

УДК 620.179.162:622.69

В.В. Пронин, e-mail: pronin@echoplus.ru

¹ ООО «НПЦ «ЭХО+» (Москва, Россия).

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АНТЕННЫ

Рассмотрены проблемы, связанные с эрозионно-коррозионным износом металла сварных соединений трубопроводов. Описана разработанная технология построения профиля донной поверхности с применением метода цифровой фокусировки антенны. Технология основана на применении двух антенных решеток, размещенных на обращенных передними гранями друг к другу наклонных призмах. Антенные решетки устанавливаются на поверхности изделия на рассчитанном расстоянии одна от другой, причем одна решетка работает в режиме излучателя ультразвуковых импульсов, вторая – приемника. На основе регистрации отраженных от донной поверхности ультразвуковых эхо-импульсов восстанавливаются множество парциальных изображений путем умножения матрицы принятых эхо-импульсов и матрицы сигналов, рассчитанных для каждой точки изображения для точечного отражателя, учитывая трансформацию типов волн при отражениях. Парциальные изображения суммируются и получают изображение профиля донной поверхности. Расчеты основных параметров схем контроля технологии проводились методом лучевых трубок с применением верифицированного программного средства CIV4. Приведены примеры использования технологии. Описаны перспективы развития ультразвуковой толщинометрии сварных соединений трубопроводов с применением цифровой фокусировки антенны для визуализации и измерения профиля донной поверхности. Предлагаемая технология может найти широкое применение в ультразвуковой дефектоскопии трубопроводов и других металлоконструкций с неэквидистантными поверхностями объекта контроля при одностороннем доступе. Учет внутренней поверхности позволит повысить достоверность и эффективность автоматизированного эксплуатационного контроля ответственного оборудования за счет получения высококачественного изображения профиля донной поверхности.

Ключевые слова: эрозионно-коррозионный износ, цифровая фокусировка антенны, построение профиля дна, толщинометрия неэквидистантных поверхностей.

Трубопроводы в процессе эксплуатации подвержены эрозионно-коррозионному износу. Стоимость защиты от коррозии, дефектоскопии и устранения разрушительного воздействия коррозии обходится промышленности по всему миру в миллиарды долларов. На сегодняшний день используется широкий спектр различных мето-

дов и технологий неразрушающего контроля для определения параметров коррозионных дефектов, в том числе глубины поражения [1–3]. Весьма эффективны ультразвуковые методы толщинометрии [4–11], основанные на свойстве отражения ультразвуковых волн на границах раздела сред. Их основные достоинства состоят в возможности конт-

роля при одностороннем доступе, высокой производительности и относительно нежестких требованиях к подготовке участка измерения. Однако известные методы ультразвукового контроля не обеспечивают достоверного выявления коррозионных поражений в зонах с неэквидистантными внешней и внутренней поверхностями, на-

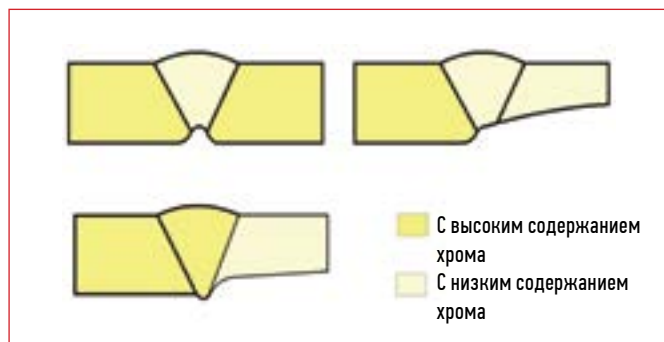


Рис. 1. Примеры эрозионно-коррозионного износа в области композитных сварных соединений и околошовной зоны

пример при контроле разнотолщинных объектов или в области сварных соединений. Примеры эрозии-коррозии в области сварных соединений представлены на рис. 1. Для контроля толщины сварных соединений используют дифракционно-временной метод TOFD [4, 12], но у него очень малое пространственное разрешение и большая погрешность, что приводит к недооценке или переоценке дефектности сварного соединения. Для контроля толщины трубопроводов с неэквидистантными поверхностями разработана технология [13] построения профиля донной поверхности на основе ультразвукового метода с применением цифровой фокусировки антенны (ЦФА). Метод основан на излучении в объекте контроля (ОК) ультразвуковых волн и регистрации этих ультразвуковых волн, отраженных от внутренних границ ОК, а также последующей цифровой обработке данных, полученных с применением ЦФА [14], с формированием изображений из зарегистрированных сигналов.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технология основана на применении двух антенных решеток (АР) с двумя одинаковыми призмами по двум схемам – раздельной и совмещенной (рис. 2).

Реализацию технологии можно разделить на три основных этапа: 1) регистрация эхо-импульсов – на первом этапе проводится сбор данных путем излучения и реги-

страции эхо-сигналов. Этот процесс называют методом двойного сканирования [14]. Сканирование может выполняться как по раздельной, так и по совмещенной схеме. При применении раздельной схемы одна АР излучает эхо-импульсы в ОК каждым элементом независимо и последовательно, вторая работает в режиме приемника всеми элементами одновременно. В отличие от раздельной схемы при применении совмещенной каждая АР является и излучателем, и приемником, работающими аналогично;

2) цифровая обработка сигналов – на втором этапе производится обработка принятых эхо-сигналов методом ЦФА и определяются шесть парциальных изображений, восстановленных по следующим акустическим схемам (рис. 2):

- для поперечной волны по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 1);
- для продольной волны по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 1);
- для продольной волны, трансформировавшейся в поперечную при отражении от дна по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 2);
- для поперечной волны, трансформировавшейся в продольную при отражении от дна по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 3);

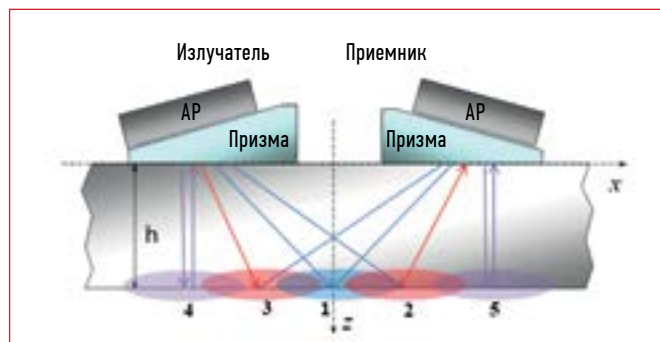


Рис. 2. Технология построения профиля донной поверхности с применением ЦФА

- для продольной волны по совмещенной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 4);
- для продольной волны по совмещенной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 5);

3) алгоритм построения профиля дна – на третьем этапе применяется алгоритм построения профиля донной поверхности. В качестве входных данных используются полученные на предыдущем этапе парциальные изображения. Затем происходит их нормировка (выравнивание амплитуд относительно одного из изображений) и объединение в суммарное восстановленное изображение (рис. 3). Объединение выполняется по максимуму, т. е. в каждой точке объединенного восстановленного изображения принимается значение амплитуды, являющейся максимальной среди амплитуд точек с теми же координатами каждого из парциальных изображений.

Поиск профиля дна проводится по суммарному восстановленному изображению. Построенный профиль дна представлен на рис. 3 и наложен на суммарное восстановленное изображение.

Поиск профиля дна проводится по суммарному восстановленному изображению. Построенный профиль дна представлен на рис. 3 и наложен на суммарное восстановленное изображение.

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ

Были исследованы возможности применения разработанной технологии. Исходные данные для обработки получены путем моделирования в программной среде CIVIA [15].

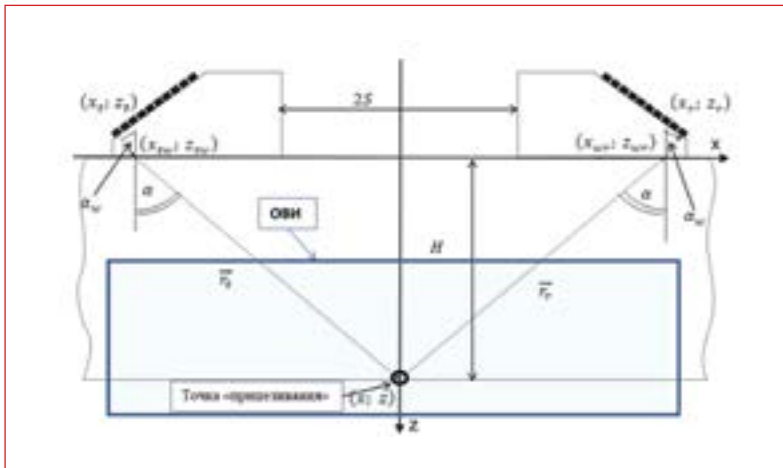


Рис. 3. Суммарное восстановленное изображение с профилем донной поверхности

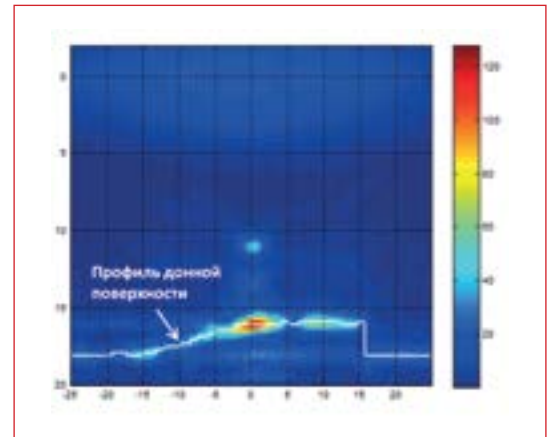


Рис. 4. Суммарное восстановленное изображение сварного соединения с вогнутым внутренним валиком

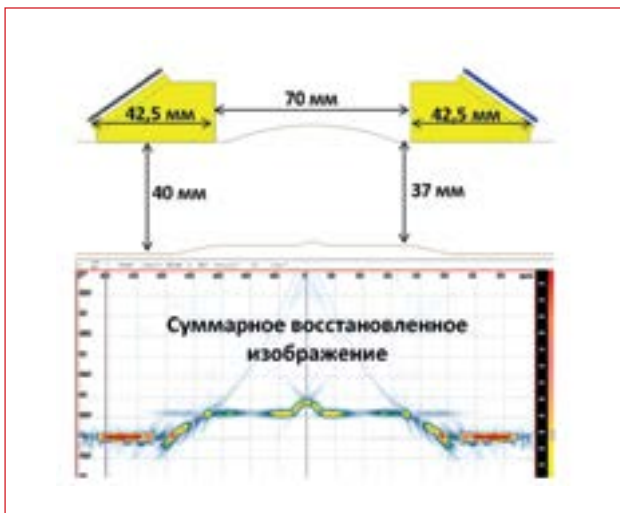


Рис. 5. Профиль донной поверхности сварного соединения с вогнутым внутренним валиком

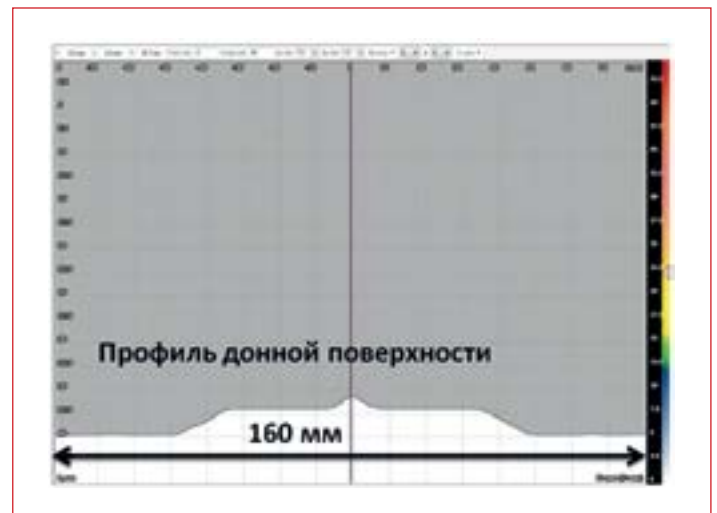


Рис. 6. Суммарное восстановленное изображение внутренней наклонной поверхности

Во всех описываемых примерах применяются АР со следующими характеристиками: частота – 5 МГц; 32 элемента; расстояние между центрами элементов – 1,0 мм (шаг). Призмы из рексолита с углом наклона 35°.

Пример 1. Определение профиля сварного соединения с вогнутым внутренним валиком

Толщина стенки основного металла – 40 мм, материал – перлитная сталь. На внешней поверхности присутствует валик усиления. На рис. 4 представлено суммарное восстановленное изображение, применяя алгоритм к которому, получили профиль дна, изображенный на рис. 5. Расстояние между

передними гранями призм – 70 мм. Ширина области восстановления (ОВ) донной поверхности при данной конфигурации равна 160 мм.

Пример 2. Определение коррозионного износа при разнотолщинности стенки основного металла

Толщина линейно меняется от 10 до 69,5 мм на отрезке длиной 220 мм. На рис. 6 представлено суммарное изображение, на рис. 7 – профиль дна.

Пример 3. Применение технологии построения профиля донной поверхности со сканированием. Построение карты коррозии

При сканировании алгоритм послойно накладывает профили донных поверхностей, формируя, таким

образом, карту коррозии (рис. 8). Такое применение позволяет образмерить коррозионный износ объекта. В данном случае выявлен и образмерен плоскодонный отражатель диаметром 10 мм на глубине 33 мм.

Пример 4. Выявление разнотолщинности кромок

Толщина образца – 14 мм; толщина правой кромки – 12,2 мм; толщина левой кромки – 11,8 мм. Модель и профиль восстановленной донной поверхности представлены на рис. 9. Среднее квадратическое отклонение погрешности измерения толщины по восстановленному профилю донной поверхности на модельных данных в примерах 1–4 составляет не более 0,2 мм.

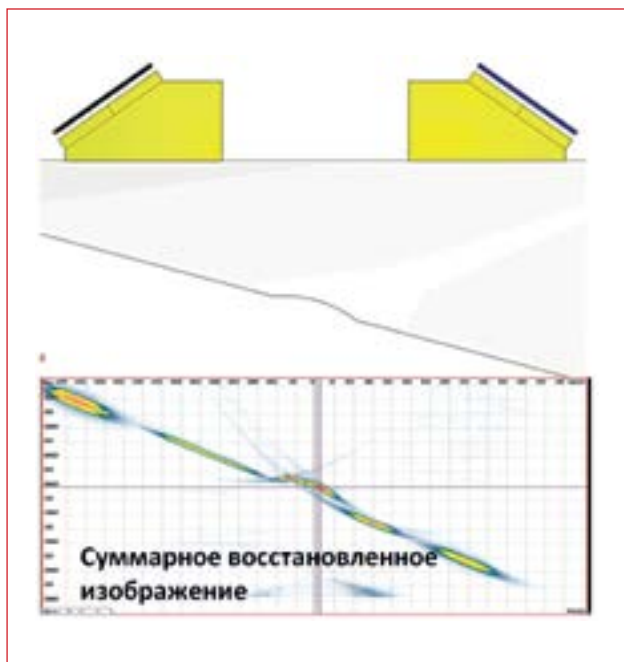


Рис. 7. Профиль донной поверхности с внутренней наклонной поверхностью



Рис. 8. Построение карты коррозии

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БАЗЫ НА ШИРИНУ ОБЛАСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Было проведено исследование влияния базы (расстояния между передними гранями призм) на ширину ОБ донной поверхности. Для расчетов также были выбраны АР с частотой 5 МГц, 32-элементные с шагом 1,0 мм и призмы из рексолита с углом ввода 35°.

Логично предположить, что чем больше база, тем шире ОБ донной поверхности. Однако при увеличении ОБ будут появляться разрывы при сложении парциальных изображений (рис. 10), полученных по разным акустическим схемам. Это приведет к ухудшению качества оценки профиля из-за повышения вероятности пропуска коррозионного износа. Таким образом, необходимо подобрать такое рассто-

яние между передними гранями призм, при котором ширина ОБ максимальна, а разрывы еще не возникают.

Кроме того, чем больше толщина ОК, тем дальше необходимо раздвинуть между собой призмы с АР для получения большей ширины ОБ, но при достижении определенного значения толщины (оптимальной для данной конфигурации) появятся разрывы, которые будут расти при дальнейшем увеличении расстояния между АР. Это происходит вследствие того, что при увеличении толщины ОК точки пересечения акустических полей будут находиться все дальше и в итоге окажутся на таком расстоянии друг от друга, которое приведет к возникновению разрывов. При появлении данного эффекта необходимо сдвигать призмы ближе друг к

другу до исчезновения разрывов, но при этом ОБ будет сокращаться. Расчет оптимального значения базы проводился по разработанной для этой цели программе.

Алгоритм работы программы:

- 1) входные данные – параметры АР, призм, ОК, а также значение базы;
- 2) расчет положений элементов каждой АР;
- 3) расчет зоны прозвучивания в ОК для каждой акустической схемы (всего шесть схем и, соответственно, зон) с учетом преломления, отражения и трансформации моды на границах сред;
- 4) анализ пересечений соседних зон прозвучивания. Значение базы считается оптимальным, когда размер всех пересечений (или минимального) соседних зон прозвучивания находится в диапазоне 2–4 мм.

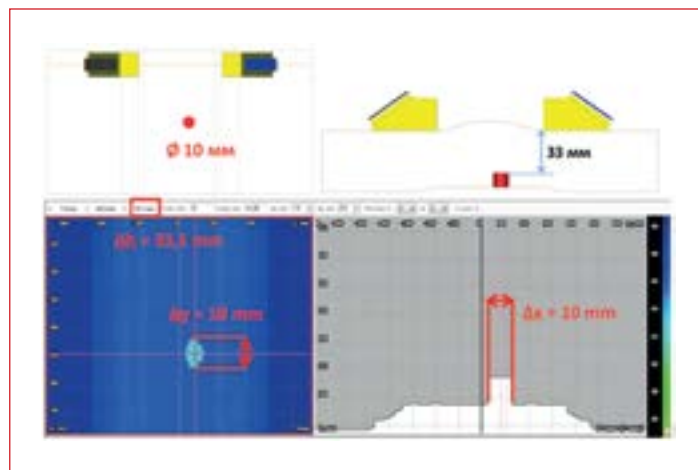


Рис. 9. Профиль донной поверхности с разнотолщиной кромок

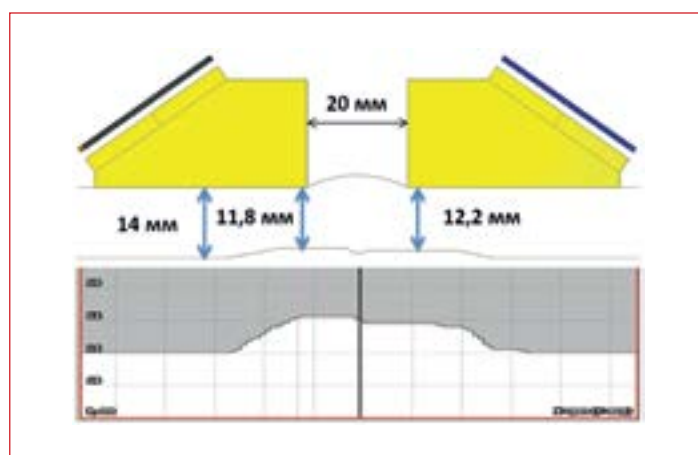


Рис. 10. Суммарное изображения профиля дна с разрывами (обозначены овалами)

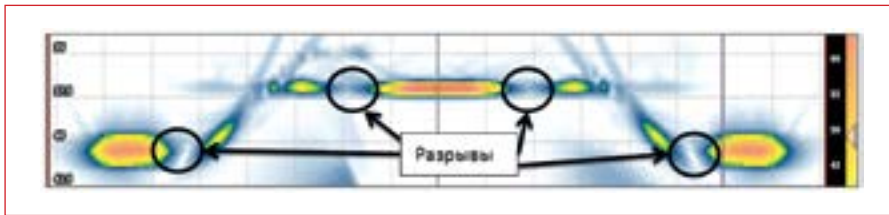


Рис. 11. Расчет оптимального положения АР

При большем размере пересеченной значение базы увеличивают, при отсутствии – соответственно, уменьшают.

Результаты расчета базы в зависимости от толщины ОК для исследуемой конфигурации показаны на рис. 11. График представляет собой оптимальный выбор базы в зависимости от толщины ОК. При увеличении базы появляются разрывы, при уменьшении – сужается ОВ донной поверхности. Максимум на графике соответствует оптимальной толщине для данной конфигурации АР и призм, при которой ширина ОВ будет максимальна без разрывов. Ширина ОВ донной поверхности вычисляется следующим способом: к минимально возможной ширине ОВ, когда призмы при-

двинуты вплотную, необходимо прибавить используемое значение базы. В данном случае она равна $42,5 \times 2 = 83$ мм, где 42,5 мм – ширина призмы с АР (рис. 4). Наличие валика усиления сварного соединения ухудшает ситуацию в случаях, когда ширина валика не позволяет сдвинуть призмы на расстояние, оптимальное или меньшее оптимального значения базы, вследствие чего будут появляться разрывы. Компенсировать эти разрывы можно путем дополнительного поперечного сканирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная технология позволяет своевременно обнаружить коррозионный износ, смещение кромок, утонения, провисания, раз-

нотолщинность и т. д. при контроле объектов с неэквидистантными внешней и внутренней поверхностями, а также измерить геометрические параметры внутренней поверхности.

2. Предлагаемая технология может найти широкое применение в ультразвуковой дефектоскопии трубопроводов и других металлоконструкций в атомной энергетике, в инфраструктуре нефтегазового транспортного хозяйства, химическом машиностроении, судостроении с неэквидистантными поверхностями объекта контроля при одностороннем доступе.

3. Учет коррозионного износа внутренней поверхности позволит повысить достоверность и эффективность автоматизированного эксплуатационного контроля ответственного оборудования за счет получения высококачественного изображения отражателей. Технология построения профиля донной поверхности даст импульс развитию автоматизированных методов распознавания и образмеривания несплошностей.

Литература:

1. Гурвич А.К., Сясько В.А., Артемьев Б.В. и др. Толщинометрия изделий и покрытий. Методы и задачи // В мире неразрушающего контроля. 2008. Т. 40. № 2. С. 4.
2. Шкатов П.Н., Шатерников В.Е. Неразрушающий контроль трещин и коррозионных поражений вихретоковым методом // Контроль. Диагностика. 1998. № 2. С. 39–42.
3. Волков Б.В., Шкатов П.Н. Вихретоковый контроль металла в энергетике. Челябинск: Цицеро, 2013. 249 с.
4. Базулин А.Е., Бенитес Х., Пронин В.В. и др. Сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла и сварных швов // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 4 (66). С. 20–26.
5. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Бобров В.Т. и др. ЗМА-преобразователи для ультразвуковых измерений // В мире неразрушающего контроля. 2008. Т. 40. № 2. С. 22–25.
6. Юнникова В.В. О достоверности ультразвукового контроля толщины // Контроль и диагностика. 1999. № 9. С. 31–34.
7. Самокрутов А.А., Алехин С.Г., Шевалдыкин В.Г. и др. Моделирование магнитных систем ЗМАП для возбуждения ультразвуковых волн в упругом слое в постоянном и импульсном магнитных полях // Контроль. Диагностика. 2014. № 12. С. 22–27.
8. Rioux Philippe. Comparison Corrosion Mapping Solutions using Phased Array and Conventional UT Techniques [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.ndt.net/events/NDTCanada2015/app/content/Paper/18_Rioux.pdf (дата обращения: 05.04.2018).
9. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Козлов В.Н. и др. А1207 – ультразвуковой толщиномер нового поколения // В мире неразрушающего контроля. 2001. № 2 (12). С. 23–24.
10. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Quideline. Olympus NTD, 2007, 376 p.
11. Швабович К., Суворов В.А. Неразрушающий контроль и построение профиля донной поверхности при помощи методов ультразвуковой томографии [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.acsys.ru/article/nerazrushayushchiy-kontrol-i-postroenie-profilya-donnoy-poverkhnosti-pri-pomoshchi-metodov-ultrazvuk/ (дата обращения: 05.04.2018).
12. Delacoux D., Trevin S., Caylar P. Weld Root Measurement by ToFD for Inspection of Flow-Accelerated Corrosion Susceptible Welds [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/266_wcndtfinal00266.pdf (дата обращения: 05.04.2018).
13. Способ ультразвукового контроля профиля внутренней поверхности изделия с неровными поверхностями: Пат. РФ № 2560754 / Е.Г. Базулин, А.Х. Воппликин, Д.С. Тихонов, В.В. Пронин Патентообладатель – ООО «НПЦ «ЗХО+».
14. Базулин Е.Г., Коколев С.А., Голубев А.С. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов // Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 18–32.