

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-58-66>

УДК 620.179.1

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ТРУБОПРОВОДОВ РЕАКТОРА ВВР-К

О. В. Тиванова*, Е. Л. Ермаков, Н. М. Акылбек

РГП на ПХВ «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: oksana.tivanova@mail.ru

Первый контур атомного исследовательского реактора ВВР-К состоит из большого количества аустенитных сварных соединений различной конфигурации. Такие сварные швы демонстрируют анизотропные и неоднородные структуры с удлиненными зернами, которые могут затруднить интерпретацию данных радиографического и ультразвукового контроля. Особую настороженность вызывает корневая часть сварного шва, находящаяся под постоянным воздействием движущейся обессоленной воды, механических и термических нагрузок, которые могут вызвать возникновение и распространение трещин и эрозионных процессов. В настоящей работе рассматривается комплексный подход к исследованию дефектов аустенитных сварных соединений первого контура реактора ВВР-К, введенного эксплуатацию в 1967 г. Небольшие габаритные размеры, сложная конфигурация трубопровода, односторонний доступ, неизвестная форма шва не позволяет применять стандартизированные процедуры испытаний. Данные радиографического контроля показали наличие невыраженных протяженных несплошностей, похожих на непровары или несплавления. Для повышения надежности и экономичности контроля кольцевых сварных швов рассмотрено применение ультразвукового контроля линейной решеткой. Исследование заключалось в выборе оптимальных режимов сканирования, получения набора акустических изображений дефектов сварных соединений контрольных образцов с использованием 16-элементной ультразвуковой линейной решетки. Практическое апробирование проведено на аустенитных сварных соединениях трубопроводов ВВР-К с неметаллическим покрытием. Основные проблемы контроля трубопровода, требующие дальнейшей доработки, заключались в не высокой скорости сканирования, невозможности использования встроенной модели шва для интерпретации и определение истинных размеров дефектов. В целом, полученные в работе результаты показали достаточно хорошую выявляемость корневых дефектов и оценку их условных размеров с применением технологии фазированных решеток.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, радиография, сварной шов, аустенит, технология фазированных решеток, реактор ВВР-К.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие цифровых технологий за последнее десятилетие, послужило толчком к созданию нового поколения оборудования неразрушающего контроля, направленного на цифровую визуализацию внутренней макроструктуры материала с помощью цифровой обработки множества первичных сигналов. Наиболее перспективным методом рассматривается применение ультразвуковых приборов на фазированных решетках в комплексе с традиционными методами неразрушающего контроля и диагностики зон концентрации напряжений. Наиболее распространенной и стандартизированной [1, 2] классической технологией формирования поля излучения-приема фазированной решетки, а также формирования акустического изображения является применение различных законов задержки, основанной на выборе фокусировки по пути, смещению или глубине, которые позволяют повысить разрешение и более точно определить информационные параметры дефектов в целевой области сканирования. Экспериментальные данные [3] продемонстрировали, что погрешность определения размеров компактных дефектов (угловых высотой 1–3 мм и цилиндрических диаметром 1–2,5 мм) фазированной линейной решет-

кой с технологией законов фокусировки меньше в три и более раза, чем при использовании традиционного эхо-импульсного метода. Цифровое акустическое изображение отражателя при использовании технологии фазированной решетки более наглядно показывает тип дефекта. При правильной настройке параметров контроля технология ультразвуковой фазированной решетки обеспечивает высокую достоверность выявления и достаточно высокую точность определения размеров внутренних дефектов типа несплошностей. Наряду с этим, имеется ряд недостатков, особенно при контроле толстостенных изделий, которые заключаются в ухудшении разрешающей способности при удалении от линии фокусировки.

В настоящее время развиваются цифровые сложные алгоритмы сбора и реконструкции изображений: фокусируемой синтезируемой апертуры (SAFT – Synthetic Aperture Focusing Technique), метод общей фокусировки (TFM – Total Focusing Technique), позволяющий правильно интерпретировать данные, полученные методом полноматричного захвата (FMC – Full Matrix Capture), в виде мультистатического сбора данных, при которых возможно получать цифровые акустические образы некоторых дефектов, приближенные к реальным. Данный подход существен-

но ограничивает мощность излучаемой в объект ультразвуковой энергии и требуется достаточно хорошее соотношение сигнал/шум, особенно для метода общей фокусировки [4]. Такие ограничения практически не позволяют применять данные алгоритмы сбора данных и реконструкции для контроля через покрытие и аустенитных сплавов с выраженной анизотропией [5, 6].

Немаловажную роль в обнаружении и идентификации плоскостных дефектов сварных соединений играет правильный выбор конфигурации преобразователя фазированной решетки. Последние исследования показывают, что в случае анизотропных сварных швов вследствие искажения ультразвукового следует применять двухэлементные матричные решетки [7]. Такие преобразователи формируют узкий и сфокусированный ультразвуковой пучок продольных волн под большим углом с длиной волны, сопоставимой с поперечной волной той же частоты. Разделение элементов преобразователя на приемный и передающий обеспечивает лучшее соотношение сигнал/шум и значительное сокращение мертвой зоны. Основным недостатком двухэлементных матричных решеток считается высокая стоимость, совместимость с приборами последнего поколения, а также ограничение по контролю тонкостенных элементов или криволинейных поверхностей малого диаметра.

Самыми распространенными, апробированными и экономичными считаются преобразователи для дефектоскопии металлических материалов на основе линейных решеток. Многочисленные исследования [8–11] показывают их универсальность по обнаружению дефектов, расположенных в корневой части или в зоне сплавления со стороны преобразователя, причем в последнем случае надежность выявления дефектов сравнима с двухэлементными матричными преобразователями [8], что немаловажно при периодическом эксплуатационном мониторинге действующих конструкций.

Несмотря на то, что способ фазированных решеток разработан достаточно давно, требования по верификации такого оборудования и процедуры проведения испытаний были стандартизированы в 2015–2021 гг. [1, 2, 12–14] и обновляются с периодичностью 5 лет, что указывает на получение новых данных по практике применения и интенсивное развитие технической базы. Контроль сварных соединений с применением технологии фазированных решеток на объектах атомной энергетики содержится в стандартах [15, 16], которые не содержат какие-либо особые условия к методике исследования с учетом анизотропии свойств и неоднородности структуры сварных соединений, также отсутствуют процедуры контроля процессе эксплуатации через покрытие. Методика испытаний сварных соединений с выраженной анизотропией свойств и неоднородностью структуры разрабатывается под каждый вид сварного шва с учетом конструктивных характеристик, примененной

технологии сварки, информационных характеристик ожидаемых дефектов контрольных отражателей в образцах сварных соединений, изготовленных из материала объекта контроля. Последнее условие проблематично выполнить для объекта с длительным сроком эксплуатации в условиях воздействия радиоактивного излучения.

Несмотря на то, что за прошедшие годы был достигнут значительный научный и технический прогресс в контроле материалов с анизотропной структурой, включая достижения в области моделирования для прогнозирования ориентации анизотропной структуры, создаваемой во время сварки, что позволяет предварительно просмотреть распространение звукового луча и провести предварительную или последующую обработку сигналов в объектах с известной историей. Однако процедуры мониторинга дефектов через неметаллическое покрытие в изотропных и анизотропных сварных швах не стандартизированы в области применения фазированных решеток и требуют всесторонних исследований [17, 18]. Цель настоящей работы заключалась в определении возможности осуществления рутинного мониторинга кольцевых сварных соединений с изотропной и анизотропной структурой без удаления неметаллического покрытия с трубопроводов первого контура охлаждения реактора ВВР-К с применением линейной фазированной решетки. По полученным нами данным радиографического и магнито-анизотропного контроля [19] в таких сварных соединениях содержатся несплошности, внесенные в процессе изготовления и монтажа трубопровода более 50 лет назад. В связи с вышеизложенным, задачи исследования включали определение режимов настройки прибора с технологией фазированной решетки с применением изготовленных контрольных образцов сварных соединений, получении акустических изображений корневых дефектов и апробации процедуры мониторинга, включая сварное соединение аустенитной нержавеющей стали с несплошностями трубопровода реактора ВВР-К через защитное эмалевое покрытие.

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования для изучения возможности применения технологии ультразвуковых фазированных решеток выбраны дефекты сварных соединений аустенитной нержавеющей стали типа X18H9T из которой изготовлен трубопровод первого контура охлаждения реактора ВВР-К. Испытательные образцы толщиной основного металла 10 ± 2 мм изготавливались методом ручной дуговой (рде) и аргонодуговой сварки вольфрамовым неплавящимся электродом (адс) с присадочным материалом. Форма разделки кромок С17 и С45 по ГОСТ 5264–80, шероховатостью поверхности пластин Rz40 и протяженностью рабочей поверхности вдоль шва не менее 65 мм. Химический состав металла образцов аустенитной стали типа X18H9T, определенный методом рентгенофлуоресцентного анализа предста-

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК
ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ТРУБОПРОВОДОВ РЕАКТОРА ВВР-К**

влен в таблице 1. Дополнительно применяли образцы углеродистой стали 20 толщиной 10–16 мм, которая имеет изотропную структуру шва относительно звуковых колебаний. Углеродистая сталь была выбрана еще из-за доступности и возможности распространить результаты методической части на алюминиевый сплав САВ-1 – материал первого контура реактора. Визуализация внутренних дефектов сварного шва осуществлялась гамма-радиографическим методом изотопом Ir-192 [20, 21]. Внешний вид и пленочная радиограмма испытательных образцов представлены на рисунке 1.

Дополнительно для сравнения полученных результатов исследование и определение количественных и качественных показателей дефектов сварных и контрольных отражателей проводили ультразвуковым

дефектоскопом SyncScan (РА 16:64+UT) с применением преобразователя малых размеров на основе линейной 16-элементной 5 МГц фазированной решетки с активной апертурой 8 мм (пассивная апертура 9 мм) и расстоянием между активными элементами решетки 0,5 мм. Наиболее опасными являются плоскостные дефекты, расположенные в корневой части шва, поэтому использовали призму для ввода поперечной волны. Согласно рекомендациям [16], настройка чувствительности контроля осуществляется по боковому цилиндрическому отражателю диаметром 2 мм, но лучшее выявление плоскостных дефектов в виде трещин и несплавлений возможно при использовании угловых плоскодонных отражателей типа зарубка с эквивалентной площадью 2,5 и 5 мм².

Таблица 1. Содержание элементов в образцах аустенитной нержавеющей стали, %

Хим. элементы	Основной металл	Сварочный материал					
		Электрод AS P 347 (рдс, С17)		Электрод E308-16 (рдс, С39)		Присадочная проволока ER 308LSi (адс, С17)	
		шов	зтв*	шов	зтв	шов	зтв
Ti	1,5	0,9	2,8	1,4	1,0	0,7	2,7
Cr	17,8	18,5	17,6	19,5	18,2	19,4	17,3
Mn	1,3	0,9	1,3	1,3	1,4	1,2	1,3
Fe	69,9	69,3	69,1	67,9	69,9	69,0	69,3
Ni	9,3	10,1	9,1	9,8	9,4	9,6	9,3
Nb	<0,004	0,2	<0,004	0,017	<0,003	0,010	<0,005
Mo	0,15	0,09	0,15	0,12	0,15	0,09	0,15

Примечание: * зтв – зона термического влияния

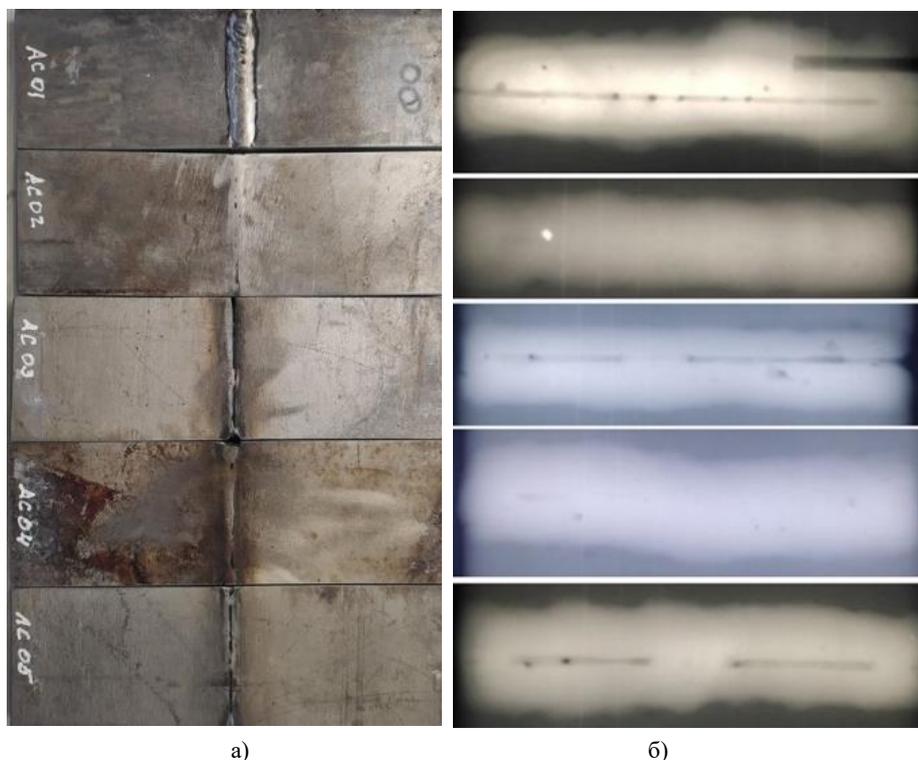


Рисунок 1. Вид с корневой части шва с наличием поверхностных дефектов (а) и радиограммы (б) сварных швов с поверхностными и внутренними дефектами испытательных образцов X18H9T

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные данные в образцах из углеродистой стали показали (см. рисунок 2), что различие в амплитудных значениях для отражателей на глубине 10–12 мм (прямой луч) составляет около 10%. На глубине 20–24 мм (однократное отражение) низкое соотношение сигнал/помехи отраженного сигнала от углового отражателя (УО-цл), имитирующего плоский дефект в трубе диаметром 219 мм. Погрешность определения амплитуды не превышает 10%, измерения проводили по углу 62 град, первичная настройка законов фокусировки осуществлялась по цилиндрическому отражателю Ø2 мм, расположенному в зоне сплавления (см. рисунок 1, образец АС01). Тестовые замеры размера отражателя при варьировании глубины фокусировки показали меньший процент ошибки на глубине равной или превышающей глубину залегания отражателя, что соответствует данным [22]. Для привязки к амплитудному критерию требуется регуляция чувствительности в условиях электронной развертки по с целью получения одинакового уровня амплитуды отраженных эхо-сигналов от определенного отражателя с учетом влияния отражающей поверхности (аналог временной регуляции чувствительности).

Исследованы методом одного пучка поперечных волн в диапазоне углов сканирования 45–75° ультразвуковой фазированной решетки сварные соединения в образцах из углеродистой стали толщиной 10 и 12 мм и получены акустические изображения основных протяженных дефектов сварных соединений, некоторые из которых представлены на рисунке 3.

Наиболее сложным в определении является дефекты в виде неравномерного неполного проплавления корня, одиночных и скоплений пор/шлака диаметром 3 мм и менее, дающие дифракции сигналы ниже уровня фиксации. В этом случае требуется дополнительная настройка по сферическому отражателю, имитирующему одиночные поры/шлак.

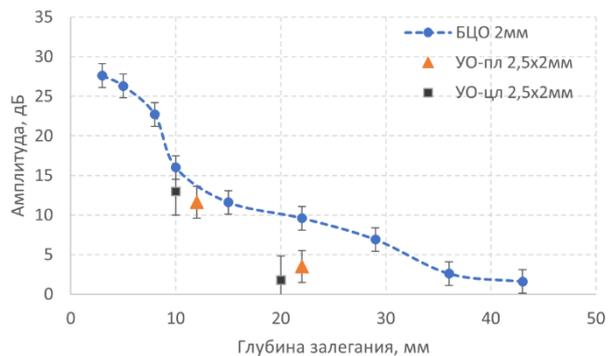


Рисунок 2. Зависимость амплитуды от глубины залегания отражателей: цилиндрических Ø2 мм (БЦО), угловых типа «зарубка» 2,5×2 мм в пластине толщиной 12 мм (УО-пл.), в изогнутом с внешним Ø219 мм и толщиной 10 мм (УО-цл)

Вертикальные трещины представляют большой риск для безопасности стальных трубопроводов. Особое значение отводится оценке высоты трещины, которая влияет на прочность и уменьшает остаточный ресурс оборудования. Оценка высоты трещины или несплавления проводили по акустическим томографическим изображениям образа трещины с использованием способа абсолютного времени прихода (Absolute Arrival Time Technique, ААТТ). Данный метод использует абсолютное положение дифрагированного эхо-сигнала от вершины или непровара/несплавления и отраженный от угла эхо-сигнал при сканировании с одной стороны, что особенно актуально при эксплуатационном контроле трубопроводов из аустенитной стали. Изображение от кончика трещины образуется за счет дифракции первого типа и амплитуда дифрагированных лучей существенно меньше амплитуды порождающего их луча. В отличие от несплавлений (непровара) одной из кромок шва, трещина состоит из множества отражающих поверхностей, в ряде случаев сигналы от них превосходит сигнал от угла.

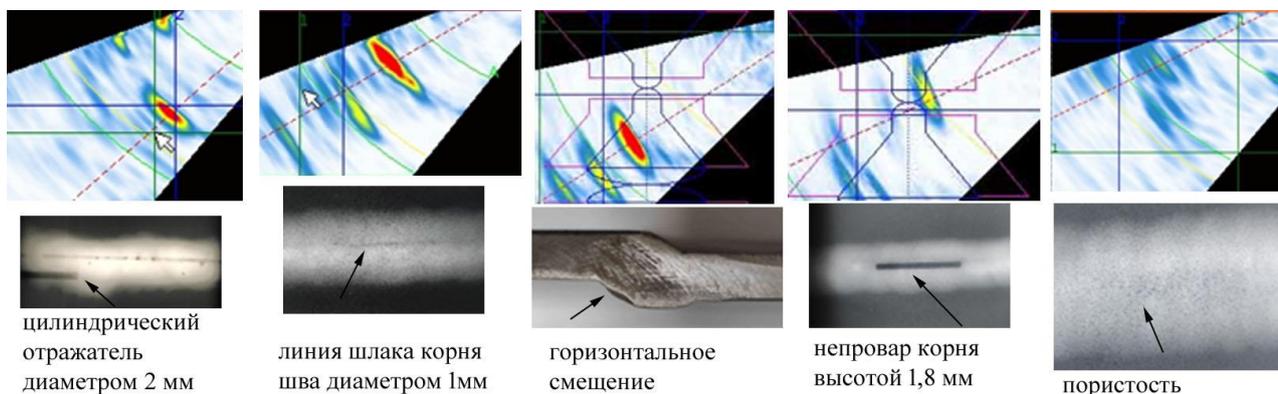


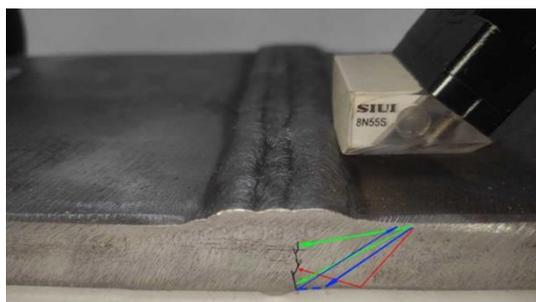
Рисунок 3. Протяженные дефекты сварных соединений (радиограммы и фотоизображения) и их акустические изображения в стальных сварных соединениях толщиной 10 мм

Эмпирически доказано [23], что амплитуда (P/P_0) дифрагированной волны от края вертикальной полуплоскости приблизительно равна амплитуде сигнала, отражённого от бокового цилиндрического отверстия диаметром d равного $\lambda/2\pi^2$, определенной по формуле (1):

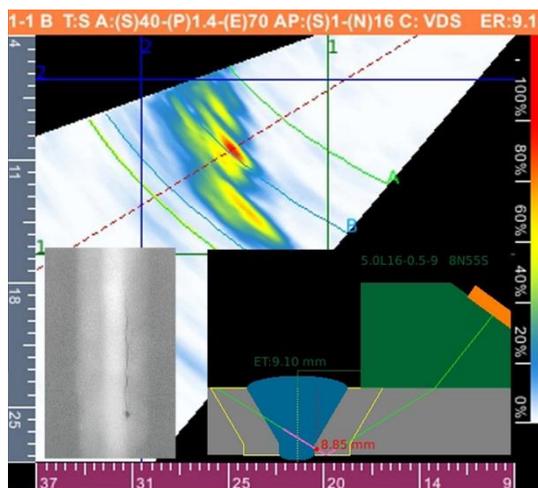
$$\frac{P}{P_0} = \frac{S}{\lambda} \sqrt{\frac{d}{8r^3(1+d/2r)}}, \quad (1)$$

где r – расстояние до ближнего края отражателя (расстояние по лучу), 14,7 мм; S – площадь пьезопластины, в нашем случае площадь ФР это произведение размера активной апертуры на пассивную, 72 мм²; d – диаметр бокового цилиндрического отражателя, 2 мм; λ – длина сдвиговой волны, 0,63 мм.

Расчеты и экспериментальные данные для аустенитной нержавеющей стали показали, что амплитуда эхо-сигнала, полученная дифракционным рассеянием на кончике трещины, на 17,68 дБ (см. рисунок 4, б) меньше амплитуды эхо-сигнала, полученного отражением от цилиндрического отверстия диаметром 2 мм в контрольном образце.



а)



б)

Рисунок 4. Положение ФР преобразователя относительно трещины при измерении высоты (а) и акустическое изображение образа (б) прикорневой продольной трещины в контрольном образце, стрелкой отмечен сигнал от конца трещины

На рисунке 4 представлена схема хода лучей преобразователя фазированной решетки и граней трещины, демонстрирующей принцип измерения высоты и получения изображения образа корневой трещины, полученного при исследовании стального образца толщиной 9,6 мм со швом типа С17 рдс. Считается [24] что определение высоты трещины как разницы между томографическим изображением образа вершины трещины и угла между трещины и плоскостью, на которую она выходит более информативно при использовании секторного S-скана, чем при анализе изображения электронного В-скана.

Проведенные измерения высоты дефектов по акустическим образам показали, достаточно хорошее совпадение с фактическими значениями (см. рисунок 5). Эксперименты с нанесенным покрытием толщиной 370–460 мкм дали неоднозначные результаты в виде появления дополнительных образов от покрытия, что затрудняет идентификацию и измерение высоты. При этом необходимо учитывать, что на чувствительность ультразвукового контроля влияет материал, толщина и степень адгезии покрытия.

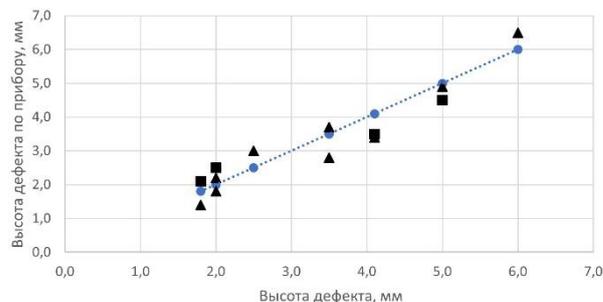


Рисунок 5. Высота дефектов (трещин, несплавлений) фактическая (●) и измеренная способом ААТ для углеродистой (■) и аустенитной (▲) стали

Сравнительные эксперименты показали, что разница между измерениями в максимуме энергии фокусных изображений дефектов находится в интервале 5–13 дБ. В связи с этим требуется корректировка чувствительности дефектоскопа [4] в зависимости от ожидаемого вида дефекта.

Для непроваров/несплавлений с притуплением кромки характерно наличие двух фокусных пятен, как правило, от углового отражателя эхо-сигнал содержит большее количество энергии и поэтому изображение яркое, а дифракционное рассеяние на вершине дает менее выраженное фокусное пятно (см. рисунок 6, а).

По результатам контроля дополнительным информационным признаком идентификации непровара или несплавления в сварном шве без притупления кромок является разница амплитуд сигналов от конца дефекта и угла, которая составляет 6 дБ. При контроле со скосом кромок или неравномерном проплавлении с притуплением кромок акустические образы могут быть нескольких видов в зависимости от размеров и конфигурации непровара или несплавления,

поэтому результаты интерпретируются не столь однозначно и требуется получение набора акустических изображений с учетом конфигурации и размера для выявления корреляции.

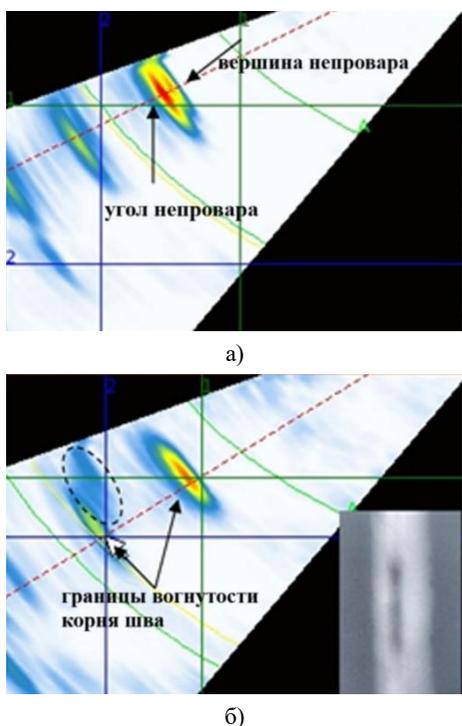


Рисунок 6. Акустические изображения (образы) дефектов в виде непровара и вогнутости ($L=25$ мм, $h=0,8$ мм) корня шва (эллипсом отмечен сигнал от поверхности вогнутости)

Дополнительными информационными параметрами при оценке глубины вогнутости шва может служить сигнал между двух фокусных пятен, полученных от кромок шва, которые являются границами вогнутости (см. рисунок 6, а). Ширину вогнутости соответствует расстоянию между центрами акустических образов границ кромок с максимальной энергией.

На рисунке 7 представлены результаты контроля сварного коллектора к главному циркуляционному насосу № 3 реактора ВВР-К. В результате визуального осмотра (см. рисунок 7, а) в корне шва присутствуют несплавления и горизонтальное смещение элементов со следами эрозийного процесса. Радиографические исследования (см. рисунок 7, б) не выявили данных несовершенств вследствие неоднородной структуры конфигурации шва и наружной. Анализ акустических изображений (см. рисунок 7, в) показал наличие плоскостной несплошности на 7 дБ превышающий сигнал от 2 мм опорного цилиндрического отражателя. Протяженность дефекта по 6 дБ больше на 7 мм, чем по данным инструментального замера. Присутствуют акустические сигналы, связанные со смещением и неровностями облицовочного валика и покрытия. Смещение луча трассировки относительно маски шва, вызвано отклонением от истинной формы и размеров соединения. Наличие эмалевого покрытия толщиной 300 мкм с хорошей адгезией к основному металлу не оказало существенного влияния на результаты, при условии настройки прибора учет поправки на покрытие 8 дБ, что соответствует данным [18].

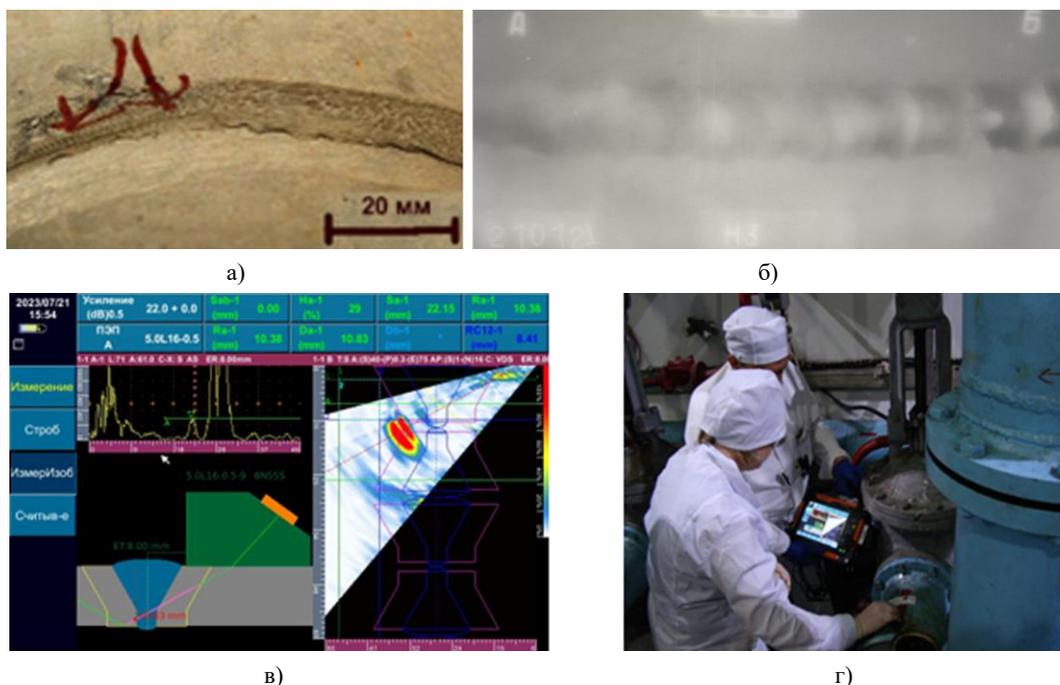


Рисунок 7. Результаты контроля элементов трубопровода первого контура реактора ВВР-К: а) дефекты, обнаруженные при визуальном контроле корня шва; б) пленочная радиограмма данного участка; в) экран дефектоскопа с А сканом, схемой расположения дефекта и акустическое изображение корневого дефекта; г) процесс диагностики

На основании исследования возможностей применения технологии линейной фазированной решетки для обследования трубопроводов выявлены недостатки, связанные с ультразвуковым оборудованием, конфигурацией участка трубопровода и сварного соединения. Контроль может проводиться только двумя операторами, скорость сканирования невысокая, невозможность применения датчика пути или устройства сканирования, требуется выравнивание поверхности покрытия. К достоинствам можно отнести экономичность и возможность обследовать весь шов, по сравнению с радиографическим методом. В целом, полученные в работе результаты показали достаточно хорошую выявляемость корневых дефектов и оценку их условных размеров с применением технологии фазированных решеток.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан (грант № BR09158958) и Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR10965174).

ЛИТЕРАТУРА

1. ISO 18563 (parts 1, 2, 3) Non-destructive testing – Characterization and verification of ultrasonic phased array equient. <https://www.iso.org/standard/62896.html> (дата обращения: 02.08.2021).
2. СТ РК ISO 19285–2019 Контроль неразрушающий сварных соединений Ультразвуковой контроль фазированными решетками Уровни приемки. Нур-Султан: Казстандарт, 2020. – 218 с.
3. Сергеев С. С., Никеев А. М., Сергеева О. С. Оценка метрологических возможностей комплексного ультразвукового контроля сварных соединений // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов, – 2020. С. 177–184. URL: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/13042>
4. Баннуф С., Лоне С., Фуше Ф., Дельмонте Ж., Шаппа Л. Исследование возможностей моделирования для улучшения выявления плоскостных дефектов, расположенных под усадочными раковинами. // В мире неразрушающего контроля. – 2015. – № 1. – С. 44–49.
5. ISO 23864:2021 Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated total focusing technique (TFM) and related. <https://www.iso.org/standard/77203.html> (дата обращения: 02.08.2021).
6. ISO 23865:2021 Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. IIW International Institute of Welding. <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 02.08.2021).
7. Rui Wang, Zhihong Liu, Jiefeng Wu, Beiyang Jiang, Bo Li, Design of DMA probe for the ultrasonic testing of CFETR vacuum vessel weld // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 146, Part A. – P. 987–990, ISSN 0920-3796. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.136>
8. S. Kumar, M. Menaka, B. Venkatraman, Performance comparison of phased array transducers for inspection of dissimilar welds on nuclear reactor components // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 162. – P. 108482, ISSN 0306-4549. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108482>
9. Kim Y, Cho S, Park IK. Analysis of Flaw Detection Sensitivity of Phased Array Ultrasonics in Austenitic Steel Welds According to Inspection Conditions // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – No. 1. – P. 242. <https://doi.org/10.3390/s21010242>
10. Xiaodan Yuan A, Yuan Zhang B, Zhijun Li et al. Investigation on the Inspection Technology of GH3535 Alloy Butt Weld With Linear Array Probe, 29 September 2021, PREPRINT (Version 1) available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-915672/v1>
11. Koskinen, A., & Leskelä, E. (2018). Phased Array Ultrasonic Sizing Performance on Artificially Produced Fatigue Cracks in Austenitic Stainless Steel Weld. 12th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Dubrovnik 4–6 October, 2016. <https://www.ndt.net/?id=22528>
12. ISO 23864:2021 Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated total focusing technique (TFM) and related. <https://www.iso.org/standard/77203.html> (дата обращения: 02.08.2021)
13. ISO 23865:2021 Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. IIW International Institute of Welding. <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 02.08.2021)
14. ISO 13588:2019 Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated phased array technology. <https://www.iso.org/standard/72747.html> (дата обращения: 12.10.2021)
15. ISO 20890-1:2020(en) Guidelines for in-service inspections for primary coolant circuit components of light water reactors – Part 1: Mechanized ultrasonic testing. – 33 p. <https://www.iso.org/ru/standard/69374.html?browse=tc> (дата обращения: 20.12.2023).
16. ГОСТ Р 50.05.13-2019 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Ультразвуковой контроль сварных соединений с применением технологии фазированных решеток. Порядок проведения. Москва. Стандартиформ. – 2019. 19 с.
17. Yassin, A., Rahman, M.S.U. & Abou-Khousa, M.A. Imaging of Near-Surface Defects using Microwaves and Ultrasonic Phased Array Techniques // J Nondestruct Eval 37, 71 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0526-9>
18. Сучков Г. М., Тараненко Ю. К., Ерощенко В.Н., Мищанчук Э.В. Ультразвуковой контроль сварных соединений с покрытием // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – № 82(8). – С. 44–46.
19. Yermakov, Y., & Tivanova, O. (2010). Capabilities of the Method for Assessment of Deformation under Stress at Inspection of Nuclear Power Facilities. 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11. <https://www.ndt.net/?id=9273>
20. СТ РК ISO 5579–2017 Контроль неразрушающий Радиографический контроль металлических материалов с использованием радиографической пленки и рентгеновского или гамма-излучения Основные правила. Астана: Госстандарт, 2017. – 44 с.
21. ГОСТ ISO 17636-1-2017 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 1. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением пленки. – М.: Стандартиформ, 2018. – 31 с.
22. C. A. Galán-Pinilla, L. A. Quintero-Ortiz, J. O. Herrera-Ortiz, Dimensional characterization with Phased Array Ultrasonic testing of induced discontinuities in ASTM A36 steel by

- EDM and SMAW welding processes // *Rev. UIS Ing.* – 2021. – Vol. 20. – No. 3. – P. 147–154.
<https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021010>
23. Ермолов И. Н., Вopilкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). М.: ИПЦ НК «ЭХО+», – 2000. – 109 с.
24. Jiang X., Jia J., Mao X. -h., Han d Q. -b. Simulation of Modified Absolute Arrival Time Technique for Measuring Surface Breaking Cracks // 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), – 2018. – P. 170–174. <https://doi.org/10.1109/FENDT.2018.8681956>
- ### REFERENCES
- ISO 18563 (parts 1, 2, 3) Non-destructive testing – Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment. <https://www.iso.org/standard/62896.html> (date of access: 02.08.2021).
 - ST RK ISO 19285–2019 Kontrol' nerazrushayushchiy svarnykh soedineniy Ul'trazvukovoy kontrol' fazirovannyimi reshetkami Urovni priemki. Nur-Sultan: Kazstandart, 2020. – 218 p.
 - Sergeev S. S., Nikeev A. M., Sergeeva O. S. Otsenka metrologicheskikh vozmozhnostey kompleksnogo ul'trazvukovogo kontrolya svarnykh soedineniy // *Sovremennye metody i pribory kontrolya kachestva i diagnostiki sostoyaniya ob'ektov.* – 2020. – P. 177–184.
URI: <http://e.biblio.bru.by/handle/121212121/13042>
 - Bannuf S., Lone S., Fushe F., Del'monte Zh., Shappa L. Issledovanie vozmozhnostey modelirovaniya dlya uluchsheniya vyyavleniya ploskostnykh defektov, raspolozhennykh pod usadochnymi rakovinami. // *V mire nerazrushayushchego kontrolya.* – 2015. – No. 1. – P. 44–49.
 - ISO 23864:2021 Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated total focusing technique (TFM) and related. <https://www.iso.org/standard/77203.html> (date of access: 02.08.2021).
 - ISO 23865:2021 Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. IIW International Institute of Welding. <https://www.iso.org/standard/78034.html> (date of access: 02.08.2021).
 - Rui Wang, Zhihong Liu, Jiefeng Wu, Beiyan Jiang, Bo Li, Design of DMA probe for the ultrasonic testing of CFETR vacuum vessel weld // *Fusion Engineering and Design.* – 2019. – Vol. 146, Part A. – P. 987–990, ISSN 0920-3796. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.136>
 - S. Kumar, M. Menaka, B. Venkatraman, Performance comparison of phased array transducers for inspection of dissimilar welds on nuclear reactor components // *Annals of Nuclear Energy.* – 2021. – Vol. 162. – P. 108482. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108482>
 - Kim Y, Cho S, Park IK. Analysis of Flaw Detection Sensitivity of Phased Array Ultrasonics in Austenitic Steel Welds According to Inspection Conditions // *Sensors.* – 2021. – Vol. 21(1). – P. 242. <https://doi.org/10.3390/s21010242>
 - Xiaodan Yuan A, Yuan Zhang B, Zhijun Li et al. Investigation on the Inspection Technology of GH3535 Alloy Butt Weld With Linear Array Probe, 29 September 2021, PREPRINT (Version 1) available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-915672/v1>
 - Koskinen, A., & Leskelä, E. (2018). Phased Array Ultrasonic Sizing Performance on Artificially Produced Fatigue Cracks in Austenitic Stainless Steel Weld. 12th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Dubrovnik 4–6 October, 2016. <https://www.ndt.net/?id=22528>
 - ISO 23864:2021 Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated total focusing technique (TFM) and related. <https://www.iso.org/standard/77203.html> (date of access: 02.08.2021)
 - ISO 23865:2021 Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. IIW International Institute of Welding. <https://www.iso.org/standard/78034.html> (date of access: 02.08.2021)
 - ISO 13588:2019 Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of automated phased array technology. <https://www.iso.org/standard/72747.html> (date of access: 12.10.2021)
 - ISO 20890-1:2020(en) Guidelines for in-service inspections for primary coolant circuit components of light water reactors – Part 1: Mechanized ultrasonic testing. – 33 p. <https://www.iso.org/ru/standard/69374.html?browse=tc> (date of access: 20.12.2023).
 - GOST R 50.05.13-2019 Sistema otsenki sootvetstviya v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Ul'trazvukovoy kontrol' svarnykh soedineniy s primeneniem tekhnologii fazirovannykh reshetok. Poryadok provedeniya. Moscow. Standartinform. – 2019. 19 p.
 - Yassin, A., Rahman, M.S.U. & Abou-Khousa, M.A. Imaging of Near-Surface Defects using Microwaves and Ultrasonic Phased Array Techniques. *J Nondestruct Eval* 37, 71 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0526-9>
 - Suchkov G. M., Taranenko Yu. K., Eroshchenkov V.N., Mishchanchuk E.V. Ul'trazvukovoy kontrol' svarnykh soedineniy s pokrytiem // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov.* – 2016. – No. 82(8). – P. 44–46.
 - Yermakov, Y., & Tivanova, O. (2010). Capabilities of the Method for Assessment of Deformation under Stress at Inspection of Nuclear Power Facilities. 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11. <https://www.ndt.net/?id=9273>
 - ST RK ISO 5579–2017 Kontrol' nerazrushayushchiy Radiograficheskiy kontrol' metallicheskiy materialov s ispol'zovaniem radiograficheskoy plenki i rentgenovskogo ili gamma-izlucheniya Osnovnye pravila. Astana: Gosstandart, 2017. – 44 p.
 - GOST ISO 17636-1-2017 Nerazrushayushchiy kontrol' svarnykh soedineniy. Radiograficheskiy kontrol'. Chast' 1. Sposoby rentgeno- i gammagraficheskogo kontrolya s primeneniem plenki. – Moscow: Standartinform, 2018. – 31 p.
 - C. A. Galán-Pinilla, L. A. Quintero-Ortiz, J. O. Herrera-Ortiz, “Dimensional characterization with Phased Array Ultrasonic testing of induced discontinuities in ASTM A36 steel by EDM and SMAW welding processes,” *Rev. UIS Ing.*, Vol. 20, No. 3, pp. 147–154, 2021. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021010>
 - Ermolov I. N., Vopilkin A.Kh., Badalyan V.G. Raschetny v ul'trazvukovoy defektoskopii (kраткий справочник). Moscow: NPTs NK “EKHO+”, – 2000. – 109 p.
 - Jiang X., Jia J., Mao X. -h., Han d Q. -b. Simulation of Modified Absolute Arrival Time Technique for Measuring Surface Breaking Cracks // 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), – 2018. – P. 170–174. <https://doi.org/10.1109/FENDT.2018.8681956>

ССР-Қ РЕАКТОРЫНЫҢ ҚҰБЫР ЖЕЛІЛЕРІН ТЕКСЕРУ КЕЗІНДЕ ФАЗАЛАНҒАН ТОРЛАР ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРДЕЛЕУ

О. В. Тиванова*, Е. Л. Ермаков, Н. М. Ақылбек

ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: oksana.tivanova@mail.ru*

ССР-Қ атомдық зерттеу реакторының бірінші тізбегі әртүрлі конфигурациядағы көптеген аустениттік дәнекерленген қосылыстардан тұрады. Мұндай дәнекерленген жіктер ұзынша түйіршікті анизотропты және біртекті емес құрылымдарды көрсетеді, бұл рентгенграфиялық және ультрадыбыстық бақылау деректерін түсіндіруді қиындатады. Қозғалмалы тұзсыздандырылған судың, механикалық және термиялық жүктемелердің тұрақты әсерінде болатын дәнекерленген жіктердің түпкілікті бөлігі ерекше қырағылықты қажет етеді, бұл сызаттар мен эрозиялық процестердің пайда болуына және таралуына әкелуі мүмкін. Бұл жұмыста 1967 жылы пайдалануға берілген ССР-Қ реакторының бірінші тізбегінің аустениттік дәнекерленген қосылыстарының ақауларын зерттеудің кешенді тәсілі қарастырылған. Шағын габариттік өлшемдер, құбыр желілерінің күрделі конфигурациясы, бір жақты қол жетімділік, жіктің белгісіз пішіні стандартталған сынақ процедураларын қолдануға мүмкіндік бермейді. Рентгенграфиялық бақылау деректері шалапісірілімге немесе балқымай қалуға ұқсас айқындалмаған созылыңқы тұтассыздықтардың болуын көрсетті. Дөңгелек дәнекерлеу жіктерін бақылаудың сенімділігі мен тиімділігін арттыру үшін сызықтық тормен ультрадыбыстық бақылауды қолдану қарастырылған. Зерттеу оңтайлы сканерлеу режимдерін таңдаудан, 16 элементтік ультрадыбыстық сызықтық торды пайдалана отырып, бақылау үлгілерінің дәнекерленген қосылыстарындағы ақаулардың акустикалық кескіндерінің жиынтығын алудан тұрды. Тәжірибелік сынап бақылау ССР-Қ құбыр желілерінің жабыны металл емес аустениттік дәнекерленген қосылыстарында жүргізілді. Әрі қарай жөнге келтіруді қажет ететін құбыр желілерін бақылаудың негізгі проблемалары сканерлеу жылдамдығының төмендігі, ақаулардың шынайы өлшемдерін интерпретациялау және анықтау үшін кіріктірілген жік үлгісін пайдалану мүмкін еместігі болды. Жалпы, жұмыс барысында алынған нәтижелер фазаланған торлар технологиясын қолдана отырып, түпкі ақаулардың жеткілікті жақсы айқындалатындығын көрсетті және олардың шартты өлшемдерін бағалау.

Түйінді сөздер: *ультрадыбыстық бақылау, дәнекерленген жік, аустенит, фазаланған торлар технологиясы*

STUDY ON THE USE OF PHASED ARRAY TECHNOLOGY FOR EXAMINATION OF PIPELINES OF THE WWR-K REACTOR

O. V. Tivanova*, Y. L. Yermakov, N. M. Akylbek

RSE REM "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: oksana.tivanova@mail.ru*

The first circuit of the WWR-K nuclear research reactor consists of a large number of austenitic welded joints of various configurations. Such welds exhibit anisotropic and inhomogeneous structures with elongated grains, which can complicate interpretation of radiographic and ultrasonic data. The root part of the weld is of particular concern since it is under the constant influence of moving demineralized water, mechanical and thermal loads, which can cause the appearance and propagation of cracks and erosion processes. In this paper, we consider an integrated approach to the study of defects in austenitic welded joints in the primary circuit of the WWR-K reactor, commissioned in 1967. Small overall dimensions, complex pipeline configuration, one-way access and an unknown weld shape do not allow us to use the standardized test procedures. Radiographic control data showed the presence of unexpressed extended discontinuities similar to lack of fusion. The use of ultrasonic testing with a linear array is considered to improve the reliability and efficiency of testing of the circumferential welds. The study implied selection of the optimal scanning modes, obtaining of a set of acoustic images of defects in welded joints of the tested samples using a 16-element ultrasonic linear array. Practical testing was performed on austenitic welded joints of WWR-K pipelines with a non-metallic coating. The main problems of pipeline testing, that require further improvement, were the low scanning speed, the impossibility of using the built-in weld model for interpretation and determination of the true size of defects. In general, the work results showed a fairly good detection of root defects and an assessment of their conditional sizes using the phased array technology.

Keywords: *ultrasonic testing, weld, austenite, phased array technology.*