

Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Коваль Д.А. Применение схемы ТАНДЕМ для восстановления вертикально ориентированных трещин методом SAFT // Дефектоскопия, 2009, №7, с. 13-26.

УДК 534.8+620

Использование схемы ТАНДЕМ для восстановления изображений дефектов методом SAFT

А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, Д.А. Коваль

ООО «Научно-производственный центр «Эхо+»

123458, г. Москва, ул. Твардовского д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: bazulin@echoplus.ru

В статье рассматривается вопрос применения схемы ТАНДЕМ при восстановлении изображений дефектов методом SAFT. При учете отражения луча от дна появляется возможность восстановить изображение границы вертикально ориентированного плоскостного дефекта. Предложены формулы расчета оптимальных параметров схемы сканирования для сбора данных по схеме ТАНДЕМ. Проведена оценка разрешающей способности. Показано что разрешающая способность по глубине для изображений, полученных с учетом отражения от дна значительно хуже, чем на прямом луче. Для повышения разрешения необходимо когерентное сложение изображений, полученных на одном и том же объекте контроля при различных базах, что подтверждено на модельных экспериментах.

1. Введение

Когерентные методы ультразвуковой (УЗ) визуализации несплошностей вывели контроль на существенно более высокий информационный уровень и открыли принципиально новые возможности для решения задачи дефектометрии сварных соединений, т.е. задачи определения реальных размеров существующих дефектов и распознавания их типа по их изображениям, полученным когерентным методом, что является решением обратной задачи рассеяния [1].

Значительную трудность в распознавании представляют собой трещины, ориентированные перпендикулярно поверхности ввода (вертикальные трещины), а как указано в [2] наиболее вероятная ориентация трещин в сварных швах – вертикальная с возможным отклонением от нее на $\pm 10^\circ$. Принцип определения размеров дефектов основан на анализе изображений, соответствующих сигналам дифракции на кончиках дефектов или анализе

изображений, полученных при нормальном падении на отражающую поверхность протяженного дефекта. При этом изображения двух точечных дефектов (например, небольших по сравнению с длиной УЗ волны шлаковин, расположенных на расстоянии, превышающем разрешающую способность используемой системы), расположенных один над другим будут иметь большое сходство с сигналами дифракции на кончиках трещины, перпендикулярной донной поверхности. Задача правильного определения типа дефекта может быть решена при обеспечении угла падения ультразвука, близкого к нормальному для любой ориентации трещины, что не всегда возможно для совмещенной схемы контроля.

В практике ультразвукового контроля (УЗК) широко используется метод ТАНДЕМ – разновидность эхозеркального метода, основанного на применении двух наклонных преобразователей [3, 4]. Преобразователи направлены в одну сторону так, что их акустические оси лежат в одной плоскости, перпендикулярной поверхности объекта контроля, причем один из преобразователей используется для излучения, другой – для приема ультразвуковых колебаний. Основное назначение способа состоит в обнаружении дефектов, перпендикулярных поверхности контроля.

Один из наиболее распространенных когерентных вычислительных алгоритмов получения изображений дефектов – это фокусировка методом синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique – SAFT). Этот метод достигает высокой разрешающей способности изображений за счет совместной обработки данных, накопленных на существенно большей, чем у обычного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) апертуре.

В базовом случае метод SAFT реализуется с помощью совмещенного ПЭП с широкой диаграммой направленности, сканирующего по поверхности объекта [5, 6, 7]. Для каждого положения ПЭП, определяемого радиус-вектором r_i , регистрируются эхосигналы (А-сканы) $p(r_i, t)$, где t – время. Когерентное изображение методом SAFT получается пу-

тем суммирования А-сканов с учетом задержек, рассчитываемых для каждой точки изображения, определяемой радиус-вектором \vec{r}_j :

$$I(\vec{r}_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p(\vec{r}_i, t_{ij})$$

где $t_{ij} = \frac{2|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}{c}$, N - количество измеренных А-сканов, c - скорость ультразвуковых волн в среде. Другими словами, значение каждой точки результирующего изображения это сумма точек всех А-сканов, предварительно сдвинутых на величины задержек, соответствующих положению ПЭП относительно данной точки изображения. Максимум изображения достигается в точках синфазного суммирования А-сканов, которые совпадают с положением отражателей (отражающих точек на поверхности дефекта).

В данной статье рассмотрена возможность применения схемы ТАНДЕМ для выявления и образмеривания придонной трещины, используя информацию об отраженном от дна луче при восстановлении изображений методом SAFT.

2. Выбор схем контроля и получение изображений по схеме ТАНДЕМ

При однократном сканировании по схеме ТАНДЕМ происходят измерения *одновременно* по четырем схемам (Рис. 1):

1. **схема на прямом луче** – линии движения излучателя и приемника расположены с одной стороны области залегания дефектов, что соответствует излучению и приему на прямом луче;
2. **схема с однократным отражением от дна** – линии движения излучателя и приемника расположены по разные стороны области залегания дефектов (мнимый излучатель находится на двойной глубине $Z_{TRM} = 2h$, где h – толщина образца)

3. **схема с однократным отражением от дна** – линии движения излучателя и приемника расположены по разные стороны области залегания дефектов (мнимый приемник находится на двойной глубине $Z_{RCV} = 2h$)
4. **схема с двукратным отражением от дна** (мнимые излучатель и приемник находятся на двойной глубине $Z_{TRM} = Z_{RCV} = 2h$).

Где, TRM – излучатель, RCV – приёмник, Z_{TRM} – координаты излучателя по оси Z, Z_{RCV} – координаты приемника по оси Z.

Схемы 2 и 3 представляют наибольший интерес при решении задачи определения типа дефекта за счет возможности визуализировать границу трещины.

Для проведения измерений при задании координат центра трещины и её наклона необходимо подобрать оптимальные параметры контроля – базу (расстояние между передними гранями излучателя и приемника), угол ввода приёмника при известном угле ввода излучателя, начальную и конечную точки зоны перемещения приемника. Оптимальными вышеприведенные параметры считаются в случае, когда луч, отвечающий углу ввода излучателя, попадает в середину трещины (по высоте), и в приемник попадает тоже луч, отвечающий углу ввода. В этом случае происходит прием эхосигналов максимальной амплитуды и на максимальной апертуре. Оптимальные параметры для схемы ТАНДЕМ рассчитываются по формулам (см. также **Рис. 2**):

База

$$b = h \cdot \left\{ \operatorname{tg} \alpha_{rcv} - \operatorname{tg} \alpha_{trm} \right\} + \frac{(h-z)}{\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha_{trm})} + \frac{(h-z)}{\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha_{rcv})}$$

Угол ввода приёмника

$$\alpha_{rcv} = \alpha_{trm} + 2 \cdot \gamma - 180^\circ$$

Начальная координата зоны сканирования (по оси X)

Рис. 1

Рис. 2

$$X_{start} = h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{rcv} + \Delta\alpha_{rcv}) - \left\{ \frac{\{b + h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{rcv} + \Delta\alpha_{rcv}) - h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{irm} + \Delta\alpha_{irm})\} \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{rcv} + \Delta\alpha_{rcv}))}{\operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{irm} + \Delta\alpha_{irm})) + \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{rcv} + \Delta\alpha_{rcv}))} \right\}$$

Конечная координата зоны сканирования (по оси X)

$$X_{end} = h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{rcv} - \Delta\alpha_{rcv}) - \left\{ \frac{\{b + h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{rcv} - \Delta\alpha_{rcv}) - h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{irm} - \Delta\alpha_{irm})\} \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{rcv} - \Delta\alpha_{rcv}))}{\operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{irm} - \Delta\alpha_{irm})) + \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{rcv} - \Delta\alpha_{rcv}))} \right\}$$

Координаты начала/конца трещины по оси Z

$$z_1 = \{b + h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{rcv} + \Delta\alpha_{rcv}) - h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{irm} - \Delta\alpha_{irm})\} \cdot \left\{ \frac{\operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{rcv} + \Delta\alpha_{rcv})) \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{irm} - \Delta\alpha_{irm}))}{\operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{irm} - \Delta\alpha_{irm})) + \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{rcv} + \Delta\alpha_{rcv}))} \right\}$$

$$z_2 = \{b + h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{rcv} - \Delta\alpha_{rcv}) - h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{irm} + \Delta\alpha_{irm})\} \cdot \left\{ \frac{\operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{rcv} - \Delta\alpha_{rcv})) \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{irm} + \Delta\alpha_{irm}))}{\operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{irm} + \Delta\alpha_{irm})) + \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha_{rcv} - \Delta\alpha_{rcv}))} \right\}$$

Где α_{rcv} – угол ввода приемника, $\Delta\alpha_{rcv}$ – половина ширины раскрытия диаграммы направленности приемника, α_{irm} – половина угла ввода излучателя, $\Delta\alpha_{irm}$ – половина ширины раскрытия диаграммы направленности излучателя, b – база, γ – угол наклона трещины относительно горизонтальной оси.

На **Рис. 3** показано, как по рассчитанным значениям z_1 и z_2 рассчитывается максимально и минимально возможная высота выявляемой трещины. Значения z_1 и z_2 рассчитываются как верхняя и нижняя точки области, образованной пересечением диаграмм направленности излучателя и приемника, когда мнимый излучатель находится на глубине, соответствующей двойной толщине образца.

Рис. 3

Можно поменять местами излучатель и приемник, и формулы будут записаны по аналогии с вышеприведенными формулами.

Рис. 4

На верхнем графике **Рис. 4** показаны временные задержки эхосигнала от точечного рассеивателя в зависимости от положения приемника, соответствующие одновременному получению данных по четырем схемам при сканировании по схеме ТАНДЕМ (**Рис. 1**). Этим схемам соответствуют четыре блика, полученные при обработке эхосигналов от

отражателя Ø2 мм в СО-2 на глубине 51.0 от поверхности (изображения **b**, **c** и **d** на **Рис. 7**). При уменьшении базы с 50.0 до 5.0 мм (нижний график на **Рис. 4**) графики задержек для схем с однократным отражением от дна практически сливаются, что соответствует получению трех бликов от точечного дефекта при проведении регистрации в совмещенном режиме. Изображение **a** на **Рис. 7** показывает отличие изображений, полученных в совмещенном режиме и по схеме ТАНДЕМ.

3. Оценка разрешающей способности (численный и модельный эксперименты)

Чем быстрее меняются времена задержек в зависимости от глубины залегания дефекта при заданной базе и координате приемника, тем выше разрешающая способность восстановленного изображения.

Разрешающую способность по глубине можно оценить как величину, пропорциональную скорости изменения временных задержек от глубины залегания дефекта. Для того чтобы импульсы от двух дефектов разрешались, излучаемый импульс должен быть в два раза короче, чем разность времен задержек между эхоимпульсами от этих дефектов.

В качестве примера определим разрешающую способность для двух схем для точечных дефектов на глубинах 15.0 и 17.0 мм при базе 50.0 мм (**Рис. 5**). Можно сделать вывод, что при схеме восстановления с однократным отражением от дна разрешающая способность ниже примерно в три раза.

Рис. 5

Таблица 1 Временные задержки (мкс) для двух разных глубин залегания дефектов при двух схемах восстановления.

	Глубина залегания дефекта, мм	Время прихода эхосигнала, мкс	
		схема $Z_{TRM} = 0, Z_{RCV} = 0$	схема $Z_{TRM} = 0, Z_{RCV} = 2h$
	15.0	21.0	25.5
	17.0	21.5	25.6
Разница во времени прихода, мкс		0.5	0.1

Если два точечных дефекта находятся на глубине 15.0 мм и 17.0 мм, то по схеме $Z_{TRM} = 0, Z_{RCV} = 0$ (на прямом луче) для их разрешения нужно использовать импульс с длительностью, менее чем 0.5 мкс (частота > 2 МГц). Для тех же дефектов и схемы $Z_{TRM} = 0, Z_{RCV} = 2h$ (с однократным отражением от дна) для их разрешения нужно использовать импульс с длительностью, меньше чем 0.1 мкс (частота > 10 МГц).

Для оценки разрешающей способности схемы с однократным отражением от дна рассмотрим данные, полученные на отверстии Ø2 мм в образце СО-2 (**Рис. 6**). Эхосигналы, измеренные по схеме ТАНДЕМ, восстанавливались методом SAFT по схемам 1, 2, 3 на **Рис. 1**. Измерения выполнены на системе АВГУР в НПЦ «ЭХО+» излучателем с углом ввода 40° и приемником с углом ввода 60°. Центральная частота обоих ПЭП равна 2.5 МГц. Дополнительно проведены измерения и в совмещенном режиме ПЭП с углом ввода 40°. По восстановленным изображениям, представленным на **Рис. 7**, была оценена разрешающая способность (Таблица 2).

Рис. 6

Рис. 7

Таблица 2 Оценка лучевой и фронтальной разрешающей способности

Схема / Разрешающая способность	$Z_{TRM} = 0, Z_{RCV} = 0$	$Z_{TRM} = 0, Z_{RCV} = 2h$	$Z_{TRM} = 2h, Z_{RCV} = 0$
Лучевая, мм	2.16	2.16	2.88
Фронтальная, мм	2.4	7.2	7.2

Данные **Таблицы 2** подтверждают сделанное ранее предположение, что лучевая разрешающая способность для схем на прямом луче и с однократным отражением от дна

по уровню 0.5 примерно одинакова для всех схем. Фронтальная разрешающая способность по схеме с однократным отражением от дна в три раза хуже (изображения 3, 4 на **Рис. 7**), чем по схеме на прямом луче (изображение 2 на **Рис. 7**).

На основании данных, приведенных в этом разделе, можно сделать следующие

выводы:

- При восстановлении методом ПСП эхосигналов, полученных по совмещенной схеме от точечного дефекта, на изображении наблюдаются три блика.
- При восстановлении методом SAFT эхосигналов, полученных по схеме ТАНДЕМ от точечного дефекта, на изображении наблюдаются четыре блика.
- Каждой из схем измерения ТАНДЕМ соответствует своя схема восстановления методом SAFT, с учетом положения излучателя и приемника. Для каждой из четырех схем восстановления только один импульс находится в истинной координате («правильный» импульс), а остальные расфокусированы, имеют неверную координату и являются «неправильными».
- При получении методом SAFT изображения сразу по четырем схемам с когерентным сложением позволит повысить отношение сигнал шум, увеличить амплитуду «правильных» импульсов и уменьшить амплитуду «неправильных».
- Показано, что при восстановлении данных методом SAFT по схеме с однократным отражением от дна разрешающая способность по глубине существенно хуже, чем на прямом луче. Один из вариантов решения данной проблемы состоит в когерентном сложении нескольких изображений, полученных в режиме ТАНДЕМ при разных базах (что будет показано в следующем разделе). Хорошие результаты должны быть получены при использовании режима «двойного сканирования» [8].

4. Результаты модельных экспериментов

Стандартный образец СО-2

Эскиз образца СО-2 представлен на **Рис. 6**. Измерения выполнены системой «АВ-ГУР» разработанной и изготовленной в НПЦ «ЭХО+». Для излучения ультразвукового импульса использовался ПЭП с углом ввода 40° , а для приема с углом ввода 60° . Центральная частота обоих ПЭП равна 2.5 МГц

Эксперимент проводился при четырех разных базах 56.0; 61.0; 66.0 и 71.0 мм, которые больше, чем оптимальная, рассчитанная по ранее приведенным формулам.

Изображения, восстановленные методом SAFT, когерентно складывались и сравнивались с изображениями до сложения.

На **Рис. 8** приведены четыре изображения, полученные по схеме на прямом луче при разных базах. На **Рис. 9** приведено суммарное изображение после когерентного сложения этих четырех изображений. На **Рис. 10** приведено изображение после когерентного сложения четырех изображений, полученных по схеме с однократным отражением от дна.

Рис. 8

Рис. 9

Рис. 10

Таким образом, на основании экспериментов на образце СО-2 можно утверждать, что при когерентном суммировании нескольких изображений, полученных при разных базах, амплитуда полезного изображения возросла в 3 раза. Обработка эхосигналов по схеме с однократным отражением от дна позволили восстановилась часть вертикальной стенки образца.

Модель плоскостного дефекта в дюралюминиевом блоке

На **Рис. 11** представлен эскиз образца из дюралюминия с моделью плоскостного дефекта высотой 15.0 мм и раскрывом 50.0 мкм выполненного электроэрозионным способом. Для измерений использовались те же ПЭП, что и в предыдущем эксперименте.

Рис. 11

На **Рис. 12** приведено изображение (1), полученное ПЭП с углом ввода 40° в совмещенном режиме. Изображение пропила имеет характерный вид для совмещенной схе-

мы регистрации наклонным ПЭП: одиночный блик, соответствующий вершине пропила, и несколько бликов в районе корня, среди которых имеется блик от уголкового отражателя в корне дефекта, блики, соответствующие трансформации моды волны и т.д. Отношение амплитуд сигнала от корня и от вершины составляет 28 дБ.

Эксперимент по схеме ТАНДЕМ проводился при четырех разных базах (56.0; 61.0; 67.0 и 72.0 мм что больше, чем оптимальная база 49.0 мм, рассчитанная по приведенным ранее формулам). Изображения, восстановленные методом SAFT по схеме на прямом луче при разных базах, были проанализированы отдельно. На **Рис. 12** приведено изображение (2), полученное при базе 56,0 мм. Здесь отношение амплитуд сигнала от корня и от вершины пропила составляет около 20 дБ. Затем изображения, полученные при разных базах, были когерентно сложены с учетом положения ПЭП (**Рис. 12**, изображение 3). Это привело к тому, что амплитуда «правильного» блика от вершины возросла примерно в три раза, из-за их когерентного сложения, в сравнении с бликом на изображении до сложения. Блики «неправильные», то есть сформированные ультразвуковым импульсами полученными в результате перерасеивания и трансформации на границах дефекта и образца, складываются не в фазе и их амплитуда растет медленнее, чем амплитуда «правильных» бликов. В результате отношение амплитуд сигнала от корня и от вершины пропила стало около 14 дБ, что позволяет более уверенно обнаруживать сигналы дифракции от вершины трещины на фоне сигналов из корня.

Рис. 12

Изображения, полученные по схеме с однократным отражением от дна, были когерентно сложены только при базах 55.6, 62.0 и 67.0 мм, так как изображение, полученное при базе 72.0 мм «распадается» из-за недостаточной апертуры сканирования. На левом изображении **Рис. 13** видно, что граница плоскостного дефекта восстановилась в правильном месте, уменьшились амплитуды «неправильных» импульсов (в 2 раза). Рассмотрим вертикальный срез двух изображений: до суммирования (изображение, полученное при базе 56.0 мм) и после суммирования трех изображений (правое изображение на **Рис. 13**).

Рис. 13

По изображению, полученному при базе 56.0 мм, высота может быть определена как 20 мм, а **по суммарному** изображению высота может быть оценена как 16.0 мм **по уровню 0.7** от максимальной амплитуды блика. Измеряя высоту **по уровню 0.5**, высоту можно оценить как 31.0 мм для изображения, полученного при базе 56.0 мм, или 22.0 мм на суммированном изображении. Можно сделать вывод, что на изображениях, полученных при однократном измерении с определенной базой, высота трещины завышена в зависимости от уровня на 18 или 82 процента. Наличие протяженного вертикального блика можно рассматривать как признак вертикально ориентированной придонной трещины, что очень важно при определении типа обнаруженной несплошности.

Таким образом, показана возможность визуализации границы плоскостного вертикально ориентированного дефекта, и улучшения качества изображения этой границы путем когерентного сложения нескольких изображений, полученных при разных базах. Лучший результат по определению высоты плоскостного дефекта достигается при отсечке по уровню 0.7 от максимума амплитуды для суммированного изображения.

5. Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- Изображения, восстановленные по эхосигналам, полученным по схеме ТАНДЕМ на прямом луче, позволяют уменьшить разницу амплитуд от вершины и корня приповерхностного плоскостного дефекта на 14 дБ в сравнении с совмещенной схемой регистрации..
- Изображения, восстановленные по эхосигналам, полученным по схеме ТАНДЕМ на отраженном луче, можно использовать как дополнительную информацию для определения типа дефекта.
- Предложены формулы для расчета оптимальных параметров для схемы ТАНДЕМ.

- Проведена оценка разрешающей способности, показано, что фронтальная разрешающая способность для схем с однократным отражением от дна примерно в три раза хуже, чем для схемы на прямом луче. Разрешающая способность может быть повышена при когерентном сложении нескольких изображений, полученных в режиме ТАНДЕМ при разных базах. Полученные результаты могут быть обобщены в идеологии «двойного сканирования» когда работают все схемы получения данных [8].
- Алгоритмы и формулы, использованные в данной работе, предполагают строгую параллельность поверхности образца и донной поверхности, однако могут быть модифицированы с тем, чтобы учесть непараллельность поверхности и дна объекта контроля или даже произвольную форму данных поверхностей.
- Дальнейшее развитие алгоритмов состоит в применении обработки SAFT для схемы самотандем [9], объединении изображений по разным схемам, продолжении экспериментов на реальных сварных соединениях.

20 февраля 2008 года.

Рисунки

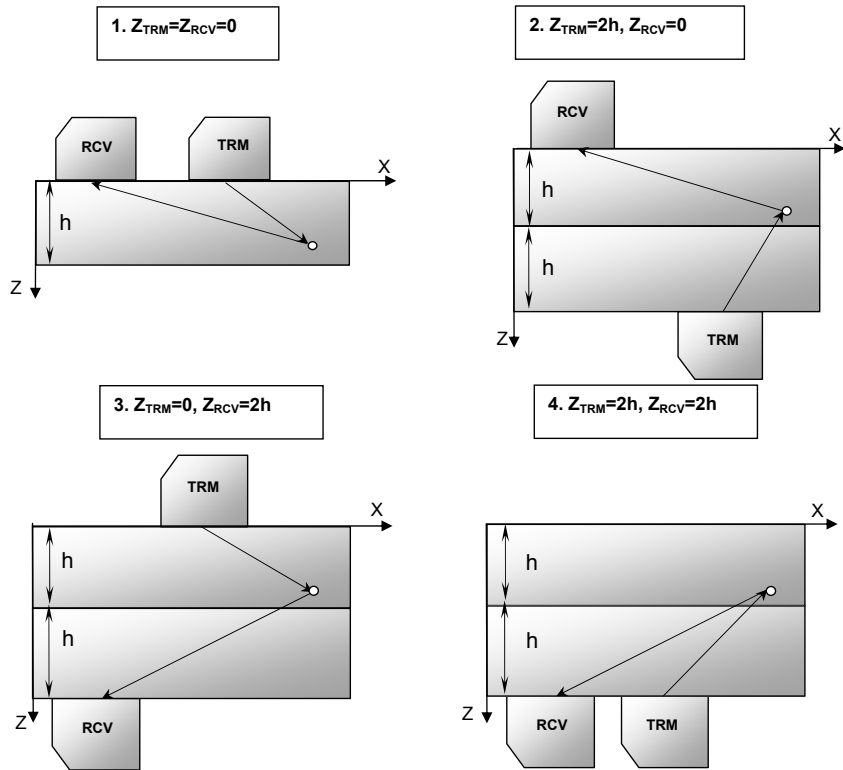


Рис. 1. Схемы получения данных об отражателях. 1 – Схема на прямом луче; 2 — Схема с однократным отражением от дна (мнимый излучатель находится на двойной глубине); 3 – Схема с однократным отражением от дна (мнимый приемник находится на двойной глубине); 4 – Схема с двукратным отражением от дна (мнимые излучатель и приемник находятся на двойной глубине).

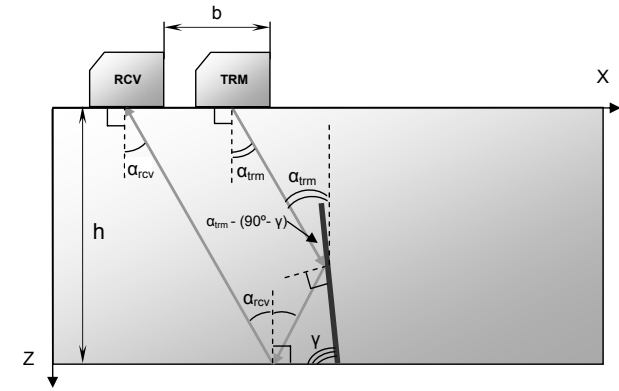


Рис. 2. Схема с однократным отражением от дна.

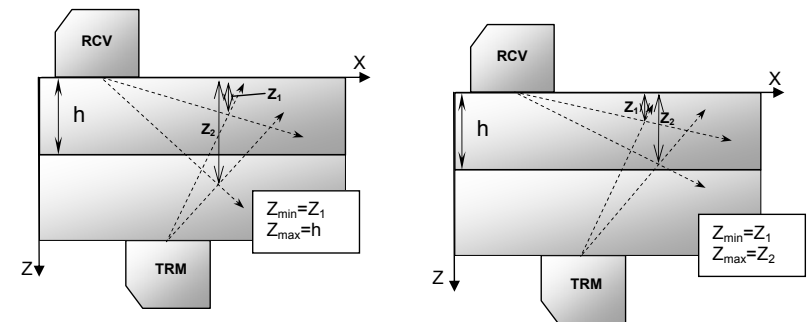


Рис. 3. Определение максимальной и минимальной возможных высот выявляемой трещины.

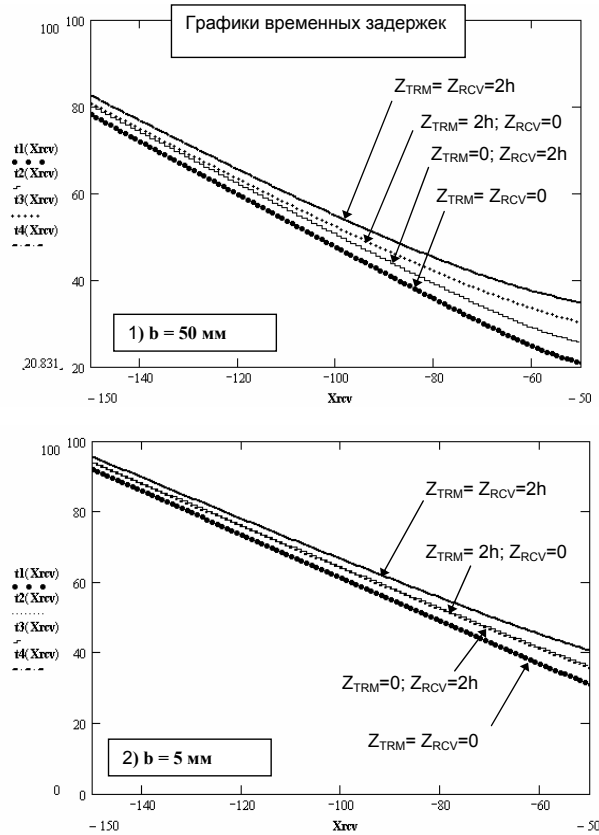


Рис. 4. Временные задержки эхосигнала от точечного рассеивателя в зависимости от положения приемника XRCV. 1 – при базе 50.0 мм; 2 – при базе 5.0 мм.

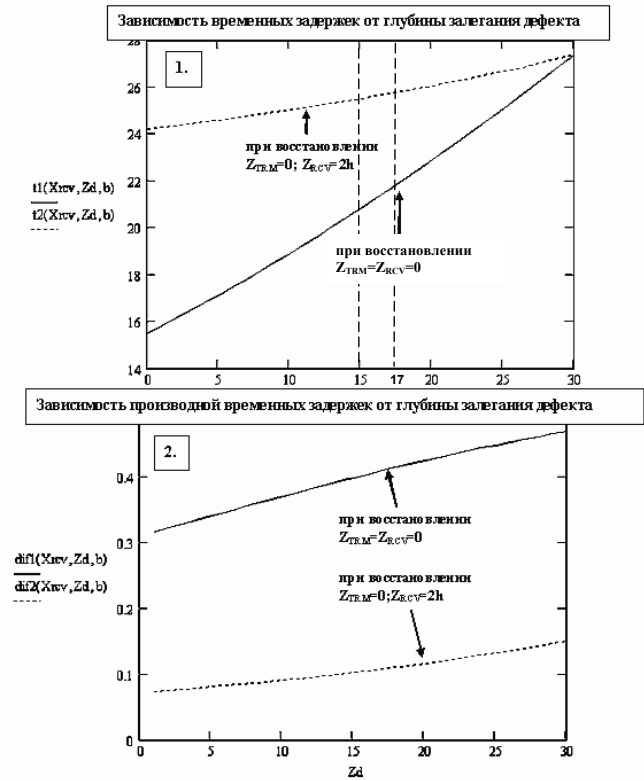


Рис. 5. 1 – Временные задержки эхосигнала от точечного рассеивателя в зависимости от его глубины залегания.
 2 – Производная временных задержек по глубине залегания в зависимости от глубины залегания точечного дефекта.

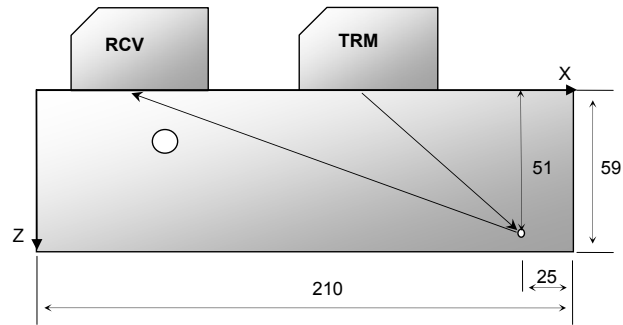


Рис. 6. Эскиз стандартного образца CO-2 (показано только одно отверстие $\varnothing 25$ мм).

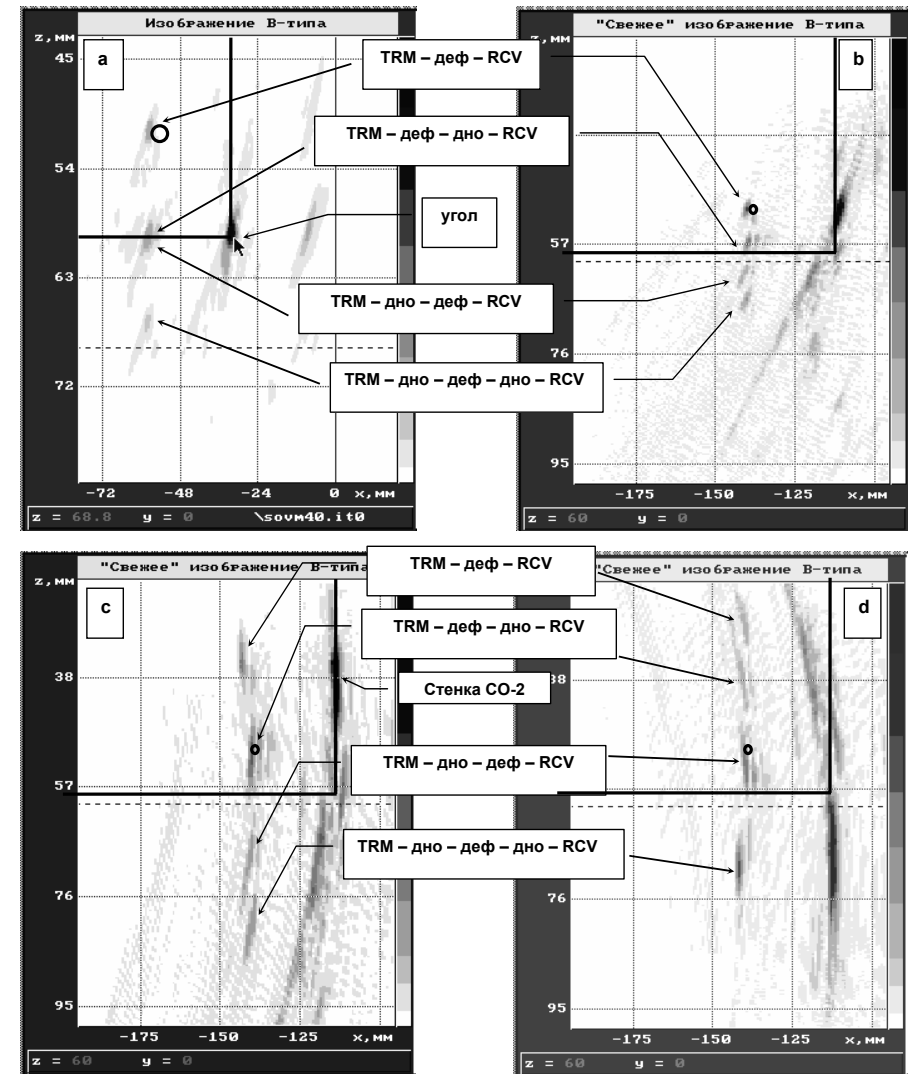


Рис. 7. а – изображение отверстия $\varnothing 25$ мм в CO-2, полученное методом ПСП при измерении в совмещенном режиме; б – изображение, полученное методом SAFT по схеме на прямом луче; с – изображение, полученное методом SAFT (восстановление с параметрами $Z_{TRM} = 0$, $Z_{RCV} = 2h$); д – изображение, полученное методом SAFT (восстановление с пара-

метрами $Z_{TRM} = 2h$, $Z_{RCV} = 0$). На изображение наброшена маска с контурами отверстия и границ образца.

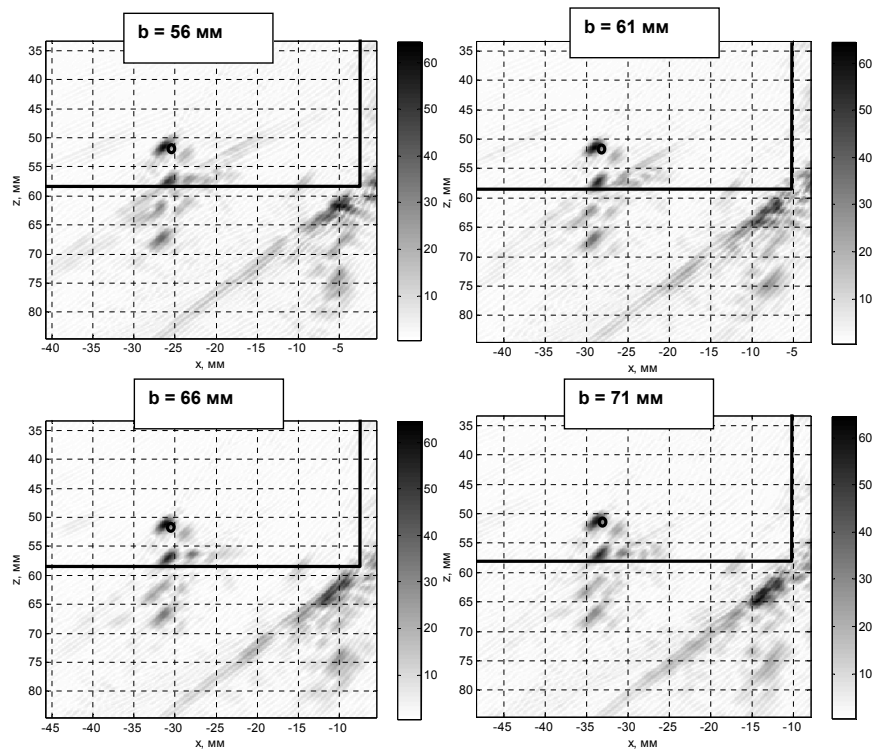


Рис. 8. Изображения, полученные при разных базах, восстановленные методом SAFT по схеме на прямом луче. На изображение наброшена маска с контурами отверстия и границ образца.

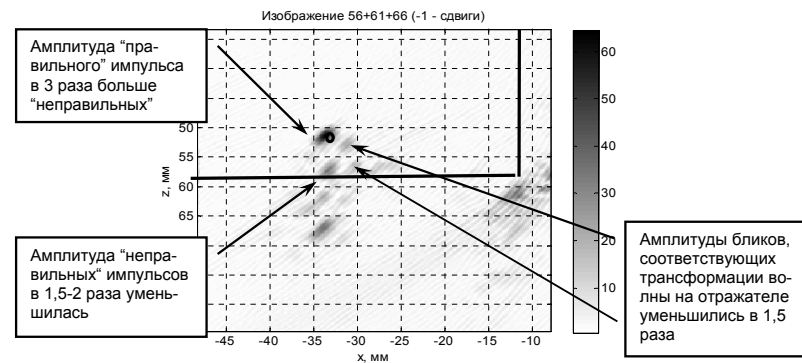


Рис. 9. Результат когерентного сложения изображений, полученных при разных базах, по схеме на прямом луче. На изображение наброшена маска с контурами отверстия и границ образца.

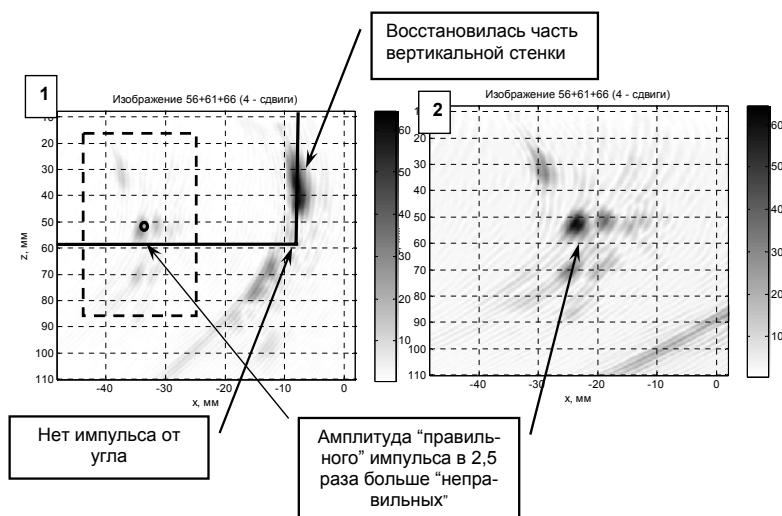


Рис. 10. Результат когерентного сложения четырех изображений, восстановленных методом SAFT по схеме с отражением от дна. 1 – когерентное сложение изображений, восстановленных из данных, полученных при базах 56.0, 61.0, 66.0 и 71.0 мм; 2 – фрагмент изображения 1 (сигнал от уголкового отражателя не виден). На изображение наброшена маска с контурами отверстия и границ образца.

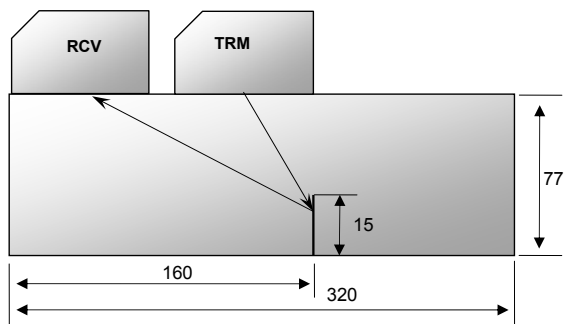


Рис. 11. Схема эксперимента по получению изображения модели плоскостного дефекта в дюралюминиевом блоке.

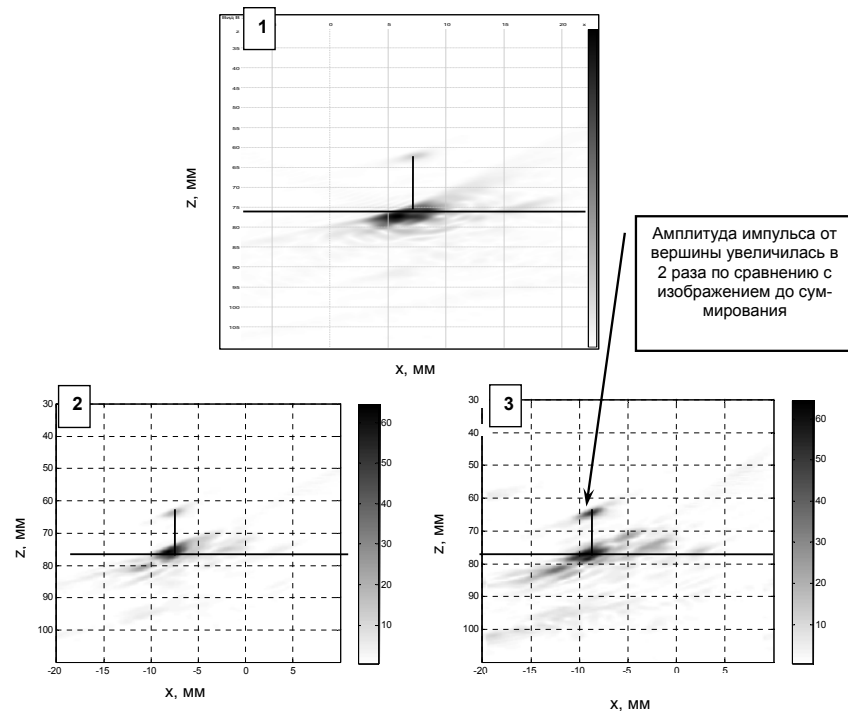


Рис. 12. Результаты восстановления изображений модели плоскостного дефекта, полученных по совмещенной схеме (1), по схеме ТАНДЕМ на прямом луче при базе 56.0 мм (2) и

суммарное изображение, полученное по схеме ТАНДЕМ при базах 56.0, 61.0, 66.0 и 71.0 мм (3). На изображение наброшена маска с контурами модели трещины и границ образца.

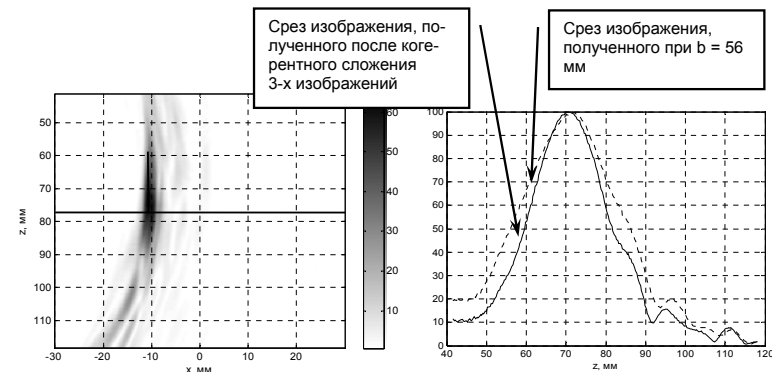


Рис. 13. Слева результат когерентного сложения трех изображений плоскостного отражателя, восстановленных с учетом отражения от дна после измерений с базами 55.6, 61.0, 67.0 мм. Справа показан срез изображения по оси Z. На изображении наброшена маска с контурами модели трещины и границ образца

Список литературы

- 1 Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Новый подход к ультразвуковому неразрушающему автоматизированному контролю ответственных сварных соединений. - Контроль. Диагностика. - 1999. - № 10. С. 23-31.
- 2 Щербинский В.Г., Белый В.Е. Эхо-зеркальный ультразвуковой метод обнаружения и распознавания дефектов сварных швов. - М.: Машиностроение, 1989. - 41 с.
- 3 Ланге Ю.В., Воронков В.А. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. Справочник. Издание второе. - М.: Авторское издание, 2003. - 120 с.
- 4 Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2000, 496 с.
- 5 Thomson, R.N. A Portable System for High Resolution Ultrasonic Imaging on Site. - British Journal of Non-Destructive Testing. - 1984, Vol. 26, N 7, pp. 281-285.

-
6. Johnson, J.A, Barna, B.A. The Effects of Surface Mapping Corrections with Synthetic-Aperture Focusing Techniques on Ultrasonic Imaging. - IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. - 1983, Vol. 30, Issue 5, pp. 283-294.
7. Плис А.И., Бабин М.В., Железняков В.А. К вопросу о прямом восстановлении пространственной структуры акустических источников. - Письма в ЖТФ. - 1981. - Т. 8. - № 2. - С. 83-86.
8. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей. - Акустический журнал, 2001, т. XLVII, № 6, с. 741-745.
9. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение. – 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н.Ермолов, Ю.В. Ланге. – 864 с.