической обработки деталей. Магнитная проницаемость значительно больше, чем электрическая проводимость, зависит от химического состава, структуры и состояния ферромагнитных материалов. В связи с этим контроль изделий из ферромагнитных материалов в большей степени основывается на определении изменения свойств, связанных с магнитной проницаемостью.

На результаты контроля существенно влияют геометрические факторы: расстояние между датчиком и поверхностью контролируемого изделия, их взаимное расположение, форма и размеры изделия. В ряде случаев они затрудняют практическое применение метода, т. к. отклонения размеров деталей могут вызвать более сильное изменение параметров преобразователя, чем исследуемые свойства металлов (электрическая проводимость и магнитная проницаемость). Для устранения влияния мешающих факторов приходится применять специальные методы отстройки, позволяющие повышать чувствительность приборов к измеряемому параметру.

Вихретоковые методы применяют для контроля размеров листов, прутков, проволоки и труб, а также для контроля толщины стенок труб и металлических или неметаллических покрытий. В этом случае контроль затрудняют изменение электрической проводимости, магнитной проницаемости (для ферромагнитных материалов) и наличие нарушений сплошности.

Таким образом, вихретоковые методы позволяют осуществлять многопараметровый контроль. При контроле одного из параметров влияние остальных на сигнал преобразователя становится мешающим и это влияние необходимо уменьшать настройкой прибора.

Промышленность выпускает следующие приборы:

вихретоковые дефектоскопы ВД-30П, АСК-12, ЭМИД-2М, ППД-1М, ВД-20НД и др., предназначенные для контроля сплошности магнитных и немагнитных материалов;

вихретоковые структуроскопы ВС-10П, ВС-30НП, ЭМИД-4М, ВС-30К и др. для неразрушающего контроля термической обработки и сортировки материалов по маркам;

измерители электрической проводимости ИЭ-1, ИЭ-1М, ВЭ-20Н, ВК-20Б и др., предназначенные для контроля качества термической обработки, химического состава, сортировки неферромагнитных материалов по маркам;

толщиномеры ВТ-10Э, ТВФ-1, ВТ-20Н, ВТ-30Н, ТПН-1М и др. для измерения толщины листов и стенок труб, а также толщины металлических и неметаллических покрытий.

Вихретоковые методы не нашли пока широкого применения для дефектоскопии сварных соединений. Они могут быть использованы для фазового и структурного анализа металла в сварном шве и околошовной зоне. В энергетике вихретоковые приборы применяют для обнаружения и определения глубины трещин в сварных соединениях паропроводных труб из аустенитных сталей. Контроль сплошности сварных швов изделий из ферромагнитных материалов невозможен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Выборнов В. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
- 2 Гурвич А. К. Ультразвуковой контроль сварных швов / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов Киев: Техника, 1972. 460 с.
- 3 Ермолов И. Н. Методы ультразвуковой дефектоскопии. М. : Московский горный институт, 1967. 267 с.
- 4 Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М. : Машиностроение, 1981. 240 с.
- 5 Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справ. в 2 ч. Ч. 2 / под ред. В. Б. Ключева. М. : Машиностроение, 1986. 351 с.
- 6 Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голяминой. М. : Советская энциклопедия, 1979. 400 с.

Учебное издание

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Автор-составитель **Бирюков** Дмитрий Юрьевич

Редактор *И. В. Меркурьева*

Компьютерная верстка *А.И.Бирюковой*

ИД №06263 от 12.11.2001 г.

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Плоская печать

Усл.печ.л.

Уч.-изд.л. 7,8

Тираж 50 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
rio@mail.ustu.ru

Ризография НИЧ УГТУ-УПИ,
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19