

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ, РЕМОНТЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

УДК 620.179.16

Д.С. Тихонов, к.т.н., ООО «Научно-производственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+» (Москва, РФ), dtikh@echoplus.ru

В статье описываются современные методы автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений магистральных газопроводов. Они позволяют решать широкий спектр практических задач – от выявления малых дефектов на фоне структурных помех металла до дифракционной дефектометрии в толстостенных объектах контроля.

Реализация трехмерного метода когерентного восстановления изображений позволила полностью решить задачу контроля поднакладочного сварного соединения тройников сварных с накладками. Задача осложнена ограниченностью доступа к сварному соединению, а также наличием влияния сварных соединений накладки в области контроля. Решить задачу на требуемом уровне чувствительности традиционными методами невозможно. В статье рассмотрены технология автоматизированного контроля таких объектов, результаты аттестационных и практических испытаний.

Сочетание различных методов получения визуальных данных позволило совместить производительность, качество и полную документированность контроля. Примером служит новая система АВГУР-ТФ, успешно прошедшая аттестационные испытания во ВНИИГАЗ в 2017 г. В ней используются методы фазирования антенных решеток, многозонального контроля по схеме «тандем», дифракционно-временной, а также метод цифровой фокусировки антенны. В процессе контроля первые три метода используются одновременно, сохраняется высокая скорость сканирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ, ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ, МНОГОЗОНАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ, ТАНДЕМ, ДИФРАКЦИОННО-ВРЕМЕННОЙ МЕТОД, ЦИФРОВАЯ ФОКУСИРОВКА АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ, СВАРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ, МАГИСТРАЛЬНЫЙ ГАЗОПРОВОД, ТРОЙНИКИ СВАРНЫЕ С УСИЛИВАЮЩИМИ НАКЛАДКАМИ, ПОДНАКЛАДОЧНОЕ СВАРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ.

Применение средств автоматизации ультразвукового контроля (УЗК) в процессе сбора данных и последующей их обработки не только снижает влияние субъективного фактора на результат контроля, но и увеличивает информационную составляющую этого результата, что выводит на качественно новый уровень возможности решения обнаружения и классификации дефектов. Эти методы обработки и представления данных УЗК позволяют определять размеры, ориентацию, профиль, местоположение, характер несплошностей, свойства среды в области неоднородности,

скорость звука, плотность, затухание и т. п., а также фиксировать изменения этих параметров во времени.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ УЗК

Простейшие методы визуализации данных автоматизированного УЗК (АУЗК) – некогерентные способы растровой записи эхо-сигналов. К ним можно отнести и вариации дифракционно-временного метода контроля (от англ. Time of Flight Diffraction – TOFD).

Следующий уровень сложности – алгоритмы когерентной обработки данных для сканирующих од-

ноэлементных преобразователей. Механическое синтезирование пространственной апертуры выполняется в целях преобразования данных в двух- и трехмерные изображения с использованием алгоритмов Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) [1, 2], метода проекции в спектральном пространстве (ПСП) [3] и их вариаций: 2D-SAFT (2D-ПСП) и 3D-SAFT (3D-ПСП), Multi-SAFT.

Появление многоканальных систем и многоэлементных преобразователей реализовало методы динамической аппаратной фокусировки антенных решеток и матриц (2D- и 3D-фокусировка).

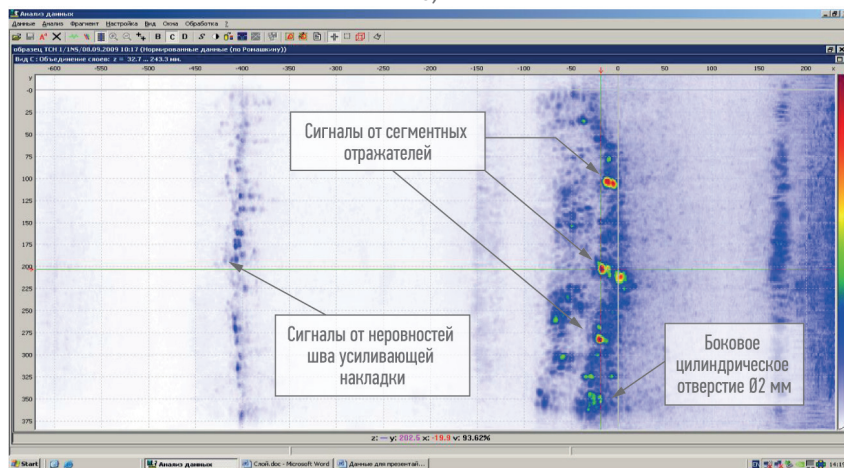
Наиболее технологически сложной и информативной является группа методов, реализующая идею цифровой фокусировки многоэлементных антенн (ЦФА). Для ЦФА используются эхо-сигналы, полученные от комбинаций пар элементов «излучатель – приемник» для последующей когерентной обработки методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [4, 5]. Преимуществом его является возможность применения для сканирующих антенных решеток для когерентного совмещения механического и электронного синтеза апертуры антенны. Это позволяет достичь наилучших показателей качества изображения как по разрешающей способности, так и по отношению «сигнал и (или) шум». Такая пространственная обработка может проводиться вдоль одной из осей сканирования (ЦФА-Х, ЦФА-У) – она обозначается как 2D-ЦФА – и двумерно по обеим осям (3D-ЦФА или ЦФА-XY). Использование метода C-SAFT для учета влияния границ объекта контроля, многосхемных и многомодовых вариантов распространения ультразвуковых волн, а также преобразования типов волн при их отражении от границ (методы Multi-ЦФА) позволяет достичь предельного для современного актуального оборудования качества изображений дефектов.

НЕКОГЕРЕНТНЫЕ И КОГЕРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЕФЕКТОВ

Некогерентные и когерентные методы визуализации дефектов применяются в системах АУЗК с различными сканирующими устройствами и предназначены для обнаружения и измерения параметров дефектов в металлических конструкциях и сварных швах технологического оборудования, в том числе труб различного диаметра и толщины, выполненных из сталей перлитного, аустенитного классов и других материалов. Параметры



а)



б)

Рис. 1. а) испытательный образец; б) результат восстановления изображения отражателей методом 3D-ПСП в испытательном образце с сегментными отражателями в корне поднакладочного шва

дефектов при этом определяются по изображениям, полученным после компьютерной обработки исходных данных контроля. Это позволяет реализовать подлинный измерительный режим в УЗК, обеспечивающий измерение реальных размеров дефектов. Методы являются наиболее эффективными из всех практически применяемых для решения задач контроля. Востребован в России также и метод TOFD.

С использованием метода 3D-SAFT (3D-ПСП) стало возможным решение сложной для УЗК задачи контроля внутреннего поднакладочного сварного соединения «патрубок – обечайка» тройников сварных с усиливающими накладками (ТСН). Применение традиционных методов контроля внутреннего сварного соединения «патрубок – обечайка» тройника, установленного в газопровод, невозможно из-за наличия усиливающей накладки на патрубке и воротника на обечайке тройника, которые ограничивают доступ к этому сварному соединению. Для достижения требуемого уровня чувствительности и высокой

разрешающей способности при контроле внутреннего сварного соединения «патрубок – обечайка» предложен метод, основанный на эффекте распространения звука с многократным отражением от параллельных границ. Исходные эхосигналы фиксируются на поверхности патрубка по большой двумерной апертуре с точностью позиционирования преобразователя не менее чем 0,1 мм на значительном (более 300 мм) удалении от сварного соединения и затем обрабатываются алгоритмом 3D-ПСП. Полученные в результате обработки изображения отражателей имеют высокий уровень полезного сигнала, высокую разрешающую способность для определения протяженности несплошностей и высокое отношение «сигнал и (или) шум».

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ

На рис. 1а, б показано размещение сканирующего устройства на патрубке ТСН толщиной 24 мм. Диаметр патрубка – 1020 мм, диаметр обечайки – 1400 мм. В образце были выполнены искусственные дефекты виде сегмент-

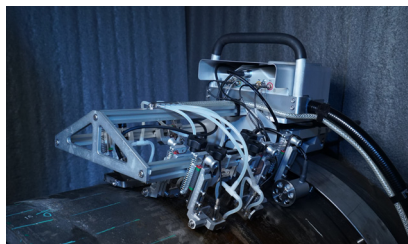


Рис. 2. Сканер системы АВГУР-ТФ, установленный на трубу диаметром 720 мм

ных отражателей высотой до 4 мм и боковых цилиндрических ($\varnothing 3$ и $\varnothing 4$ мм протяженностью 14 и 26 мм) и плоскдонных отверстий (7 мм²) в разных частях сварного соединения: по границе сплавления шва «патрубок – обечайка», в области корня этого шва и по границе сплавления сварного соединения «патрубок – обечайка». На этом же рисунке показана суммарная проекция всех слоев результирующего изображения некоторых дефектов образца.

Испытания системы АВГУР-Т, реализующей данную методику, на большом количестве образцов с различными типами дефектов показали, что дефекты в виде сегментных отражателей высотой более 10 % толщины патрубка и протяженностью более 15 мм надежно выявляются при отношении «сигнал и (или) шум более 12 дБ». Также установлено, что измерение протяженности такого рода дефектов вдоль оси сварного соединения возможно с погрешностью, не превышающей 3 мм. По результатам испытаний система АВГУР-Т и технология проведения контроля с ее помощью внесены в сводные реестры оборудования и аттестованных технологий, соответствующих техническим требованиям ОАО «Газпром» при выполнении работ по диагностике.

МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Применение сочетания различных методов получения визуальных данных позволило совместить производительность,

высокое качество и полную документированность контроля. Примером такого совмещения служит новая система АВГУР-ТФ. В целях создания высокопроизводительной и максимально информативной системы контроля реализованы эхо- и теневой методы ультразвукового контроля с использованием технологий фазированных антенных решеток (ФАР), ФАР с возможностью зональной фокусировки, ЦФА, а также метод TOFD.

Система представляет собой соединение TOFD-модуля с многоканальным ФАР- и ЦФА-дефектоскопом. Система дополняется однокоординатным сканером, обеспечивающим быстрое кольцевое сканирование преобразователей вокруг трубы вдоль сварного соединения (рис. 2). Система предназначена для проведения АУЗК кольцевых сварных соединений и основного металла трубопроводов в процессе их монтажа и при эксплуатации с измерением координат и размеров дефектов, а также амплитуд сигналов от них. Внешний диаметр сварных соединений – от 108 мм до плоскости. Толщина сварных соединений – от 5 до 80 мм. Материал свариваемых деталей: стали углеродистые,

низколегированные, низколегированные теплоустойчивые, а также стали мартенситно-ферритного, аустенитного и аустенитно-ферритного классов.

В процессе сканирования на экран выводится следующая информация (рис. 3): регистрируемые данные контроля по всем акустическим каналам, информация об акустическом контакте и информация о текущей координате сканирующего устройства.

ОТЛАДКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Для отладки метода контроля на первом этапе испытаний был изготовлен образец кольцевого сварного соединения диаметром 720 мм и толщиной 25 мм, в который были внесены различные технологические дефекты. Разделка сварного соединения – V-образная с углом наклона кромок 20°. В процессе заводских испытаний было проведено сопоставление данных АУЗК методами ФР и TOFD с данными рентгенографического контроля. Результаты показали, что комбинация ФР и TOFD обеспечивает выявляемость дефектов, превышающую возможности рентгенографического контроля.

В 2017 г. на территории Опытного-экспериментального центра

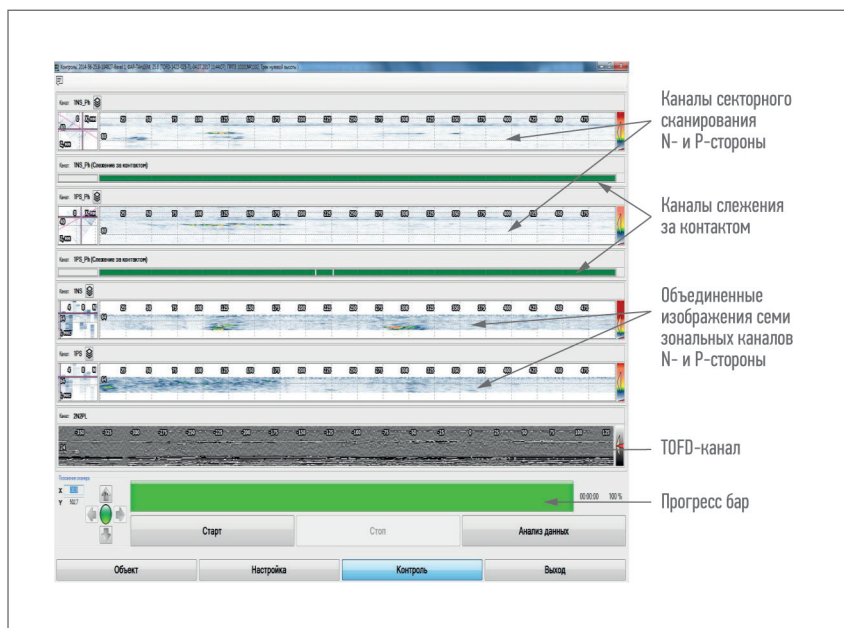


Рис. 3. Регистрация данных

ООО «Газпром ВНИИГАЗ» были проведены квалификационные испытания системы АВГУР-ТФ в соответствии с СТО Газпром 2-3.5-046-2006 [6]. Изготовлены «слепые» образцы кольцевых сварных соединений с заложенными технологическими дефектами сварки разных типов, видов, ориентации, размеров в соответствии с требованиями СТО Газпром 2-2.4-083-2006 [7], пять образцов диаметром 1420 мм, толщиной

25,8 мм и четыре образца диаметром 720 мм, толщиной 9 мм. При проведении испытаний были выполнены проверка повторяемости результатов контроля, проверка стабильности настроечных параметров, проверка срабатывания сигнализации потери акустического контакта, проверка выявляемости и оценка погрешности измерения параметров дефектов.

В результате испытаний были выявлены все заложенные недо-

пустимые дефекты, погрешности определения протяженности дефектов не превысили значения 3 мм, а погрешность определения высоты дефектов не превысила 1 мм. Подтверждено назначение системы для проведения АУЗК качества сварных соединений труб сухопутных участков магистральных газопроводов в соответствии с действующими нормативными документами ПАО «Газпром» по неразрушающему контролю. ■

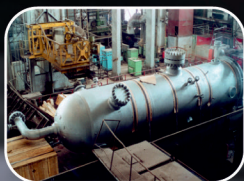
ЛИТЕРАТУРА

1. Осетров А.В. Теория пространственно-временной дифракционной томографии при сканировании одиночного приемопередатчика по плоскости // Акустический журнал. 1991. Т. 37, № 3. С. 528–534.
2. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М: Мир, 1970. 364 с.
3. Бадалян В.Г. Базулин Е.Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве // Акустический журнал. 1988. Т. 34, № 2. С. 222–231.
4. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29–41.
5. Базулин Е.Г. Восстановление изображения дефектов методом C-SAFT по эхосигналам измеренным антенной матрицей в режиме тройного сканирования // Дефектоскопия. 2012. №1. С. 3–19.
6. СТО Газпром 2-3.5-046-2006. Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ОАО «Газпром». Порядок экспертизы технических условий на оборудование и материалы, аттестации технологий и оценки готовности организаций к выполнению работ по диагностике и ремонту объектов транспорта газа ОАО «Газпром» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/437188506> (дата обращения: 28.08.2018).
7. СТО Газпром 2-2.4-083-2006. Инструкция по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://standartgost.ru/id/1072446> (дата обращения: 28.08.2018).



ООО «Научно-производственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+»

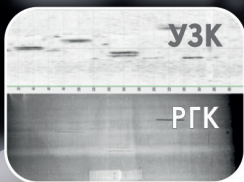
Высокая производительность автоматизированного ультразвукового контроля и надежная оценка качества сварных швов при монтаже и эксплуатации



Уникальные объекты



Магистральные газопроводы

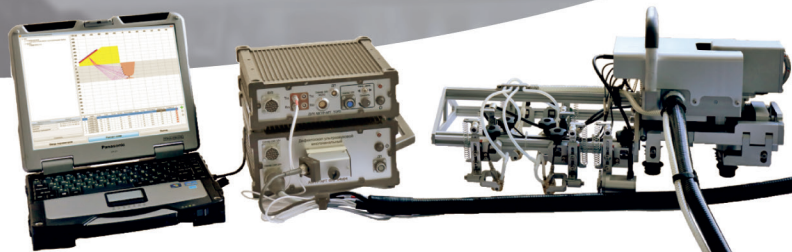


Замена радиографии на ультразвук

Контроль сварных швов → Проверка соответствия нормам → Выдача заключения



АВГУР-ТФ



Технологии фазированных решеток, цифровой фокусировки антенны и TOFD, объединенные в одной системе контроля