

УДК 620.179.16  
DOI

## МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С НОВЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ КРИТЕРИЯМИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Д. С. Тихонов,**  
канд. техн. наук,  
ООО «НПЦ «ЭХО+»,  
Москва, Россия.  
E-mail: dtikh@echoplus.ru

Рассматривается возможность перехода от старых критериев оценки качества сварных соединений, таких как эквивалентная площадь, количество точечных дефектов, условные размеры и пр., к новым информационным критериям дефектности по результатам современных видов автоматизированного УЗК. Трехмерная визуализация областей контроля, получаемая с использованием современных когерентных методов восстановления изображений, дает новые информационные параметры. Такими параметрами могут являться габаритные размеры дефектов, профиль внутренней поверхности шва, а также визуальный, приближенный к оптическому, образ дефекта, получаемый за счет использования многих схем прозвучивания по технологии цифровой фокусировки антенных решеток. Приводятся примеры действующих методик с размерными критериями по новым нормам оценки качества.

**Ключевые слова:** автоматизированный ультразвуковой контроль, восстановление изображений, визуализация, дефекты, цифровая фокусировка, антенные решетки, нормы оценки качества.

D. S. Tikhonov (SPC ECHO+ Ltd, Moscow, Russia)

### AUTOMATED ULTRASOUND DIAGNOSTIC WITH HIGH RESOLUTION AND THE NEW INFORMATION CRITERIA FOR ASSESSING THE QUALITY OF WELDED JOINTS

The article deals with the possibility of transition from the old criteria for assessing the quality of welded joints, such as the equivalent size, the number of point defects, etc. to the new information criteria of defects according to the results of modern types of automated ultrasound testing. Three-dimensional visualization of areas of control obtained with the use of modern methods of coherent image restoration gives new information parameters. Such parameters may be the overall size of defects, the inner surface of the seam profile, as well as visual, close to the optical, image defect obtained with use of many testing schemes by digital technology of focus of antenna arrays. The examples of existing techniques with the dimensional criteria for the new standards of quality assessment are given.

**Keywords:** automated ultrasonic testing, restore image, visualization, defect, digital focus, phased arrays, quality assessment standards.



Статья поступила в редакцию 11.05.2016

Received 11.05.2016

В основе оценки качества сварных соединений по результатам *ультразвукового контроля* (УЗК) лежит уровень акустической энергии, возвращаемой к приемнику в процессе зондирования. Эталонные отражатели, используемые при настройке чувствительности контроля, являются лишь очень грубым приближением к реальным дефектам, так как аналогичную акустическую энергию могут отражать дефекты очень разных типов и размеров.

Данный фактор, наложенный на серьезную погрешность измерения амплитуд эхосигналов, делает связь между результатами традиционного УЗК и решением о конструкционной прочности сварного соединения условной. Эта условная связь в период создания норм оценки качества была единственно возможной для выработки каких-либо твердых критериев.

Эти критерии используют две следующие хорошо известные физические величины: эквивалент-

ная площадь ( $\text{мм}^2$ ), привязывающая амплитуду эхосигнала к площади зеркально ориентированного плоскостного отверстия, и условные протяженность и высота ( $\text{мм}$ ), определяемые по размеру проекции пятна поля отражателя на поверхность объекта контроля. Дополнительными критериями являются количество несплошностей, суммарные размеры нескольких несплошностей на определенной длине шва и т.п.

Недостатки такого подхода особенно ярко проявляются при проведении контроля в процессе эксплуатации объектов. В этом случае вопрос стоит не столько об обнаружении любых отражателей, как это происходит при изготовлении новых конструкций, сколько о принятии очень ответственного решения о возможности дальнейшей эксплуатации при наличии отражателей с весьма условными параметрами. И именно под давлением проблем, возникающих при эксплуатационном контроле, были созданы и аттестованы новые технологии УЗК с автоматизацией процесса регистрации данных и восстановлением трехмерных изображений дефектов.

Эти технологии позволили определять пространственные параметры дефектов, используя широкий динамический диапазон эхосигналов от них, включающий в том числе и уровни дифракционных сигналов. Применение когерентной обработки сигналов, зафиксированных на точной пространственной сетке, обеспеченной сканирующим устройством, позволяет создавать точные трехмерные образы отражателей.

Одной из первых методик такого рода была методика *автоматизированного УЗК (АУЗК)* кольцевых сварных соединений трубопроводов Ду300.

#### Методика АУЗК кольцевых сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300

Методика контроля кольцевых сварных соединений аустенитных трубопроводов номинальным внешним диаметром 325 мм (Ду300), толщиной от

10,5 до 19,0 мм. Основной целью контроля, проводимого по данной методике, является выявление и определение размеров несплошностей сварных соединений, которые могут возникать при эксплуатации, монтаже и ремонте (поры, раковины, расслоения, непровары, трещины, в том числе коррозионные, образованные по механизму межкристаллитного растрескивания под напряжением и другие несплошности). Выявляемые несплошности могут располагаться как в наплавленном металле сварного шва, включая его корень, так и в зоне сплавления и в околошовной зоне сварного соединения.

При выборе преобразователей для методики помимо учета соображений, связанных с геометрией объекта (толщина шва, форма разделки кромок и проточки внутренней поверхности, наличие и размеры валика усиления), большое внимание было уделено параметрам чувствительности, разрешающей способности и отношению сигнал/шум, обеспечиваемыми *пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП)* с различными частотами, диаграммами направленности и использующими различные типы волн.

На рис. 1 приведены изображения трещины, полученные по результатам АУЗК, модель сканирующего устройства и результаты разрушающего метода проверки трещины.

В измерительном режиме контроля проводится регистрация эхосигналов на пространственной апертуре с шагом, не превышающим половины длины самой короткой принимаемой волны. Затем происходит совместная обработка всех эхосигналов с учетом их временных задержек (фазы) и истинной формы импульсов. При обработке используется метод вычислительной многочастотной акустической голографии.

Полученные в результате восстановления изображения имеют разрешающую способность порядка длины волны, что обеспечивает требуемую

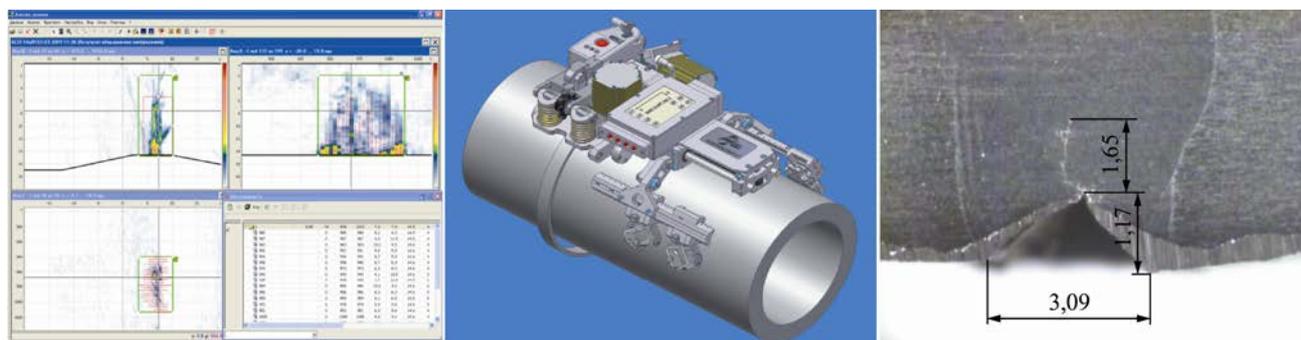
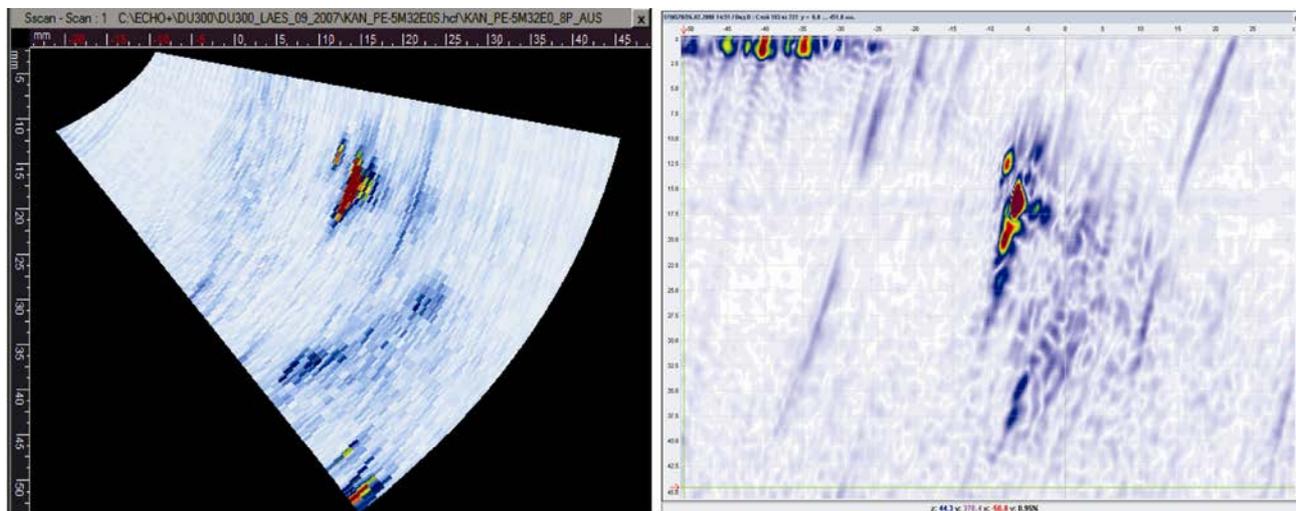


Рис. 1. Изображение трещины, модель сканера и результаты разрушающих исследований для сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300



**Рис. 2. Изображение трещины, полученное в сварном соединении Ду300 с использованием фазированных антенных решеток (слева) и системой «АВГУР» (справа)**

точность измерений, а также повышает отношение полезный сигнал/уровень структурных помех. Определение размеров дефектов при контроле аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду300 проводится по результатам анализа данных измерительного режима контроля, выполняемого по специальной методике.

В результате аттестационных испытаний методики установлены значения погрешности измерений размеров межкристаллитных трещин, возникающих под напряжением: для 95 % случаев погрешность измерения высоты трещин находится в интервале от  $-1,5$  до  $+1,5$  мм. Максимальная абсолютная погрешность измерения длины несплошностей, определенная по данным металлографических исследований, составила 6 мм.

Для этих же объектов контроля была разработана методика с аналогичными параметрами обнаружения и определения параметров дефектов, использующая фазированные антенные решетки. Основное преимущество этой методики в использовании более компактного оборудования (из-за снижения требований к точности сканирующих устройств). Эта методика также прошла полный цикл аттестационных испытаний и в настоящее время является основной методикой контроля для этих сварных соединений на АЭС РФ. На рис. 2 приведено изображение одной и той же межкристаллитной трещины, полученное с использованием фазированных антенных решеток и системы «АВГУР».

#### **Измерительные методики для аустенитных и разнородных сварных соединений большой толщины**

Наиболее распространенным способом УЗК аустенитных сварных соединений в настоящее время является способ с применением продольных волн, при реализации которого используются наклонные раздельно совмещенные ПЭП с фокусировкой луча на определенную зону по толщине. В методиках контроля аустенитных сварных соединений значительной толщины (более 30 мм) системами автоматизированного УЗК серии «АВГУР» использован комплекс мер для повышения выявляемости дефектов на фоне высоких структурных шумов. Помимо выбора оптимальных схем и частотного диапазона прозвучивания, учитывающих конструктивные особенности конкретного сварного соединения, используются [1, 2]:

- одновременно два типа волн – продольные и поперечные;
- пространственная фильтрация данных поискового режима контроля;
- когерентная обработка данных измерительного режима контроля;
- объединение изображений или синхронный режим их анализа;
- восстановление изображений с учетом преобразования типов волн (трансформации) волн на дефектах.

На рис. 3 приведены три проекции изображения искусственного плоскостного дефекта, заложеного в аустенитном сварном соединении.

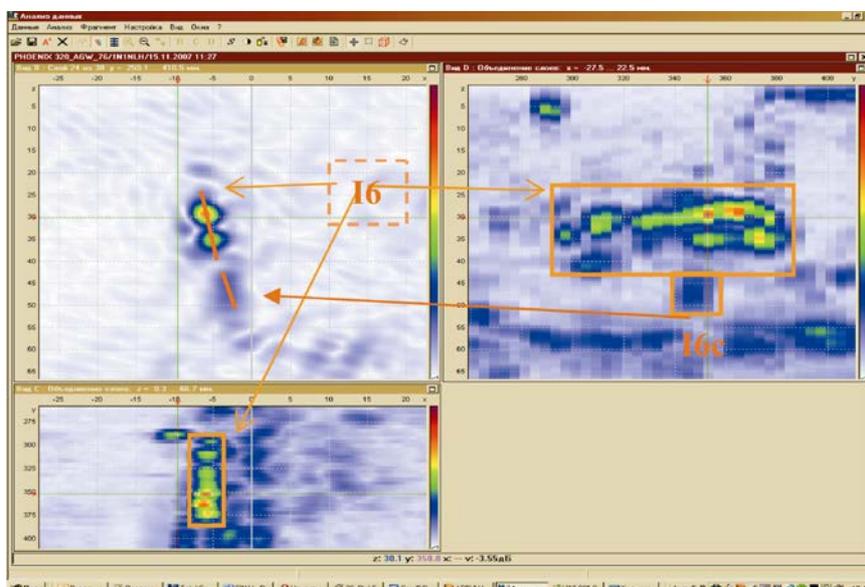


Рис. 3. Три проекции изображения плоскостного дефекта (I6) в аустенитном сварном соединении

Предложенный подход использован для создания методик АУЗК ответственных толстостенных аустенитных и композитных сварных соединений АЭС с реакторными установками ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200.

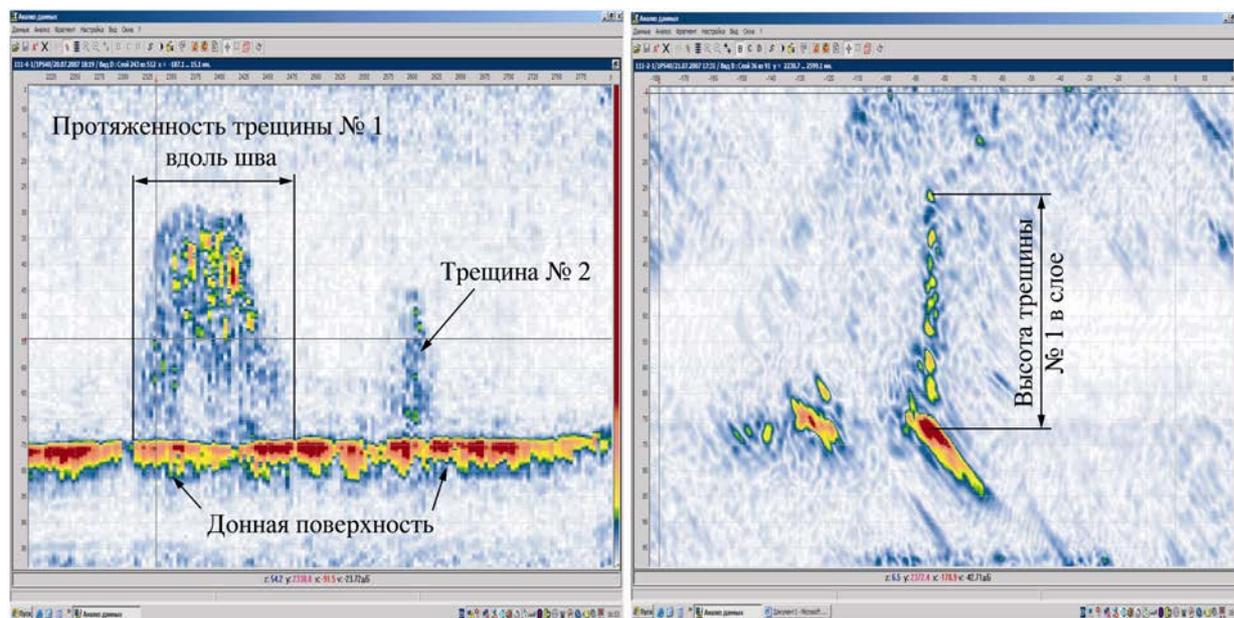
#### Измерительные методики для перлитных сварных соединений большой толщины

Концепция измерительного контроля используется для контроля кольцевых и продольных ответственных сварных соединений трубопроводов диаметрами и толщиной 840 и 28...54 мм (Ду800), 960 и 55...75 мм (Ду850), 1335 и 72 мм (Ду1200), используемых на атомных станциях с реакторными установками РБМК-1000 и ВВЭР-1000. Для всех типов сварных соединений поиск несплошностей, ориентированных вдоль оси шва, выполняется по совмещенной схеме в эхорежиме. Используются преобразователи с углами ввода 40, 50, 55 и 65°, работающие на частоте 2,5 МГц (применяются двух- и трехэлементные совмещенные преобразователи). При этом размер пьезоэлемента выбирается соответствующим требованиям разрешающей способности в измерительном режиме и минимально выявляемого дефекта в поисковом режиме. Лучевая и фронтальная разрешающая способности обычно составляют величину, равную 2...3 мм, а самые жесткие требования к отражающей способности минимально выявляемого дефекта составляют эквива-

лентную площадь плоскодонного отражателя, равную 3,5 мм<sup>2</sup>.

При аттестационных испытаниях в измерительном режиме на большой выборке реалистичных дефектов установлены значения максимальной погрешности измерения протяженности дефекта 11 мм и максимальной погрешности измерения высоты дефекта 2 мм. Параметры коррозионных язв и неровностей корня шва, определяемые по результатам измерительного режима УЗК с такими же погрешностями, соответствуют данным визуального контроля. На рис. 4 приведены D- и В-изображения высоких коррозионных трещин, полученные по данным одного из каналов регистрации системы «АВГУР». На основании полученных изображений составлены заключения контроля, содержащие данные о размерах, местоположении и ориентации дефекта. Результаты последующего вскрытия подтвердили точность определения параметров дефекта.

Для всех перечисленных объектов контроля разработаны методики с применением фазированных антенных решеток на базе таких дефектоскопов, как «АВГУР-АРТ», Omnisan, Harfang и аналогичных. Контроль по методике с использованием антенных решеток проводится эхоимпульсным методом контроля с контактным способом ввода ультразвука с поверхности сварного соединения с использованием автоматизированных сканирующих устройств. При контроле применяются антенные решетки, формирующие поперечную волну и



**Рис. 4. D-изображение (слева) и B-изображение (справа) участка сварного соединения с двумя коррозионными трещинами**

обеспечивающие при подключении к дефектоскопу диапазон углов качания луча от 15 до 85°. При технической возможности дефектоскопа контроль проводят с использованием технологии цифровой фокусировки антенны [3], обеспечивающей наилучшие параметры изображения. Основные преимущества методики контроля с применением антенных решеток заключаются в следующем:

- применение множества углов ввода повышает достоверность контроля при выявлении плоскостных разветвленных отражателей (трещин);
- снижение влияния неровной поверхности приводит к увеличению отношения сигнал/шум для несплошностей, расположенных в области корня сварного соединения;
- погрешность определения размеров дефектов находится на уровне, достигаемом с применением системы «АВГУР»;
- в изображениях несплошностей, полученных с применением фазированных решеток, уменьшается амплитуда блика, соответствующего получению трансформированных эхосигналов от несплошностей, не выходящих на поверхность, по схеме с отражением от донной поверхности, в результате облегчается задача идентификации типа несплошности;
- уменьшение веса оборудования за счет отказа от автоматизированного продольно-поперечного сканирования (сканирующие устройства имеют лишь один двигатель) и увеличение скорости контроля.

#### **Информационные критерии оценки качества сварных соединений по результатам автоматизированного УЗК**

Использование возможностей новых методик позволило создать несколько нормативных документов, допускающих в эксплуатацию сварные соединения с несплошностями установленных размеров, определенных в результате прочностных расчетов. Так, новыми федеральными нормами и правилами контроля металла при эксплуатации АЭС (НП-084-15, [4]) установлены нормы оценки качества допустимых размеров протяженных несплошностей по результатам проведения эксплуатационного УЗК для:

- сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 и трубопроводов Ду800 реакторной установки РБМК-1000;
- разнородных сварных соединений патрубков Ду1100 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-440;
- узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам Ду1200 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-1000.

Данные нормы используют лишь размеры областей, в которые вписываются обнаруженные дефекты определенного, обычно наиболее опасного типа. Размеры этих областей отождествляют с размерами дефектов. Такой подход оправдан для перечисленных объектов, так как наиболее вероятный критический сценарий развития разрушения объекта контроля изучен очень хорошо, и ситуация,

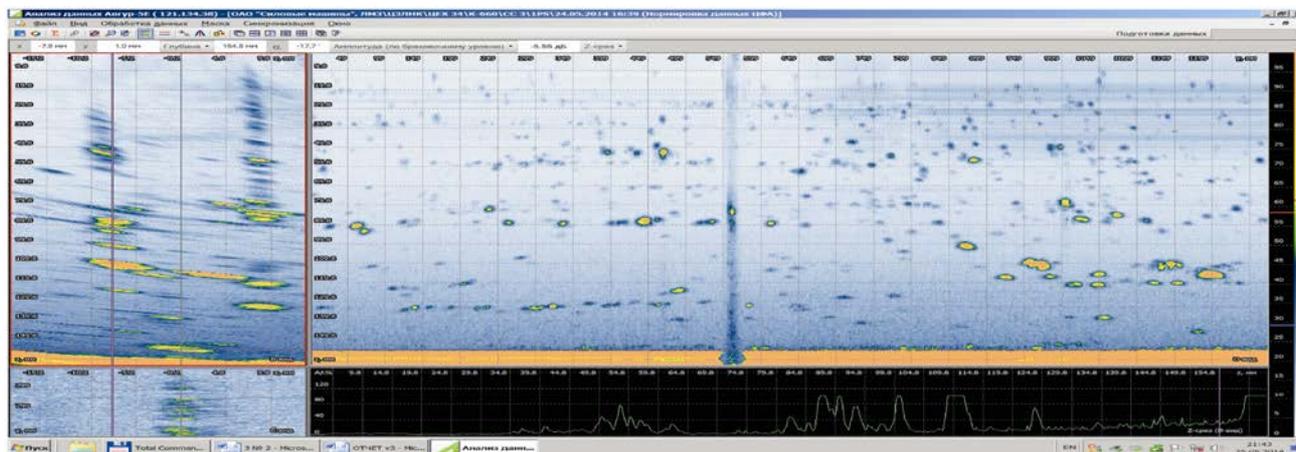


Рис. 5. Три проекции изображения участка сварного соединения ротора протяженностью 1250 мм. Самое большое сечение – суммарная D-проекция изображения

безусловно, прогнозируема. Для применения этих норм сознательно ограничиваются лишь информацией о размерах опасных дефектов определенного типа. А для оценки других несплошностей применяются или традиционные критерии, или консервативный подход, рассматривающий все фиксируемые несплошности как самые опасные.

При этом современные методы УЗК предоставляют целый ряд дополнительных характеристик неоднородностей, которые могут быть использованы для более точной и даже индивидуальной оценки оставшегося ресурса проконтролированного сварного соединения. И эта информация пока не используется при принятии решений. Рассмотрим несколько таких параметров, которые в настоящее время надежно фиксируются при проведении контроля, но остаются невостребованными.

Одним из таких параметров является множество отражателей, превышающих уровень структур-

ного шума металла, но не фиксируемых по тем или иным причинам (малый размер, ограничения уровня фиксации). Трудность точной интерпретации типов этих несплошностей, которая пока остается при УЗК, не должна быть поводом для полного отказа от принятия во внимание факта их наличия. В качестве иллюстрации на рис. 5 приведено изображение сечения сварного соединения ротора, которое демонстрирует такого рода отражатели с амплитудой ниже уровня фиксации.

Еще одним малоиспользуемым набором критериев являются: полная группа размеров дефекта (не только длина и высота), профиль дефекта (изменение его высоты по разным направлениям) и ориентация дефекта в заданной системе координат. На рис. 6 приведены характерные примеры для диагонально и продольно ориентированных дефектов.

Недавно была разработана новая технология измерения профиля донной поверхности сварного

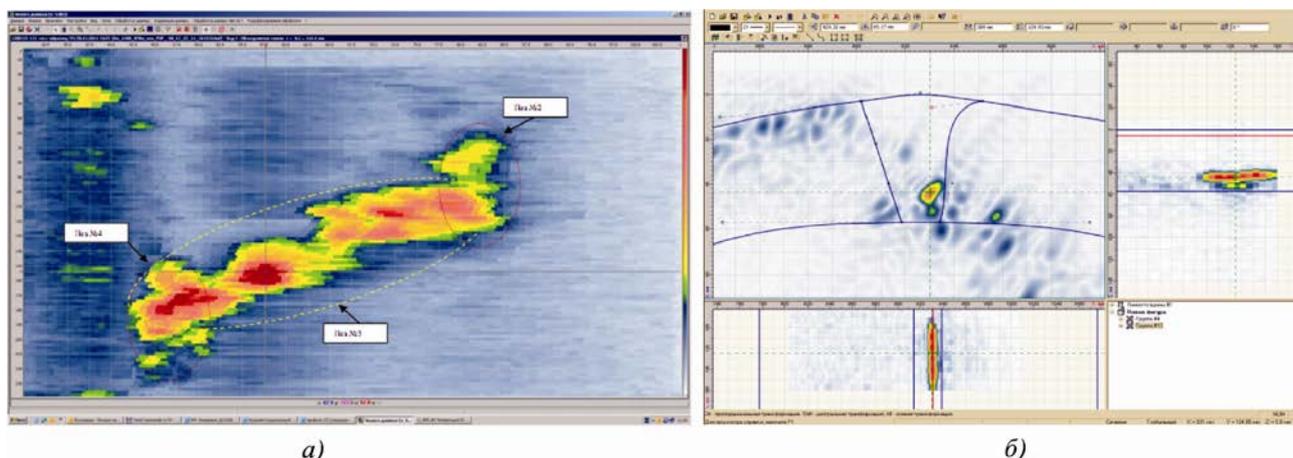


Рис. 6. Диагональная ориентация корня трещины (С-вид – а) и продольно ориентированный несправ в корне шва (три проекции изображения – б)

соединения под валиком усиления, которая позволяет фиксировать отклонения толщины сварного соединения с точностью от  $\pm 0,2$  до  $\pm 0,8$  мм [5, 6]. Индивидуальный профиль – еще один параметр сварного соединения, который необходимо учитывать при прогнозировании индивидуальных отклонений жизненного цикла объекта контроля.

Дополнительным критерием могут также служить зафиксированные изменения параметров несплошностей или сварного соединения, произошедшие за межконтрольный период эксплуатации.

Таким образом, опираясь на данные современного УЗК, можно сформировать информационный массив данных контроля для программ расчета остаточной прочности. Тщательное обследование на начальной стадии эксплуатации и использование такого массива данных позволит определить индивидуальный срок очередного обследования (создавая индивидуальные программы контроля) и увеличить периодичность контроля, а также отказаться от случайного выбора объектов контроля при формировании программ периодического освидетельствования.

#### Библиографический список

1. Гребенников В. В., Вопилкин А. Х., Гребенников Д. В. и др. УЗК аустенитных сварных соединений: I. Применение многопараметровых методов для повышения эффективности // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 1 (19). С. 10 – 12.
2. Гребенников В. В., Вопилкин А. Х., Гребенников Д. В. и др. УЗК аустенитных сварных соединений. II. Новые возможности при применении автоматизированных систем // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 1 (19). С. 13 – 15.
3. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Вопилкин А. Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов. М.: Машиностроение, 2008. 368 с.
4. Федеральные нормы и правила НП-084-15 в области использования атомной энергии «Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций». Официальная публикация Минюста РФ на

сайте <http://pravo.gov.ru/>. Номер опубликования: 0001201603140029. Дата опубликования: 14.03.2016.

5. АО «Концерн Росэнергоатом». Сплошная ультразвуковая толщинометрия оборудования и трубопроводов энергоблоков атомных электростанций. Ультразвуковая толщинометрия металла сварных соединений с применением фазированных решеток. Методика МТ 1.2.1.15.001.1087-2015. М., 2015.

6. Базулин А. Е., Пронин В. В., Тихонов Д. С., Шкатов П. Н. Построение профиля внутренней поверхности трубопроводов ультразвуковым методом с применением технологии цифровой фокусировки антенны // Приборы. 2015. № 11 (185). С. 16 – 25.

#### Библиографический список

1. Гребенников В. В., Вопилкин А. Х., Гребенников Д. В. и др. УЗК аустенитных сварных соединений: I. Применение многопараметровых методов для повышения эффективности // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 1 (19). С. 10 – 12.
2. Гребенников В. В., Вопилкин А. Х., Гребенников Д. В. и др. УЗК аустенитных сварных соединений. II. Новые возможности при применении автоматизированных систем // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 1 (19). С. 13 – 15.
3. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Вопилкин А. Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов. М.: Машиностроение, 2008. 368 с.
4. Федеральные нормы и правила НП-084-15 в области использования атомной энергии «Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций». Официальная публикация Минюста РФ на сайте <http://pravo.gov.ru/>. Номер опубликования: 0001201603140029. Дата опубликования: 14.03.2016.
5. АО «Концерн Росэнергоатом». Сплошная ультразвуковая толщинометрия оборудования и трубопроводов энергоблоков атомных электростанций. Ультразвуковая толщинометрия металла сварных соединений с применением фазированных решеток. Методика МТ 1.2.1.15.001.1087-2015. М., 2015.
6. Базулин А. Е., Пронин В. В., Тихонов Д. С., Шкатов П. Н. Построение профиля внутренней поверхности трубопроводов ультразвуковым методом с применением технологии цифровой фокусировки антенны // Приборы. 2015. № 11 (185). С. 16 – 25.

