

УДК 620.179.162:534.87

В.В. Пронин¹¹ ООО «НПЦ «ЭХО+» (Москва, Россия).

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ: ОТ ЛИНЕЙНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДО МНОГОСХЕМНЫХ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

В статье описаны технологии и средства ультразвуковой толщинометрии основного металла и сварных соединений: сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла трубопроводов с применением антенных решеток, ультразвуковая толщинометрия сварных соединений по схеме TOFD (Time-of-flight diffraction) с применением антенных решеток, ультразвуковая толщинометрия сварных соединений методом цифровой фокусировки антенны с построением профиля донной поверхности. Технологии и средства контроля позволяют проводить толщинометрию объектов контроля с неэквидистантными поверхностями (на примере сварных соединений) с записью данных контроля. При толщинометрии сварных соединений проводится контроль в области сварных соединений, а также в околошовной зоне за один проход. По данным толщинометрии с применением специализированного программного обеспечения получают карты толщины объектов контроля. Приведены результаты измерений с применением разработанных технологий на испытательных образцах с искусственными дефектами, а также с реальным эрозионно-коррозионным износом. В статье описаны перспективы развития технологий толщинометрии основного металла и сварных соединений. Разработанные технологии позволяют одновременно обнаружить коррозионный износ, смещение кромок, утонения, провисания, разнотолщинность и т. д. при контроле объектов с неэквидистантными внешней и внутренней поверхностями, а также измерить геометрические параметры внутренней поверхности. Предлагаемые технологии могут найти широкое применение в ультразвуковой дефектоскопии трубопроводов и других металлоконструкций в атомной энергетике, инфраструктуре нефтегазового транспортного хозяйства, химическом машиностроении, судостроении при контроле основного металла и сварных соединений.

Ключевые слова: антенная решетка, цифровая фокусировка антенны, ультразвуковая толщинометрия сварных соединений, ультразвуковая толщинометрия сварных соединений методом TOFD, линейное сканирование, TOFD, ЦФА.

Трубопроводы в процессе эксплуатации подвержены эрозионно-коррозионному износу. Под воздействием теплоносителя происходит эрозионное разрушение защитной оксидной пленки на внутренней поверхности, что способствует протеканию процесса коррозии,

возникновению коррозионных трещин, в результате чего происходит разрушение металла стенки трубопровода.

Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации трубопроводов необходимо использовать современные достижения техно-

логий ультразвукового неразрушающего контроля и диагностики металла стенок и сварных соединений трубопроводов. Одним из таких направлений является сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла и сварных швов с применением антенных реше-

ток (АР). В отличие от выборочной ультразвуковой толщинометрии применение автоматизированных сканирующих устройств (СУ) при контроле позволяет увидеть и зафиксировать полную картину состояния металла.

На рынке представлены различные средства для сплошной ультразвуковой толщинометрии на основе АР в режиме электронного сканирования (рис. 1), которые позволяют за один проход измерять толщину в полосе, ширина которой определяется количеством элементов в антенной решетке. Применение электронного сканирования АР значительно экономит время по сравнению с механическим сканированием, что является важным фактором, в том числе для работы в условиях ионизирующего излучения.

ООО «НПЦ «ЭХО+» были разработаны технологии и средства ультразвуковой толщинометрии. Работа велась по следующим направлениям:

- 1) сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла трубопроводов с применением антенных решеток;
- 2) ультразвуковая толщинометрия сварных соединений по схеме TOFD (Time-of-flight diffraction) с применением антенных решеток;
- 3) ультразвуковая толщинометрия сварных соединений методом цифровой фокусировки антенны с построением профиля донной поверхности.

СПЛОШНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДОВ

Объектом контроля (ОК) является основной металл монометаллических трубопроводов, гибы и конусные переходы. Диапазон контролируемых толщин стенок трубопроводов составляет от 5,5 мм.

Измерение толщины проводится с использованием технологии ультразвуковых фазированных антенных решеток эхо-импульсным ультразвуковым методом с

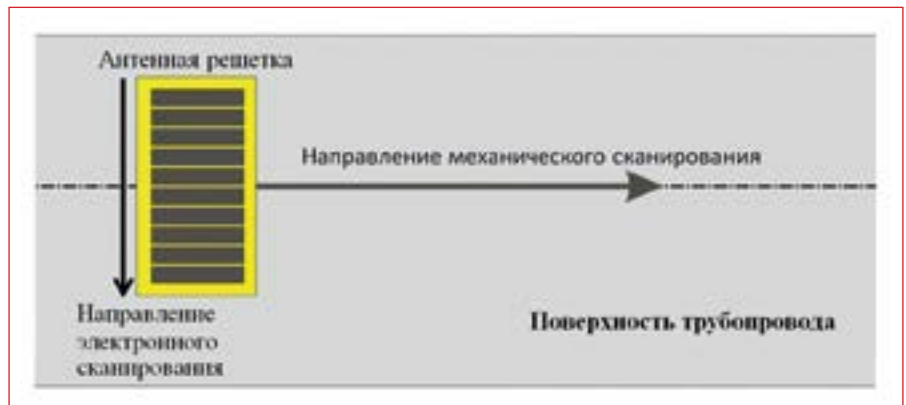


Рис. 1. Схема толщинометрии основного металла трубопроводов

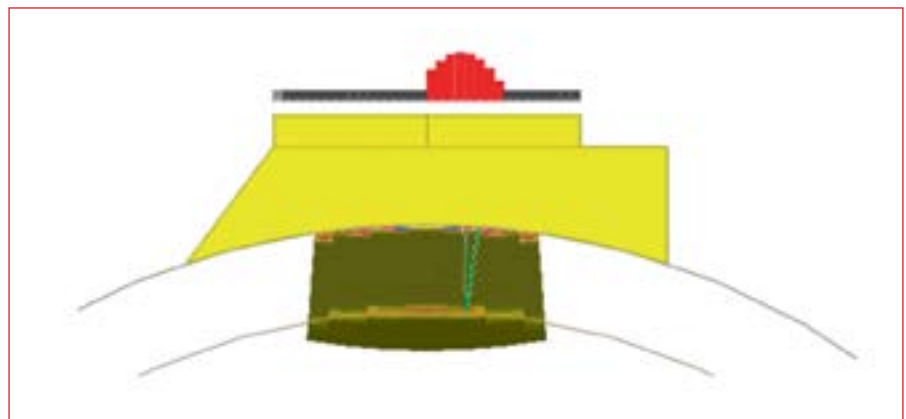


Рис. 2. Электронное сканирование вдоль апертуры АР

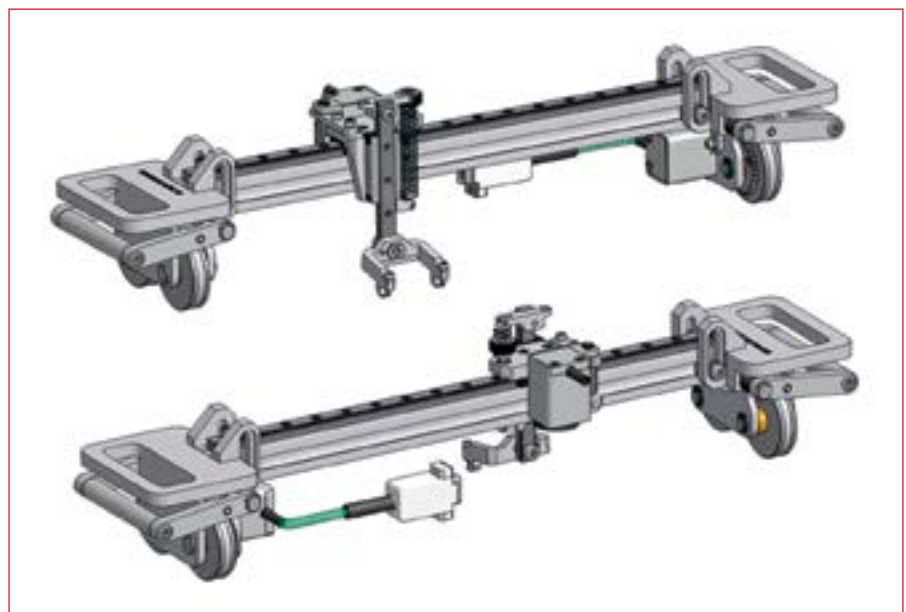


Рис. 3. Сканер для выполнения толщинометрии основного металла

контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с использованием полуавтоматизированных сканирующих устройств.

Обеспечить относительно широкую полосу измерения толщины трубопровода позволила схема контроля, при которой АР движется вдоль оси трубопровода и

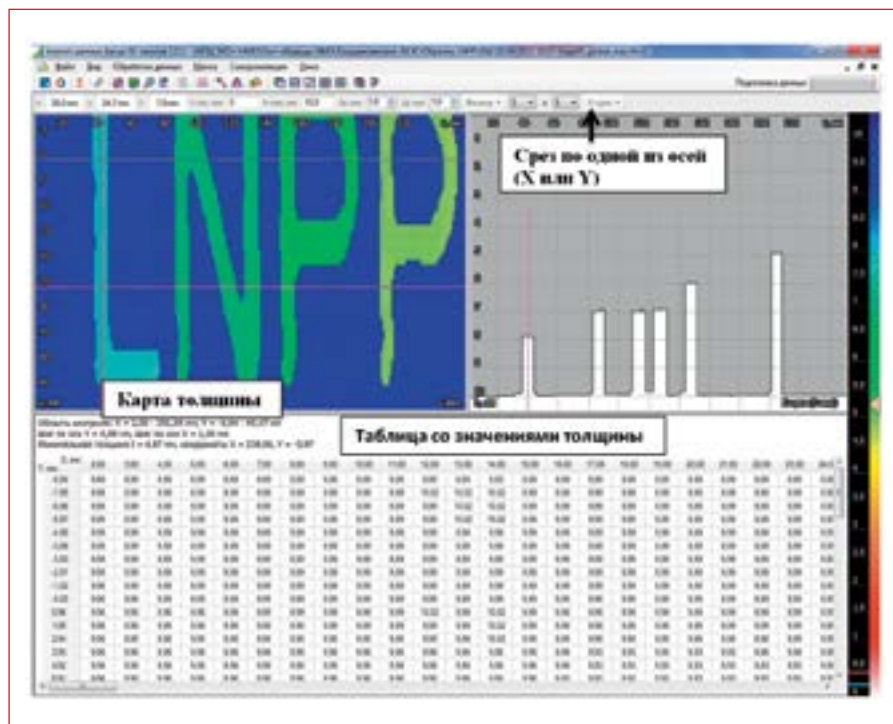


Рис. 4. Интерфейс программного обеспечения для построения и анализа карты толщины

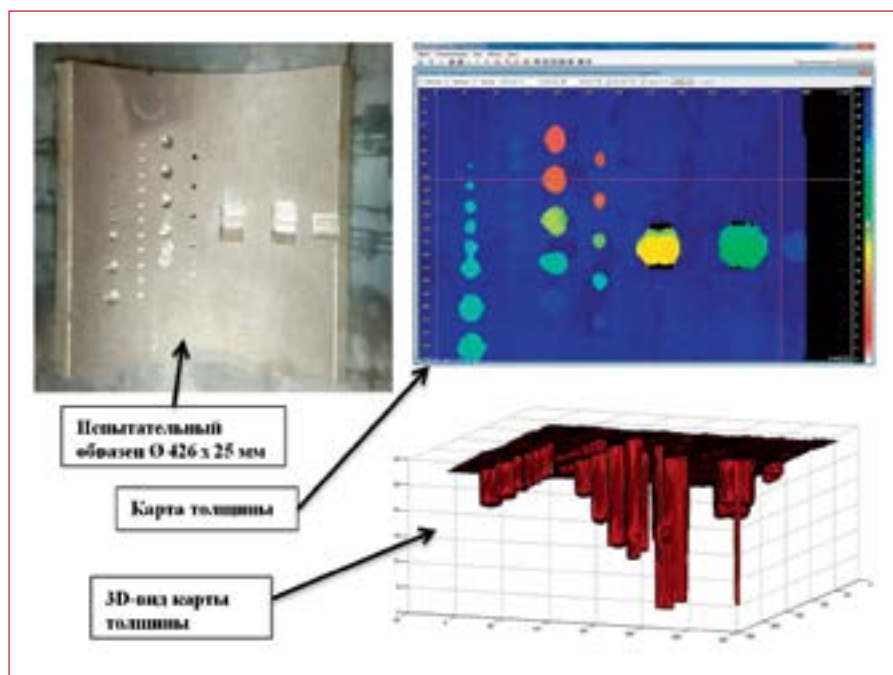


Рис. 5. Испытательный образец Ø 426 x 25 мм с картой толщины, построенной по результатам толщинометрии с применением АР

ориентирована поперек направления сканирования (рис. 1). В процессе измерений применяются АР, установленные на плосковогнутые задержки, контактная поверхность которых имеет вогнутую поверхность (рис. 2).

При контроле используют продольную волну, сфокусированную на номинальную толщину ОК, и электронное сканирование, обеспечиваемое при подключении к дефектоскопу, поддерживающему технологию контроля фазиро-

ванными антенными решетками (ФР).

Для проведения толщинометрии основного металла трубопроводов по предложенной схеме контроля было разработано механизированное двухкоординатное сканирующее устройство (СКУ) на магнитных колесах (рис. 3) с возможностью установки на трубопроводы с наружными диаметрами Ø 159–426 мм, а также на гибы и конусные переходы.

Для работы с данными толщинометрии было разработано специализированное программное обеспечение (ПО), включающее следующие функции и возможности:

- построение карты толщины по данным толщинометрии;
- просмотр карты толщины по координатам X–Y и по срезу X/Y;
- значение толщины в каждой точке с формированием таблицы значений;
- возможность изменения сетки с соответствующим изменением количества столбцов/строк таблицы со значением толщины;
- поиск минимального значения толщины с фиксацией координат;
- возможность выдачи заключения;
- возможность применения фильтрации (медианная, сглаживающая);
- возможность объединения двух или нескольких файлов данных в один и просмотр общей карты толщины;
- представление карты толщины не зависит от метода сбора данных толщинометрии.

Интерфейс ПО представлен на рис. 4.

Для аттестационных испытаний метода был разработан образец диаметром 426 мм и толщиной стенки 25 мм, в котором были изготовлены плоскостные отверстия, перпендикулярные поверхности образца, с различными диаметрами и высотами для определения. Погрешность измерений составила менее 0,2 мм (рис. 5).

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ
ТОЛЩИНОМЕТРИЯ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ (СС) ПО СХЕМЕ
TOFD (TIME-OF-FLIGHT
DIFFRACTION) С ПРИМЕНЕНИЕМ
АНТЕННЫХ РЕШЕТОК**

Объектом контроля по настоящему методу являются сварные соединения трубопроводов с наружными диаметрами от $\varnothing 159$ мм и толщиной стенки от 5,5 мм.

Измерения проводятся с использованием технологий ультразвуковых фазированных антенных решеток ультразвуковым методом времяпролетной дифракции (TOFD), с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с использованием полуавтоматизированных сканирующих устройств. При контроле применяются АР и призмы, формирующие наклонный ввод продольной волны и обеспечивающие при подключении к дефектоскопу ФР режим электронного сканирования (рис. 6). Одновременно проводятся измерения толщины в околошовной зоне с применением тех же АР, работающих в режиме электронного сканирования с углом ввода 0° , по времени прихода донного сигнала (рис. 7). Таким образом, обеспечивается широкая полоса измерения толщины.

Для перемещения антенных решеток используется одноординатное сканирующее устройство с набором треков под диаметры $\varnothing 159$; 219; 273; 325; 377 и 426 мм (рис. 8).

Для аттестационных испытаний метода в испытательном образце $\varnothing 426 \times 25$ мм были изготовлены имитации расточек сварных соединений. Погрешность измерений в области околошовной зоны составила менее 0,6 мм, а в области сварного соединения – менее 1,0 мм (рис. 9). По описываемому методу получают три карты толщины (околошовная зона с двух сторон СС и область СС), которые объединяют с помощью ПО и получают общую карту толщины.

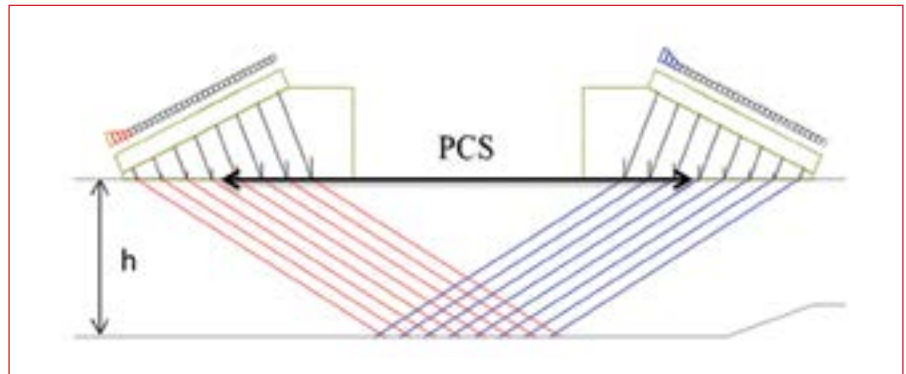


Рис. 6. Принцип измерения толщины в области сварного соединения по схеме TOFD с АР и электронным сканированием

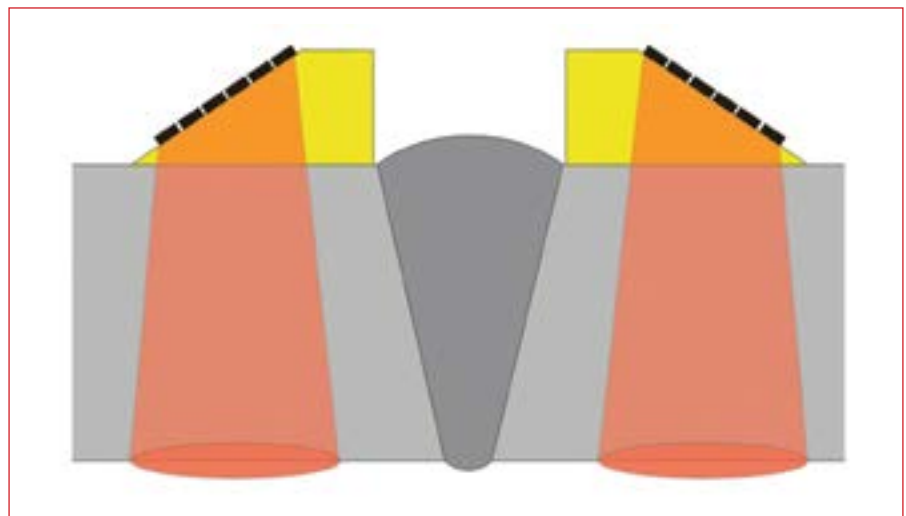


Рис. 7. Принцип измерения толщины в околошовной зоне

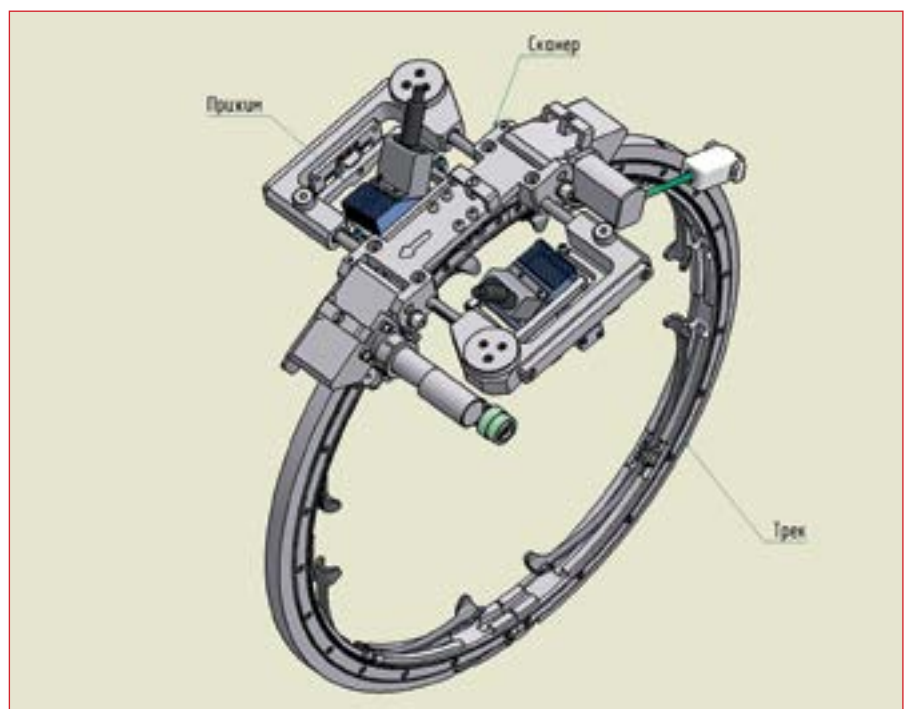


Рис. 8. Сканер СК-ТД.160-426.ДП-1 с треком $\varnothing 325$ мм

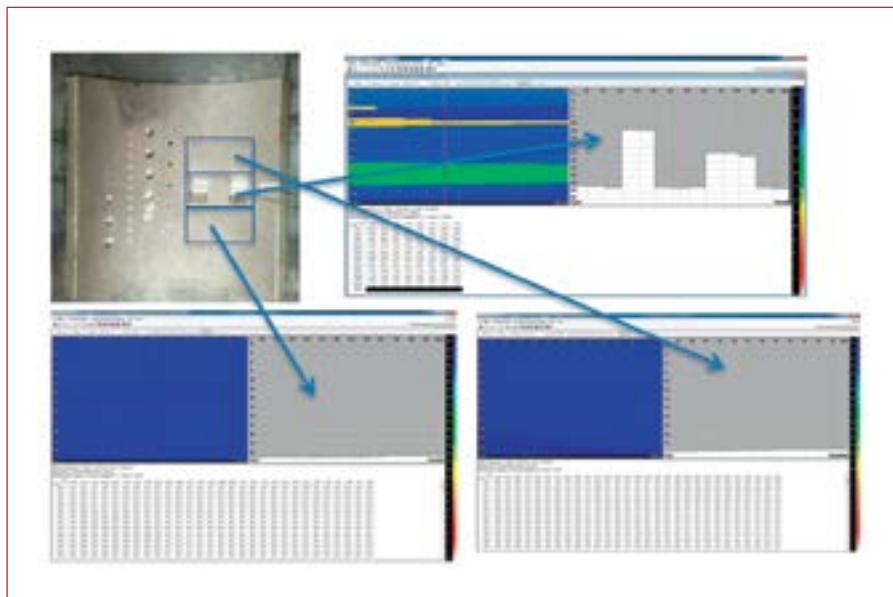


Рис. 9. Испытательный образец $\varnothing 426 \times 25$ мм с картой толщины, построенной по результатам толщинометрии СС по схеме ТОFD

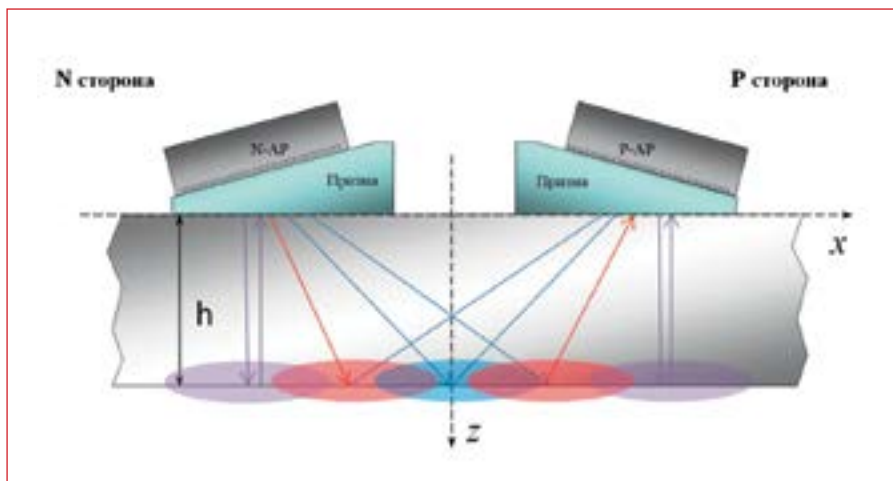


Рис. 10. Применение ЦФА для толщинометрии СС:

фиолетовый цвет – продольные волны по совмещенной схеме; красный цвет – продольные волны по раздельной схеме, фиолетовый цвет – поперечные волны по раздельной схеме

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АНТЕННЫ С ПОСТРОЕНИЕМ ПРОФИЛЯ ДОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для контроля толщины трубопроводов с неэквидистантными поверхностями разработана [1] технология построения профиля донной поверхности на основе ультразвукового метода с применением цифровой фокусировки антенны (ЦФА). Метод основан на

излучении в ОК ультразвуковых волн и регистрации этих ультразвуковых волн, отраженных от внутренних границ ОК, а также последующей цифровой обработке ЦФА [2] с формированием изображений из зарегистрированных сигналов. Технология основана на применении двух антенных решеток (АР) с двумя одинаковыми призмами по двум схемам: по раздельной схеме и по совмещенной схеме (рис. 10).

Реализацию разработанной технологии построения профиля донной

поверхности можно разделить на три основных этапа.

На первом этапе проводится сбор данных путем излучения и регистрации эхо-сигналов. Этот процесс называют методом двойного сканирования. Сканирование может выполняться как по раздельной, так и по совмещенной схеме. При применении раздельной схемы одна из АР излучает эхо-импульсы в ОК каждым элементом независимо и последовательно. Вторая АР работает в режиме приемника всеми элементами одновременно. В отличие от раздельной схемы при применении совмещенной каждая АР является и излучателем, и приемником, работающими аналогично.

На втором этапе производится обработка принятых эхо-сигналов методом ЦФА и определяются шесть парциальных изображений, восстановленных по следующим акустическим схемам (рис. 10):

- 1) для поперечной волны по раздельной схеме;
- 2) для продольной волны по раздельной схеме;
- 3) для продольной волны, трансформировавшейся в поперечную при отражении от дна, по раздельной схеме;
- 4) для поперечной волны, трансформировавшейся в продольную при отражении от дна, по раздельной схеме;
- 5) для продольной волны по совмещенной схеме;
- 6) для продольной волны по совмещенной схеме.

На третьем этапе применяется алгоритм построения профиля донной поверхности. Здесь 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. 11). Построенный профиль дна изображен на рис. 11 и наложен на суммарное восстановленное изображение.

На рис. 12 приведены примеры толщинометрии образцов с реальным эрозионно-коррозионным износом (ЭКИ) с построением карты толщины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные технологии позволяют своевременно обнаружить коррозионный износ, смещение кромок, утонения, провисания, разнотолщинность и т. д. при контроле объектов с неэквидистантными внешней и внутренней поверхностями, а также измерить геометрические параметры внутренней поверхности.

2. Предлагаемые технологии могут найти широкое применение в ультразвуковой дефектоскопии трубопроводов и других металлоконструкций в атомной энергетике, в инфраструктуре нефтегазового транспортного хозяйства, химическом машиностроении, судостроении при контроле основного металла, а также с неэквидистантными поверхностями объекта контроля.

3. Учет внутренней поверхности позволит повысить достоверность и эффективность автоматизированного 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. Патент RU № 2560754. Способ ультразвукового контроля профиля внутренней поверхности изделия с неровными поверхностями / Е.Г. Базулин, А.Х. Вопилкин, Д.С. Тихонов, В.В. Пронин. Патентообладатель: ООО «НПЦ «ЭХО+».
2. 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.

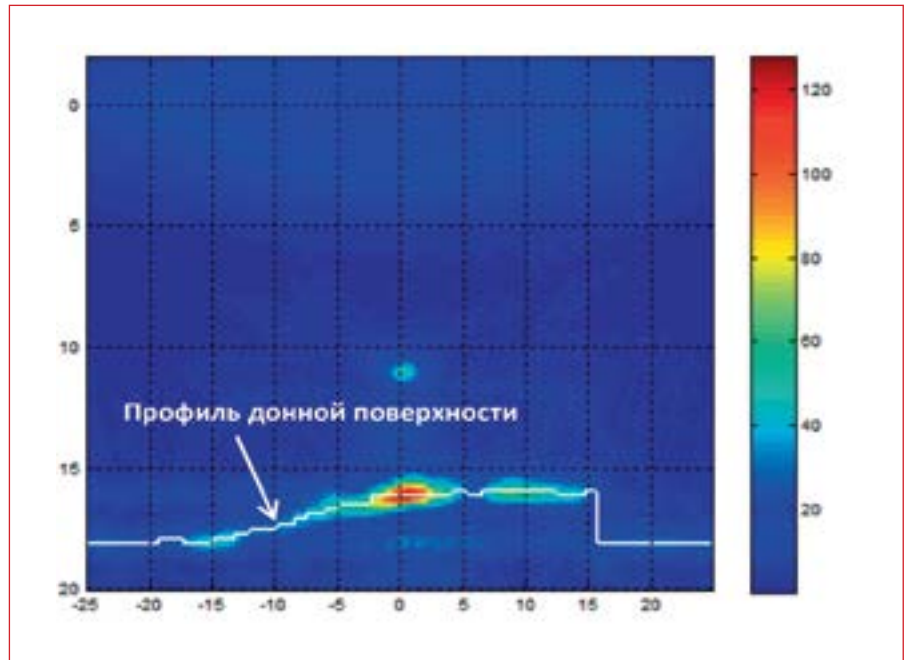


Рис. 11. Суммарное восстановленное изображение с профилем донной поверхности

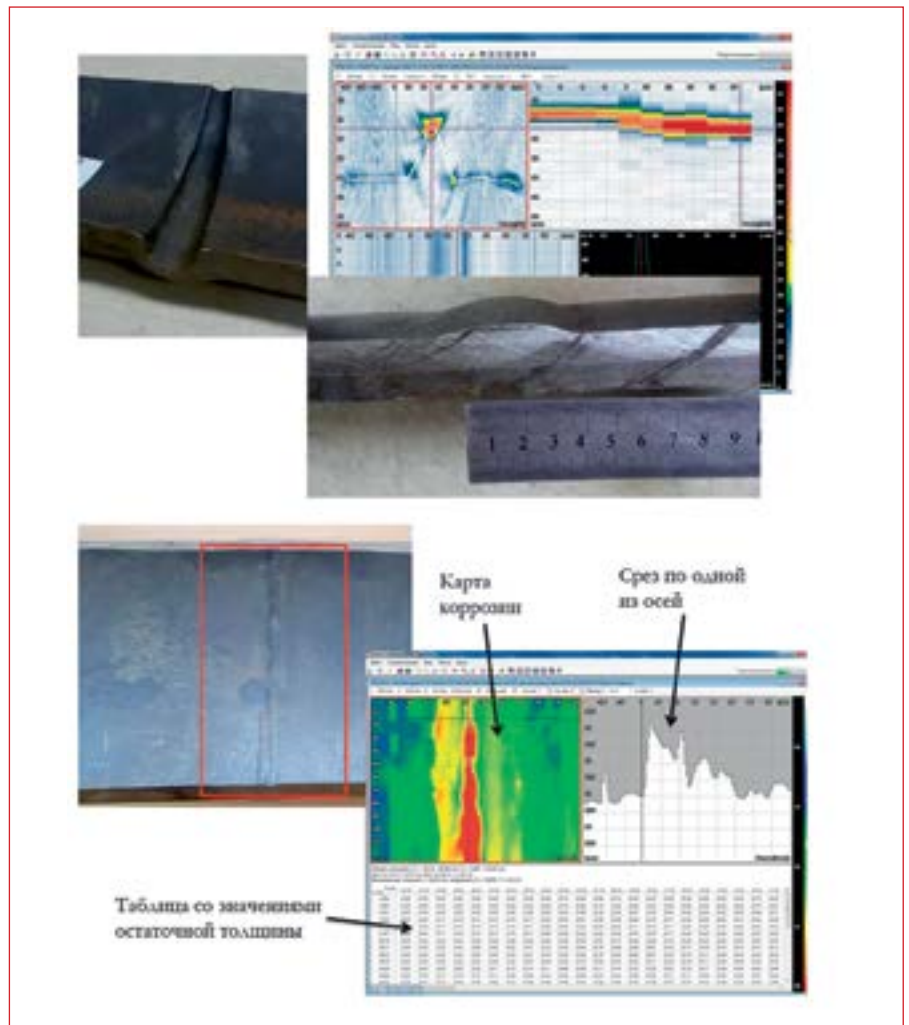


Рис. 12. Применение технологии ультразвуковой толщинометрии СС с ЦФА образцов с ЭКИ