

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 620.179.17
ББК 32.87
П75

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «3» мая 2023 г.,
протокол № 9

Составители: канд. техн. наук, доц. С. С. Сергеев;
ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

В методических рекомендациях кратко изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ. Методические рекомендации разработаны в соответствии с учебной программой по дисциплине «Приборы и системы акустического контроля» для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения.

Учебное издание

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

1 Изучение принципа действия, технических характеристик и правил эксплуатации акустических приборов и вспомогательных средств	4
2 Определение основных параметров ультразвукового контроля посредством контрольных и стандартных образцов	5
3 Ультразвуковой контроль плоскопараллельных образцов, определение координат и размеров дефектов	11
4 Сравнительный ультразвуковой контроль толщины плоскопараллельных и трубных образцов.....	17
5 Исследование особенностей ультразвукового контроля стыковых сварных соединений.....	21
6 Ультразвуковой контроль структуры металла.....	25
7 Изучение методики ультразвукового контроля с преобразователями на фазированных решетках	29
8 Изучение физических основ и методики TOFD-метода контроля сварных соединений.....	34
9 Комплексный контроль сварных соединений.....	39
Список литературы	44

1 Изучение принципа действия, технических характеристик и правил эксплуатации акустических приборов и вспомогательных средств

Цель работы: изучить основные принципы действия, технические характеристики и правила эксплуатации акустических приборов и вспомогательных средств.

1.1 Основные теоретические положения

При работе с приборами имеются некоторые общие правила, обеспечивающие безопасную эксплуатацию и охрану труда.

Каждый прибор должен иметь паспорт и инструкцию по эксплуатации, которыми руководствуется обслуживающий персонал. Без изучения инструкции пользоваться приборами, установками и комплексами запрещается. Перед включением в сеть проверяется наличие заземления, а коммутирующие и регулирующие устройства выставляются в исходное состояние.

Работа в лаборатории проводится под наблюдением преподавателя и лаборанта. При этом к лабораторной установке должен быть обеспечен свободный доступ: запрещены загромождение проходов, хождение студентов и посторонних лиц во время занятий.

Мероприятия по технике безопасности и охране труда, технической надежности и пожарной защите являются составной частью подготовки и проведения лабораторных занятий. Эти мероприятия должен знать и выполнять каждый студент.

1.2 Выполнение работы

Приступая к выполнению работы, студент обязан ознакомиться с порядком ее проведения, правилами безопасной работы на данном лабораторном стенде (оборудовании).

Перед включением прибора или аппарата в электросеть необходимо убедиться в исправности заземляющих элементов, качества изоляции.

Эксплуатация приборов должна производиться только в присутствии преподавателя (лаборанта).

По окончании работ в лаборатории приборы (оборудование) приводятся в первоначальное состояние, инструкции сдаются лаборанту. Должен производиться осмотр всех рабочих мест с обязательным отключением всех цепей питания и освещения.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключаются поражающие факторы электрического тока?
- 2 Почему электрический ток и напряжение электрического тока является основным поражающим фактором?

3 Чему равна величина условно безопасного напряжения?

4 Почему переменный электрический ток более опасен по сравнению с постоянным?

2 Определение основных параметров ультразвукового контроля посредством контрольных и стандартных образцов

Цель работы: изучить назначение, конструкцию и технические данные контрольных образцов, методику определения основных параметров контроля с помощью комплекта образцов; исследовать практически параметры и характеристики контроля.

2.1 Основные теоретические положения

Образцом называют средство УЗ-контроля в виде твердого тела, предназначенное для хранения и воспроизведения физических величин (геометрических размеров, скорости звука, затухания), используемых для проверки или настройки параметров дефектоскопа и преобразователей [1–9].

Различают государственные стандартные образцы (ГСО или СО) и стандартные образцы предприятий (СОП).

СО предусмотрены стандартами, в которых указан материал, из которого они изготовлены, и конструкция. СО предназначены для проверки и настройки аппаратуры при контроле широкого ассортимента продукции. СО предназначены для проверки параметров преобразователя и дефектоскопа. Комплект КОУ-2 (СО-1, СО-2, СО-3, СО-4) применяют при контроле изделий с плоской поверхностью ПЭП (пьезоэлектрический преобразователь) шириной до 20 мм на частоту 1,25 МГц и выше.

СОПы рекомендованы ведомственными нормативно-техническими документами (НДТ) или руководящими документами предприятий. Предназначены для настройки аппаратуры при контроле определенного вида продукции.

Внешний вид наиболее распространенных стандартных образцов СО-1, СО-2 и СО-3 приведен на рисунках 2.1–2.3, назначение и положения преобразователя, при которых происходит проверка основных параметров, показаны на рисунках 2.4–2.6.

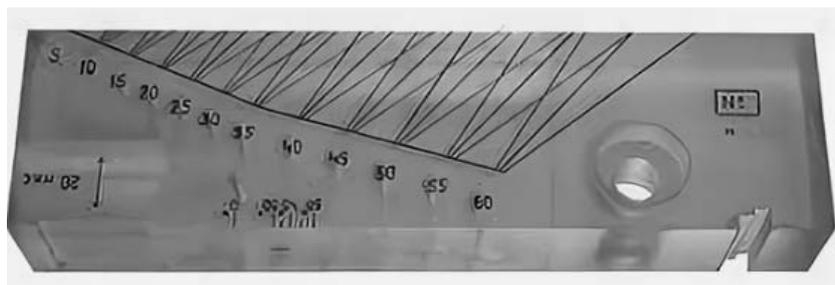


Рисунок 2.1 – Стандартный образец СО-1

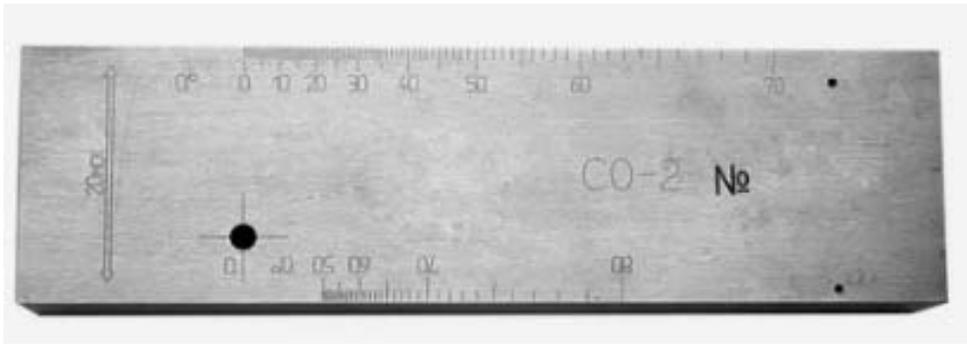


Рисунок 2.2 – Стандартный образец СО-2



Рисунок 2.3 – Стандартный образец СО-3

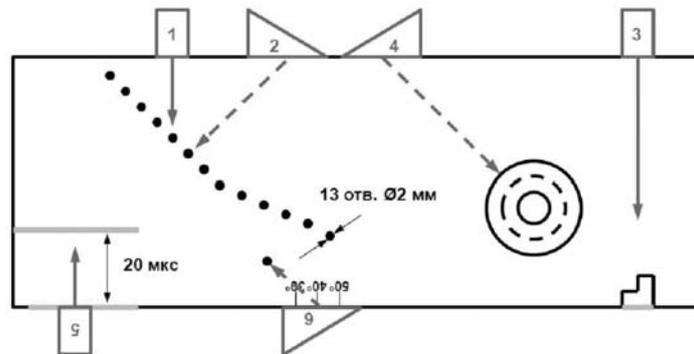


Рисунок 2.4 – Положение преобразователя на СО-1

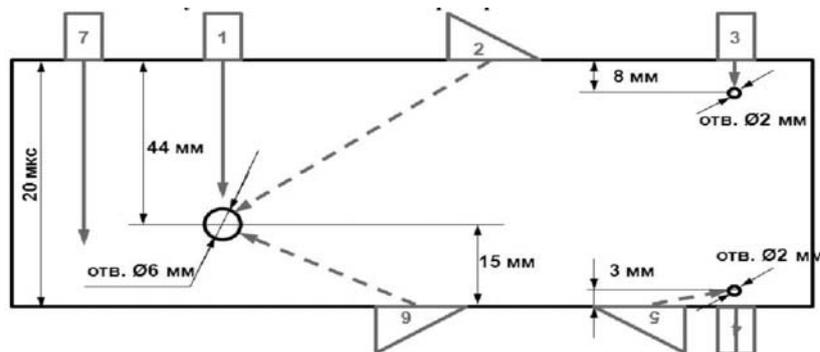


Рисунок 2.5 – Положение преобразователя на СО-2

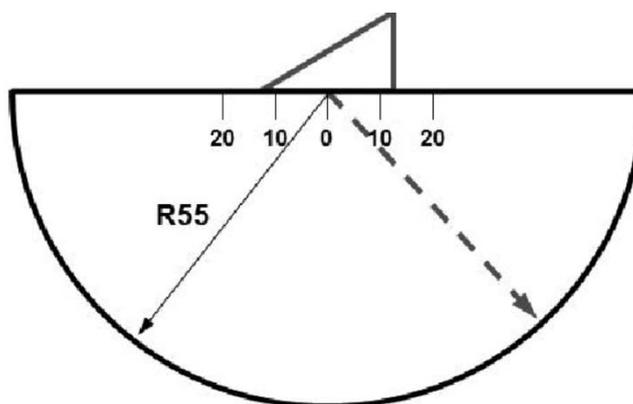


Рисунок 2.6 – Положение преобразователя на СО-3

2.1.1 Основные параметры контроля. Основные параметры, определяющие достоверность результатов ультразвукового контроля и подлежащие определению посредством комплекта контрольных образцов, приведены в таблице 2.1; параметры указаны в последовательности, соответствующей порядку их измерения.

Таблица 2.1 – Основные параметры, определяемые посредством контрольных образцов

Наименование параметра	Условное обозначение	Размерность	Контрольный образец
1 Стрела преобразователя	n	мм	КО № 3
2 Угол ввода	α	град	КО № 2 или КО № 2А
3 Частота ультразвуковых колебаний	f	МГц	КО № 3 или КО № 4
4 Условная чувствительность	K_y	мм, дБ	КО № 1, КО № 2
5 Предельная чувствительность	S_n	мм ²	КО № 2 или КО № 2А
6 Мертвая зона	M	мм	КО № 2 или КО № 2А
7 Погрешность глубиномера	A_z	%	КО № 1 или КО № 2
8 Разрешающая способность	T_p	мкс	КО № 1
9 Диаграмма направленности наклонного преобразователя	$\Phi(\alpha)$	–	КО № 2 или КО № 2А

2.2 Методика определения параметров контроля

2.2.1 Определение стрелы преобразователя. Для определения данного параметра используют контрольный образец № 3 (см. рисунок 2.6). Величину n находят по шкале образца между передней гранью преобразователя и проекцией точки выхода луча на боковую плоскость преобразователя. В свою очередь, точка выхода УЗ-луча находится на призме преобразователя против центра полуокружности образца при установке преобразователя в положение с максимальной амплитудой эхосигнала от цилиндрической поверхности.

При контроле материалов, в которых скорость распространения поперечной волны меньше, чем в стали 20, а также при использовании преобразователя с углом падения волны, близким ко второму критическому углу в стали 20, следует

применять образцы из контролируемого материала.

2.2.2 Определение угла ввода луча. Угол α ввода луча измеряют по контрольному образцу № 2 (см. рисунок 2.5), если контролируемый объект выполнен из малоуглеродистой или низколегированной стали.

При контроле объектов из других материалов угол ввода измеряют по контрольному образцу № 2А, плита которого изготовлена из контролируемого материала.

Угол ввода луча отсчитывают по шкале контрольного образца против метки, соответствующей точке выхода луча, при установке преобразователя в положение, соответствующее максимальной амплитуде эхосигнала от отверстия диаметром 6 мм.

При необходимости определения значения углов ввода луча с высокой точностью измерение углов следует производить при температуре t_k , при которой осуществляется контроль, или вносить поправку $\Delta\alpha$, если измерение выполнялось при другой температуре t_u .

2.2.3 Подбор и сравнение преобразователей по частоте колебаний. Приближенные значения частоты f ультразвуковых колебаний преобразователей оценивают косвенным методом по контрольным образцам № 3 и 4 с целью подбора и сравнения преобразователей, изготовленных организациями, эксплуатирующими дефектоскопы.

Образец № 4 применяют для оценки частоты преобразователей с углом ввода луча $\alpha = (50 \pm 2)^\circ$. Если проверяется отличный преобразователь, то следует сменить призму.

Параметр f определяют следующим образом:

– устанавливают преобразователь на контактную поверхность образца № 4 и выбирают сегментный отражатель, амплитуда эхосигнала от которого максимальна;

– измеряют в децибелах максимальную амплитуду U_1 эхосигнала от выбранного сегментного отражателя;

– измеряют в децибелах максимальную амплитуду U_0 эхосигнала от вогнутой поверхности в образце № 3;

– рассчитывают разность ($\Delta U = U_1 - U_0$) измеренных амплитуд.

При подборе преобразователей по частоте к одной группе могут быть отнесены преобразователи, для которых значения ΔU не отличаются более чем на 2 дБ. При этом в пределах группы преобразователи должны быть с равными значениями диаметра пьезопластины и угла ввода луча.

Приближенное значение частоты f , МГц, УЗ-колебаний, излучаемых преобразователем, может быть рассчитано по формуле

$$f = \frac{55 + 0,688r}{1,14\sqrt[3]{S_a}} \sqrt[3]{K^2}, \quad (2.1)$$

где K – значение ΔU , отн. ед.;

r – средний путь ультразвука в призме, $r = 13$ мм;

S_a – площадь пьезоэлемента, мм²; $S_a = \pi b^2$.

2.2.4 Определение условной чувствительности. Условная чувствительность – чувствительность к искусственным несплошностям в стандартных образцах. Определяется:

– глубиной залегания наиболее удаленного выявляемого отверстия диаметра 2 мм в СО-1 при определенной настройке дефектоскопа в миллиметрах (см. рисунок 2.4, положение преобразователя – 1, 2);

– числом децибел, показывающим, на сколько нужно изменить чувствительность от настройки по отверстию диаметром 6 мм в СО-2, чтобы получить заданную предельную чувствительность (см. рисунок 2.5).

Понятие «условная чувствительность» нужно для того, чтобы запомнить и воспроизвести чувствительность дефектоскопа при замене преобразователя на другой того же типа или каких-нибудь других изменениях в аппаратуре.

Для дефектоскопов с аттенюаторами параметр K_y определяют по образцу № 1 или 2. По образцу № 2 K_y выражают разностью в децибелах между показаниями аттенюатора при данной настройке прибора N_x и N_0 , соответствующем максимальному ослаблению, при котором еще амплитуда эхосигнала от цилиндрического отверстия диаметром 6 мм на глубине 44 мм соответствует порогу срабатывания автоматической сигнализации дефекта или достигает заданного уровня на экране, т. е.

$$K_y = N_x - N_0. \quad (2.2)$$

2.2.5 Определение предельной чувствительности. Предельная чувствительность определяется посредством SKH-диаграммы, входящей в комплект КОУ-2.

2.2.6 Определение мертвой зоны. Данный параметр для дефектоскопа с наклонным преобразователем проверяют по образцу № 2 или 2А при чувствительности, необходимой для проведения контроля (см. рисунок 2.5, положения преобразователя – 3, 4, 5). Если контролируется изделие из малоуглеродистой или низколегированной стали, мертвую зону M определяют по образцу № 2, если из другого материала – по образцу № 2А, изготовленному из этого материала. При этом мертвая зона составляет не более минимальной глубины расположения отверстия диаметром 2 мм, уверенно выявляемого всеми индикаторами при заданной настройке дефектоскопа.

2.2.7 Определение погрешности глубиномера. Погрешность глубиномера A_r определяют по контрольному образцу № 1 или 2 (см. рисунки 2.4 и 2.5) в соответствии с выражением

$$A_r = \frac{T_n - T_0}{T} \cdot 100 \%, \quad (2.3)$$

где T_n – интервал времени между двумя донными эхосигналами, измеренный по глубиномеру, мкс;

T_0 – номинальное значение интервала времени, указанное на контрольном образце, $T_0 = 20$ мкс.

Параметр T_n измеряют при установке преобразователя над прорезью в контрольном образце № 1 при температуре 20 °С или на контактную поверхность в середине образца № 2.

2.2.8 Определение разрешающей способности. Лучевая разрешающая способность (по дальности) T_p оценивается по минимальному интервалу времени между эхосигналами от «ступенчатой» отражающей поверхности при работе с прямым преобразователем (см. рисунок 2.4, положение преобразователя – 3) или между эхосигналами от смежных отверстий при работе с наклонным преобразователем в образце № 1 (см. рисунок 2.4, положение преобразователя – 4), фронты которых не сливаются.

2.2.9 Построение диаграммы направленности. Диаграмма направленности наклонного преобразователя в плоскости падения луча и угол раскрытия φ_k основного лепестка диаграммы на уровне K определяются по образцу № 2 или 2А в зависимости от марки контролируемого материала.

2.3 Приборы и оборудование

Оборудование для проведения лабораторной работы включает: ультразвуковой дефектоскоп, комплект преобразователей, измерительный инструмент, комплект контрольных и стандартных образцов.

2.4 Порядок выполнения работы

2.4.1 Изучить назначение, конструкцию и основные характеристики комплекта контрольных и стандартных образцов.

2.4.2 Изучить особенности методики определения основных параметров контроля посредством комплекта контрольных и стандартных образцов.

2.4.3 Подготовить к работе ультразвуковой дефектоскоп и подобрать преобразователи с углом наклона призмы 40°, рассчитанные на частоту 2,5 МГц и преобразователи с неизвестными параметрами.

2.4.4 Определить экспериментально параметры контроля согласно пп. 2.2.1–2.2.9.

2.4.5 Результаты экспериментов свести в таблицу.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, приборы и оборудование, таблицу с результатами экспериментов, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что понимается под условной и предельной чувствительностью?
- 2 Чем определяется угол ввода луча и как он измеряется?
- 3 Что понимается под лучевой разрешающей способностью?
- 4 Какие образцы входят в состав комплекта стандартных и контрольных образцов и для чего они предназначены?
- 5 Что такое стрела преобразователя?

3 Ультразвуковой контроль плоскопараллельных образцов, определение координат и размеров дефектов

Цель работы: изучить способы определения координат, измеряемые характеристики и признаки дефектов; изучить возможность определения типа дефекта по измеряемым признакам; выполнить измерение координат, характеристик и признаков дефектов, провести классификацию выявленных дефектов.

3.1 Основные теоретические положения

Процедура измерения координат дефекта состоит в определении положения преобразователя, соответствующего максимуму эхосигнала от дефекта; измерении глубиномером времени пробега УЗ-импульса от пьезопластины преобразователя до дефекта; расчете по результатам измерений координат дефекта относительно точки ввода O (рисунок 3.1). В современных дефектоскопах расчетные операции выполняются автоматически. Для этого глубиномер предварительно настраивают на скорость распространения импульса в протекторе прямого или призмы наклонного преобразователей [1–9].

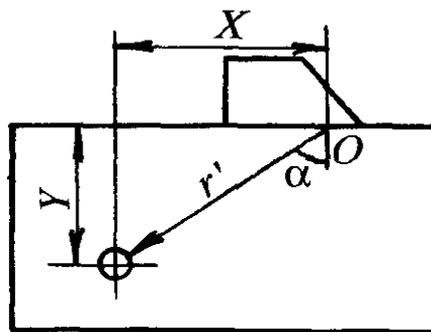


Рисунок 3.1 – Определение координат дефектов

Обозначим через (X_0, Z_0) координаты точки ввода O на поверхности объекта контроля (см. рисунок 3.1). Координата z направлена перпендикулярно к плоскости рисунка. Относительно точки O координаты дефекта при контроле наклонным преобразователем можно выразить формулами:

$$x = r' \sin \alpha; \quad y = r' \cos \alpha; \quad r' = c(t - t_3), \quad (3.1)$$

где r' – расстояние до дефекта;

t – время, измеренное глубиномером;

c – скорость распространения ультразвуковых волн;

t_3 – время пробега ультразвукового импульса в акустической задержке (призме преобразователя, жидких контактных слоях и т. д.);

α – угол ввода, определяемый выбором преобразователя.

Для прямого преобразователя $\alpha = 0$ и следовательно

$$y = H = c(t - t_3). \quad (3.2)$$

При контроле наклонным преобразователем однократно отраженным лучом (рисунок 3.2) глубина дефекта от поверхности ввода вместо формулы (3.1) определяется следующей формулой:

$$y = 2H - y_{изм}, \quad (3.3)$$

где $y_{изм}$ – глубина, измеренная дефектоскопом;

H – толщина объекта контроля.

Расстояние от точки ввода до дефекта определяется по формуле

$$x = r' \sin \alpha.$$

При контроле наклонным преобразователем объекта с цилиндрической поверхностью радиусом R (см. рисунок 3.2) координаты обнаруженного дефекта удобно измерять по окружности (например, гибкой линейкой, – расстояние $x' = OD_1$) и по радиусу от поверхности ввода ($y' = DD_1$) вместо измеряемых дефектоскопом значений x и y в прямоугольных координатах.

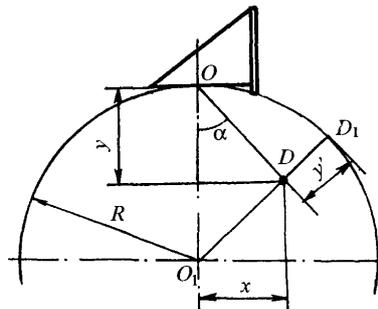


Рисунок 3.2– Измерение координат дефектов при контроле цилиндрических изделий

При неразрушающем контроле о дефекте судят по косвенным характеристикам, часть из которых можно измерить. Измеряемую характеристику, по которой принимают решение о возможном обнаружении дефекта или о его отсутствии, называют главной. В УЗ-дефектоскопии такой характеристикой является эквивалентная площадь дефекта. Сравнивая значения измеряемых характеристик выявленного дефекта и значений соответствующих характеристик эталонного отражателя, получают значения признаков дефекта. По значениям определенной совокупности признаков идентифицируют дефекты по классам, отображающим их потенциальную опасность.

Зная огибающие амплитуд при заданных диаграммах направленности, можно определить индикатрису рассеяния дефекта. Под индикатрисой рассеяния отражателя (дефекта) понимают нормированную функцию, описывающую поле отражаемой в направлении к преобразователю УЗ-волны, падающей на дефект.

Индикатриса наиболее полно характеризует конфигурацию и ориентацию дефекта. Однако определение как индикатрис рассеяния, так и огибающих амплитуд весьма сложно и трудоемко. В связи с этим в практике УЗ-дефектоскопии ограничиваются измерением числовых характеристик огибающих, называемых линейными и угловыми размерами дефекта (ΔL , ΔX , ΔH , $\Delta \gamma$). Эти характеристики так же, как и эквивалентную площадь дефекта S_3 , измеряют при контроле эхометодом одним преобразователем, включенным по совмещенной схеме.

К линейным относят условные протяженность ΔL_d , ширину ΔX_d и высоту ΔH_d ; к угловым – азимут γ_0 и угол индикации $\Delta \gamma_d$.

Размеры ΔL_d и ΔX_d характеризуются длиной зоны (в миллиметрах) перемещения преобразователя между некоторыми крайними положениями, в пределах которого воспринимается эхосигнал от дефекта.

Условная высота ΔH (в миллиметрах или микросекундах) определяется разностью значений глубины расположения дефекта, измеренных в крайних положениях преобразователя (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Признаки и измеряемые характеристики дефектов

Признак (обозначение и расчётная формула)	Измеряемая характеристика	Примечание
$K_{\Delta L} = \Delta L_d / \Delta L_0$	ΔL_d	Измеряют при постоянном относительном уровне отсечки
$K_{\Delta X} = \Delta X_d / \Delta L_0$	ΔX_d	
$K_\chi = \frac{\chi_d}{\chi_0} = \frac{\Delta X_d / \Delta L_d}{\Delta X_0 / \Delta L_0}$	$\Delta X_d ; \Delta H_d$	
$K_\mu = \frac{\mu_d}{\mu_0} = \frac{\Delta X_d / \Delta H_d}{\Delta X_0 / \Delta H_0}$	$\Delta X_d ; \Delta H_d$	Измеряют в одном и том же сечении при одинаковых крайних положениях ПЭП
γ_d	γ_d	Измеряют относительно нормали к оси шва
$K_{\gamma_d} = \Delta \gamma_{дц} / \Delta \gamma_{п}$	$\Delta \gamma_{дц}$	Измеряют на заданном уровне ослабления при повороте ПЭП от середины дефекта
$K_{\gamma_k} = \Delta \gamma_{дк} / \Delta \gamma_{п}$	$\Delta \gamma_{дк}$	

Азимут γ_0 дефекта, измеряемый в градусах, соответствует углу между нормалью к сечению объекта и плоскостью падения волны при установке преобразователя в положение, при котором достигается максимальная амплитуда эхосигнала. Угол индикации $\Delta\gamma$ характеризуется углом поворота плоскости падения волны в одну сторону от положения, при котором был определен азимут, до некоторого крайнего положения при неизменном расстоянии от точки ввода луча до точки на проекции дефекта на контактную поверхность объекта (рисунок 3.3).

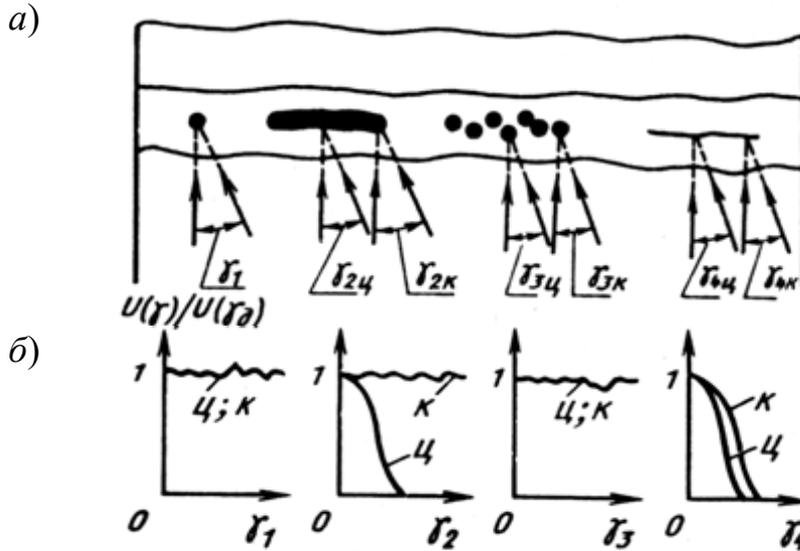


Рисунок 3.3 – Схемы измерения углов индикации (а) и огибающие амплитуд эхосигналов (б) при озвучивании центра и края дефектов различного типа

При измерении ΔL , ΔX , ΔH , $\Delta\gamma$ возможны два способа задания крайних положений преобразователя.

Способ 1. За крайние принимают такие положения преобразователя, при которых амплитуда эхосигнала достигает значения U_{\min}^1 , составляющего определенную часть A от своего максимального значения U_{\max} т. е.

$$U_{\min}^1 = A_{om} U_{\max},$$

где A_{om} – относительный уровень отсечки. Обычно $A_{om} = 0,5$ (–6 дБ).

Условные размеры ненаправленных (округлых) отражателей (дефектов), измеренные этим способом ($A_{om} = -6$ дБ), не зависят от их истинных размеров и монотонно растут с увеличением глубины их расположения.

Способ 2. За крайние положения преобразователя принимают такие, при которых амплитуда эхосигнала достигает некоторого заданного значения U_{\min}^{11} , не зависящего от максимальной амплитуды эхосигнала. Значение U_{\min}^{11} остается постоянным, если измерения выполняются при постоянной условной чувствительности ($K_V = \text{const}$), и меняется с глубиной залегания дефекта, если

измерения выполняются при постоянной предельной чувствительности ($S_{II} = \text{const}$). В любом случае относительный уровень отсечки зависит от эквивалентной площади выявленных дефектов. Значение U_{\min}^{11} , не связанное с максимальной амплитудой U_{\max} эхосигнала от дефекта, задается в документации на контроль.

Условные размеры, измеренные в соответствии с этим способом, во многом зависят от максимальной амплитуды эхосигнала от дефекта. Поэтому условные размеры ненаправленного дефекта связаны с их истинными размерами, т. к. последние определяют амплитуду эхосигнала. Измеренные условные размеры дефекта с круговой индикатрисой рассеяния не дают никакой новой полезной информации по сравнению с той, которая содержится в амплитуде эхосигнала от дефекта. Более того, значения L , X и H , измеренные при постоянной условной чувствительности, немонотонно зависят от глубины залегания дефекта.

Выбор того или иного способа задания крайних положений преобразователя при измерении условных размеров дефекта определяется поставленной задачей. Например, если нужно получить дополнительную информацию о конфигурации отражающей поверхности дефектов, размеры которых меньше ширины УЗ-пучка в месте расположения дефекта, целесообразен способ 1. Он предпочтителен также при оценке истинной протяженности дефектных участков, существенно превышающей ширину УЗ-пучка. При этом необходимо более точно определить границу дефектного участка. Она приблизительно совпадает с осью преобразователя в положении, соответствующем ослаблению амплитуды эхосигнала U_{\max} в 2 раза ($A = 0,5$), где U_{\max} – максимальная амплитуда эхосигнала при озвучивании края дефектного участка. Однако обычно вначале измеряют условные размеры дефектов по способу 2.

Из изложенного следует, что размеры L , X и H одного и того же дефекта существенно зависят от глубины его расположения и способа измерения и что значения X и H , каждое в отдельности, однозначно не определяют размеры, конфигурацию и ориентацию дефекта в сечении. В то же время, сравнивая условные размеры дефекта, можно получить дополнительную информацию о выявленном дефекте, не содержащуюся в амплитуде эхосигнала.

Одна из главных задач УЗ-контроля – определение совокупности реальных параметров дефекта (тип, ориентация, размеры).

Методы распознавания типа дефекта. Методы первой группы основаны на измерении условных параметров дефектов – протяженности ΔL_d , ширины ΔX_d , высоты ΔH_d , а также углов индикации дефектов $\Delta \gamma_d$ и сравнении их с аналогичными параметрами, измеренными на эталонных отражателях (например, в СО-2) (см. таблицы 3.1 и 3.2).

Для распознавания дефектов с помощью этих признаков не требуется разработка специализированной аппаратуры; с этой целью можно использовать стандартные преобразователи и дефектоскопы. Рекомендуется применять специальные приспособления для удобства отсчета измеряемых параметров.

Рассматриваемые информативные признаки следует применять при контроле сварных швов толщиной 20...60 мм.

Перечислим недостатки контроля с помощью этих признаков: на достоверность распознавания дефектов существенно влияют их размеры и ориентация; примерно 1/3 толщины занимает подповерхностная зона, в которой дефекты не могут быть распознаны; эти признаки являются малоинформативными при обнаружении дефектов с зеркальной поверхностью; протяженные объемные дефекты с помощью признаков $K_{\Delta X}$ и K_{μ} распознаются как плоскостные (кроме $K_{\Delta L}$).

Таблица 3.2 – Классы дефектов и их признаки

Класс дефекта	Значение признака
Округлый компактный	$K_{\Delta L} = 1; K_{\Delta X} = 1;$ $K_{\mu} = 1; K_{\gamma} = 1$
Округлый протяженный	$K_{\Delta L} > 1; K_{\Delta X} = 1;$ $K_{\mu} = 1; K_{\gamma \mu} = 1;$ $K_{\gamma K} \gg 1$
Скопление (цепочка) округлых дефектов	$K_{\Delta L} > 1; K_{\Delta X} = 1;$ $K_{\mu} = 1; K_{\gamma \mu} \gg 1;$ $K_{\gamma K} \gg 1$
Плоскостной вертикальный (ориентирован нормально к контактной поверхности) компактный	$K_{\Delta L} < 1; K_{\Delta X} < 1;$ $K_{\gamma} = 1$
Плоскостной вертикальный протяженный с зеркально отражающей поверхностью	$K_{\Delta L} > 1; K_{\Delta X} < 1;$ $K_{\mu} = 1; K_{\gamma} = 1$
Плоскостной вертикальный протяженный с диффузно отражающей поверхностью	$K_{\Delta L} > 1; K_{\mu} < 1;$ $K_{\gamma \mu} \geq 1; K_{\gamma K} \geq 1$
Плоскостной горизонтальный протяженный с диффузно отражающей поверхностью	$K_{\Delta L} > 1; K_{\Delta X} < 1;$ $K_{\mu} = 1$

Для повышения достоверности распознавания рекомендуется одновременно измерять несколько признаков; при этом решение об отнесении дефекта к плоскостному типу принимают в том случае, если значение хотя бы одного признака соответствует плоскостному.

3.2 Приборы и оборудование

Для проведения лабораторной работы используются: ультразвуковой импульсный дефектоскоп; набор прямых и наклонных преобразователей; стандартные образцы СО-2 и СО-3; плоскопараллельные образцы с дефектами; контактная смазка; ветошь; линейка.

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Настроить глубиномер дефектоскопа по стандартной методике по образцам СО-2 и СО-3.

3.3.2 Настроить чувствительность аппаратуры по образцу СО-2. Для этого получить на экране дефектоскопа сигнал от отверстия $\varnothing 6$ мм на глубине 15 мм. Вывести этот сигнал на браковочный уровень и увеличить чувствительность на 4 дБ.

3.3.3 Выявить дефекты в предложенных плоскопараллельных образцах. Определить размеры и координаты выявленных дефектов. Сделать эскизы образцов.

3.3.4 Рассчитать $K_{\Delta L}$, $K_{\Delta H}$, $K_{\Delta X}$, K_{μ} для выявленных дефектов. Результаты расчетов свести в таблицу.

3.3.5 Провести классификацию выявленных дефектов.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, приборы и оборудование, эскизы образцов с выявленными дефектами, таблица с расчетом $K_{\Delta L}$, $K_{\Delta H}$, $K_{\Delta X}$, K_{μ} для выявленных дефектов, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что относят к измеряемым характеристикам дефектов в УЗК?
- 2 Какая измеряемая характеристика является главной?
- 3 Какие существуют способы определения ΔL , ΔX , ΔH , $\Delta \gamma$?
- 4 Какие существуют методы для распознавания типа дефекта?

4 Сравнительный ультразвуковой контроль толщины плоскопараллельных и трубных образцов

Цель работы: изучить физические основы ультразвуковой толщинометрии, приборы, применяемые для толщинометрии, провести контроль толщины образцов из различных материалов.

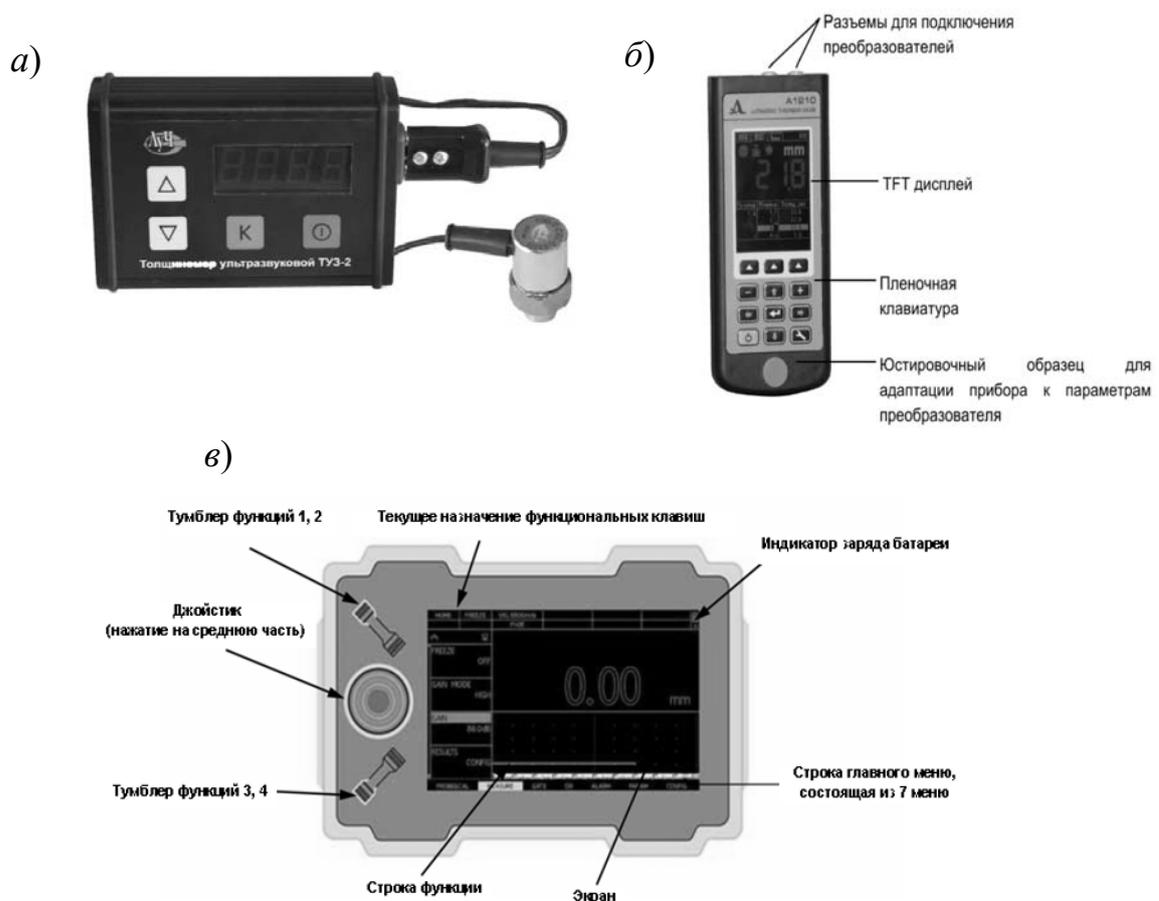
4.1 Основные теоретические положения

В основу измерения толщины положен ультразвуковой импульсный эхометод. Данный метод использует свойство УЗК отражаться от границы раздела сред с различными акустическими сопротивлениями [2, 3, 6]. Достоинством толщинометрии является высокая точность измерения без разрушения обследуемого объекта.

Различают три вида задач при измерении толщины:

- 1) ручной контроль изделий с гладкими равноотстоящими поверхностями, например, изделий после их изготовления;
- 2) ручной контроль изделий с грубыми непараллельными поверхностями, например изделий, внутренняя поверхность которых поражена коррозией;
- 3) автоматический контроль в потоке (обычно труб, листов).

Ультразвуковые толщиномеры (рисунок 4.1) измеряют время, которое затрачивает ультразвуковой импульс на прохождение до противоположной поверхности объекта контроля, отражение от нее и возвращение на преобразователь. Для проведения таких измерений доступ к противоположной поверхности объекта контроля не требуется. Благодаря этому, если противоположная поверхность объекта контроля является труднодоступной или полностью недоступной, необходимость разрезать объект контроля (что требуется при использовании микрометра или штангенциркуля) отсутствует. С помощью ультразвуковых толщиномеров может быть измерена толщина изделий из большинства конструкционных материалов, таких как металлы, пластики, керамика, композиты, эпоксидная смола и стекло, а также толщина слоя жидкости или биологических образцов.



a – толщиномер ТУ3-2; *б* – толщиномер А1210; *в* – толщиномер DMS Go

Рисунок 4.1 – Ультразвуковые толщиномеры

Для измерения толщины используются раздельно-совмещенные пьезоэлектрические преобразователи с жестким протектором, акустическими задержками (призмами) из оргстекла с малой контактной поверхностью (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Раздельно-совмещенные преобразователи

Угол ввода таких преобразователей составляет $\alpha = 0^\circ \dots 5^\circ$. Передающая пьезопластина ПЭП раздельно-совмещенного типа излучает импульс УЗК через линию задержки (призму) в направлении наружной поверхности изделия, толщину которого нужно измерить. Импульс УЗК распространяется в изделии до противоположной поверхности, отражается от нее, распространяется в обратном направлении и, пройдя линию задержки (призму), принимается приемной пьезопластиной. Время распространения УЗК от одной поверхности до другой и обратно связано с толщиной изделия зависимостью

$$H = \frac{c \cdot t}{2},$$

где H – толщина контролируемого изделия;

c – скорость распространения УЗК в материале изделия;

t – время распространения УЗК от одной поверхности до другой и обратно.

Перед проведением ультразвуковой толщинометрии на объекте в узлах сетки с шагом 100×100 мм или 150×150 мм подготавливают участки (площадки) обычно размером 35×35 мм. Подготовка состоит в зачистке участка абразивным камнем и очистке от грязи, окалины и т. д. Шероховатость поверхности изделия со стороны ввода ультразвуковых колебаний должна быть не хуже $R_a = 6,3$ мкм. Допускается проведение ультразвуковой толщинометрии на поверхности покрытой плотной пленкой оксида или тонким ровным слоем краски.

Для настройки толщиномеров используют стандартные образцы предприятия (СОП) (рисунок 4.3), изготовленные из материала измеряемого объекта, имеющие толщину, равную номинальной или минимальной толщине объекта, кривизну и шероховатость поверхности, соответствующие тем же характеристикам объекта. При измерении толщины труб и гибов с наружным диаметром менее 100 мм целесообразно выполнять СОП в виде фрагмента этих изделий.

На погрешность ультразвуковой толщинометрии оказывает влияние отклонение геометрии контролируемого слоя; непостоянство и неоднородность

свойства материала (затухание и скорость УЗК); нарушение акустического контакта или изменение толщины контактного слоя; ошибки в настройке прибора.

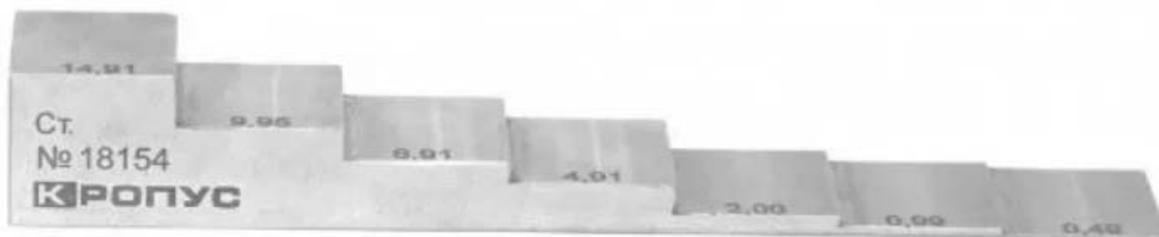


Рисунок 4.3 – СОП для толщинометрии

Измерения обычно выполняются однократно на каждом участке. Однако, если результат измерений существенно отличается от ожидаемого значения, то он отбрасывается. На этом участке выполняются три измерения взамен ошибочного и в качестве окончательного результата принимается среднее арифметическое трех последних измерений.

Считывание результата измерения производится после получения устойчивого и достоверного показания. Для цифровых приборов оно характеризуется либо одним значением, изменяющимся в пределах дискретности прибора, либо двумя. При оформлении протокола (заключения) результат измерения должен быть представлен в следующем виде:

$$X; \Delta_n < \Delta < \Delta_g; P,$$

где X – результат измерения, мм;

Δ_n, Δ_g – нижний и верхний пределы измерения;

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

4.2 Приборы и оборудование

Оборудование для проведения лабораторной работы включает: ультразвуковые толщинометры; контрольные образцы; натурные образцы различной толщины.

4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1 Изучить физические принципы, положенные в основу ультразвуковой толщинометрии.

4.3.2 Изучить по техническому описанию принцип действия и технические характеристики используемых в лабораторной работе толщинометров.

4.3.3 Подготовить к работе толщинометры, провести настройку приборов по контрольным образцам.

4.3.4 Провести измерения толщины реальных образцов без покрытия,

оценить абсолютную и относительную погрешности измерений.

4.3.5 Провести измерения толщины реальных образцов с покрытием, оценить абсолютную и относительную погрешности измерений.

4.3.6 Провести измерение толщины образца, содержащего язвенную коррозию металла. В соответствии с паспортом на образец оценить абсолютную и относительную погрешности измерений.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, приборы и оборудование, таблицы с результатами измерения толщины различных образцов с указанием погрешности измерения, эскиз образца, содержащего язвенную коррозию, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 На каких физических принципах основана эхоимпульсная толщинометрия?
- 2 Какие преобразователи используются для эхоимпульсной толщинометрии и почему?
- 3 Какие основные погрешности возможны при эхоимпульсной толщинометрии? Как уменьшить данные погрешности?
- 4 Как производится подготовка поверхности объекта контроля к измерению толщины?

5 Исследование особенностей ультразвукового контроля стыковых сварных соединений

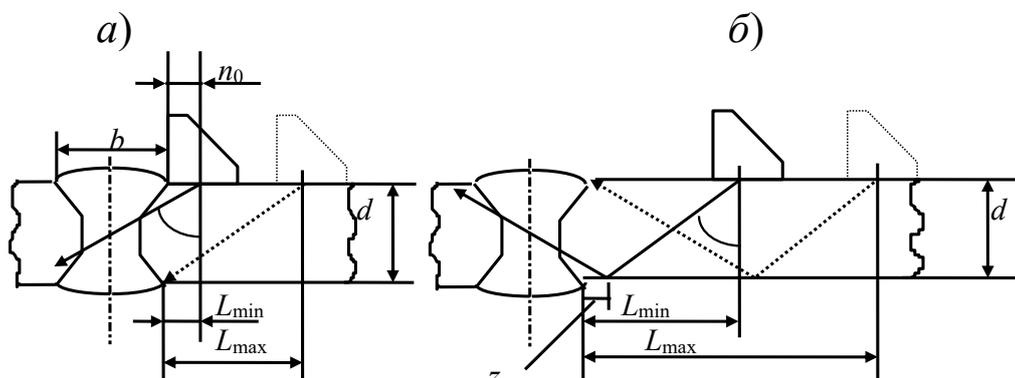
Цель работы: изучить особенности методики и технологии ультразвукового контроля стыковых сварных соединений; исследовать экспериментально способы проверки и воспроизведения параметров контроля; произвести контроль натуральных сварных образцов и оценить качество соединений.

5.1 Основные теоретические положения

Для выявления дефектов в сварных соединениях установлено стандартом (ГОСТ 14782–76) три метода акустического контроля, отличающихся способами обнаружения дефектов: эхометод, теневой, зеркально-теневой. Применимость того или иного метода определяется его эффективностью для данного типа соединений [1, 4, 5, 8].

Контроль стыковых сварных соединений производят, как правило, эхометодом по совмещенной схеме включения преобразователя. Ультразвук вводят в сварной шов посредством наклонных преобразователей через поверхность основного металла. Прозвучивание ведется прямым и однократно отраженным лучом (рисунок 5.1) с одной поверхности соединения при перемещении преобра-

зователя с двух сторон шва. Если геометрия шва не обеспечивает полное его прозвучивание по указанной схеме, контроль производят многократно отраженным лучом.



a – прямым лучом; *б* – однократно отраженным лучом

Рисунок 5.1 – Схема контроля стыковых сварных соединений

Оптимальное значение угла ввода УЗ-волн α обычно выбирают так, чтобы в крайнем положении преобразователя его акустическая ось пересекала ось симметрии шва на глубине, равной половине толщины основного металла. В этом случае обеспечивается прозвучивание всего сечения шва, если выполняются условия:

– для контроля прямым лучом

$$\operatorname{tg} \alpha \geq (b + 2n_0) / d;$$

– для контроля однократно отраженным лучом

$$\operatorname{tg} \alpha \geq (b + 2z) / d,$$

где b – ширина усиления;

n_0 – стрела преобразователя;

z – расстояние от границы усиления до точки отражения, $z = 2 \dots 8$ мм.

Если в НТД не указан тип ПЭП, следует руководствоваться таблицей 5.1 [8].

Угол ввода луча и способ прозвучивания определяют зону перемещения преобразователя. При этом для контроля прямым лучом $L_{\min} = n_0$; $L_{\max} = d \cdot \operatorname{tg} \alpha$, для контроля однократно и многократно отраженным лучом:

$$L_{\min} = m \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha + z; L_{\max} = (m + 1) \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (5.1)$$

где m – число отражений.

Таблица 5.1 – Рекомендуемые параметры ПЭП

Номинальная толщина сваренных элементов, мм	Частота, МГц	Угол ввода, град, при контроле лучом	
		прямым	отраженным
От 2 до 8 включ.	4,0...10	70...75	70...75
Св. 8 до 12 включ.	2,5...5	65...70	65...70
Св. 12 до 20 включ.	2,5...5	65...70	60...70
Св. 20 до 40 включ.	1,8...4	60...65	45...65
Св. 40 до 70 включ.	1,25...2,5	50...65	40...50
Св. 70 до 125 включ.	1,25...2,0	45...65	Контроль не проводится

Технология контроля сварных швов определяется типоразмером соединения и требованиями к качеству и включает несколько этапов.

Перед контролем соединение подвергают внешнему осмотру: измеряют толщину свариваемого металла и ширину усиления, устанавливают отсутствие недопустимых внешних дефектов.

Выбор частоты и амплитуды колебаний производится в зависимости от размеров изделия, коэффициента затухания волн в материале изделия и уровня структурных помех. Чем больше трещина, тем ниже должна быть частота и больше амплитуда колебаний.

Выбор типа преобразователя и УЗ-волн определяется размерами изделия, характером дефектов, их предполагаемым расположением, ориентацией, формой, размерами.

Настройка и проверка аппаратуры заключается в проверке соответствия требованиям инструкции частоты, условной и предельной чувствительности, угла ввода, погрешности глубиномера, мертвой зоны, разрешающей способности в направлении прозвучивания, стрелы преобразователя. Данные операции выполняются с использованием стандартных образцов или косвенным методом по SKH- и ARD-диаграммам. Широко применяется метод настройки аппаратуры при контроле сварных швов малой толщины по стандартным образцам предприятия (СОП) в виде стальных пластин с угловыми отражателями («зарубками») (рисунок 5.2).

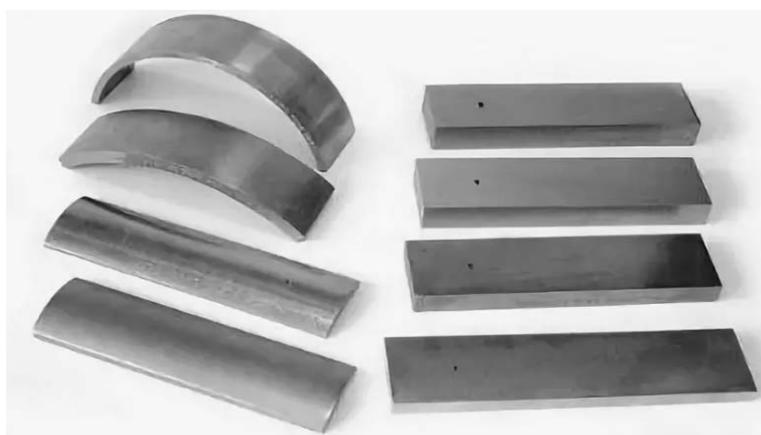


Рисунок 5.2 – Стандартные образцы предприятия

Прозвучивание шва обеспечивается путем поперечно-продольного или продольно-поперечного сканирования. Параметры сканирования определяются характеристиками поля преобразователя и толщиной изделия (рисунок 5.3).

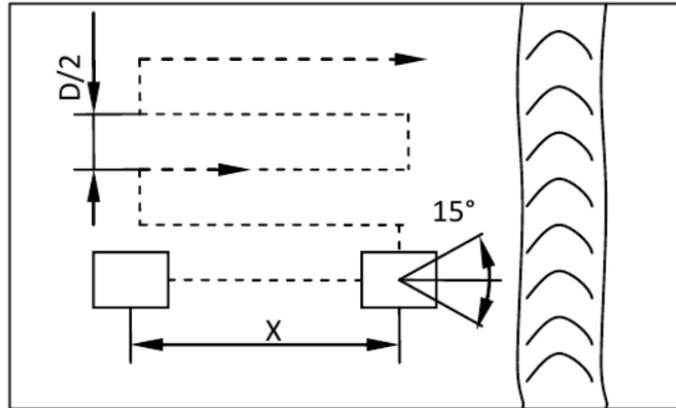


Рисунок 5.3 – Схема сканирования сварного соединения

Результаты контроля оформляются согласно рекомендациям ГОСТ 14782–76.

5.2 Приборы и оборудование

Для проведения лабораторной работы используются: ультразвуковой дефектоскоп с набором наклонных преобразователей на различные частоты, натурные образцы сварных стыковых соединений с различными параметрами и дефектами; стандартные образцы № 1–3; набор СОП.

5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1 Изучить особенности методики и технологии контроля стыковых сварных соединений.

5.3.2 Исследовать основные параметры натуральных сварных образцов. Произвести подготовку образцов к контролю.

5.3.3 Произвести выбор параметров контроля. Оптимизировать схемы сканирования.

5.3.4 Произвести настройку ультразвукового дефектоскопа и проверить параметры аппаратуры.

5.3.5 Исследовать выявляемость дефектов различного типа в натуральных сварных образцах.

5.3.6 Оформить результаты контроля, составить дефектную карту и оценить качество соединений.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, приборы и оборудование, схемы сканирования заданного сварного соединения, эскиз

образца с выявленными дефектами, условные размеры выявленных дефектов, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 В чем особенность стыковых сварных соединений как объектов ультразвукового контроля?
- 2 Какие параметры аппаратуры проверяются перед проведением контроля?
- 3 Чем определяется выбор частоты и амплитуды УЗ-волн?
- 4 Охарактеризуйте способы повышения достоверности выявления дефектов в сварных швах.
- 5 Какие схемы сканирования применяются при контроле сварных швов? От чего зависят параметры сканирования?
- 6 Какие виды дефектов характерны для стыковых сварных соединений?
- 7 В каких документах фиксируются результаты контроля?

6 Ультразвуковой контроль структуры металла

Цель работы: изучить принципы ультразвуковой диагностики структуры металлов; изучить способ и методику ультразвукового контроля твердости стальных деталей; провести измерения толщины закаленного слоя натуральных образцов, твердости натуральных образцов.

6.1 Основные теоретические положения

Механические свойства стальных изделий во многом определяются структурой материала. Контроль структуры акустическими методами основан на анализе корреляционных связей измеренных параметров распространения акустического сигнала со структурными характеристиками материала. В частности, упругие постоянные материала (модуль Юнга E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона ν) имеют однозначную связь со скоростями распространения упругих волн. Поэтому точное измерение скорости звука позволяет, в ряде случаев, оценить структурные изменения, происходящие в результате технологических воздействий. Как правило, для того чтобы оценить интересующий структурный параметр, следует организовать распространение в изделии нужной моды упругой волны в заданном направлении. После этого проводятся необходимые измерения параметров распространения упругих волн и строятся корреляционные зависимости, связывающие измеряемые параметры с соответствующими структурными характеристиками [1, 3, 6, 7].

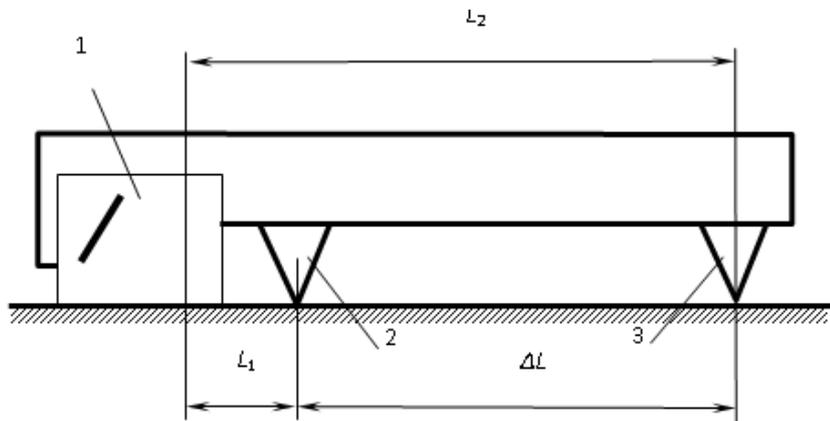
Одной из актуальных проблем современного машиностроения является измерение глубины поверхностных упрочненных слоев. Для упрочнения поверхностных слоев применяется закалка после цементации или термическая обработка поверхностных слоев методами ТВЧ (токи высокой частоты). В случае закалки после цементации и поверхностной закалки с нагревом токами высокой

частоты в поверхностном слое реализуется классическая схема закалки, основанная на превращении аустенита в мартенсит. В случае ТВЧ-закалки толщина упрочнённого слоя достигается регулированием глубины прогрева деталей при равном по всему объёму содержании углерода. Максимальная твёрдость на поверхности за счёт высокой скорости нагрева и кратковременной выдержки на 5...7 HRC выше твердости тех же сталей, закалённых при печном нагреве. Кроме того, возрастает износостойкость и предел выносливости. При закалке после цементации закалка происходит в слое, насыщенном углеродом. Нарушение режимов закалки может привести к браку, который, как правило, проявляется в недостаточной глубине закаленного слоя. На результат закалки ТВЧ влияют: скорости нагрева, время выдержки при температуре фазовых изменений, скорости охлаждения и максимальной температуры.

Методы неразрушающего контроля толщины упрочненного слоя являются более предпочтительными, т. к. позволяют уменьшать потери за счет отказа от разрушения деталей для изготовления шлифов, а также проверять 100 % деталей.

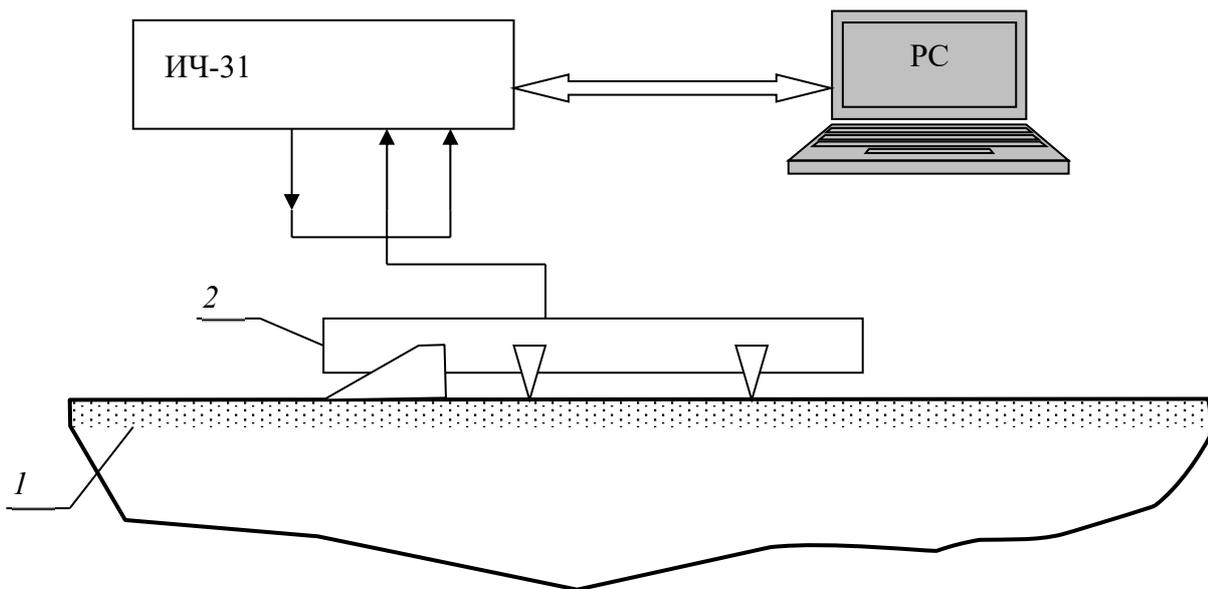
Возможность измерений глубины закаленного слоя дает индикатор толщины закаленных слоев ИЧ-31. В данном устройстве для измерений используется поверхностная упругая волна. Измерения проводятся путем сравнения скорости распространения в «сыром» и закаленном изделиях. Тогда, если глубина проникновения поверхностной волны превышает глубину закаленного слоя, то звуковой импульс, распространяющийся вдоль закаленной поверхности, распространяется как в закаленной среде (с меньшей скоростью), так и в «сыром» материале (с большей скоростью). В результате скорость прохождения звукового импульса уменьшается по сравнению со скоростью в сыром материале, причем она замедляется тем больше, чем большая часть энергии поверхностной звуковой волны проходит через закаленный слой. Таким образом, задача сводится к измерению скорости поверхностной звуковой волны в конкретном месте проверяемого изделия. Для этого используют специальный акустический блок, содержащий излучающий пьезопреобразователь (ПЭП) поверхностной волны и два (последовательно расположенных на поверхности) точечных ПЭП (приемников) (рисунок 6.1). Чем больше расстояние между приемными ПЭП, тем выше точность измерения. Но это расстояние должно выбираться исходя из размеров контролируемых деталей. Кроме того, результат измерения дает усредненную оценку толщины слоя в области между приемными преобразователями, что не позволяет производить измерения в конкретной точке. Поэтому расстояние между приемными ПЭП при проектировании выбирают с учетом вышеизложенного. Связь индикатора ИЧ-31 с компьютером осуществляется по USB-порту (рисунок 6.2).

Твердость характеризует свойство поверхности твердого тела сопротивляться вдавливанию или царапанию. Классические методы определения твердости основаны на измерении глубины вдавливания *индентор*–наконечника из очень твердого шарика (твердость по Бринеллю) или алмазной пирамидки (твердость по Виккерсу или Роквеллу). Широко применяют также метод, основанный на измерении высоты отскока легкого твердого бойка от поверхности ОК [1, 7].



1 – излучающий пьезопреобразователь поверхностной волны; 2, 3 – приемные преобразователи с локальным акустическим контактом; ΔL – акустическая база, на которой производится измерение скорости распространения акустического сигнала

Рисунок 6.1 – Схема акустического блока из комплекта ИЧ-31 для контроля глубины термоупрочненного слоя



1 – исследуемый объект; 2 – акустический блок

Рисунок 6.2 – Блок-схема измерительной установки на базе индикатора ИЧ-31

Акустические способы измерения твердости основаны на методе контактного импеданса и корреляции твердости со скоростью распространения упругих волн, измеряемой методами отражения, прохождения или интегральным методом собственных колебаний.

Метод контактного импеданса получил очень широкое распространение. Этому способствовали его простота, портативность применяемой аппаратуры, оперативность и возможность проводить измерения на деталях сложной формы (шестернях, пружинах, резьбах и т. п.) и в труднодоступных местах.

Метод отскока (динамический метод) не относится к акустическим методам неразрушающего контроля. Однако он кратко рассматривается, как конкурентный методу контактного импеданса. Метод отскока имеет несколько вариантов, наиболее известный и широко применяемый из которых – *метод Лееба*.

Он основан на измерении отношения скорости движения подвижной системы прибора после отскока v_2 к скорости v_1 соударения. Подвижная система содержит боек в виде шарика из твердого материала с высоким модулем упругости (например, карбида вольфрама). Постоянство скорости v_1 соударения обеспечивается пружинной системой прибора. Уменьшение твердости увеличивает энергию, расходуемую на пластическую деформацию материала, что снижает скорость отскока. Прочность HL по шкале Лееба определяется формулой

$$HL = \frac{v_1}{v_2} \cdot 1000.$$

Максимально возможное значение твердости при чисто упругом ударе и отсутствии других потерь (например, на излучение упругих волн в подвижную систему или преодоление сопротивления воздуха) составляет $HL = 1000$. Однако на практике предпочитают пользоваться привычными шкалами твердости, для чего показания прибора переводят в единицы шкал Роквелла, Бринелля или Виккерса.

6.2 Приборы и оборудование

Оборудование для проведения лабораторной работы включает: индикатор ИЧ-31; персональный компьютер с программой «Толзомер»; блок акустических пьезопреобразователей; два образца фрагментов шестерен (один не термобработанный – № 1, и один закаленный после цементации – № 2); ультразвуковой твердомер.

6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1 Подготовить индикатор ИЧ-31 к работе в соответствии с инструкцией по эксплуатации. Запустить на компьютере программу «Толзомер».

6.3.2 Провести калибровку индикатора ИЧ-31 на незакаленном образце № 1.

6.3.3 Произвести измерение толщины закаленного слоя (три раза не изменяя положения акустического блока) на закаленном образце № 2 в различных точках на поверхности образца. Провести статистическую обработку результатов измерений.

6.3.4 Подготовить к работе ультразвуковой твердомер. Провести измерения твердости различных металлических образцов.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, приборы и оборудование, таблицы с результатами измерения глубины закаленного слоя и твердости, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 На чем основаны акустические методы исследования структуры металлов?
- 2 Какие физические явления лежат в основе ультразвукового измерения толщины термоупрочненных слоев индикатором ИЧ-31?
- 3 Исходя из чего выбираются расстояния между принимающими ПЭП?
- 4 Чем объясняется разброс значений толщины в деталях из одной партии?
- 5 Назовите основные методы контроля твердости материалов.

7 Изучение методики ультразвукового контроля с преобразователями на фазированных решетках

Цель работы: изучить принцип работы преобразователя на фазированных решетках; приобрести навыки работы с ультразвуковым дефектоскопом Phasor XS; произвести контроль образца в различных режимах сканирования.

7.1 Основные теоретические положения

Фазированной решеткой называют преобразователь в виде излучающих и принимающих ультразвуковых элементов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга (рисунок 7.1). Возбуждающие электрические импульсы на элементы подают со сдвигом фазы (времени). Аналогичные электрические временные задержки для каждого принимающего элемента вводят в приемный тракт. Изменяя сдвиг фазы, управляют акустическим полем преобразователя [11, 12].

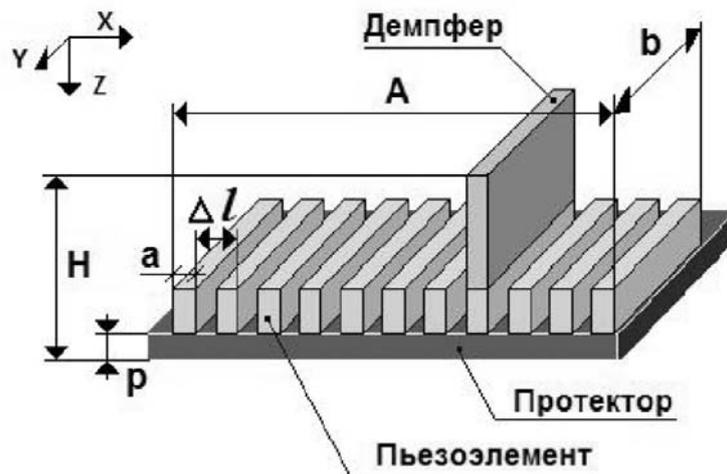


Рисунок 7.1 – Конструкция преобразователя

Основные преимущества преобразователей в виде фазированной решетки – значительное увеличение производительности контроля по сравнению с механическим сканированием, возможности оперативного изменения формы диаграммы направленности, фокусировки ультразвуковой энергии и применения

методов оптимальной обработки эхосигналов. Внешний вид преобразователя представлен на рисунке 7.2, призмы – на рисунке 7.3.



Рисунок 7.2 – Внешний вид преобразователя



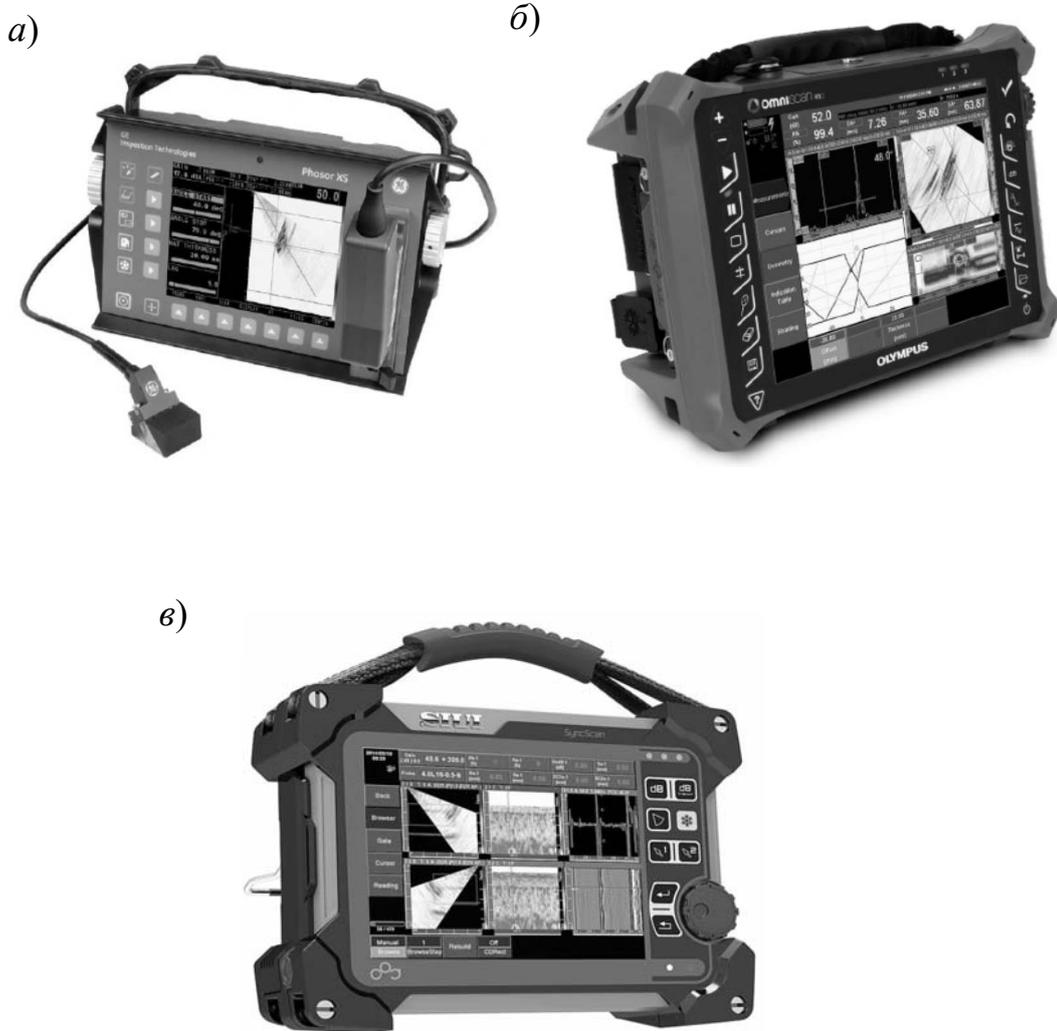
Рисунок 7.3 – Призмы для преобразователей

Аппаратура ультразвукового контроля с использованием фазированных решеток может обеспечивать три типа разверток *A*, *B*, *C*, а также трехмерное изображение дефектов и других нарушений сплошности. Приборы, реализующие технологию ФАР (фазированной антенной решетки), представлены на рисунке 7.4.

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

B-скан. *B-скан* представляет собой двумерное изображение данных ультразвукового контроля. Чаще всего горизонтальная ось используется для координаты преобразователя, а по вертикальной оси откладывается время прихода сигнала (или пройденное им расстояние). Положение данных на скане связано с показанием датчика координаты (или времени) в момент их записи в определенной точке. По сути, *B-скан* представляет собой множество собранных в пакет *A-сканов*, полученных в последовательных точках траектории сканирования. Каждый *A-скан* подвергается амплитудно-цветовому кодированию, тем самым превра-

шаяся в ряды цветных пикселей на *B*-скане. Для получения *B*-скана необходимо подключить к прибору датчик, который будет измерять пространственное перемещение преобразователя в горизонтальной плоскости.



a – дефектоскоп Phasor XS; *б* – дефектоскоп OmniScan MX2; *в* – дефектоскоп SyncScan

Рисунок 7.4 – Дефектоскопы, реализующие технологию ФАР

S-скан. *S*-скан (секторный или азимутальный скан) представляет собой двумерное изображение, полученное из множества *A*-сканов из одного положения преобразователя под различными углами ввода. Типичный *S*-скан представляется в диапазоне углов с использованием одного фокусного расстояния. Горизонтальная ось изображения соответствует горизонтальной координате на контролируемой детали, а вертикальная ось изображения – глубине. *S*-скан является характерным для фазированных решеток и может использоваться при контроле продольными, поперечными волнами в контактном или иммерсионном

вариантах прямым преобразователем или с призмой. Пример S-скана представлен на рисунке 7.5.

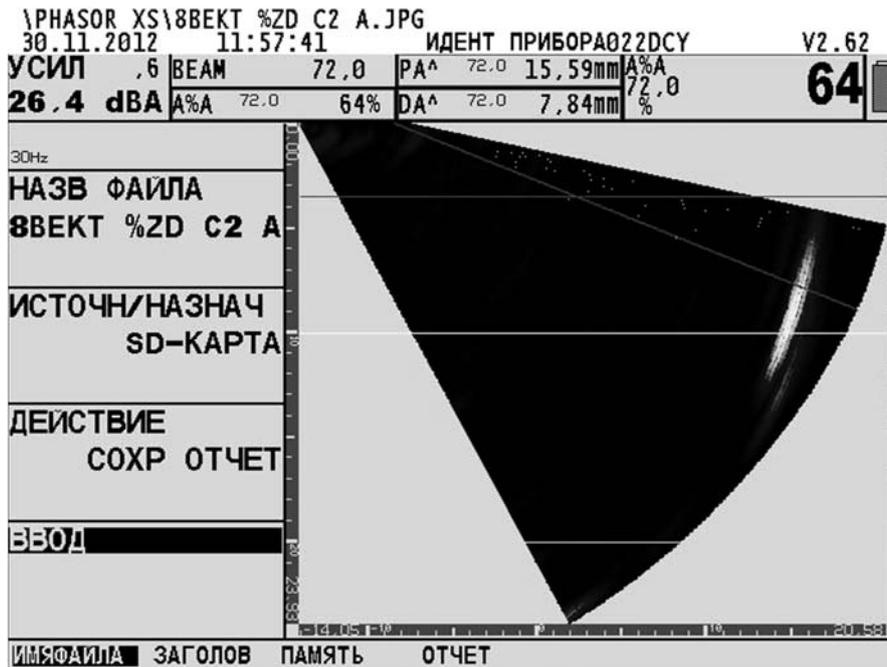


Рисунок 7.5 – Пример S-скана отражателя в виде непровара в корне шва, полученный с помощью Phasor XS

По функциональным возможностям и геометрии фазированные решетки делятся на линейные (одномерные) и двумерные. Первые позволяют осуществлять электрическое сканирование в одной плоскости, вторые – в двух ортогональных плоскостях.

Преобразователи на фазированных решетках обладают следующими преимуществами:

- различные углы ввода пучков могут быть сгенерированы с помощью одного преобразователя, охватывающего гораздо большую интересующую область (область, проверяемую на наличие дефекта);
- большой охват позволяет как уменьшать скорость сканирования объекта, так и увеличивать разрешающую способность контроля или совмещать их;
- получение реальных изображений положения и размеров дефектов, а также их интерпретация происходит быстрее и проще;
- все данные, учитывающие последовательность контроля, могут быть записаны в реальном времени;
- отчеты представляются в виде изображения, что облегчает упрощение понимания результатов контроля для персонала.

Для настройки дефектоскопов используется стандартный калибровочный образец, представленный на рисунке 7.6.

При сканировании преобразователь следует перемещать вдоль сварного соединения (рисунок 7.7) в отличие от траектории перемещения при контроле преобразователем с одним углом ввода со скоростью не более 100 мм/с.

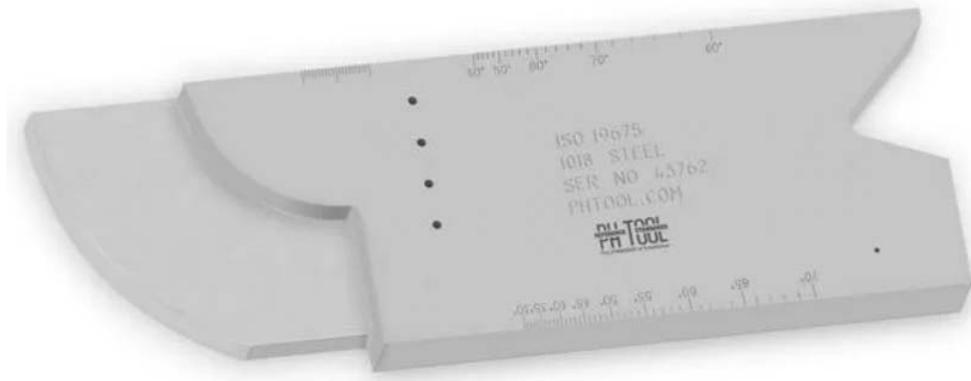


Рисунок 7.6 – Калибровочный образец

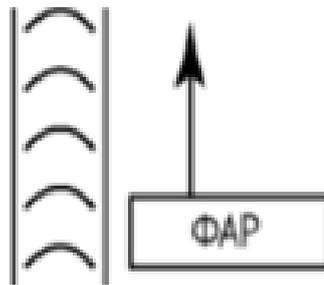


Рисунок 7.7 – Схема сканирования

7.2 Приборы и оборудование

Для проведения лабораторной работы используются: ультразвуковой дефектоскоп Phasor XS, преобразователи на фазированной решётке, стандартный образец предприятия, образцы из различных материалов, энкодер для получения *B*-скана.

7.3 Порядок выполнения работы

7.3.1 Изучить особенности методики и технологии контроля внутренней структуры различных материалов преобразователем на фазированной решетке.

7.3.2 Изучить инструкцию по эксплуатации ультразвукового дефектоскопа Phasor XS. Настроить дефектоскоп, используя калибровочный образец, который представляет собой стандартный образец предприятия в виде пластины, изготовленной из стали 20. Толщина образца 20 мм. В образце просверлены три отверстия диаметром по 2 мм. Отверстия расположены на расстоянии 5, 10 и 15 мм от поверхности пластины в одной плоскости, перпендикулярной поверхности образца. Внешний вид образца приведен на рисунке 7.8.

7.3.3 Произвести сканирование образцов в режиме стандартного преобразователя и в режиме фазированной решётки, а также в режиме *B*-скана.

7.3.4 По полученным данным сделать вывод о качестве образцов.

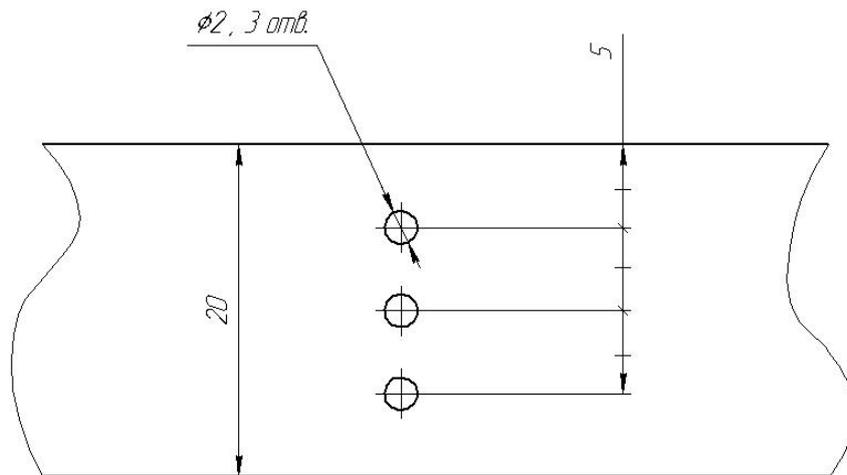


Рисунок 7.8 – Внешний вид используемого стандартного образца предприятия

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, приборы и оборудование, эскиз образца с выявленными дефектами, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключаются конструктивные особенности действия ПЭП на фазированных решётках?
- 2 Как происходит управление пучком сигнала ПЭП на фазированных решётках?
- 3 В чем особенность стыковых сварных соединений как объектов ультразвукового контроля?
- 4 Какие схемы сканирования применяются при контроле сварных швов преобразователем на фазированной решетке? От чего зависят параметры сканирования?
- 5 Как получить *S*- и *B*-сканы? В чем состоит особенность данных сканов?

8 Изучение физических основ и методики TOFD-метода контроля сварных соединений

Цель работы: изучить физические основы TOFD-метода контроля; провести контроль сварных соединений TOFD-методом.

8.1 Краткие теоретические сведения

TOFD-метод ультразвукового контроля основан на применении двух наклонных преобразователей – излучающего и приемного, расположенных соосно навстречу друг другу с двух сторон дефекта симметрично относительно его оси [11–13]. Схема реализации TOFD-метода УЗК представлена на рисунке 8.1.

Основной идеей TOFD-метода является взаимодействие ультразвуковой волны с кончиками несплошностей. Результат этого взаимодействия – эмиссия

дифрагированных волн в большом угловом диапазоне.

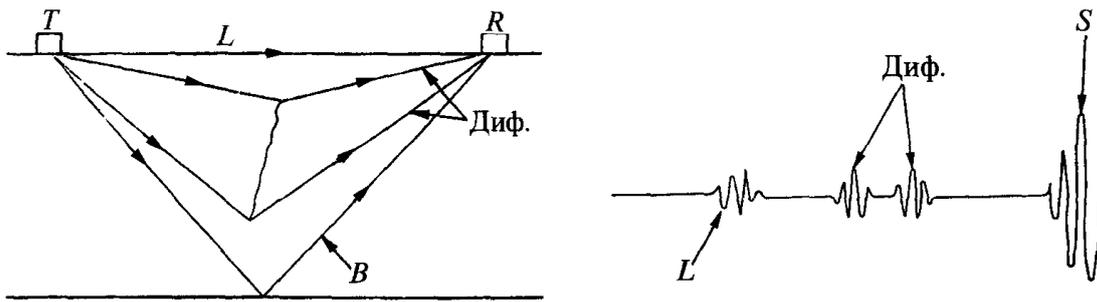


Рисунок 8.1 – Схема реализации TOFD-метода УЗК

Величина амплитуды сигнала дифрагированной волны зависит в большей степени – от формы края дефекта и величины раскрытия дефекта, и в меньшей – от его ориентации; уровень шума зависит от структуры материала. Вследствие относительно низких амплитуд сигналов, которые используются в методе TOFD, метод обычно применяется для материалов с относительно низкими уровнями поглощения и рассеяния ультразвуковых волн.

Характеристики преобразователей выбираются так, чтобы генерировать распространение УЗ-энергии в настолько широком диапазоне, насколько это возможно для заданной толщины материала, чтобы обеспечить полное прозвучивание.

Первым сигналом, попадающим на приемник после излучения ультразвукового импульса, обычно является боковая волна, которая проходит прямо под верхней поверхностью объекта контроля.

При отсутствии несплошностей вторым сигналом, прибывающим на приемник, является эхосигнал от донной поверхности.

Эти два сигнала обычно применяются для установления контрольных точек. Если пренебречь изменением фазы волны, любые сигналы, создаваемые несплошностями в материале, должны поступать между боковой волной и эхосигналом от донной поверхности, учитывая, что последние две отвечают, соответственно, самому короткому и самому длинному путям между излучателем и приемником. По тем же причинам дифракционный сигнал, созданный верхним краем несплошности, прибывает до сигнала, созданного нижним краем.

Высота несплошности может быть получена из разности времени прихода двух дифракционных сигналов.

В случаях, когда имеется доступ к обеим поверхностям объекта контроля и несплошности расположены по всей его толщине, сканирование с обеих поверхностей улучшит общую точность, особенно в отношении подповерхностных несплошностей.

Пример изображения приведен на рисунке 8.2.

На рисунке 8.2 представлено TOFD-изображение удовлетворительного качества, включающее:

- свободную от помех боковую волну;
- четыре TOFD-индикации от пропилов на разных глубинах;

- прямое отражение от донной поверхности;
- сигналы с изменением фазы от пропилов и донной поверхности.

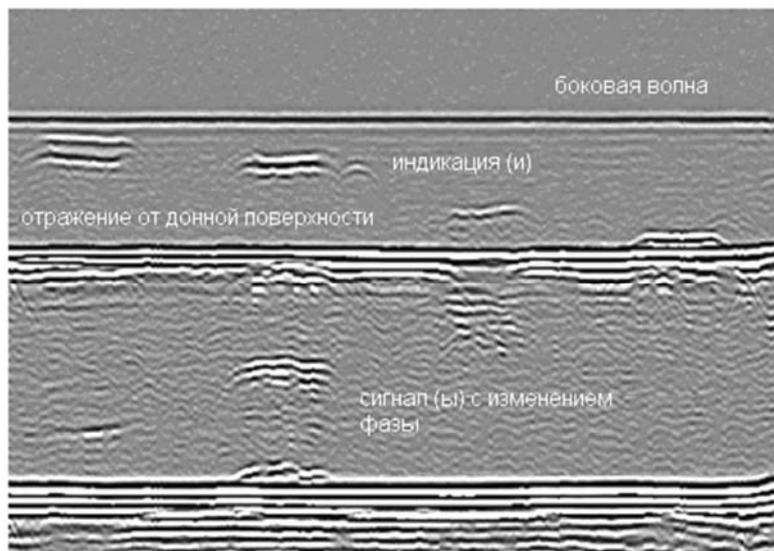


Рисунок 8.2 – Пример изображения TOFD

8.2 Приборы и оборудование

Для проведения лабораторной работы используется ультразвуковой дефектоскоп, реализующий TOFD-метод контроля, наклонные преобразователи поперечных и продольных волн, образец для изучения физических основ TOFD-метода, образцы сварных соединений с различными дефектами.

8.3 Порядок выполнения работы

8.3.1 На образец (рисунок 8.3) установить пару преобразователей поперечной волны, включенных по отдельной схеме, таким образом, чтобы обеспечить прием максимального эхосигнала, отраженного от бокового цилиндрического отверстия.



Рисунок 8.3 – Положение преобразователей над отражателем

При нахождении максимального эхосигнала установить длительность развертки таким образом, чтобы данный импульс находился ровно посередине экрана дефектоскопа. Далее, сохраняя расстояние между точками выхода луча и настройками дефектоскопа неизменными, переставить пару преобразователей

так, чтобы равнобедренный треугольник образовывался путем соединения точек выхода луча преобразователей и вершиной пропила (рисунок 8.4).

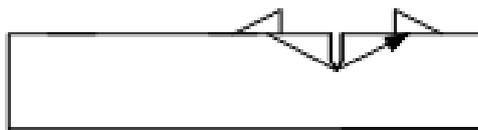


Рисунок 8.4 – Положение преобразователей над пропилом

Проанализировать полученные сигналограммы.

8.3.2 Установить на образец пару преобразователей продольной волны, включенных по отдельной схеме таким образом, чтобы обеспечить прием максимального эхосигнала, отраженного от бокового цилиндрического отверстия. Проанализировать полученные на экране дефектоскопа сигналы (рисунок 8.5). Сместить преобразователи на свободный от несплошностей участок образца (рисунок 8.6).

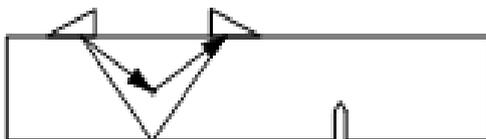


Рисунок 8.5 – Положение преобразователей над боковым цилиндрическим отражателем

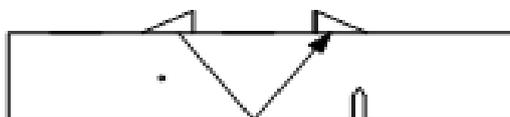


Рисунок 8.6 – Положение преобразователей на свободном от несплошностей участке образца

Проанализировать полученные на экране сигналы.

8.3.3 Установить преобразователи в положении макс эхосигнала от бокового цилиндрического отражателя (рисунок 8.7).



Рисунок 8.7 – Положение преобразователей продольной волны над цилиндрическим отражателем

Изменяя задержку развертки переместить сигнал головной волны в начало *A*-скана, отрегулировать длительность развертки, переместить донный сигнал продольной волны в конец *A*-скана. Изменить режим индикации детекти-

рованного сигнала на режим невыпрямленного сигнала. Проанализировать полученные сигналы.

8.3.4 Установить преобразователи на свободный от несплошностей участок образца (рисунок 8.8).

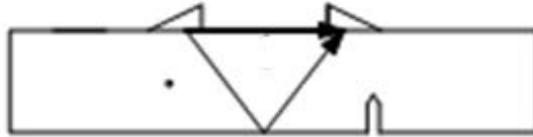


Рисунок 8.8–Преобразователи на свободном от несплошностей участке образца

Проанализировать полученные сигналы.

8.3.5 Установить преобразователь на участок с пропилом (рисунок 8.9).



Рисунок 8.9 – Положение преобразователей над пропилом

Проанализировать полученные сигналы.

8.3.6 Установить преобразователь на участок с пропилом так, чтобы пропил имитировал трещину, выходящую на донную поверхность (рисунок 8.10).

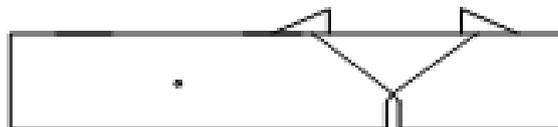


Рисунок 8.10 – Положение преобразователей при имитации трещины, выходящей на донную поверхность

Проанализировать полученные результаты.

8.3.7 Путем перемещения пары преобразователей вдоль образца определить ширину диапазона, в котором обеспечивается обнаружение дефектов в прозвучиваемом сечении.

8.3.8 Настроить дефектоскоп, реализующий TOFD-метод УЗК. Проконтролировать сварные соединения. Провести анализ полученных изображений, оценить выявленные дефекты.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, приборы и оборудование, сигналограммы, полученные по пп. 8.3.1–8.3.6, результаты контроля натурального сварного соединения, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 В чем сущность TOFD-метода УЗК сварных соединений?
- 2 Какие сигналы являются базовыми в TOFD-методе?
- 3 Как распознать на А-скане объемный и плоскостной дефекты?
- 4 Какие преобразователи используются при TOFD-методе УЗК?
- 5 Для каких толщин контролируемого металла используют TOFD-метод?
- 6 Какими достоинствами обладает TOFD-метод УЗК?

9 Комплексный контроль сварных соединений

Цель работы: изучить основы комплексного контроля сварных соединений (технология ФАР и TOFD-метод контроля); изучить контрольные образцы, используемые при настройке приборов, реализующих ФАР и TOFD-метод контроля; провести контроль сварного соединения.

9.1 Общие теоретические сведения

Лабораторные стенды для построения цифровых изображений дефектов и цифровых и ультразвуковых исследований объектов предназначены для комплексного ультразвукового неразрушающего контроля (НК) и диагностике различных объектов (в производстве и эксплуатации) на основе комбинации современных методов контроля: фазированной антенной решетки и дифракционно-временного (TOFD-) метода контроля [11–13].

Метод TOFD реализован с помощью двух либо четырех датчиков, работающих в раздельном режиме, для контроля как объектов малой толщины, так и толстостенных объектов. Основные объекты контроля – стыковые сварные соединения, листовая металл и трубопроводы. Для обеспечения стабильного акустического контакта ПЭП и требуемого расстояния PCS между точками ввода данных преобразователей и осевой ориентации их относительно друг друга должно использоваться универсальное ручное сканирующее устройство. Функция информационного обеспечения положения ультразвуковых преобразователей реализована с помощью энкодера.

Наиболее существенные TOFD-отличия от стандартного эхо-импульсного метода:

- возможность достижения более высокой точности при проведении измерений, как правило, ± 1 мм, а при повторном обследовании $\pm 0,3$ мм;
- почти полная независимость вероятности обнаружения дефекта от его углового положения;
- калибровка основана на времени прохождения пути дифракционных сигналов и не зависит от амплитуды сигнала;
- высокая производительность контроля, т. к. сканирование проводится вдоль одной линии с контролем всего объема шва;

- документирование и хранение результатов контроля;
- полная воспроизводимость результатов контроля;
- измерение величины эрозии металла обратной поверхности;
- замена радиационных методов НК на TOFD + фазированные решётки.

Метод антенной фазированной решетки реализован с использованием технологии многоэлементных датчиков, являющейся более усовершенствованной по сравнению с традиционным ультразвуковым контролем, в котором используется одноэлементный преобразователь. Различные углы ввода пучков сгенерированы с помощью одного преобразователя, и охватывать гораздо большую область прозвучивания (область, проверяемая на наличие дефекта). Большой охват должен позволять как уменьшать скорость сканирования объекта, так и увеличивать разрешающую способность контроля или совмещать их. Реализовано обеспечение получения изображений положения и размеров дефектов, для более простой и быстрой их интерпретации. Данные, учитывающие последовательность контроля, записываются в режиме реального времени. Отчеты представлены в виде изображения, для упрощения понимания результатов контроля персоналом. Перемещение датчика фазированной решетки вдоль сварного соединения реализовано с помощью универсального ручного сканирующего устройства. Применение фазированных решёток даёт следующие преимущества:

- расширяет возможности проведения ультразвукового контроля по сравнению с традиционным настолько, что делает его вспомогательным, но не заменяет его;
- повышает производительность, т. е. проведение сканирования с высокой скоростью без поперечных перемещений ПЭП;
- проведение ультразвукового контроля сварных соединений большой толщины (более 20 мм) за один проход с сектором углов от 39° до 74°, где по техническим условиям требуется применение двух ПЭП с разными углами ввода.

Для обеспечения нормального функционирования стендов (получения достоверных результатов контроля и хорошей выявляемости минимально допустимых дефектов) дефектоскоп, как его составная часть, должен быть поверен и аттестован. Поверку дефектоскопа проводят в специально установленные технической документацией сроки. Поверка прибора осуществляется органами метрологической службы с помощью специальных приборов и стендов. Не поверенный дефектоскоп для контроля применять строго воспрещается.

Также проводят повседневную проверку аппаратуры. Эта проверка служит для подтверждения работоспособности дефектоскопа и во время установления значений характеристик, которые меняются эксплуатации. При этом проверяют совместно дефектоскоп, преобразователь и соединяющий их кабель. Эту проверку проводит оператор непосредственно перед началом работы комплекса. Для проверки основных параметров используется контрольные образцы, которые предусмотрены в СТБ EN 583-6 и СТБ ISO 10863.

Минимальные требования к контрольному образцу следующие:

- он должен быть изготовлен из того же материала, что и объект контроля (например, с учетом скорости звука, шума из-за зернистости и состояния

поверхности);

- толщина стенки должна быть эквивалентна или больше, чем номинальная толщина объекта контроля;

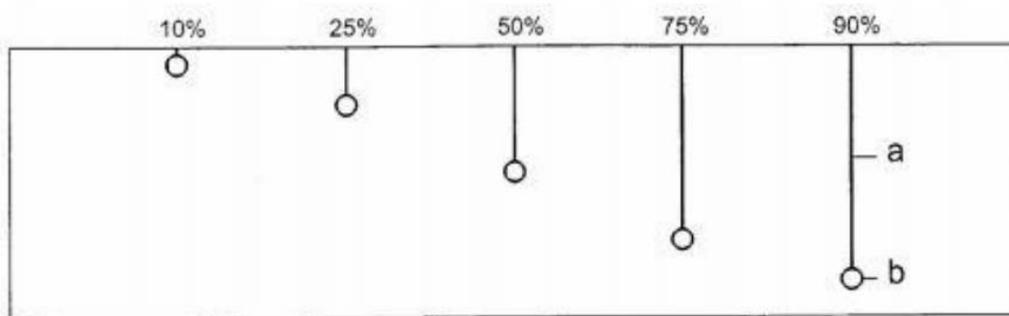
- ширина и длина сканируемой поверхности должна быть достаточной для перемещения преобразователей над контрольными отражателями.

Измерения должны быть основаны на дифракционных сигналах от контрольных отражателей.

К ним относятся:

- механически изготовленные пропилы, выходящие на сканируемую поверхность;

- боковые цилиндрические отверстия с диаметром, равным как минимум двойной длине волны при рабочей частоте преобразователей, используемых при контроле. Отверстия должны быть прорезаны до сканируемой поверхности для того, чтобы перекрывать прямое отражение от верха отверстия (рисунок 9.1).



a – пропил, *b* – боковое цилиндрическое отверстие

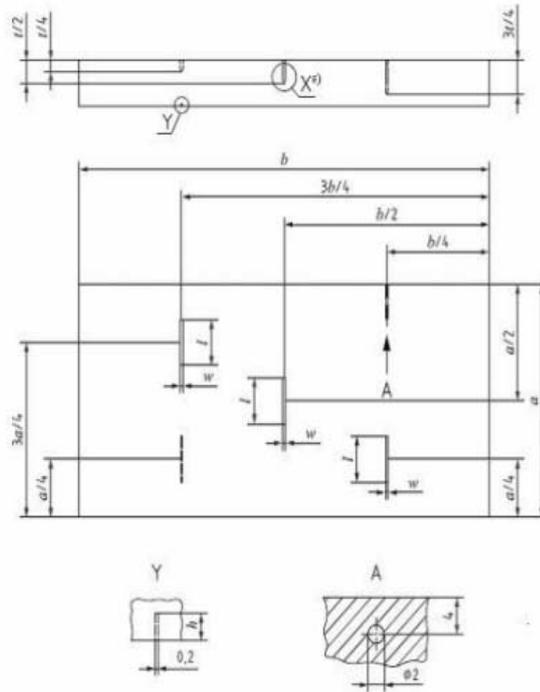
Рисунок 9.1 – Эскиз контрольного образца с использованием боковых цилиндрических отверстий в качестве контрольных дифракционных отражателей

Контрольные дифракционные отражатели должны располагаться приблизительно на 10 %, 25 %, 50 %, 75 % и 90 % от номинальной толщины объекта контроля.

Некоторые контрольные образцы, используемых в TOFD-методе, содержащих типичные контрольные отражатели, представлены на рисунке 9.1 (с пропилами) и на рисунке 9.2 (с боковыми цилиндрическими отверстиями и пропилом).

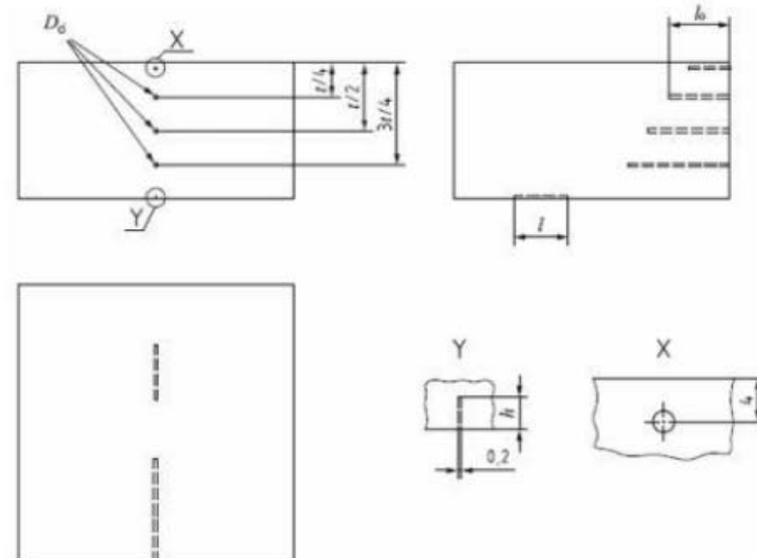
В соответствии с нормами, указанными в государственных стандартах Республики Беларусь СТБ EN 583-6 и СТБ ISO 10863 разработан универсальный контрольный образец для определения соответствия требованиям контроля. Задачей контрольного образца является правильное установление чувствительности системы и обеспечение достаточного контролируемого объема. Боковые цилиндрические отверстия выполнены на различной глубине с диаметром, рекомендованным в государственных стандартах. С помощью данного образца возможно проведение лабораторных работ на основе TOFD-метода, в нем

предусмотрены возможное положение дефектов на разных глубинах, а также различного расположения относительно друг к другу (рисунок 9.3).



a – ширина образца; b – длина образца; t – толщина образца; w – ширина пропила; l – длина пропила, h – высота пропила

Рисунок 9.2 – Контрольный образец с пропилами



t – толщина образца; D_d – диаметр бокового цилиндрического отверстия; l_0 – длина бокового цилиндрического отверстия; l – длина пропила нижней части образца; h – высота пропила

Рисунок 9.3 – Контрольный образец с односторонними боковыми цилиндрическими отверстиями и пропилом

9.2 Приборы и оборудование

Для проведения лабораторной работы используют ультразвуковой дефектоскоп, реализующий ФАР и TOFD-метод контроля; наборы пьезопреобразователей; образцы стыковых сварных соединений; лабораторную сканирующую систему для ультразвукового контроля; универсальный контрольный образец для TOFD-метода контроля.

9.3 Порядок проведения работы

9.3.1 Изучить технические характеристики и порядок настройки ультразвукового дефектоскопа, реализующего ФАР и TOFD-методы контроля, а также лабораторной сканирующей системы для ультразвукового контроля.

9.3.2 Провести настройку дефектоскопа и сканирующей системы по универсальному контрольному образцу.

9.3.3 Провести комплексный ультразвуковой контроль стыковых сварных соединений. Сделать выводы.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы, приборы и оборудование, результаты контроля натурального сварного соединения различными методами, выводы.

Контрольные вопросы

1 Какие технологии ультразвукового контроля позволяют реализовывать стенд для построения цифровых изображений дефектов?

2 Какие контрольные образцы могут использоваться для настройки приборов, реализующих ФАР и TOFD-метод УЗК?

3 Какие требования предъявляются к контрольным образцам?

4 Что используется в качестве отражателей в контрольных образцах?

Список литературы

- 1 **Овчинников, В. В.** Контроль качества сварных швов и соединений: учебник / В. В. Овчинников. – Москва; Вологда: Инфро-инженерия, 2022. – 208 с.
- 2 **Зацепин, А. Ф.** Акустические измерения : учебное пособие для вузов / А. Ф. Зацепин; под ред. В. Е. Щербина. – Москва: Юрайт; Екатеринбург: Урал. ун-т, 2022. – 209 с.
- 3 **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: практическое пособие: в 5 т. Т. 2: Акустические методы контроля / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.: ил.
- 4 **Кретов, Е. Ф.** Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении: учебное пособие / Е. Ф. Кретов. – Санкт-Петербург: Свен, 2011. – 305 с.: ил.
- 5 **Щербинский, В. Г.** Ультразвуковой контроль сварных соединений / В. Г. Щербинский, Н. П. Алешин. – Москва: Стройиздат, 2001. – 200 с.
- 6 **Щербинский, В. Г.** Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В. Г. Щербинский. – Москва: Тиссо, 2014. – 326 с.: ил.
- 7 **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил.
- 8 Методы контроля качества в машиностроении: учебное пособие / Е. Г. Кравченко [и др.]. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 132 с.
- 9 **Новокрещенов, В. В.** Неразрушающий контроль сварных соединений в машиностроении : учебное пособие / В. В. Новокрещенов, Р. В. Родякина; под науч. ред. Н. Н. Прохорова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2017. – 274 с.
- 10 Ультразвуковой контроль / Н. П. Алешин [и др.]; под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Спектр, 2011. – 224 с.
- 11 **Данилов, В. Н.** Просто о преобразователях с фазированными решетками в ультразвуковом контроле / В. Н. Данилов, Л. В. Воронкова. – Москва: Спектр, 2019. – 136 с.
- 12 Сайт компании «Olympus» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.olympus-ims.com>. – Дата доступа: 25.11.2022.
- 13 Сайт «ТОFD и фазированные решетки» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tofd-ra.ru>. – Дата доступа: 25.11.2022.