

УДК 620.179.16

д.т.н. Сотников А. Л.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР),
Орлов А. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Выполнен анализ эксплуатационных характеристик отечественных ультразвуковых дефектоскопов, использующих технологию фазированных и антенных решеток, по разрешающей способности, особенностям настройки и качеству отображаемых томограмм с целью выработки рекомендаций по их выбору для различных областей применения. Проведенный сравнительный анализ технических возможностей дефектоскопов на фазированных и антенных решетках информативно позволяет показать преимущества и недостатки каждого из них.

Ключевые слова: дефектоскопия, фазированные и антенные решетки, неразрушающий контроль, фокальный закон, искусственный отражатель, цифровая фокусировка.

Современные технологии и приборы, позволяющие визуализировать внутренний объем твёрдого тела, например из металла, композита или бетона, находят все большее применение в практике неразрушающего контроля ответственных изделий и конструкций.

Одними из таких приборов являются ультразвуковые (УЗ) дефектоскопы на фазированных и антенных решетках (ФАР или ФР и АР соответственно).

При УЗ-контроле обычно используются одноэлементные пьезопреобразователи, создающие УЗ-колебания, которые распространяются вдоль акустической оси преобразователя с небольшим расхождением (рис. 1). Расхождение колебаний помогает обнаруживать и измерять размеры

дефектов, расположенных под углом к УЗ-лучу.

Особенностью технологии ФАР является способность управлять формой и направлением УЗ-луча электронным способом при помощи одного преобразователя с множеством элементов (рис. 2). Пьезоэлемент решетки разрезан на множество идентичных элементов, ширина каждого из которых многократно меньше его длины. Элементы расположены на одной подложке на одинаково малом расстоянии друг от друга и связаны между собой электрически и акустически. Каждый из этих элементов может рассматриваться как источник цилиндрической волны. Волновые фронты от множества узких пьезоэлементов будут интерферировать, создавая суммарный волновой фронт [1].

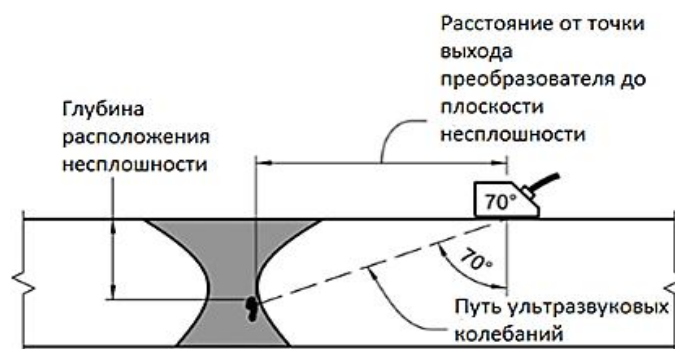


Рисунок 1 Определение глубины и расположения несплошностей сварного шва геометрическим способом с помощью традиционного УЗ-контроля



Рисунок 2 УЗ-контроль сварного шва с помощью технологии ФАР

На рисунке 2 показана секторная раз-
вертка, полученная с помощью ФАР, воз-
буждающей УЗ-колебания, как правило, в
диапазоне углов $35\text{--}75^\circ$. Для удобства по-
нимания на этом рисунке показаны только
первый и второй сегменты сканирования.
Часть сварного соединения, сканируемая
прямым лучом, заштрихована вертикаль-
ными линиями. Часть сварного соедине-
ния, сканируемая однократно отраженным
лучом, заштрихована горизонтальными
линиями. Стоит обратить внимание, что
при этом сканировании нижняя часть
сварного шва исследуется как прямым, так
и однократно отраженным лучом.

В сравнении с классическим УЗ-
контролем применение УЗ-дефектоскопов
с ФАР предоставляет гораздо более ин-
формативное двумерное изображение се-
чения внутреннего объема материала —
томограмму, — а также даёт возможность
генерации преобразователем разных углов
ввода сигнала, что намного увеличивает
контролируемую зону и скорость сканиро-
вания. Вместе с тем генерация эхосигна-
лов диапазона углов и последующая их
обработка повышает требования к вычис-
лительной мощности применяемых УЗ-
дефектоскопов для получения высокого
качества изображения с приемлемой час-
тотой обновления, что особенно важно при
автоматизированном сканировании [2].

В случае использования ФР волновые
фронты, излучаемые отдельными элемен-
тами преобразователя, могут быть задер-
жаны во времени и синхронизированы по
фазе и амплитуде таким образом, чтобы
создавать сфокусированный и управляе-
мый УЗ-луч. АР отличается тем, что в

процессе ее работы зондирование проис-
ходит поочередно каждым отдельным
элементом, а прием — одновременно все-
ми элементами преобразователя [3].

По принципу действия УЗ-дефектоскопы
с ФАР можно разделить на две группы:

1) приборы, в которых ФР физически
формируют в объекте контроля (ОК) скани-
рующий УЗ-сигнал;

2) приборы с виртуально синтезируемой
фокусируемой апертурой, где АР поэлемент-
но зондирует ОК рассеянным УЗ-сигналом.

В первом случае, перед проведением
контроля, задаётся тип фокусировки, по
которому для конкретной ФР, призмы и
ОК рассчитываются задержки при излуче-
нии и приёме в заданном диапазоне углов.
При зондировании все элементы преобра-
зователя излучают акустические импульсы
с некоторыми взаимными временными за-
держками, которые заданы фокальным за-
коном, благодаря чему происходит фоку-
сировка импульсов в выбранную точку
пространства. В процессе приема сигналов
применяется тот же, что и при излучении
сигналов, фокальный закон, который, бла-
годаря взаимным задержкам сигналов в
приемных каналах, обеспечивает сумми-
рование эхо-сигналов от выбранной точки
пространства. При этом каждый элемент
ФР (активной группы) работает независи-
мо от других элементов. Полезным эффек-
том от их совместной работы является
сумма эхо-сигналов, пришедших из точки
фокусировки в ОК [3].

После процедуры расчёта задержек, ко-
торая может длиться несколько секунд,
УЗ-дефектоскоп на ФР начинает формиро-
вать секторное изображение отражателей

(S-скан) либо с некоторым периодом, либо по сигналам с датчика положения [2]. Заключение о размерах и типе обнаруженного отражателя делается не по одному эхосигналу, как в традиционном УЗ-контроле, а по двумерному изображению S-скана, которое значительно информативнее.

Во втором случае, при использовании АР, регистрируются эхосигналы, поочередно излученные и принятые всеми парами элементов решётки. Такой метод регистрации эхосигналов в зарубежной литературе называют «полноматричный захват» — Full Matrix Capture (FMC) [4]. Затем по измеренным эхосигналам восстанавливаются изображения отражателей. Один из алгоритмов, позволяющий обработать этот объём информации, — метод общей фокусировки (в зарубежной литературе называют Total Focusing Method (TFM) [4]). Объединенную работу методов FMC+TFM в русскоязычной литературе называют методом цифровой фокусировки антенной решетки (ЦФА) [2, 5, 6].

В России на сегодняшний день выпускаются следующие УЗ-дефектоскопы на ФАР, внесенные в реестр средств измерений (табл. 1):

- АВГУР-АРТ компании «Эхо+» (рис. 3, а) [5];
- A1550 IntroVisor компании «АКС» (рис. 3, б) [6];
- УСД-60ФР компании «Кропус» (рис. 3, в) [7].

УЗ-дефектоскоп АВГУР-АРТ (рис. 3, а) имеет достаточно большие габаритные размеры и массу (7 кг), а также аккумуляторную батарею с продолжительностью работы 4 часа [5], что не позволяет с приемлемым комфортом работать в полевых условиях. Размеры данного дефектоскопа дали возможность вместить мощную вычислительную базу, однако при этом он не отличается простотой настройки и эксплуатации. Прибор обладает большим спектром настроек под разнообразные конфигурации ОК и условия сканирования. Высокая скорость обработки данных позволяет проводить авто-

матизированное сканирование при помощи АВГУР-АРТ с высокой производительностью. Ограничением данного прибора является возможность его работы только при температуре окружающей среды выше 0 °С.

A1550 IntroVisor (рис. 3, б), так же как и следующая модель УЗ-дефектоскопа, обладает простым и удобным меню основных настроек и установки параметров рабочей конфигурации под каждый конкретный ОК. По утверждению разработчиков, освоить работу с прибором под силу специалистам любого уровня квалификации, в том числе не имеющим предварительной подготовки [6]. Прибор имеет небольшие габаритные размеры и массу (1,8 кг), что является важным качеством при работе в полевых условиях. Быстросменные аккумуляторные батареи позволяют использовать дефектоскоп в рабочем режиме около 8 часов непрерывной работы.

К преимуществам УСД-60ФР (рис. 3, в) можно отнести несложный интерфейс, простую и быструю настройку дефектоскопа для заданных условий контроля конкретных объектов. Малая масса (1,4 кг) и габаритные размеры, аккумулятор большой емкости позволяют использовать прибор в полевых условиях около 10 часов в рабочем режиме. Также в данном дефектоскопе реализована функция автоматической калибровки призмы преобразователя и самодиагностики коммутатора [7].

Отличительной чертой УЗ-дефектоскопов на ФР является способность фокусироваться в любой желаемой точке в ОК. При фокусировке используются задержки, как при передаче, так и при приеме, для синхронизации времени пролета коротких импульсных сигналов в интересующих точках. В фокальной зоне объекта ширина генерируемого акустического луча уменьшается (рис. 4, а — зона ярко-оранжевого и красного цвета), а соответствующее разрешение обнаружения существенно увеличивается. Реализация указанного принципа фокусировки возможна на УЗ-дефектоскопах УСД-60ФР и АВГУР-АРТ.

Таблица 1

Сравнение технических возможностей УЗ-дефектоскопов на ФАР

Технические характеристики	УЗ-дефектоскоп на ФАР		
	АВГУРТ-АРТ	A1550 IntroVisor	УСД-60ФР
Количество пьезоэлементов в решетке, шт.	32	16	16
Сектор обзора поперечной волной	35–75°	35–80°	35–75°
Диапазон измерений глубины с прямой решеткой, мм	1–200	2–300	<2900
Диапазон измерений глубины с наклонной решеткой, мм	–	2–160	–
Диапазон частот решетки, МГц	0,4–25	1–10	0,5–12
А-СКАН — режим классического дефектоскопа	+	+	+
В-СКАН — режим томографа	+	+	+
С-СКАН — представление результатов в виде сечения ОК в плане, параллельного поверхности сканирования	+	+	+
D-СКАН — представление результатов в виде поперечного сечения ОК, перпендикулярного к поверхности сканирования и перпендикулярного к проекции оси УЗ-пучка на поверхность сканирования	+	+	+
S-СКАН — секторное сканирование	+	–	+
L-СКАН/E-СКАН — линейное сканирование	+	–	+
TOFD — дифракционно-временной метод	+	–	+
Возможность использования датчика пути (энкодера)	+	+	+
Притираемость призмы (дополнительного модуля) под конкретные радиусные поверхности, мм	–	+	+
Цифровая фокусировка сигнала (ЦФА)	+	+	+
Физическая фокусировка луча решетки	+	–	+
Временная регулировка чувствительности (ВРЧ)	+	+	+
Пространственная регулировка чувствительности (ПРЧ)	+	+	–
Угловая регулировка чувствительности (УРЧ)	+	–	+
Способность к автоматической калибровке	–	–	+
Возможность самодиагностики коммутатора и преобразователя	–	–	+
Возможность автоматизированного сканирования	+	+	+
Работоспособность при температурах, °С	+1...+40	–10...+55	–30...+55

На рисунке 4, б представлена томограмма (S-скан) ОК с искусственными боковыми цилиндрическими отверстиями (БЦО) в количестве 8 шт. и установленным базовым углом ввода ФР-преобразователя 50° [8].

В УЗ-дефектоскопе A1550 IntroVisor реализуется метод ЦФА. Его особенность в том, что всё изображение отображается со сфоку-

сированной амплитудой (рис. 5, б), тогда как в случае УЗ-контроля с помощью ФР (рис. 5, а) изображение имеет высокое разрешение только в зоне фокусировки луча [7].

На рисунке 6 представлена реализация фокальных законов УЗ-дефектоскопом УСД-60ФР. Применяя активную апертуру с

количеством пьезоэлементов 8 шт. (рис. 6, а), можно наблюдать небольшое ухудшение четкости получаемого изображения томограммы. В этом случае частота обновления кадров на экране прибора составляет 13 кадров в секунду (13,2 Гц). С увеличением количества задействованных пьезоэлементов до 16 шт. (рис. 6, б) качество полученного изображения томограммы повышается. Одна-

ко частота обновления кадров на экране уменьшается до 4 кадров в секунду (4 Гц). Апертуру из 16 активных элементов целесообразно использовать при внимательной оценке уже найденных дефектов либо на малых развертках [7]. Таким образом, ФР позволяет находить баланс между производительностью и качеством получаемых изображений томограмм.

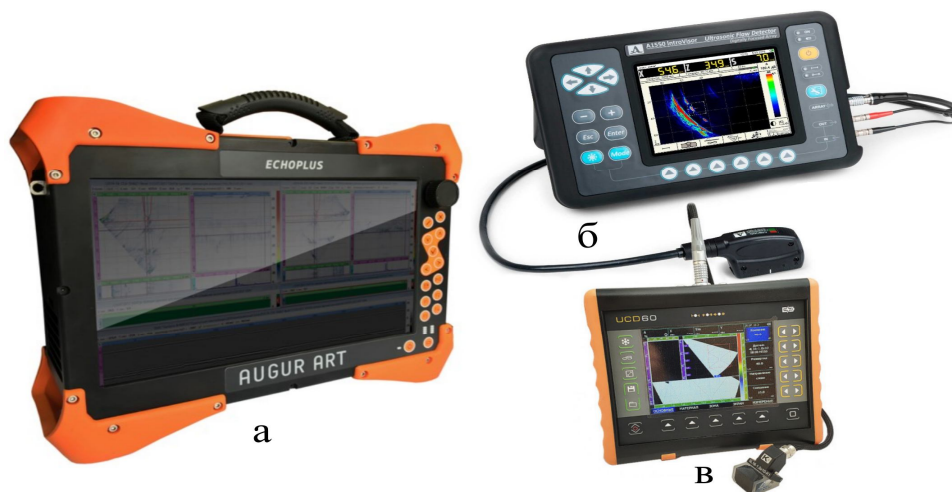


Рисунок 3 Внешний вид отечественных УЗ-дефектоскопов на ФАР

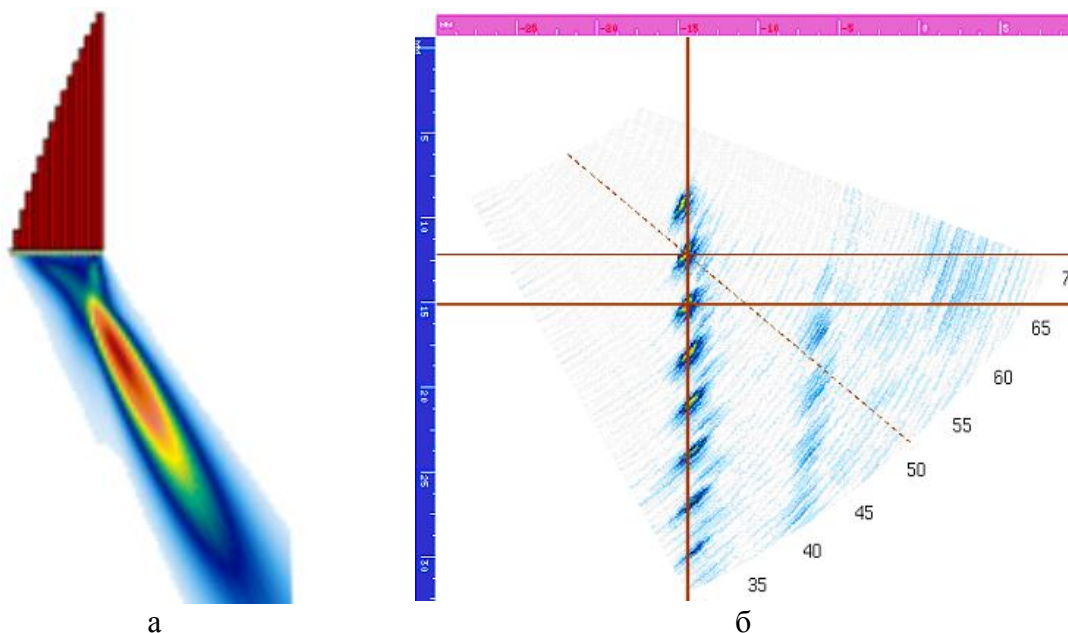


Рисунок 4 Пример фокальных законов для обнаружения БЦО поперечными волнами [8]

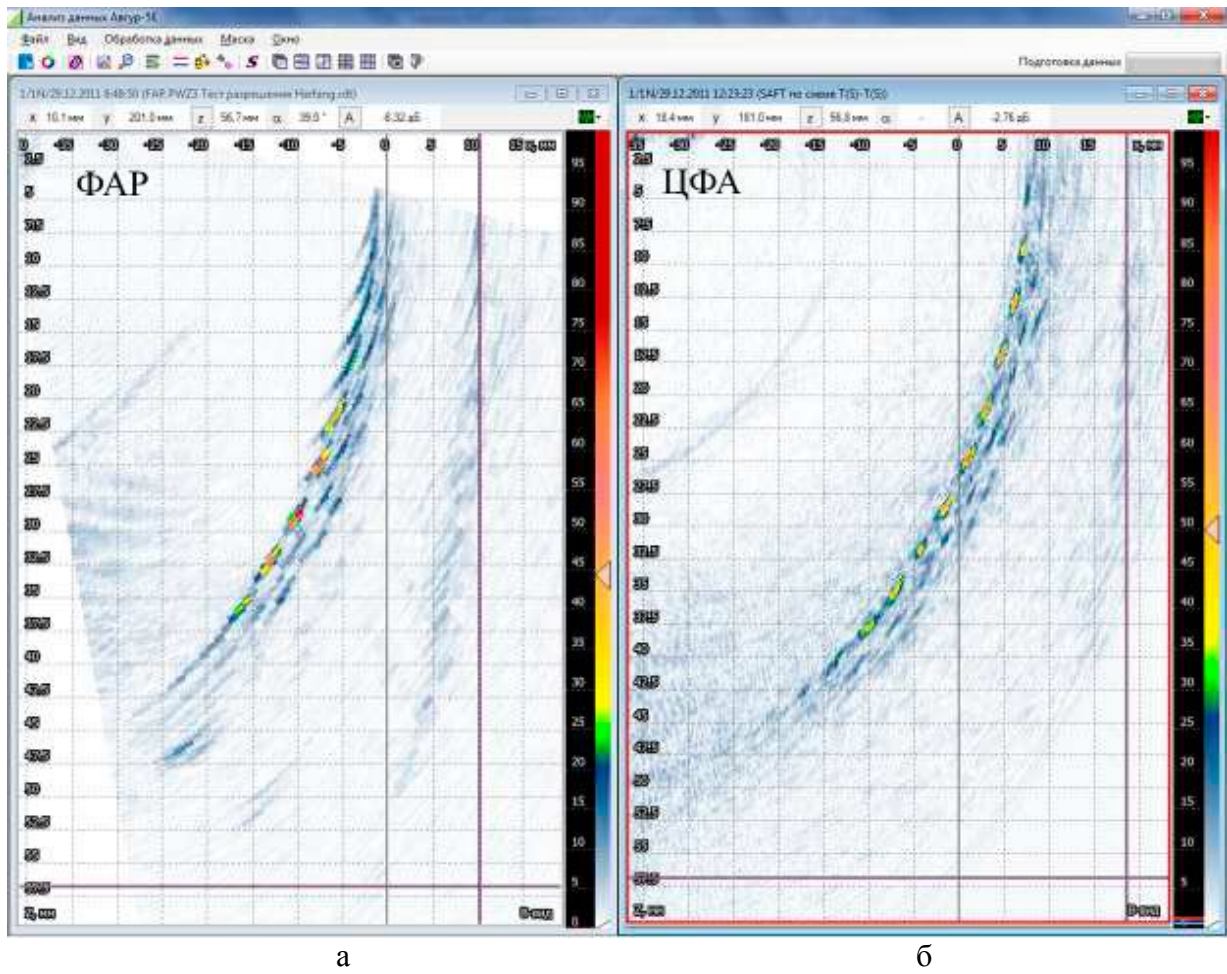
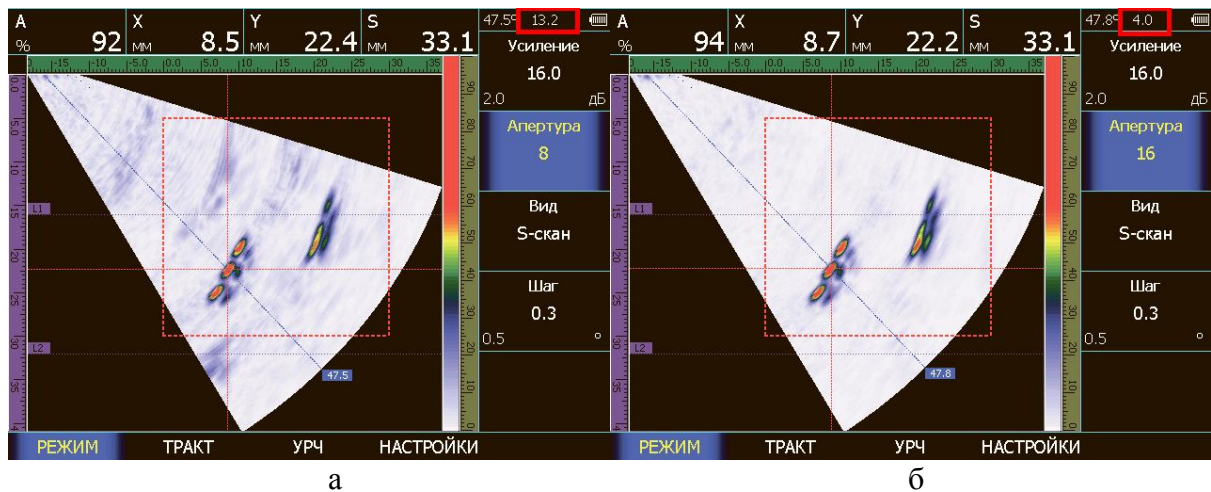


Рисунок 5 Изображение фронтального разрешения результата сканирования БЗО [2]



а — 8 элементов; б — 16 элементов

Рисунок 6 Сравнение S-сканов при разной апертуре [7]

Ещё одним способом повышения производительности УЗ-дефектоскопа с ФР является изменения шага углов, с которым строится развертка. При смене шага с $0,5^\circ$ (рис. 7, а) до $1,0^\circ$ (рис. 7, б) скорость обновления экрана УЗ-дефектоскопа вырастает с 20,6 до 35,7 Гц соответственно. Вместе с тем качество получаемого изображения томограммы уменьшается. Это связано с тем, что прибору необходимо обработать в два раза больше эхо-импульсных сигналов, т. к. шаг изменения угла при построении развертки определяет количество классических А-сканов, из которых состоит S-скан.

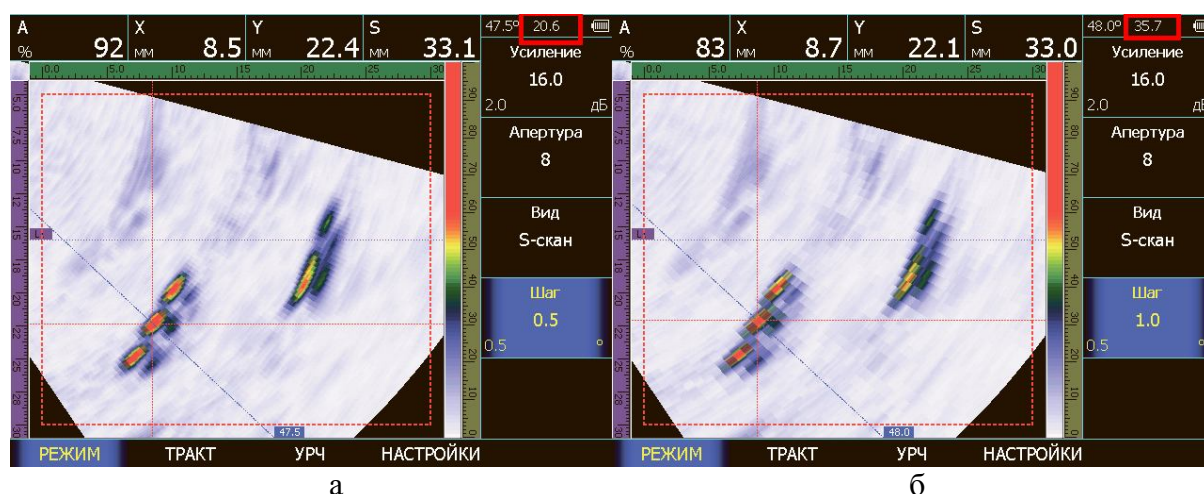
Таким образом, видно, что производительность УЗ-дефектоскопа с ФР находится в жесткой взаимосвязи с качеством получаемого изображения томограммы.

Для полной прорисовки гладких трещин в приборе A1550 IntroVisor предусмотрены специальные режимы, при которых изображение реконструируется с использованием УЗ-сигналов, отражающихся от трещин зеркально и диффузно [3]. Результат такой реконструкции показан на рисунке 8, где электроэрозионный пропил у донной поверхности образца (рис. 8, а) прорисован полностью (рис. 8, б). Иден-

тифицировать объемную несплошность труднее, т. к. её более удаленная от АР поверхность не отображается. В этом случае вид образа ближайшей поверхности может указать на характер несплошности, например, изогнутой в сторону АР формой. Оценивать несплошности, соизмеримые с длиной волны, можно только по амплитудам их образов на экране, т. к. форма и размеры образов мало связаны с формой и размерами самих несплошностей [9].

В УЗ-дефектоскопе A1550 IntroVisor реализована функция пространственной регуляции чувствительности (ПРЧ), которая позволяет вести поиск и оценку малых дефектов, а также оценивать размеры дефектов по всей контролируемой толщине ОК.

Возможности A1550 IntroVisor позволяют выводить на экран УЗ-дефектоскопа одновременно В-, С-, D-скан (рис. 9, а). Сканирование вдоль линии сварного шва с помощью АР с установленным на ней датчиком пути позволяет в режиме реального времени получать наглядное и достоверное представление о внутренней структуре ОК в виде С- и D-сканов (рис. 9, б). Новые модели УЗ-дефектоскопов с АР компании «АКС» позволяют выводить на экран прибора ещё и А-скан [6].



а — сканирование с шагом изменения угла $0,5^\circ$; б — сканирование с шагом изменения угла 1°

Рисунок 7 Сравнение S-сканов, полученные при разном шаге углов построения развертки [7]

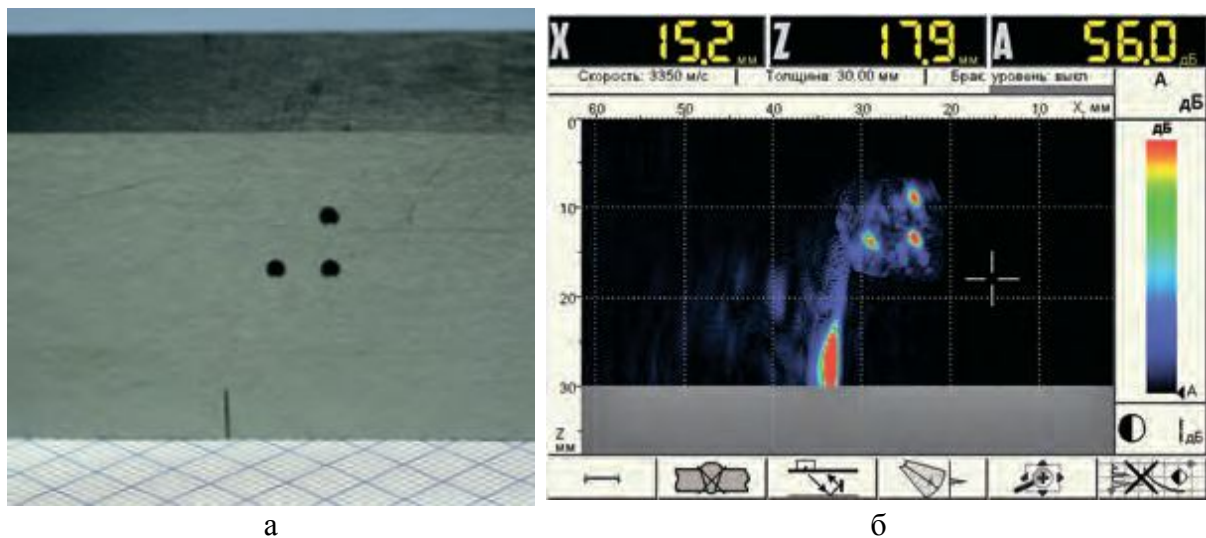
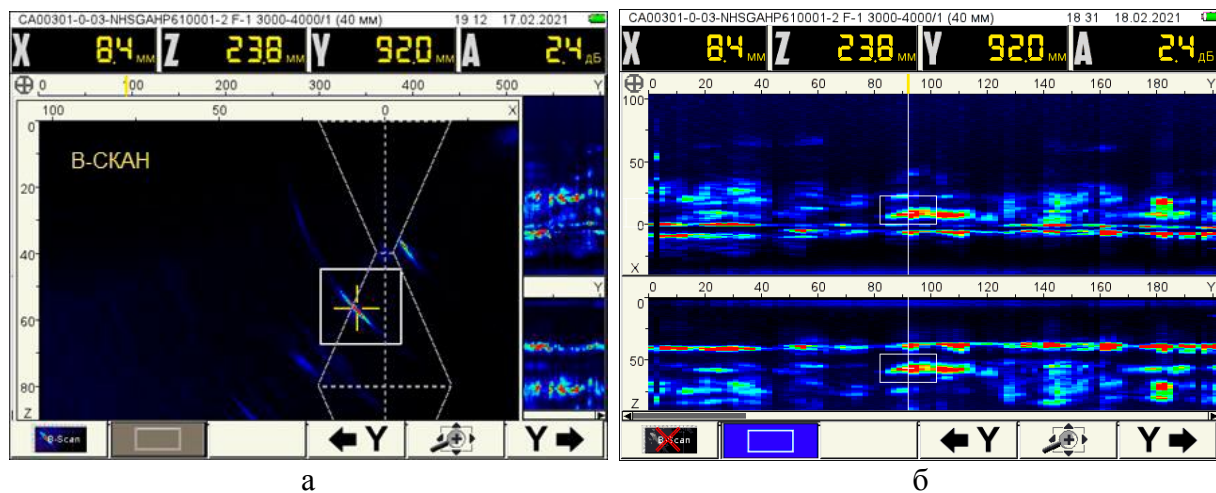


Рисунок 8 Результат реконструкции методом ЦФА (б) боковых отверстий и электроэрозионного пропила у донной поверхности образца (а) [9]



а — одновременно выведены В-, С- и D-скан; б — одновременно выведены С- и D-скан

Рисунок 9 Томограмма, реализованная A1550 IntroVisor, в режиме «Сканер» [6]

На рисунке 10 представлены томограммы, реализованные УЗ-дефектоскопом АВГУР-АРТ. На экране прибора одновременно расположены S-скан (а), D-скан (б), С-скан (в) и классический А-скан (г). Кроме этого, прибор позволяет проводить анализ и выявлять размеры и характер дефектов на сохраненной томограмме при помощи специализированного программного обеспечения на персональном компьютере. В дефектоскопе также реализована функция угловой регулировки чувствительно-

сти (УРЧ). На рисунке 10 угол фокусировки УЗ-луча равен 50° (можно видеть на S-скане), что совпадает с отражателем.

Следует отметить, что работ, отражающих опыт практического применения в реальных рабочих и производственных условиях рассматриваемых УЗ-дефектоскопов, авторам данной работы найти не удалось. Все приведенные выше томограммы, демонстрирующие внутренний объем ОК, являются результатом испытаний на стандартных образцах (СО, СОП, V2 и т. д.).

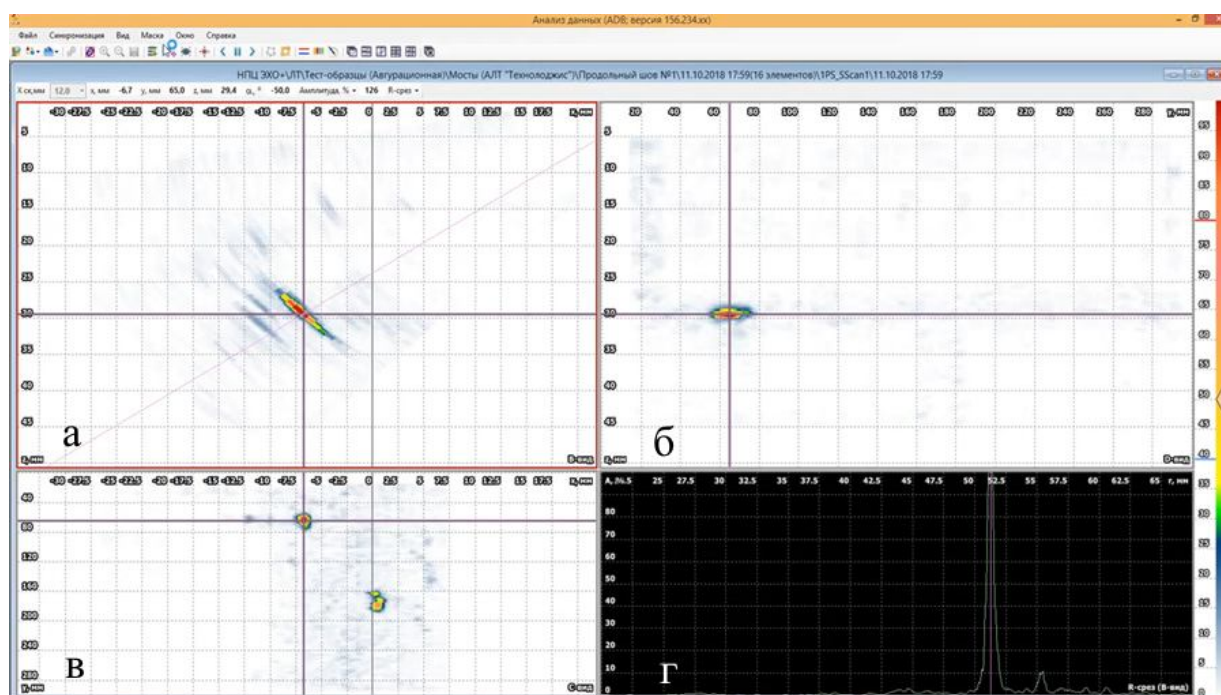


Рисунок 10 Томограмма, реализованная АВГУР-АРТ [10]

Несмотря на то, что изображение при ЦФА сильно сфокусировано по всей области контроля, отображённой на экране УЗ-дефектоскопа, оно по-прежнему подвержено тем же акустическим ограничениям, что и УЗ-контроль с применением ФР. Амплитудные флуктуации и искажения наблюдаются как при физической фокусировке, так и при цифровой, но результаты для группы идентичных рассеивателей в ОК более устойчивы в режиме цифровой фокусировки [11]. Если сразу формировать ЦФА-изображение без излучения эхосигналов, то скорость контроля резко возрастёт, но пропадёт возможность хранить эхосигналы и возможность их постобработки.

Дефектоскопы компаний «Кропус» и «Эхо+» имеют возможность фокусировки УЗ-луча как цифровым способом, так и физическим — при помощи выбора фокальных законов и регулировкой рабочей апертуры, что позволяет выбрать оптимальное соотношение между производительностью контроля и точностью отображаемого изображения внутреннего объёма ОК. Благодаря этому появляется возможность фоку-

сировки УЗ-луча в ближней зоне для поиска и локализации возможных дефектов в тонких подповерхностных слоях объекта. УЗ-дефектоскоп A1550 IntroVisor работает с АР, поэтому не имеет возможности использовать преимущества ФР по применению различных законов фокусировки.

Все представленные дефектоскопы обладают функцией конструктора сварного соединения с возможностью задания параметров разделки кромок с отображением геометрических особенностей сварного шва на экране во время сканирования. При этом прибор УСД-60ФР в режиме настройки способен моделировать процесс контроля: направление луча на всех углах; смещение датчика относительно сварного соединения с одновременным отображением на экране захватываемой зоны сканирования S-сканом и L-сканом прямым лучом, однократно отраженным и т. д. [6]. Как показали ранее проведенные исследования авторов [12], УЗ-контроль с применением технологии ФАР, обладает рядом преимуществ применительно к сварным соединениям деталей из цветных метал-

лов, полученных сваркой трением с перемешиванием (СТП). Однако работ, описывающих реальный практический опыт применения рассматриваемых дефектоскопов для контроля сварных соединений, полученных СТП, найти авторам не удалось. Как правило, в известных работах по идентификации дефектов сварных соединений, полученных СТП, использовались УЗ-дефектоскопы с ФАР зарубежных разработчиков-производителей.

Таким образом, рассмотренные УЗ-дефектоскопы имеют возможность работать в режимах:

1) «томограф» — обеспечивает работу с ФАР и формирование томограмм в реальном масштабе времени;

2) «сканер» — обеспечивает работу с ФАР и датчиком пути, при сканировании вдоль линии сварного шва;

3) «дефектоскоп» — обеспечивает работу прибора в качестве классического УЗ-дефектоскопа с наклонными и прямыми пьезоэлектрическими преобразователями.

При работе в режиме «томограф» у всех приборов есть возможность выводить на экран УЗ-дефектоскопа помимо В-скана (у прибора A1550 IntroVisor) и В-, S-, L-сканов (у приборов УСД-60ФР и АВГУР-АРТ) D-скан, С-скан и классический А-скан, что повышает информативность полученных данных о внутреннем объёме ОК. Однако размер таких изображений неизбежно уменьшается, что затрудняет расшифровку (ухудшает читаемость таких изображений) результатов в режиме реального времени. Данный недостаток отсутствует в приборе АВГУР-АРТ ввиду его больших габаритных размеров и, соответственно, больших размеров экрана (примерно в 2,5 раза).

Особенность дефектоскопа A1550 IntroVisor заключается в том, что в используемых АР апертура равна 40 мм, что в полтора-два раза больше размеров стандартных 32-элементных решёток зарубежного производства. Это приводит к более высокой фронтальной разрешающей способности полученных изображений томограммы. К

тому же цена данных решёток на порядок меньше аналогов. К недостаткам АР конструкции фирмы «АКС» можно отнести занижение амплитуды бликов дефектов, залегающих близко к поверхности.

Для систем автоматизированного контроля малый вес и габариты дефектоскопа не являются решающим критерием, а важнейшим свойством таких систем является возможность получать предельно точное заключение о типе и размерах отражателей. Очень важна скорость работы таких систем.

Компания «Эхо+» разработала большой ассортимент сканеров для автоматизированного и механизированного УЗ-контроля как магнитных, так и немагнитных материалов; радиальных ОК диаметром 159–4000 мм; планшетных ОК длиной до 20 м. Способность реализации метода ЦФА в дефектоскопе АВГУР-АРТ позволит не терять скорости механизированного контроля. Оператор имеет возможность проводить контроль как в непосредственной близости от ОК, так и на удалении от него благодаря наличию сигнального кабеля длиной от 3 до 100 м.

Выводы. Выполненный анализ эксплуатационных характеристик по разрешающей способности, особенностям настройки и качеству отображаемых томограмм отечественных УЗ-дефектоскопов, использующих технологию ФАР, позволил сформулировать следующие рекомендации по области их применения:

1. Для автоматизированного УЗ-контроля рационально применять дефектоскоп АВГУР-АРТ в цеховых условиях.

2. Для механизированного и ручного УЗ-контроля как в цеховых, так и в полевых условиях наиболее подходят дефектоскопы УСД-60ФР и A1550 IntroVisor.

3. Для детектирования сварных соединений больших толщин, а также для контроля основного металла ОК наиболее продуктивно применение дефектоскопов A1550 IntroVisor и АВГУР-АРТ с реализацией технологии ЦФА.

Простотой освоения характеризуются дефектоскопы УСД-60ФР и A1550 IntroVisor.

Библиографический список

1. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Advanced practical NDT series [Text] / series coordinator: Noël Dubé. — Waltham, MA : Olympus NDT, 2007. — 369 p.*
2. Базулин, Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные решетки [Электронный ресурс] / Е. Г. Базулин ; Научно-производственный центр «ЭХО+». — Режим доступа: <https://echoplus.ru/upload/iblock/d7b/d7bcfa054ec1281f035bca25829a56ef.pdf> (05.05.2022).
3. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов [Текст] / В. А. Воронков, И. В. Воронков, В. Н. Козлов [и др.] // В мире НК. — 2011. — № 1 (51). — С. 64–69.
4. *Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models / S. Chatillon, A. Fidahoussen, E. Iakovleva, P. Calmon // NDT in Canada 2009 National Conference, Aug. 25–27, 2009. — [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.ndt.net/article/aspnde2009/papers/10.pdf> (05.05.2022).*
5. Дефектоскоп АВГУР-АРТ : техническое описание. — М. : Эхо+, 2021. — 19 с.
6. Дефектоскопы ультразвуковые: A1550 Intro Visor / A1525 Solo. Методические рекомендации по применению режима «томограф» [Текст]. — М. : Акустические контрольные системы, 2021. — 144 с.
7. УСД-60ФР: ультразвуковой дефектоскоп на фазированных решетках [Текст] : руководство пользователя. — М. : Кропус, 2018. — 59 с.
8. Фазированные решетки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://shearwave.ru/wp-content/uploads/2013/09/Лекция_ФР_МЭИ.pdf (05.05.2022).
9. Самокрутов, А. А. Особенности оценки несплошностей [Текст] / А. А. Самокрутов, В. Шевалдыкин // Территория «Нефтегаз». — 2015. — № 8. — С. 30–32.
10. Базулин, А. Е. Универсальный ручной дефектоскоп АВГУР-АРТ 2020 для ручного, механизированного и автоматизированного ультразвукового контроля [Электронный ресурс] / А. Е. Базулин // Современные методы и средства УЗК с применением ФР и УЗ голографии : семинар, 21 сентября 2021 г., г. Санкт-Петербург. — Режим доступа: <https://echoplus.ru/news/povuyu-defektoskop-avgur-art/> (09.05.2022).
11. Использование метода общей фокусировки (TFM) для лучшей визуализации дефектов при ФР-контроле [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.olympus-ims.com/ru/applications/using-the-total-focusing-method-to-improve-phased-array-ultrasonic-imaging/> (29.04.2022).
12. Сотников, А. Л. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием [Текст] / А. Л. Сотников, А. А. Муховатый, А. А. Орлов // Сварка и диагностика. — 2022. — № 3. — С. 19–24.

© Сотников А. Л.

© Орлов А. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневым Д. А.,
д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.*

Статья поступила в редакцию 05.09.2022.

Doctor of Technical Sciences Sotnikov A. L. (DonNTU, Donetsk, DPR), Orlov A. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

VISUALIZATION OF DEFECTS IN WELDED JOINTS

The analysis of the operational characteristics of domestic ultrasonic flaw detectors using phased array and antenna array technology in terms of resolution, configuration features and quality of the displayed tomograms is carried out in order to develop recommendations for their choosing for various applications. The comparative analysis of the technical capabilities of flaw detectors on phased arrays and antenna arrays informatively allows us to show the advantages and disadvantages of each one.

Key words: *flaw detection, phased array and antenna arrays, non-destructive testing, focal law, artificial reflector, digital focusing.*