



УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ 30 ЛЕТ

**Юбилейный сборник трудов
ООО «НПЦ «ЭХО+»**

Москва
Издательский дом «Спектр»
2020

У51 **Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет:** юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: Издательский дом «Спектр», 2020. – 216 с.: ил.
ISBN 978-5-4442-0151-0

В сборник включены наиболее интересные работы, выполненные коллективом «НПЦ «ЭХО+» за последние годы. Одновременно с развитием и использованием автоматизированных ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных, представлены работы, посвященные исследованию, разработке и применению приборов с фазированными антенными решетками. Описана новая электроника, сканирующие системы, алгоритмы улучшения качества изображений. Рассмотрены основные принципы построения методик контроля с использованием таких систем. Исследован вопрос о соотношении радиографии и ультразвука в неразрушающем контроле. Показано, что когерентный АУЗК в ряде случаев дает результаты не хуже, а в комплексе лучше, чем радиография. Приведены примеры применения средств визуализации данных и автоматизации ультразвукового контроля. Представлен новый ручной ультразвуковой дефектоскоп «АВГУР-АРТ²⁰²⁰», реализующий все современные и востребованные наработки.

Приведен опыт применения программы компьютерного моделирования задач УЗК CIVA для разработки методик ультразвукового контроля.

УДК 620.179.16(082)

ББК 32.873я43

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| А.Х. Вopilкин. Предисловие к юбилейному сборнику | 4 |
| А.Х. Вopilкин. Ультразвуковая дефектометрия: от спектрального образа до когерентного изображения портрета дефектов | 7 |
| Д.С. Тихонов. Визуализация данных и автоматизация ультразвукового контроля для измерения несплошностей в сварных швах атомной энергетики | 25 |
| А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, А.В. Бутов, А.Х. Вopilкин, Д.С. Тихонов. Замена радиографического контроля на автоматизированный ультразвуковой с визуализацией данных..... | 42 |
| А.Е. Базулин, А.Х. Вopilкин, В.Л. Козлов, Д.С. Тихонов, Г.В. Тишин, С.В. Ромашкин, Е.А. Рубен, А.М. Штерн. Универсальный ручной дефектоскоп на фазированных решетках «АВГУР-АРТ»..... | 54 |
| А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, А.Х. Вopilкин, Д.С. Тихонов. Автоматизированная система для измерения параметров ультразвуковых пьезопреобразователей | 66 |
| А.Х. Вopilкин, С.В. Ромашкин, Д.С. Тихонов, С.А. Коколев, А.В. Бутов, А.М. Штерн, В.Л. Козлов, Е.А. Рубен, Г.В. Тишин. Система автоматизированного ультразвукового контроля «АВГУР-ТФ»: особенности и опыт применения..... | 74 |
| А.Е. Базулин, А.В. Бутов, Д.С. Тихонов, С.В. Ромашкин, А.В. Заушицын. Применение технологии TOFD в разработках ООО «НПЦ «ЭХО+» | 84 |
| В.Г. Федотовских, Д.С. Тихонов, С.В. Ромашкин. Опыт сплошной толщинометрии на основе ФР-дефектоскопов | 93 |
| С.А. Коколев, С.В. Ромашкин. Комплект средств автоматизированного визуального и измерительного контроля | 109 |
| В.Г. Бадалян. Риск-ориентированный подход в диагностике и ультразвуковая дефектометрия | 116 |
| В.Г. Бадалян. Выявление и достоверность контроля в ультразвуковой дефектоскопии и дефектометрии.... | 125 |
| А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, Д.С. Тихонов. Математическое моделирование при разработке и аттестации методик УЗК | 137 |
| Д.С. Тихонов, П.Ф. Самарин. Автоматизированный ультразвуковой контроль аустенитных и разнородных сварных соединений | 153 |
| А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, А.Х. Вopilкин, Д.С. Тихонов ФР-дефектоскоп: Почему 32 канала лучше, чем 16 | 167 |
| В.К. Авагян, Е.Г. Базулин. Увеличение скорости регистрации эхосигналов ультразвуковой антенной решеткой с применением технологии CDMA | 173 |
| Е.Г. Базулин, М.С. Садыков. Определение упругих констант в однородном анизотропном сварном соединении по эхосигналам, измеренным двумя антенными решетками..... | 189 |
| А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, Д.С. Тихонов. Практические аспекты реализации индустриальной революции 4.0 в продукции «НПЦ «ЭХО+» | 199 |
| Приложение 1. Содержание юбилейного сборника трудов к 20-летию ООО «НПЦ «ЭХО+» «Автоматизированный ультразвуковой контроль объектов повышенной опасности | 210 |
| Приложение 2. Содержание юбилейного сборника трудов ООО «НПЦ «ЭХО+» «Ультразвуковая дефектометрия. 25 лет»..... | 211 |
| Авторы статей юбилейного сборника «НПЦ «ЭХО+» | 212 |

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЮБИЛЕЙНОМУ СБОРНИКУ



Алексей Харитонович Вopilкин,
доктор технических наук, профессор,
генеральный директор ООО «НПЦ «ЭХО+»

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Вы в руках держите сборник статей специалистов нашей компании, посвященный тридцатилетнему юбилею НПЦ «ЭХО+». Уже стало хорошей традицией к юбилею выпускать сборники новых материалов. Это уже третий. Компания позиционирует себя не только как производственная и внедренческая, но и как научная организация. Об этом свидетельствует порядка 390 публикаций наших ученых, в том числе семь монографий. В компании работают три доктора и четыре кандидата наук.

В сборник вошли 18 статей, посвященных решению самых актуальных проблем ультразвукового неразрушающего контроля. Во многих статьях рассматриваются вопросы совершенствования ультразвуковой дефектометрии объектов как основного и наиболее важного направления деятельности, сопровождающего все 30 лет нашего существования.

Сборник открывается обзорной статьей «Ультразвуковая дефектометрия: от спектрального образа до когерентного изображения портрета дефектов», посвященная более чем 50-летнему решению автором этой задачи, сначала 22 года в стенах НПО «ЦНИИТМАШ», затем 30 лет в НПЦ «ЭХО+». Я думаю, что эта тема вечная, и в последующие 30 лет она будет также активно развиваться.

Основной акцент в новых статьях сделан на развитие методологии, аппаратной и программной поддержке технологии, основанной на применении фазированных решеток. Созданы и аттестованы новые системы «АВГУР-АРТ» и «АВГУР-ТФ», которые широко применяются прежде всего в атомной энергетике и начали активно использоваться в других отраслях, таких как газовая промышленность (ПАО «ГАЗПРОМ»), нефтехимия и т.д. На основе нашего практического опыта ультразвуковой дефектометрии разрабатываются эксплуатационные нормы дефектов в различных от-

раслях. Благодаря высокой разрешающей способности и относительно небольшой погрешности в измерении размеров дефектов открыто целое направление по замене непроизводительного и опасного радиационного контроля на высокопроизводительный и информативный автоматизированный ультразвуковой когерентный контроль. Создано порядка 10 методик, обеспечивших эту самую замену.

В сборнике представлен наш опыт по автоматизированному ультразвуковому контролю аустенитных сварных соединений, которых великое множество как в атомной энергетике, так и на объектах нефтехимии. Применены новые аппаратно-программные решения, повышающие отношение сигнал/шум на 8 – 12 дБ. Это нашло практическое отражение в разработанных методиках, многие из них широко используются нами при практическом контроле.

В России не так давно начал применяться так называемый дифракционно-временной метод контроля (ТОFD), уже широко используемый за рубежом. Мы создали аппаратно-программный комплекс по реализации этого метода, развив и усовершенствовали его. Встроили его в систему «АВГУР-ТФ» так, чтобы одновременно можно было вести контроль несколькими методами, которые информативно дополняют друг друга.

Несмотря на то что мы все годы создавали автоматизированные комплексы, мы рискнули создать ручной ФР-дефектоскоп, требующий при разработке гораздо более серьезного подхода. Он вобрал в себя самые современные электронные и технологические решения. По сути это три прибора в одном, имеющем возможность работать и в составе автоматизированных комплексов.

Представляет практический интерес работа по ультразвуковой толщинометрии на основе использования фазированных решеток. Разработанная технология позволяет контролировать толщину стенок изделия на трубах шириной до 300 мм за один проход. Кроме того, появилась возможность измерять остаточную толщину сварного шва непосредственно под швом, что весьма актуально при эрозионно-коррозионном износе в процессе эксплуатации.

Несколько статей посвящены созданным новым алгоритмам и технологиям, которые пока еще не имеют воплощения и ждут своего часа.

В последние годы все большую популярность завоевывает риск-ориентированный подход в диагностике. Разработанные приборы ультразвуковой дефектометрии представляют необходимые данные о текущем техническом состоянии объекта, что очень важно для объективной оценки риска аварий. Этому вопросу посвящены две статьи в сборнике.

Я очень надеюсь, что каждый, кто возьмет в руки этот сборник статей, найдет для себя что-то новое, чего раньше не знал, возможно, решение какой-то наболевшей проблемы. Уверен, что представленными в сборнике исследованиями развитие этого направления не ограничится. Надеюсь, что к следующему нашему юбилею мы снова будем готовы опубликовать новые материалы на эту тему.



Научно-производственный центр
неразрушающего контроля «ЭХО+»

ООО «НПЦ «ЭХО+»
123458, РФ, г. Москва,
ул. Твардовского, д. 8
«Технопарк «СТРОГИНО»
Тел.: +7 (495) 780-92-50
e-mail: echo@echoplus.ru
www.echoplus.ru

АВГУР-АРТ 2020

Ручной ультразвуковой дефектоскоп на фазированных решетках

Применение фазированных решёток, TOFD и технологий цифровой фокусировки в режимах ручного, механизированного и автоматизированного контроля

1 Самый большой и яркий экран в своем классе

2 2 пары TOFD
4 традиционных ПЭП

3 До 16 схем контроля (ФР, ЦФА, слежение за контактом)

4 Работа с любыми сканерами

5 Multi-touch интерфейс

6 Управление по Wi-Fi

7 IPEX – надежный разъем для подключения ФР от 32 до 128 элементов

8 SSD для записи данных, от 128 Гб

9 Гибкое и мощное программное обеспечение

10 Горячая замена аккумуляторов

11 Интеграция с модулем автоматизированного визуально-измерительного контроля и видеокамерами



УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ: ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО ОБРАЗА ДО КОГЕРЕНТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОРТРЕТА ДЕФЕКТОВ



А. Х. Вopilкин,
д-р техн. наук, проф.,
ген. директор

Приведена история развития одного из актуальных направлений ультразвукового контроля – ультразвуковой дефектометрии за 50-летний период работы автора сначала в НПО «ЦНИИТМАШ», затем в НПЦ «ЭХО+». Начались работы с применения дифракционных методов оценки типа и размеров дефектов, затем на смену им пришли ультразвуковые голографические методы, которые сослужили хорошую службу на атомных электростанциях. В последние годы активно развиваются методы и аппаратура ультразвуковой дефектометрии с использованием фазированных решеток (ФР). Апогеем создания приборов ФР явился выпущенный на рынок ФР дефектоскоп на 128 каналов, в котором реализованы одновременно три технологии контроля.

2 апреля 2020 года ООО «НПЦ «ЭХО+» отмечает 30-летие образования. За эти годы коллективом пройден невероятно большой путь в развитии технологии, приборов и систем, реализующих главное направление деятельности фирмы – «ультразвуковую дефектометрию». Именно это направление было выбрано при организации компании. Почему так? Дело в том, что я до создания компании 22 года проработал в НПО «ЦНИИТМАШ» и там тоже занимался созданием методов и приборов определения типа и размеров дефектов на основе изучения волн дифракции на отражателях различной формы. Этому были посвящены мои кандидатская и докторская диссертации. Тогда это направление еще не называлось ультразвуковой дефектометрией. Слишком грубыми были методы. Получается, что в теме «Ультразвуковая дефектометрия» я нахожусь уже более полувека. Оглядываясь назад, на пройденный путь, и анализируя сегодняшнее состояние этой темы, я решил подготовить обзорную статью, охватывающую мои работы с 1968 года по дифракционным методам и их продолжение уже в НПЦ «ЭХО+» на принципиально новом уровне – с применением голографических методов, а сегодня – основанных на использовании технологии фазированных антенных решеток (ФР-технологии).

Публикуя эту статью, я хочу рассказать читателям об истории развития этого одного из самых важных направлений ультразвукового контроля. Сегодня технологический процесс развивается с такой стремительностью, что сделанное вчера уже неактуально. Даже свои разработки десятилетней давности мы не все помним. В свое время наш классик И. Н. Ермолов опубликовал серию статей под названием «Дефектоскопические истории». Эта статья в том же ключе.

Часть 1. Ультразвуковая дефектометрия на основе спектрального и дифракционного образов

Когда я был студентом 5-го курса Московского горного института, мой руководитель диплома Игорь Николаевич Ермолов подкинул мне статью американского ученого Герике, в которой автор развивал идею, что дефектам различного типа соответствует свой спектральный отклик отраженного сигнала в частотном представлении. Например, спектр плоскостного дефекта при наклонном падении ультразвукового пучка на него имеет периодический осциллирующий характер, а для объемного дефекта характерно плавное изменение спектра. Игорь Николаевич предложил мне в дипломной работе проверить выводы Герике. На дворе был 1968 год. Я собрал установку для проведения экспериментов, разработал генератор линейно-частотно-модулированных колебаний, провел кое-какие эксперименты, мало что интересного получил, но диплом защитил на отлично. Далее я последовал за моим учителем в ЦНИИТМАШ и продолжил заниматься этой темой.

Почему тема распознавания типа дефектов по самым различным критериям (не только по спектру) так волновала не только меня (я тогда был еще новичком), но и многих ученых во всем мире? Дело в том, что нет прямой корреляции между типом дефектов и его амплитудным откликом. В то же время именно тип дефекта является критерием его опасности для конструкции. Все дело в различном коэффициенте концентрации напряжений K_c для дефектов различного типа. Например, пора округлой формы имеет $K_c = 3$, а трещина имеет $K_c = 25$ и более. Отсюда следует, что трещины на порядок опаснее, чем поры и, как результат, именно по трещинам происходит разрушение.

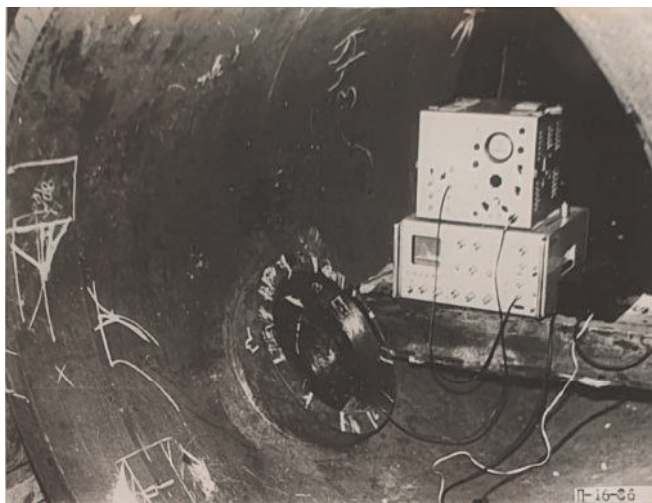


Рис. 1. Ультразвуковой спектроскоп конструкции НПО «ЦНИИТМАШ»

На протяжении многих лет практической работы я сталкивался с одним и тем же вопросом, который задавали сварщики, конструктора, технологи при обнаружении дефекта: какой это дефект и каких размеров? И дефектоскописты всегда уходили от ответа на этот вопрос, поскольку не существовали методы и средства определения истинных размеров и типа дефектов. Взамен наши ученые-классики И. Н. Ермолов и А. К. Гурвич ввели понятие эквивалентных и условных размеров, чтобы хоть как-то оценивать качество контролируемых изделий. Многочисленные исследования, проведенные различными авторами (В. Г. Щербинский, А. З. Райхман, В. Е. Белый и др.), показали, что между ними практически нет корреляции. Вследствие этого принимались очень жесткие нормы, многократно превышающие минимально необходимые. Отсюда возникали многочисленные необоснованные ремонты и бракование годных по качеству изделий. С другой стороны, наиболее опасные дефекты типа трещин, имеющие, как правило, небольшую отражательную способность (ниже браковочных норм), допускались в эксплуатацию и зачастую приводили к авариям.

Проблема определения типа и размеров дефектов захватила меня и сопровождала в научной деятельности всю жизнь. Не оставляет она меня и сейчас. Потому что в ультразвуковом неразрушающем контроле нет более актуальной темы, чем эта. Разумеется, на разных временных этапах она решалась по-разному. Начались исследования со спектрального метода, и это стало темой моей кандидатской диссертации. Далее исследования продолжились с применением волн дифракции различных типов и составили основу моей докторской диссертации. И уже в «ЭХО+» исследования развернулись на новом

уровне – на основе применения когерентных голографических методов, а в последнее время с применением фазированных антенных решеток (ФАР).

Теперь все по порядку.

Как только я начал работать в ЦНИИТМАШе, я развернул работы по спектральному методу. Конечно, при поддержке и общем руководстве Игоря Николаевича (ИН). По ходу аппаратной разработки надо было решить несколько научных и технических задач. Одна из них состояла в том, чтобы создать широкополосные преобразователи, работающие в диапазоне 1 – 10 МГц.

Я предложил и реализовал технологию преобразователя с переменным управляемым профилем поверхности пьезоэлемента. Эти преобразователи были запатентованы во многих странах. Надо сказать, что по этой теме началось плодотворное сотрудничество с чешскими институтами SVUM и SVUSS. От них руководил работами давний приятель ИН Ярослав Образ. Мы разрабатывали свой вариант прибора – ультразвукового спектроскопа, они – свой. Потом мы провели сравнительные испытания обоих приборов и лучшие решения применили в опытном образце.

Ультразвуковой спектральный метод основан на различной реакции отраженного сигнала при падении на дефект различной формы. Для плоскостного дефекта спектр носит периодический осциллирующий характер, а для объемного дефекта спектр – равномерный характер без осцилляций. Этот метод реализован в ультразвуковом спектроскопе, внедренном на ряде предприятий (рис. 1).

Конечно, в те годы элементная база не позволяла сделать прибор компактным. Прибор был достаточно громоздким и неудобным в цеховых условиях. В то же время я понимал, что деления дефектов на два класса – плоскостные и объемные – недостаточно, поскольку большинство дефектов находятся в промежутке между этими двумя полярными классами. Это с одной стороны, а с другой – специалисты по прочности моделируют при расчетах дефекты в виде эллипсов с соотношением полуосей эллипсов от 0,5 для сферы до 0,001 для трещины. Я его назвал коэффициентом формы Q . Такая шкала эллипсов перекрывает все возможные размеры дефектов. Понимая это, я заказал на Ижорском заводе серию образцов с моделями эллиптических дефектов, перекрывающих всю шкалу эллипсов. Перед началом исследований я предложил классификацию типов дифракции [1], состоящую из четырех типов: (рис. 2):

- дифракция на острых краях трещины; отраженное поле формируется как суперпозиция двух сигналов от кончиков трещины, причем фазы обоих сигналов отличаются на 180° ;

- дифракция на гладкой выпуклой поверхности; здесь формируется волна обегания-соскальзывания, но осцилляции отсутствуют;

- дифракция на границе раздела двух сред; этот тип дифракции характерен для излучения волны вблизи первого критического угла. В этом случае образуется головная волна, распространяющаяся вдоль поверхности и переизлучающая боковую волну. Головная волна широко используется для контроля подповерхностных дефектов. Она нечувствительна к неровности поверхности;

- дифракция в слоисто-неоднородных средах. Этот тип дифракции наблюдается в поверхностно-закаленных слоях валков холодной прокатки, в аустенитных сварных швах, в которых вследствие неравномерной кристаллизации по его сечению изменяется скорость распространения волн [1, 2].

Эти четыре типа дифракции описывают все возможные типы формирования отраженного луча от любого отражателя при контроле объемными волнами.

Возвращаюсь к образцам с эллиптическими дефектами. Я провел большой цикл измерений первых двух отраженных сигналов, соответствующих дифракции первого и второго типов.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуд двух первых сигналов волн, дифрагированных на

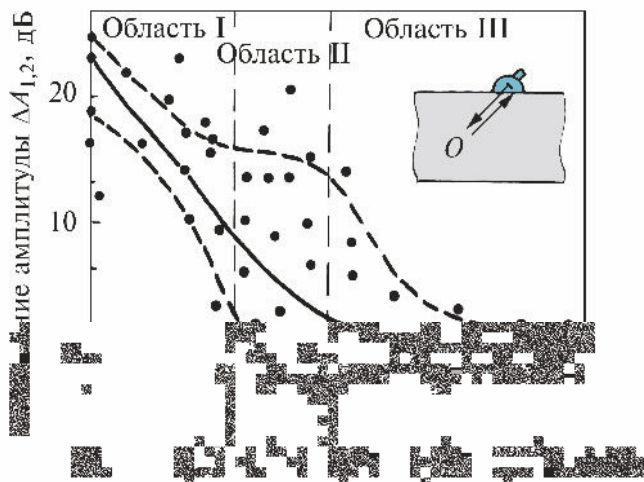


Рис. 3. Зависимость отношения первых двух сигналов волн, дифрагированных на эллиптических отражателях, от коэффициента формы Q

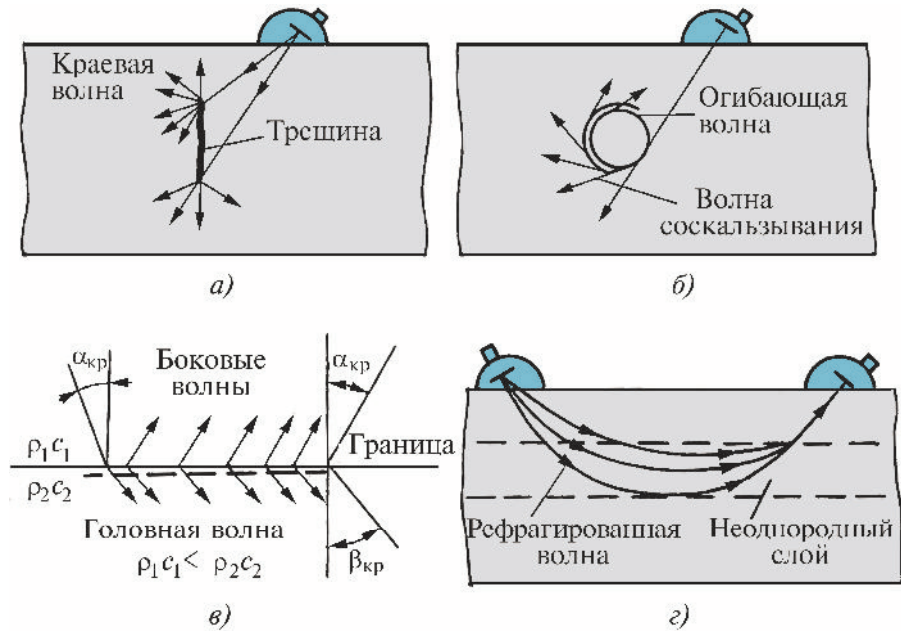


Рис. 2. Классификация типов дифракции:

a – дифракция на краях плоскостных отражателях; b – дифракция на объемных отражателях; c – дифракция на границе раздела двух сред; d – дифракция в слоисто-неоднородных средах

эллиптических дефектах от коэффициента формы Q . Из рис. 3 видно, что для Q , равного 0,50 – 0,23, соотношение амплитуд составляет 10 – 20 дБ (область I), а для Q , равного 0,1 и менее, соотношение амплитуд стремится к нулю (область III). Эти эксперименты позволили сформулировать трехуровневую классификацию типов дефектов по соотношению амплитуд дифрагированных сигналов (рис. 4).

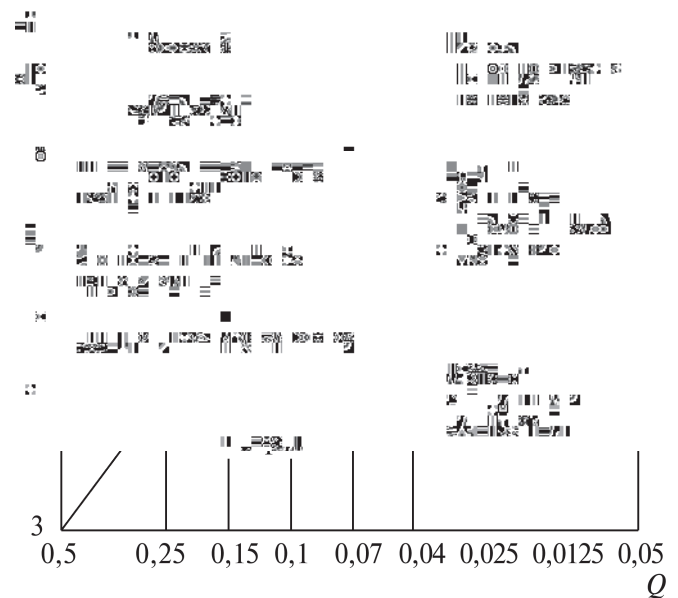


Рис. 4. Трехуровневая система классификации эллиптических отражателей, связывающая коэффициент концентрации напряжений K_σ и коэффициент формы отражателей Q

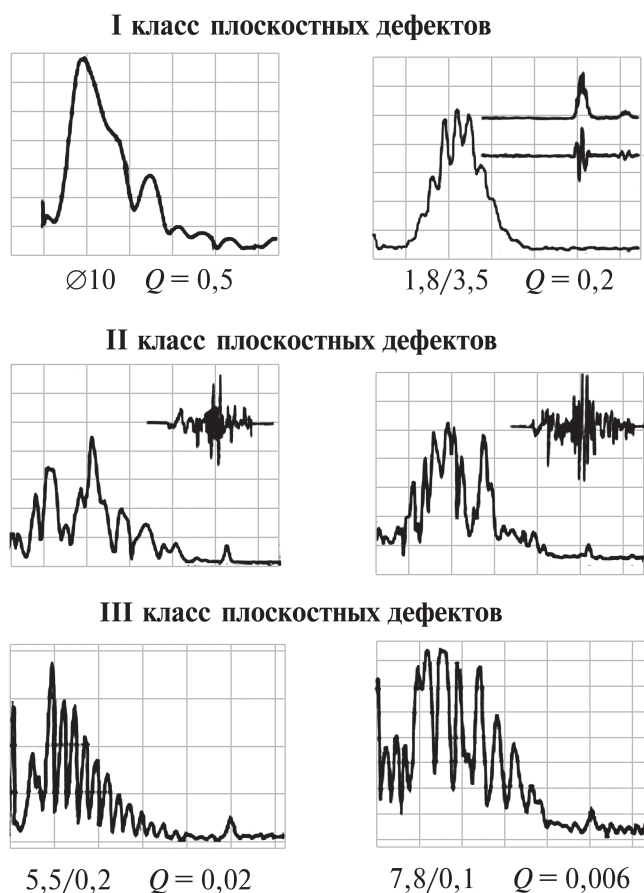


Рис. 5. Спектральные отклики отраженных сигналов от дефектов различных классов

Данная классификация оказалась применима и к спектральному методу распознавания типа дефектов. На рис. 5 показаны спектральные отклики отраженных сигналов от дефектов различных классов.

Для объемных дефектов огибающая спектра плавная, неосциллирующая, а для плоскостных дефектов огибающая представляет собой периодическую осциллирующую кривую. Причем период осцилляций напрямую связан с размером и углом наклона дефекта. Спектральная технология использовалась в спорных случаях для оценки необходимости ремонта сварного шва. Однако реализуется этот метод весьма непросто: надо иметь генератор качающейся частоты, широкополосный излучающий и приемный тракты, что всегда создавало проблемы.

Наибольшее практическое применение нашли первый и третий типы дифракции. Принцип формирования дифракционных волн по третьему типу показан на рис. 6. Волна, излученная в металл под первым критическим углом (для пары плексиглас-сталь этот угол составляет $27,5^\circ$), вдоль свободной поверхности металла распространяется как головная волна, которая является неоднородной, самостоятельно существовать не может и в каждой точке своего распространения переизлучает боковую поперечную волну. Эта волна, дойдя до нижней свободной поверхности, переизлучается во вторичную головную волну. Головная волна имеет ряд позитивных особенностей. В частности, она нечувствительна к неровностям поверхности и может быть применена для выявления подповерхностных дефектов. Именно это свойство головной волны использовал Н.П. Разыграев (НПО «ЦНИИТ-МАШ») и разработал ряд эффективных методик для контроля подповерхностных слоев, в том числе под валиком усиления.

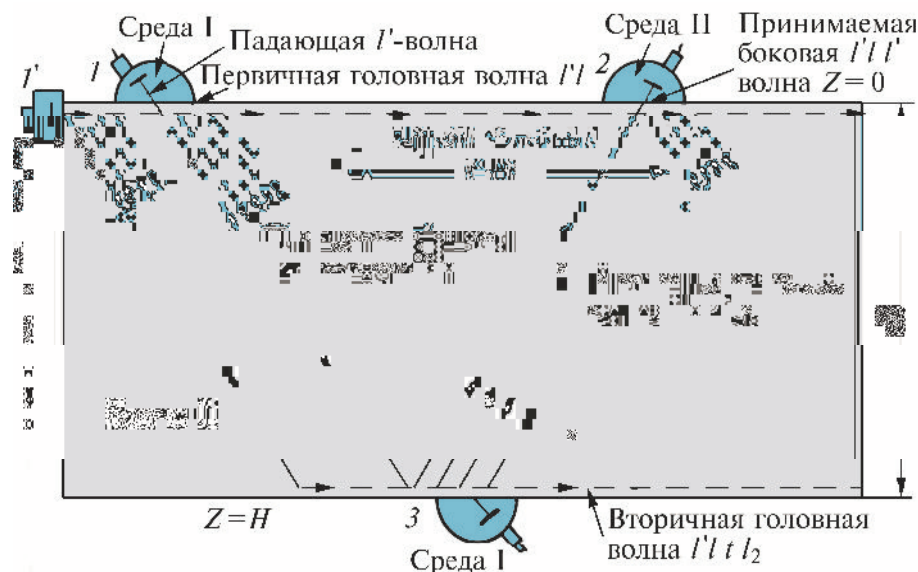


Рис. 6. Формирование головных и боковых дифракционных волн при излучении в металл под первым критическим углом

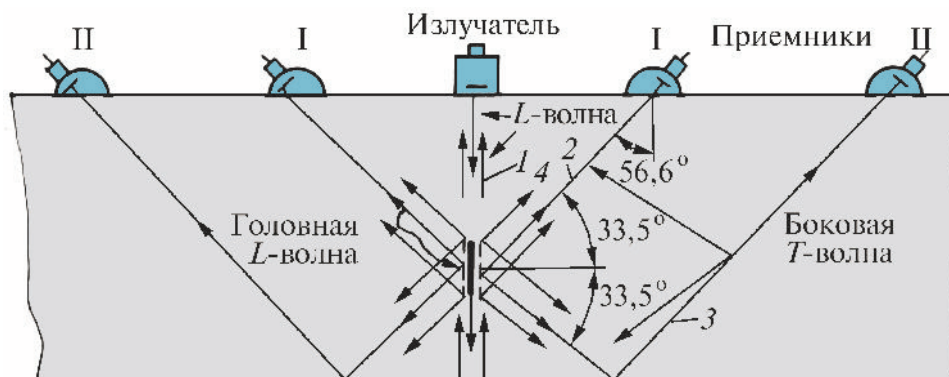


Рис. 7. Формирование головных и боковых волн на вертикальной трещине

Приведу еще один пример. На рис. 7 показана схема формирования дифрагированных волн на вертикальной трещине. Если излучить импульс прямым преобразователем вдоль трещины, то, с одной стороны, будет наблюдаться уменьшение донного сигнала пропорционально высоте трещины. С другой стороны, вдоль берегов трещины будет формироваться импульс боковой волны, принимаемой на поверхности под третьим критическим углом. Причем амплитуда сигнала соизмерима с амплитудой отраженного сигнала от плоскодонного отверстия, равного высоте трещины. Это так называемый дельта-метод, предложенный в 1970-х годах А. К. Гурвичем и М. В. Григорьевым. В моей докторской диссертации, защищенной в 1987 году в НПО «ЦНИИТМАШ», посвященной дифракционным методам в ультразвуковом контроле, я привел примерно 10 методов классификации дефектов для различных методов контроля.

Расскажу о последней моей работе в НПО «ЦНИИТМАШ». В 1985 году мы поставили на Челябинский металлургический комбинат установку для автоматизированного ультразвукового контроля цилиндрических поковок диаметром от 100 до 800 мм. С этой целью в кузнечно-прессовом цехе было построено помещение, площадью 110 м², в котором размещались две автоматизированные установки, одна для малых диаметров, другая для больших диаметров поковок. Акустические блоки реализовывали как раз дельта-методику, упомянутую выше. В этом помещении была построена отдельная комната, в которой была установлена самая современная на то время вычислительная машина СМ-1. Все сигналы от выявляемых дефектов поступали на эту ЭМВ, по специально разработанной программе обрабатывались и анализировались выявляемые дефекты, их эквивалентный размер и классифицировались по типу. Это была первая установка в СССР (а может быть, и в мире!), дававшая возможность в автоматическом режиме не только выявлять, но и классифицировать дефекты по типу.

Примечательна судьба этой установки. Она эксплуатировалась на полную мощность вплоть до 1991 года. Разработчики осуществляли постоянное эксплуатационное обслуживание. После распада СССР все очень быстро пришло в упадок и на заводе, и в НПО «ЦНИИТМАШ», и установку забросили. Но спустя несколько лет завод преодолел кризис и переориентировался на экспорт своей продукции. Импортёры потребовали проведения автоматизированного ультразвукового контроля с выдачей паспорта на каждую поковку. Вот тут-то и началась вторая жизнь нашей системы. Но это уже было без меня, поскольку я уволился в 1990 году и создал свою компанию НПЦ «ЭХО+».

На протяжении всех 22 лет работы в НПО ЦНИИТМАШ во время работы над темой ультразвуковой дефектометрии меня не оставляла мысль о том, что все многочисленные методы, которые я разрабатывал, все-таки не в полной мере решали поставленную задачу. Слишком высока погрешность измерения параметров дефектов и слишком много неопределенных факторов, влияющих на результаты, иногда сводящих на нет результаты измерений. Но других подходов в решении поставленной задачи мы в то время не знали.

Часть 2. Ультразвуковая дефектометрия на основе когерентных голографических изображений дефектов

При создании в НПО «ЦНИИТМАШ» методов распознавания типа дефектов на основе спектральных и дифракционных сигналов меня все время преследовала одна и та же мысль: все эти методики дают очень грубую, с большой погрешностью оценку типа и размеров реальных дефектов и далеко не всегда реализуемые. Собственно, эти методики еще нельзя было назвать дефектометрическими, а лишь оценочными. Но на тот момент времени ничего другого придумать было нельзя. Тем не менее поиски более объективных и точных методов продолжались. На продолжение поисков нас подтолкну-

нула проблема со сварными швами роторов турбин, выпускаемых Харьковским турбинным заводом. Конструкция шва была такова, что неизбежно в корне шва образовывались трещины. Причем обычными методиками они либо не выявлялись, либо выявлялись, но определить, что это трещина, а не пора или непровар, возможности не было. При этом было два случая разрушения роторов в процессе их эксплуатации, едва не приведших к катастрофе.

Однажды в 1988 году меня и И. Н. Ермолова пригласили в Акустический институт АН СССР ознакомиться с исследованиями, проводимыми группой ученых, возглавляемых В. Г. Бадаляном, по разработке акустических голографических методов визуализации дефектов. Это был принципиально новый подход к оценке параметров дефектов. Оказывается, можно увидеть изображение дефекта на экране монитора. И хотя установка, которую они собрали, представляла собой стойку высотой 2 м, а расчеты проводились на стационарной ЭВМ БЭСМ-6, исследования показали многообещающими.

В это время в стране начали происходить тектонические сдвиги. Клич «Перестройка. Ускорение. Гласность», провозглашенный М. С. Горбачевым, народ принял с большим энтузиазмом. Вся страна пришла в движение. Как грибы после дождя начали создаваться кооперативы, малые предприятия, коммерческие структуры. Именно в это время я при участии академика РАН Н. П. Алешина создал компанию под названием ООО «Научно-производственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+» (ООО «НПЦ «ЭХО+»).

На мое счастье, как раз группа, возглавляемая В. Г. Бадаляном, согласилась перейти во вновь организованную компанию. В нее вошли восемь молодых, энергичных, талантливых ребят, и работа закипела. Компания ведет свой отсчет со 2 апреля 1990 года. Этот день стал первым рабочим днем первого сотрудника, т.е. меня. У нас на первых порах не было ничего, кроме голого энтузиазма, граничащего с самопожертвованием. Подробно вехи становления и развития нашей компании я описал в изданной мной книге «Без истории нет будущего», которую можно скачать с сайта компании: <http://www.echoplus.ru/prochee.html>.

Когерентные методы с обработкой во временной области общепринято называть SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique). В наших ранних работах мы показали, что в рамках дифракционной теории алгоритм SAFT можно реализовать как во временной области, так и в области пространственных частот. Рассмотрим подробнее эти методы. Оба алгоритма

дают близкие результаты, но временной алгоритм требует значительно больших машинных ресурсов. В начале 1990-х годов персональная компьютерная техника была еще очень примитивная и не позволяла реализовать временной алгоритм, поэтому выбор пал на частотный алгоритм. Этот алгоритм называется «проекция в спектральном пространстве» (ПСП), метод назван акустической голографией.

Упрощенно технология акустической голографии состоит в следующем. В изделие излучают короткие ультразвуковые импульсы с широкой диаграммой направленности ($30 - 60^\circ$), сканируют ПЭПом с малым шагом ($0,1 - 0,5$ мм) по поверхности изделия строго по прямым линиям, в каждой точке сканирования принимают отраженные от дефекта сигналы и оцифровывают их. Обработывают полученную последовательность сигналов с помощью алгоритма ПСП, визуализируют полученные сигналы в виде проекции изображения на три плоскости (В, С и D).

Физически это означает, что путем измерения фазовых сдвигов между излученным и принятым сигналами во всем пространстве контролируемого изделия на приеме формируется узкий, слабо расходящийся пучок шириной порядка 1 мм. Тем самым удается визуализировать отдельные сечения, сложив которые, можно получить изображение дефекта. При этом разрешающая способность может повышаться в десятки раз. В качестве подтверждения высокой разрешающей способности на рис. 10 и 11 представлены результаты измерения длины дефектов (a) и их высоты (b) в отдельных сечениях. Приведенный массив данных из 120 измерений имеет среднеквадратичную ошибку измерения высоты дефектов составляет $\pm 1,5$ мм, длины – 5 мм.

Шесть лет у нас ушло на создание первого в России, да, пожалуй, и в мире промышленного образца ультразвуковой голографической системы, названной «АВГУР 4.2». Название пришло из древнегреческой мифологии, согласно которой жрецы (авгуры) по полету птиц определяли будущее.

Наша деятельность на АЭС началась в 1996 году. Я на удачу позвонил на Смоленскую атомную станцию. К моему удивлению, трубку снял сам тогдашний директор Евгений Михайлович Сафрыгин. Я представился, рассказал о наших разработках. Уже на следующий день мы в его кабинете демонстрировали «АВГУР 4.2» прямо на его столе. Директора так впечатлили результаты, что он тут же вызвал начальника лаборатории металлов и приказал ему заключить договор на эксплуатационный контроль проблемных сварных соединений главных циркуля-

ционных трубопроводов. Е. М. Сафрыгин посетовал, что такой технологии не было 10 лет назад, когда пускался третий энергоблок. Тогда из-за невозможности измерять дефекты пришлось провести огромное количество ненужных ремонтов, как того требовали устаревшие нормативные документы. Это как раз тот случай, который я прокомментировал в начале статьи. Эти ремонтные заварки создали большие проблемы для станции на многие десятилетия. В них в процессе эксплуатации вновь стали развиваться трещины. Мы не раз обращались в разные годы к решению

этой проблемы, разрабатывали методики, проводили эксплуатационный контроль.

К моменту начала практических работ по эксплуатационному контролю на АЭС НППЦ «ЭХО+» впервые предложил новый подход в ультразвуковой диагностике, заключающийся в применении трехуровневой технологии (рис. 8). На первом этапе осуществляется поиск дефектов по действующим нормам. На втором этапе происходит измерение реальных размеров и типа дефектов с применением алгоритмов акустической

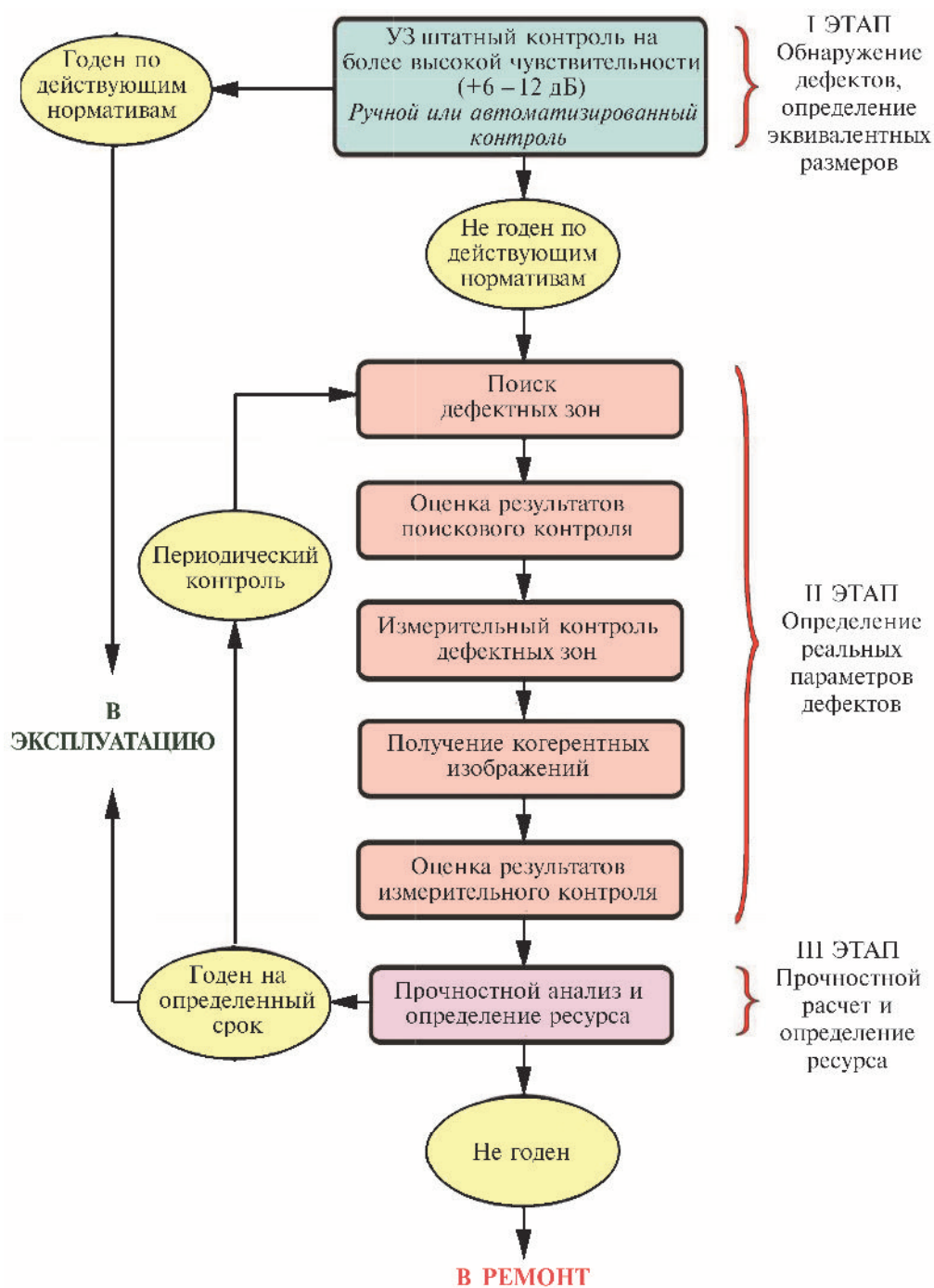


Рис. 8. Комплексная технология УЗ-контроля сварных соединений с использованием систем серии «АВГУР»

голографии. На третьем этапе эта информация используется для оценки работоспособности объекта с учетом параметров дефектов. Именно этот подход реализован в автоматизированных системах «АВГУР».

Данная технология ультразвукового диагностирования позволила:

- значительно повысить надежность выявления дефектов различного типа за счет более высокой чувствительности контроля;
- минимизировать как «недобраковку», так и «перебраковку» благодаря регистрации всей информации о контроле и возможности детального анализа ее оператором в особо сложных и важных случаях;
- составить базу данных о наличии в сварных швах различного рода допустимых несплошностей (провести паспортизацию швов);
- осуществлять эксплуатацию оборудования с «непроходными» (по действующим нормам) дефектами благодаря возможности оценки ресурса работы сварной конструкции по установленным размерам несплошностей и параметрам напряженного состояния;
- проводить мониторинг за развитием дефектов в процессе эксплуатации объектов.

Прочностной анализ на основании экспертного заключения и принятие решения о допустимости эксплуатации осуществляют специализированные



Рис. 9. Система «АВГУР 4.2» образца 2000 года

организации (НИКИЭТ, ОКБ ГИДРОПРЕСС, РНЦ «Курчатовский институт», ВНИИАЭС).

Разумеется, в основе предложенной и реализованной технологии лежит возможность измерения размеров дефектов и определения их типа. В этом главное преимущество систем «АВГУР» (рис. 9). Если ранее во всех руководящих документах красной линией проходило требование о недопустимости трещин любого размера, то сегодня концепция эксплуатационного контроля строится на том, что с трещинами объекты могут эксплуатироваться при условии, что известна скорость роста трещины, организован периодический мониторинг АУЗК в измерительном режиме.

Таким образом, эта технология обеспечивает эффективное использование результатов НК в прочностных расчетах по оценке надежности и ресурса контролируемых изделий и постоянное наблюдение за состоянием объекта.

Уже в первые годы применения голографического контроля удалось снизить более чем в 2 раза объем ремонта, благодаря тому, что появилась возможность разделять выявляемые дефекты на опасные и неопасные, которые не влияют на работу объекта. А неопасных дефектов было большинство. Как правило, они образовывались еще на стадии изготовления оборудования и в течение всего срока эксплуатации не развивались.

Приведу один показательный пример эффективности применения голографической технологии контроля. На реакторах РБМК (реакторы большой мощности, каналные) имеется много сварных соединений диаметром 325 мм (примерно 1700 штук на каждом блоке). Причем все швы аустенитные, а их ультразвуковой контроль отсутствовал из-за крупнозернистой структуры. В то же время при эксплуатации энергоблока в этих швах с внутренней поверхности достаточно часто образуются и растут трещины. Возникла реальная опасность отрыва трубопровода с катастрофическими последствиями.

В 1996 году на одном из блоков стали наблюдаться случаи выхода из строя этих швов по трещинам. Из-за отсутствия контроля и картины дефектности швов пришлось ремонтировать почти все швы, блок простоял в ремонте целый год. Поэтому, когда мы предложили нашу технологию выявления трещин и измерения их размеров, она сразу вызвала большой интерес, и с 1997 года начался масштабный контроль этих швов на всех станциях.

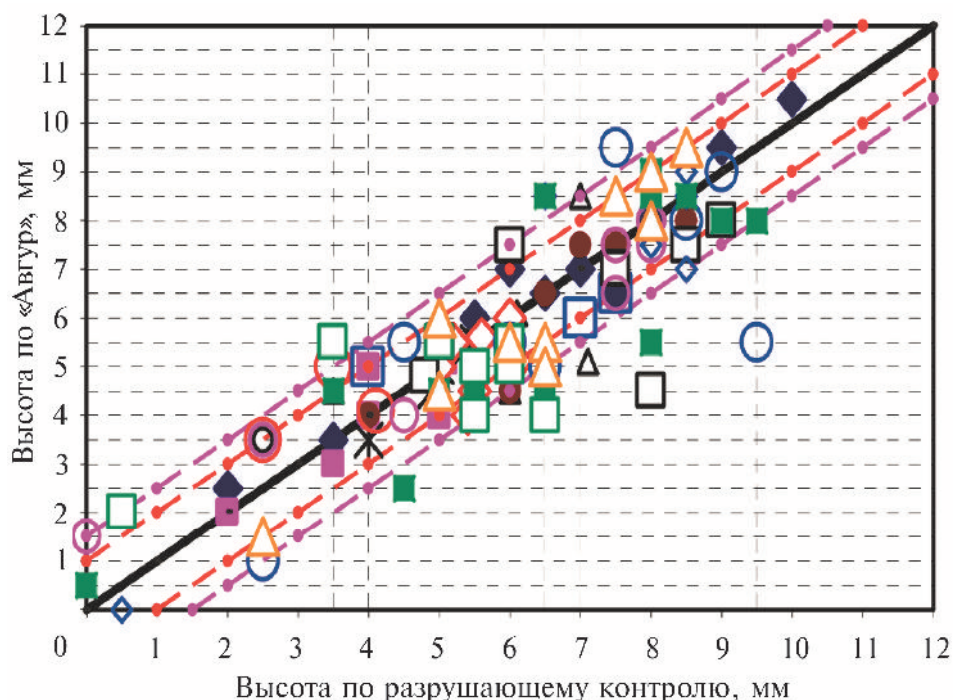


Рис. 10. Высота дефектов в отдельных сечениях, полученная с помощью системы «Авгур» и при разрушающем контроле (металлография, трехточечный изгиб):

значки – результаты измерений в отдельных сечениях; черная линия – погрешности, равные нулю; красные пунктирные линии – погрешности, равные ± 1 мм; лиловые пунктирные линии – погрешности, равные $\pm 1,5$ мм

Для оценки погрешности измерения параметров трещин при голографическом контроле был проведен большой цикл работ по сопоставлению результатов контроля с металлографическими исследованиями. На рис. 10 приведены данные по сопоставлению высоты дефектов, измеренных системой «АВГУР» и обнаруженных разрушающим контролем. Из него следует, что погрешность определения высоты дефектов не превышает ± 1 мм, что

вполне устраивает эксплуатационщиков для правильного принятия решения о дальнейшей эксплуатации трубопровода. Существенно хуже погрешность при измерении длины дефекта (рис. 11), поскольку в этом направлении не предусматривается голографическое восстановление. На рис. 12 приведены в качестве примера изображения В- и С-типа трещины в сварном шве Ду300 и микрошлиф, соответствующий этой трещине.

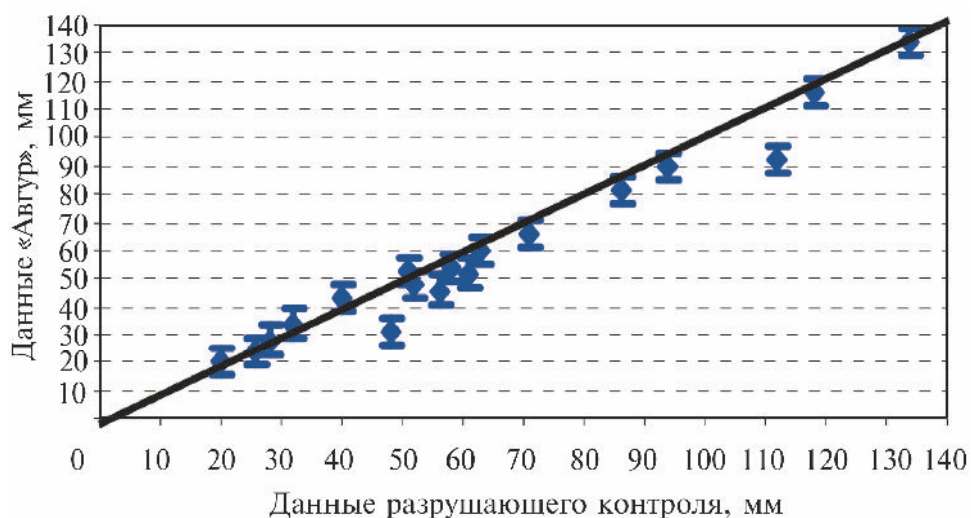


Рис. 11. Результаты сопоставления длины дефектов по данным «АВГУР» с разрушающим контролем (металлография, трехточечный изгиб). Погрешность составила ± 4 мм

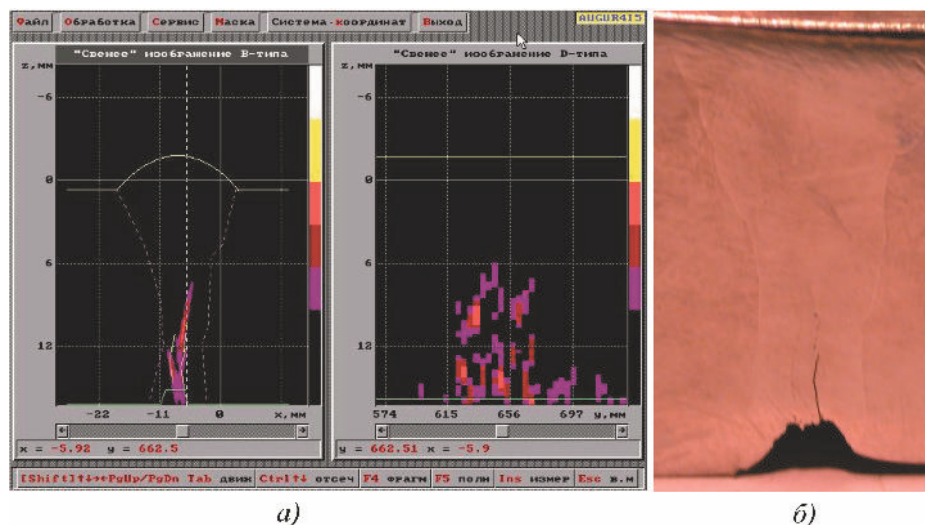


Рис. 12. Сопоставление изображений реального сварного соединения трубопровода Ду300, полученных с использованием системы серии «АВГУР», и металлографии:

a – изображения В- и D-типа, полученные в измерительном режиме АУЗК; *б* – фотография микрошлифа сварного шва в области дефекта

Базируясь на наших многолетних данных контроля и периодического мониторинга, специалисты по прочности создали эксплуатационные нормы оценки дефектов, в которых впервые допускались сварные швы с трещинами (рис. 13). Зная скорость их роста, в каждый ремонтный период можно заранее планировать ремонт небольшого количества швов, в которых трещины достигли критического значения. Что и было сделано.

Экономический эффект от внедрения новых технологий в атомной энергетике не принято подсчитывать, но можно с уверенностью сказать, что он составляет многие сотни миллионов рублей. Сегодня все сварные соединения такого типа постоянно проверяют нашими системами «АВГУР». На сленге станций это называется «проавгурить». На сегодня все сварные соединения «проавгурены» по четыре-пять раз (более 100 тыс. соединений).

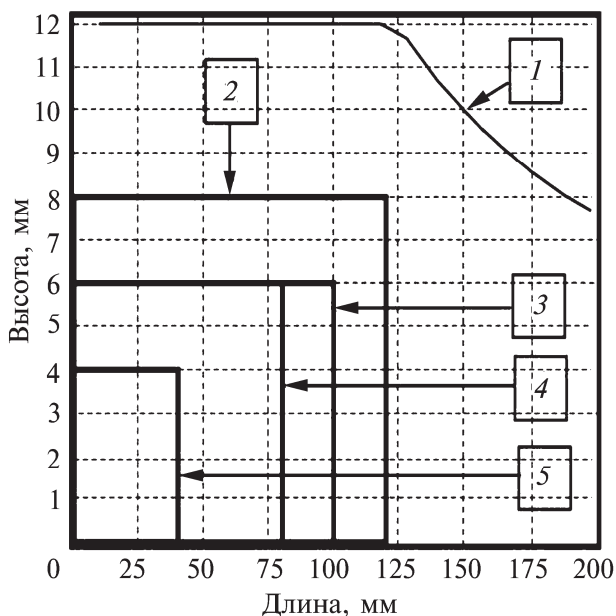


Рис. 13. Диаграмма допускаемых размеров дефектов: *1* – диаграмма предельных допускаемых дефектов; *2* – область, безопасная для эксплуатации на конец срока оценки; *3* – область, безопасная для эксплуатации на 1 год; *4* – область, безопасная для эксплуатации на 2 года; *5* – область, безопасная для эксплуатации 4 года

На рис. 13 приведены безопасные области эксплуатации сварных соединений (кривые *1* – *3*), которые определяются длиной и высотой трещин. Кривые соответствуют длительности межконтрольного срока эксплуатации с учетом подрастания трещины за этот период времени в длину и глубину.

Новое поколение систем «АВГУР»

В 2003 году прошли приемочные испытания системы «АВГУР 5.2», которая сменила «АВГУР 4.2» и на десятилетие определила наши внедренческие работы. С началом использования системы «АВГУР 5.2» мы вошли в тематику контроля сварных соединений реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Здесь оказалось непаханое поле задач и проблем. Для многих швов не существовало вообще никакого контроля. Лишь для некоторых швов действовали ручные методики. Швы эти оказались непростые, как правило, аустенитные, большой толщины, многие из них разнородные, с ограниченными поверхностями ввода ультразвука, к тому же криволинейные. До нашего участия в этих работах такие швы считались неконтролепригодными.

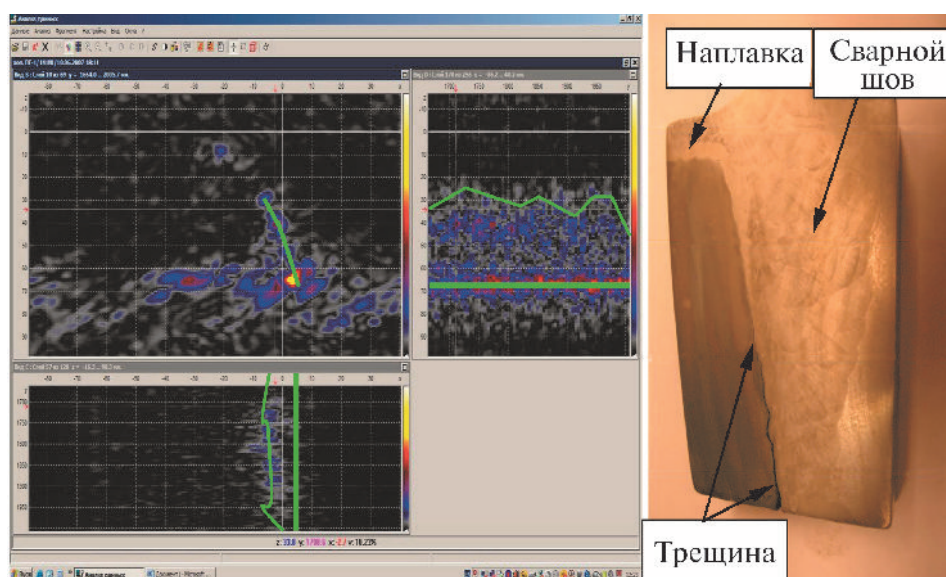


Рис. 14. Когерентное изображение В-, С- и D-типа плоскостного дефекта в разнородном сварном соединении Ду1100 реактора ВВЭР-440, полученное по данным измерительного контроля с использованием продольных волн:

пунктирные линии отмечают трещину; справа – микрошлиф сварного соединения

Первый же контроль разнородных соединений на реакторе ВВЭР-440, отработавшем тридцать лет, показал наличие огромной трещины высотой в две трети толщины шва и длиной в половину периметра (рис. 14). Была очевидной опасность катастрофического отрыва трубопровода диаметром 1100 мм. Станционные работники не хотели верить, что такое возможно, долго не решались на ремонт, но позже вскрыли шов, провели металлографические исследования, и все подтвердилось. Доверие станций к нашим разработкам контроля возросло многократно. Вообще, с недоверием к результатам разработок и контроля мы сталкивались очень часто, особенно вначале, и каждый раз приходилось доказывать достоверность наших данных путем вскрытия и металлографии.

В 2003 – 2013 годах мы разработали около двадцати методик, охватывающих основные сварные соединения реакторов ВВЭР. Почему так много? Дело в том, что в атомной отрасли существует непреложное правило: не допускают контроля новым оборудованием, если нет аттестованной методики применительно именно к данному шву, а оборудование не прошло сертификацию в Госстандарте. Недопустимо использование универсальных методик, слишком большое значение придается качеству контроля каждого шва. Причем при каждой аттестации новой методики требуется проводить испытания на образцах с искусственными и реалистичными дефектами. Изготовление образцов – также забота и головная боль разработчика. В развитых странах существуют специализированные независимые валидационные центры, оснащенные

парками образцов на все случаи жизни. Им передаются методики и оборудование, и они проводят экспертизу и выдают сертификат о возможности применения. К сожалению, у нас ничего подобного нет, разработчик сам и швец, и жнец, и на дуде игрец.

Постепенно новая технология начала проникать и в другие отрасли. Так, например, на нефтебазе Шисхарис (дочернее предприятие ПАО «Транснефть» в Новороссийске) в сварном шве диаметром 1200 мм экспортного трубопровода была обнаружена трещина высотой в одну треть сечения (рис. 15). Никакими другими методами она не выявлялась. Преодолев первоначальное недоверие местных специалистов, мы все же получили добро от руководства головной компании на вскрытие и ремонт этого участка трубопровода. Металлогра-



Рис. 15. Контроль системой «АВГУР» на нефтебазе Шисхарис, 2002 год

фия вырезанного темплета показала хорошее совпадение. Через непродолжительное время эта трещина могла бы привести к катастрофе. После этого случая было принято решение проверить все сварные соединения.

Похожая ситуация сложилась в одной дочерней компании ПАО «Газпром». На нескольких компрессорных станциях (КС) при плановом контроле было забраковано порядка 400 сварных соединений. Ремонт их потребовал бы выключения на длительный период нескольких КС из сети экспортных поставок газа. Применение нами в 2003 – 2004 годах АУЗК системами «АВГУР» с последующими прочностными расчетами показал, что ремонт потребовался всего 20 соединениям. Во всех остальных наблюдались отражатели, либо не являющиеся дефектами, либо это были дефекты, тип и размеры которых не представляли угрозы для работоспособности конструкции.

Одна из полезных разработок, часто используемых в ПАО «Газпром», – это система «АВГУР-Т», предназначенная для контроля тройников сварных с накладками (рис. 16). В ней впервые применена трехмерная голография, позволившая сфокусировать луч на расстоянии до 1 м, что обеспечило обнаружение и измерение дефектов в тройниках под накладками. Задача контроля тройников весьма актуальна, поскольку именно поднакладочный шов является слабым узлом и к тому же ранее был неконтролепригоден. А таких тройников в эксплуатации более 40 тысяч. Система «АВГУР-Т» включена в программу оснащения всех дочерних предприятий ПАО «Газпром».

На вопрос, для чего применяется ультразвуковая автоматизированная голография, можно ответить следующее.



Рис. 16. Автоматизированный голографический контроль сварных соединений тройников с накладками

Применение ультразвуковой автоматизированной голографии позволило решить давнюю проблему УЗК – измерять реальные дефекты, осуществить переход от дефектоскопии к дефектометрии, которая открыла много новых возможностей и приложений.

С помощью предложенной новой технологии диагностики объектов повышенной опасности, заключающейся в трехуровневом контроле с измерением реальных размеров дефектов, можно проводить оценку состояния эксплуатируемых объектов по их фактическому состоянию и выйти на управление остаточным ресурсом.

Получив возможность измерять реальные размеры дефектов, специалисты по прочности начали работы по созданию эксплуатационных норм на диагностику объектов. Наш опыт показывает, что ультразвуковая дефектометрия и наличие эксплуатационных норм сокращают объем ремонтных работ не менее чем в 10 раз [3, 4]. В то же время повышается эксплуатационная надежность объектов, поскольку к эксплуатации не допускаются изделия с трещинами, превысившими критические размеры.

Часть 3. Ультразвуковая дефектометрия с применением фазированных антенных решеток

Двухтысячные годы в мире неразрушающего контроля ознаменовались быстрым развитием направления, связанного с применением фазированных антенных решеток (ФАР). Многие уважаемые компании предложили рынку приборы на основе ФАР-технологии. Мне показался перспективным этот вектор развития средств контроля. Наши ведущие специалисты поначалу не поддержали покупку прибора, говорили, что у нас есть система «АВГУР» – более мощное средство, чем ФАР. Тем не менее я настоял на приобретении в 2007 году прибора X-32 компании Harfang. Это стало поворотной вехой в развитии «ЭХО+».

Детальное изучение прибора и в целом технологии ФАР показало, что перед системой «АВГУР 5.2» у нее есть как минимум два преимущества. Первое: за счет качания луча по глубине отпадает необходимость сканирования по одной координате, тем самым повышается производительность контроля. И второе: мгновенная обработка, результаты выводятся сразу на экран, что также повышает производительность. Зато обнаружилось множество недостатков и проблем. Это и ограничения в применении для толщин свыше 50 мм, и фокусировка изображения только по одной линии, и наличие ложных изображений, усложняющих расшифровку, и проблемы встраивания приборов в автоматические системы контроля. Нельзя забывать, что в России на то время

ни в одной отрасли не было разработано ни одной методики, регламентирующей применение приборов. К тому же их стоимость зашкаливала за 100 тыс. дол. Это обстоятельство существенно тормозило применение в общем-то прогрессивной технологии ФАР, хотя на все АЭС централизованно было поставлено по два прибора Omniscan.

После детального изучения на практике технологии и приборов ФАР у наших ученых появилось множество идей, как улучшить технологию и создать более совершенное оборудование для автоматизированного УЗК. Был предложен и разработан новый алгоритм под названием C-SAFT, который в дальнейшем трансформировался в 3D-C-SAFT. Строго говоря, к этому времени уже появились работы российских ученых А. А. Самокрутова и В. Г. Шевалдыкина (компания «Акустические контрольные системы»), и даже выпускается прибор А1550 «Интравизор». Но мы пошли дальше и впервые разработали автоматизированную систему «АВГУР-АРТ». Именно в автоматизированном режиме в полной мере проявляются все преимущества технологии, которая, кстати, названа «Цифровая фокусирующая антенна» (ЦФА) [5].

Не вдаваясь в физику и тонкости, выделим преимущества ЦФА. Во-первых, создается такое акустическое поле в изделии, в котором формируется слабо расходящийся узкий луч шириной менее 1 мм, что обеспечивает высокую разрешающую способность – такую же, как при голографии. При этом чем больше толщина изделия, тем более значимо это преимущество. Благодаря формированию узкого пучка лучей чувствительность контроля повысилась примерно в 2 раза, появилась возможность контролировать изделия большой толщины (300 мм и более) с измерением размеров дефектов от 1 мм.

Во-вторых, для всех когерентных методов визуализации характерно наряду с основным изображением наличие ложных изображений (фантомов), связанных с другими модами волн, неизбежно возникающих на дефекте. Фантомы затрудняют анализ результатов и препятствуют автоматизации анализа. В свое время мы прилагали немалые усилия для решения этой проблемы, приглашали ученых – специалистов по распознаванию изображений, но результата достичь не удалось именно из-за многообразия фантомов. Так вот, технология ЦФА позволяет эти самые фантомы обратить во благо: проанализировать отдельно изображения на разных акустических схемах и объединить их. Тогда все изображения дефектов, полученные любым ходом лучей, превратятся в одно единственное изображение без фантомов. А далее уже можно автоматизировать и анализ, и получение протокола контроля.

В-третьих, при формировании правильного изображения большую роль играет профиль внутренней поверхности справа и слева от сварного шва, который далеко не всегда совпадает с чертежом и заранее неизвестен. Это незнание приводит к размыванию изображения и увеличению погрешности измерения размеров дефектов. Технология ЦФА позволяет при размещении антенных решеток с двух сторон шва восстановить профиль внутренней поверхности и с его учетом получить новое изображение, в котором ошибка будет сведена к нулю. Кстати, эта возможность легла в основу предложенной нами технологии измерения толщины и профиля внутренней поверхности по всему периметру сварного соединения, что дает дополнительную информацию о его качестве.

Есть еще ряд менее значимых преимуществ технологии ЦФА (более высокое отношение сигнал/шум при контроле аустенитных сварных швов, безэталонное и одновременное измерение толщины и скорости продольных и поперечных волн). Все эти преимущества как раз и удалось реализовать в новой системе «АВГУР-АРТ».

В 2010 году сложилась благоприятная ситуация по форсированному развитию приборов и технологий с использованием ФР применительно к контролю сварных соединений на АЭС. С одной стороны, в концерне «Росэнергоатом» и на АЭС понимали, что применение дефектоскопов ФР перспективно, и даже закупили по два прибора на все АЭС. Но отсутствие разрешенных методик не позволяло их применять. С другой стороны, мы накопили достаточно большой опыт использования дефектоскопов ФР. Факультативно мы несколько лет применяли их при контроле. Я вышел в концерн РЭА с предложением создать комплексную программу развития этого направления. Программа была создана, утверждена на уровне руководства концерна и финансировалась четыре года. Благодаря ей нам удалось разработать ту самую базовую систему «АВГУР-АРТ», которая на несколько лет стала основным нашим продуктом; благодаря этой программе были созданы и разрешены к применению пятнадцать методик, идет поставка этих систем на все АЭС, практически на все наиболее ответственные сварные соединения реакторных установок типа ВВЭР. Наш отдел неразрушающего контроля также был оснащен системами «АВГУР-АРТ» и успешно применяет их в эксплуатационном контроле на АЭС. Кроме того, разработано 18 методик контроля объектов АЭС, охватывающих практически все сварные соединения первого и второго контуров. Все эти методики предполагают использование как

в режиме классической ФР, так и в режиме ЦФА. Главной особенностью их как раз и является возможность измерения размеров дефектов.

Мы выполнили две разработки для предприятий, производящих изделия большой толщины, в частности для ОАО «Ижорские заводы», выпускающего сосуда химических реакторов диаметром до 5,5 м, длиной до 40 м и толщиной 300 мм и более.

Одна из последних наших поставок состоялась на Ленинградский металлический завод (ЛМЗ), готовящийся выпускать сварные роторы турбин новой конструкции с большой толщиной сварных швов – до 200 мм. С этой целью мы переработали систему «АВГУР-АРТ» таким образом, чтобы она поддерживала контроль одновременно четырьмя антенными решетками, две из которых предназначены для контроля продольных, а две другие – поперечных дефектов.

Расскажу о нашем вкладе в развитие технологии TOFD. За рубежом нашел широкое применение для контроля сварных швов так называемый TOFD (Time of Flight Diffraction – дифракционно-временной, или в буквальном переводе с английского «время-пролетный» метод) – разновидность ультразвукового метода контроля. В России TOFD совершенно не представлен, нет ни методик, ни аппаратуры. Мы взяли на себя восполнить этот пробел, разработали и поставили систему на базе «АВГУР-Т», реализующую технологию применительно к большим толщинам – 300 мм и более. Преимущество технологии TOFD состоит в высокой производительности контроля (отсутствие одной координаты сканирования), а также в возможности измерения высоты дефектов с достаточно высокой точностью. Но имеется и серьезный недостаток: трудно расшифровывать результаты, требуются высококвалифицированные специалисты. Еще один недостаток заключается в том, что невозможно определить координаты обнаруживаемых дефектов в сварных швах относительно оси сварного шва. Нельзя определить, где нахо-

дится дефект: слева, в середине или справа. Решение этой задачи нами запатентовано. Эта технология требует высококачественного широкополосного электроакустического тракта. Такая аппаратура была создана в варианте отдельного блока, с возможностью подключения до четырех пар ПЭП для контроля изделий большой толщины. Несколько поставок осуществлено на заводы, выпускающие нефтехимические сосуды большой толщины (до 300 мм).

Шло время, мы продолжали заниматься новыми разработками. И вот наконец в 2017 году у нас появилась совершенно новая система «АВГУР-ТФ» (рис. 17). Она представляет собой сдвоенный блок, в котором реализованы одновременно три самые современные технологии контроля, а именно: технология фазированных антенных решеток размером 64×64 независимых канала с возможностью подключения четырех антенных решеток. Вторая технология базируется на алгоритме цифровой фокусировки антенны, в которой последовательно один излучает, а остальные принимают с одновременным сложением всех А-сканов с учетом фазы. Третья технология использует «время-пролетный метод» (TOFD-метод). Все три технологии удачно дополняют друг друга, и в результате мы получаем полную информацию о качестве сварного шва. Наша разработка оказалась единственной на российском рынке подобного класса системой, потеснившей импортные очень дорогие системы, такие, как «Ротоскан».

Система «АВГУР-ТФ» стала первой отечественной системой для автоматизированного контроля, в которой реализовано сразу несколько методов контроля: ФР в режимах секторного/линейного контроля с фокусировкой на постоянную глубину по вертикальной прямой, по сектору окружности, по отрезку произвольной прямой, зональная фокусировка, ЦФА, ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ, Multi-ЦФА, TOFD и АВИК (автоматизированный визуально-измерительный контроль).

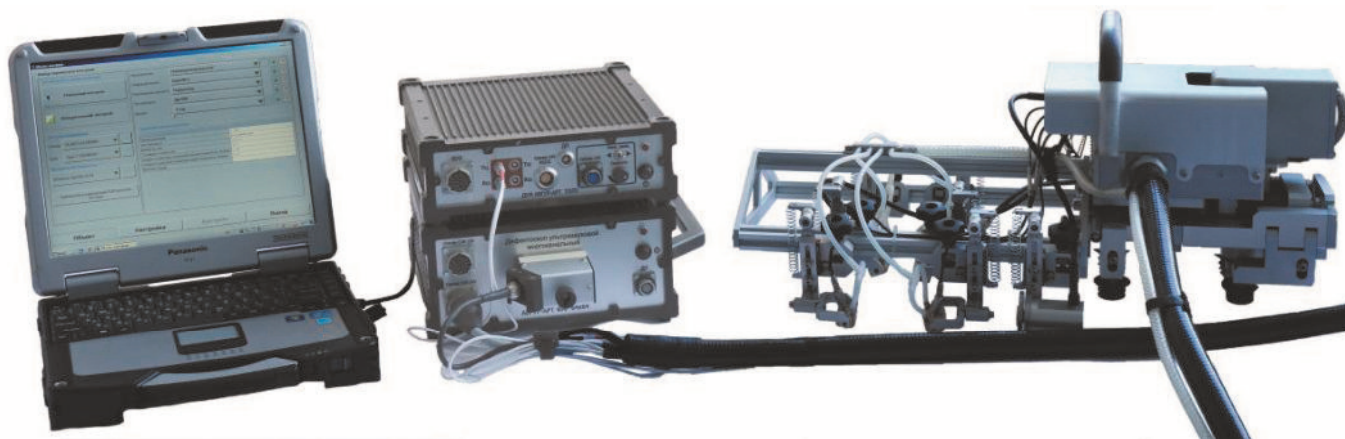


Рис. 17. Система «АВГУР-ТФ»

Испытания системы «АВГУР-ТФ» и опыт ее применения для АУЗК сварных соединений показали ее высокую эффективность по обнаружению и определению параметров дефектов, что достигается применением комбинации таких методов, как ФР, ЦФА, TOFD. Функциональные возможности системы, включая ее программное обеспечение, позволяют эффективно, в сжатые сроки решать задачи разработки методик контроля сварных соединений со сложной геометрией и проводить сам контроль.

Радиография или ультразвук: что лучше

Не могу не отметить еще одно достижение компании, которое базируется на высокой разрешающей способности наших систем. Дело вот в чем. Из-за плохой разрешающей способности традиционного УЗК на ответственные узлы, как правило, конструкторы назначают помимо УЗК еще и радиографический контроль (РГ) либо только его. С помощью РГ можно очень точно измерить реальные размеры дефектов. В то же время разрешающая способность систем «АВГУР» уже приближается к параметрам РГ, особенно для толщин более 20 мм, а для толщин более 80 мм превосходит его. Учитывая другие преимущества такого контроля (выявление трещин, высокая чувствительность, производительность, безопасность, экономичность, контроль объектов с высоким радиационным фоном), АУЗК становится прямым конкурентом РГК.

При аттестации методик полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие важные выводы:

- радиографический контроль обеспечивает меньшую чувствительность, чем АУЗК с дефектометрией;
- подтверждено наличие всех выявленных методом АУЗК несплошностей (не зафиксирована перебраковка);
- выявляются несплошности эквивалентной площадью менее 1 мм²;
- погрешность определения высоты методом АУЗК не превысила ± 2 мм.

Нами аттестовано пять методик, заменяющих РГ на АУЗК для сварных швов диаметром от 159 до 720 мм, которые успешно применяются на всех АЭС.

У нас уже имеется опыт замены РГ на АУЗК в других отраслях. Приведу пример. К нам обратилась компания «Волгонефтехиммонтаж», возводившая в Кстово Нижегородской области завод «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез». На объекте монтировалось большое количество трубопроводов диаметром 400 – 700 мм со сварными швами аусте-

нитного класса, которые ранее принципиально не контролировались УЗК, поэтому предписан был контроль РГ источником ионизирующего излучения. На контроль каждого сварного шва уходит четыре с половиной часа, при этом требуется эвакуация персонала из зоны контроля. Мы разработали методику, провели приемочные испытания со вскрытием, металлографией и сопоставлением результатов, которые оказались положительными, и Ростехнадзор разрешил замену РГ на АУЗК. Мы проконтролировали сто швов за пятнадцать смен, при этом монтаж объекта не прерывался. Для РГ потребовалось бы пятьдесят пять смен с остановкой монтажа и срывом сроков пуска объекта. Сегодня мы уже имеем несколько методик для атомных станций, разрешенных для замены РГ. Наше глубокое убеждение: когерентный АУЗК для сварных соединений любого типа и диаметром 50 мм и более и толщиной 15 мм и более для эксплуатационного контроля значительно предпочтительнее, чем радиография.

Еще более масштабная внедренческая работа по замене радиографии на АУЗК аппаратурой «АВГУР-Т» была выполнена в 2016 году на предприятии Нижнекамскнефтехим. К этому времени у нас уже была разработана и утверждена Ростехнадзором методика АУЗК аустенитных сварных соединений большой толщины. Было продиагностировано более 1000 сварных соединений. На сегодняшний день это единственная и весьма эффективная методика контроля аустенитных сварных соединений. Производительность контроля составляет 15 – 20 погонных метров швов за смену, что в 4 раза выше, чем радиографией.

Ручной ФР-дефектоскоп

На протяжении всех 30 лет существования компании основное внимание мы уделяли разработкам автоматизированных комплексов, предназначенных для диагностики сварных швов и основного металла объектов повышенной опасности. Главное требование, предъявляемое к ним, – возможность не только выявлять дефекты, но и измерять их размеры. Эта стратегия всегда имела коммерческий и научный успех. Все больше отраслей народного хозяйства стали обращаться к использованию измерительного АУЗК, разрабатывать эксплуатационные нормы. Примером могут служить принятые в 2016 году нормы и правила НП-084-15 в атомной энергетике, впервые регламентирующие эксплуатационный контроль, основанный на измерении реальных параметров дефектов. Именно наши разработки дали толчок к созданию подобных

документов. Создавая 30 лет назад компанию, я и мечтал о таком развитии ультразвуковой дефектометрии. Но, к сожалению, этот процесс пошел гораздо медленнее, чем я прогнозировал в начале пути. На то были свои причины, и главные – консерватизм руководителей отраслей, недостаточная подготовленность нормативной базы.

Не надо быть провидцем, чтобы увидеть, что в последние 5 – 7 лет во всем мире взрывным образом стали появляться на рынке ручные приборы, основанные на ФР-технологии. Это показало посещение нами двух международных выставок: всемирной в 2016 году в Мюнхене и европейской в 2018 году в Гетеборге. По нашим подсчетам, не менее 50 мировых компаний сегодня выпускают ФР-дефектоскопы. В последние годы появилось несколько российских разработок таких компаний, как «Кропус», АКС, «Вотум». Тем не менее лидерами на российском рынке продаж стали импортные дефектоскопы «Харфанг VEON» («Сонатест») и «Омнискан МХ-2» («Олимпус»). И, несмотря на высокую цену (порядка 6 млн руб.), они десятками штук поставляются в Россию. В России в последние годы проводится политика импортозамещения, направленная на снижение зависимости промышленности от импортных поставок. Имея большой опыт в создании автоматизированных систем с применением ФР, а также в соответствии с направлением на импортозамещение мы разработали свой ручной ФР-дефектоскоп «АВГУР-АРТ^Р» (рис. 18). В нем максимально использованы самые современные решения, накопленные в России и за рубежом. Этот дефектоскоп, по сути, включает в себя три дефектоскопа, в том числе: ФР-дефектоскоп, ЦФА-дефектоскоп и TOFD-дефектоскоп. Особенностью его является то, что



Рис. 18. Внешний вид дефектоскопа «АВГУР-АРТ Р»

он может работать одновременно во всех этих режимах, что существенно повышает достоверность контроля.

Основные отличительные характеристики дефектоскопа «АВГУР-АРТ^Р»:

- большой экран 13,3", позволяющий видеть одновременно до 8 картинок;
- количество каналов прибора от 32×32 до 64×128;
- наличие программы, реализующей излучение и обработку сложных сигналов, что позволяет многократно повысить чувствительность контроля;
- работа с широким спектром сканеров, поскольку прибор поддерживает три энкодера.

Немаловажно, что цена дефектоскопа «АВГУР-АРТ^Р» будет существенно ниже аналогичных импортных приборов.

Продукция нашей компании

На рис. 19 схематично представлена актуальная продукция компании:

- системы автоматизированного контроля с применением акустической голографии («АВГУР 5.2» и «АВГУР-Т»), одним из режимов работы системы «АВГУР-Т» является контроль поднакладочных сварных соединений в тройниках магистральных газопроводов, другой режим – реализация технологии TOFD;
- дефектоскопы с поддержкой технологии фазированных решеток и цифровой фокусировки – «АВГУР-АРТ»; первые такие дефектоскопы выполнялись на базе импортной многоканальной электроники, но в настоящее время мы целиком перешли на платы, разработанные в ООО «НПЦ «ЭХО+»; флагманским прибором становится дефектоскоп «АВГУР-АРТ^Р»;
- системы калибровки пьезоэлектрических преобразователей «АВГУР 4.4» и «АВГУР 5.4», которые приобретаются метрологическими центрами по всей России от Калининграда до Хабаровска;
- программное обеспечение всех дефектоскопов и систем, которое стандартизовано и делится на три основных модуля: «Редактор схем контроля», «Регистрация данных» и «Анализ данных»;
- промышленные ультразвуковые сканеры, реализующие автоматизацию и механизацию контроля, которые подразделяются на ручные и автоматизированные, трековые и магнитные; с помощью этих сканеров проводится контроль от трубок 57 мм до корпуса парогенератора диаметром 4,5 м.

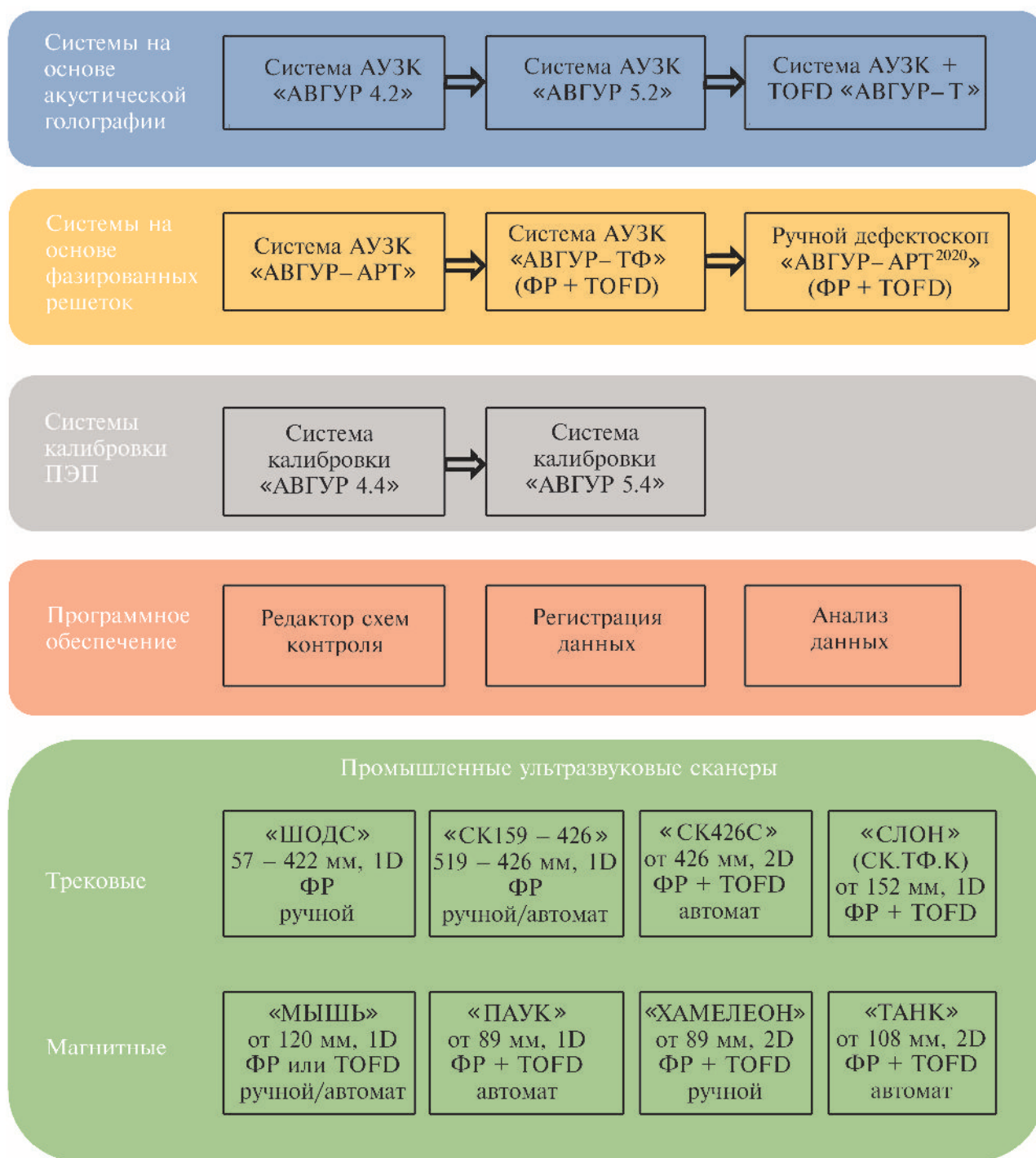


Рис. 19. Обобщенная схема продукции ООО «НПЦ «ЭХО+»

Услуги по контролю

Как я уже писал, начиная с 1996 года наша компания одновременно с разработками стала осуществлять эксплуатационный контроль на АЭС нашими системами. Поначалу это были системы «АВГУР 4.2», и работы проводились на наиболее ответственных трубопроводах. Эта работа оказалась весьма полезной для станций, поскольку позволила резко уменьшить объемы ремонта и, соот-

ветственно, время простоя энергоблока и повысить эксплуатационную надежность именно благодаря своевременному обнаружению и ремонту сварных соединений с опасными трещинами. Эта наша работа хорошо оплачивалась, что позволяло компании не только существовать, но и активно развиваться, создавая новые виды продукции. Через несколько лет в рамках компании был организован отдел неразрушающих методов контроля, который профессионально занимался только контролем и

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ И АВТОМАТИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСПЛОШНОСТЕЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЭС



Д. С. Тихонов,
канд. техн. наук,
зам. ген. директора

Приведены примеры применения средств визуализации данных и автоматизации ультразвукового контроля в атомной энергетике РФ, которые, кроме задачи выявления несплошностей в сварных соединениях, обладают возможностью точного измерения их размеров. Рассматриваются наиболее актуальные методики с применением технологии сканирующих антенных решеток, методов двух- и трехмерной когерентной обработки данных, ФР и ЦФА (TFM). Представлены разнообразные способы учета специфики задач контроля конкретных объектов. Рассматриваются различные аспекты процесса аттестации разработанных методик.

Ключевой целью применения современных методов визуализации дефектов является получение полной и точной информации о параметрах несплошностей. Отсутствие точных данных о состоянии объектов контроля и, как самое существенное, отсутствие точных данных о размерах, типе, расположении, количестве дефектов может приводить к ошибочным решениям о порядке дальнейшей эксплуатации этих объектов. Так, в атомной энергетике, в которой заложены многократные запасы прочности оборудования, достоверное наблюдение за несплошностью часто существенно безопаснее проведения ремонтных работ по ее удалению.

Первые верифицированные методики автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) с дефектметрией для АЭС начали появляться в России еще в 1998 году. Подробное их описание приведено в работе [1] 2007 года. Впоследствии, в развитие концепции дефектметрии, были созданы новые технологии контроля. В результате длительного и кропотливого аттестационного процесса и подтверждения точности результатов измерений эти технологии нашли практическое применение при эксплуатационном контроле на АЭС.

Существует два основных подхода для получения точных изображений дефектов – АУЗК с применением сканирующих одноэлементных преобразователей и АУЗК с применением антенных решеток. Использование одноэлементных преобразователей и трехмерной когерентной обработки методами SAFT и ПСП позволило решить сложные задачи выявления и определения фактических размеров дефектов в толстостенных перлитных, аустенитных и разнородных сварных соединениях (СС) трубопроводов реакторных установок РБМК и ВВЭР. Среди них:

- СС узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам Ду1200 парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 [2];
- разнородные СС приварки главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) к патрубку корпуса реактора ВВЭР-440 [3];
- аустенитные кольцевые и продольные СС ГЦТ АЭС с ВВЭР-440 [4];
- аустенитные СС приварки патрубков трубопроводов Ø585 мм к корпусам ГЗЗ [5];
- разнородные СС приварки ГЦТ к патрубку парогенератора реактора ВВЭР-440 [6];
- аустенитные СС с узкой разделкой толщиной до 80 мм для термоядерного реактора ИТЭР.

В последние годы активно развивалось направление УЗ-дефектметрии с применением антенных решеток (АР).

Методика АУЗК с применением антенных решеток для аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду300 реакторной установки РБМК-1000

Первой в атомной энергетике РФ ультразвуковой измерительной методикой с применением технологии АР стала методика контроля сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 реакторных установок РБМК-1000 [7]. При разработке методики была показана возможность измерения размеров дефектов и установлены значения неопределенности измерений, для чего были выполнены следующие процедуры подтверждения метрологических характеристик таких измерений:

- расчетные обоснования;
- математическое моделирование;
- исследования на испытательных образцах реальных сварных соединений, содержащих модели дефектов, имитирующие эксплуатационные дефекты;

- исследования на реальных сварных соединениях, содержащих реальные эксплуатационные дефекты, образованные по механизму межкристаллитного растрескивания под напряжением (МКРПН).

Основные задачи методика

Материаловедческие исследования показали, что для сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 типичными эксплуатационными дефектами являются трещины продольной и поперечной ориентации (относительно оси сварного соединения) или их комбинации, развивающиеся с внутренней поверхности по механизму МКРПН (межкристаллитное коррозионное растрескивание под напряжением). Как правило, место зарождения дефекта расположено довольно близко от корня шва со стороны основного металла. В этом случае трещина распространяется рядом с разделкой кромки шва. В некоторых случаях дефекты берут свое начало в 3 – 7 мм от корня шва, отсюда они проходят в основной металл перпендикулярно внутренней поверхности. Кроме рассмотренных дефектов, появляющихся в процессе эксплуатации, возможно присутствие технологических внутренних несплошностей, таких как непровары, несплавления, включения.

При разработке методики были решены следующие основные задачи:

- выявление и определение положения в сварных соединениях трубопроводов Ду300 технологических несплошностей (непровары, несплавления, поры, шлаковые включения и др.) и эксплуатационных несплошностей (трещины типа МКРПН), имеющих продольную и поперечную ориентацию относительно оси сварного шва, а также их комбинации;

- выявление несплошностей, локализованных в наплавленном металле, зоне сплавления и околошовной зоне шириной от границы сплавления не менее 20 мм за исключением возможной «мертвой зоны» контроля глубиной не более 3 мм от внешней поверхности;

- выявление и фиксация продольных несплошностей, эквивалентных по своим отражающим свойствам пазу протяженностью не менее 10 мм и глубиной (высотой) не менее 2 мм;

- выявление продольных несплошностей высотой не менее 3 мм и протяженностью не менее 40 мм с вероятностью не менее 0,9 при уровне доверительной вероятности 0,95;

- выявление и фиксация поперечных несплошностей, эквивалентных по своим отражающим свойствам пазу протяженностью не менее 25 мм и глубиной (высотой) не менее 2 мм;

- измерение размеров продольных несплошностей, расположенных со стороны проведения

контроля в околошовной зоне, с погрешностью измерения протяженности несплошности в 95%-ном доверительном интервале не более $\pm(10 + 0,05X)$ мм, где X – расстояние вдоль оси трубопровода от середины зоны сканирования до оси сварного соединения, и погрешностью измерения высоты несплошности в 95%-ном доверительном интервале не более ± 2 мм в диапазоне измеряемых высот от 3 до 9 мм.

Основные параметры контроля и методика анализа данных

Трещины от коррозии под напряжением (МКРПН) непрямолинейны, извилисты, что затрудняет их поиск рентгеновским методом. Однако, используя когерентные УЗ-методы визуализации ФР (фазированной антенной решетки) и ЦФА (цифровой фокусировки антенной решетки) данных, можно получать геометрические размеры дефектов. Автоматизированная аппаратура с жесткой привязкой к системе координат объекта обеспечивает возможность такого измерения, повторяемость и сопоставимость результатов контроля. Для решения задачи обнаружения и определения размеров дефектов выбраны сдвиговые волны, формируемые фокусированным акустическим пучком, осуществляющим секторное сканирование в диапазоне углов 40 – 80°. Углы прозвучивания оптимальны для надежного выявления несплошностей, локализованных в заданной области залегания, включающей область сварного шва и околошовной зоны.

Погрешность измерения параметров выявленных дефектов сильно обусловлена тем, что в ряде случаев зондирующие и рассеянные акустические импульсы распространяются через аустенитный сварной шов (при неблагоприятной локализации дефекта, когда прозвучивание ведется через сварной шов). Хорошо известна значительная зависимость коэффициентов рассеяния УЗ-волн от углов падения, отклонения направления распространения акустического пучка в наплавленном металле аустенитного сварного шва.

Влияние структуры аустенита приводит к снижению уровня полезного сигнала, увеличению ошибок определения реальных параметров дефектов – размеров, координат. Поэтому для контроля области шва, расположенной со стороны, откуда ведется прозвучивание, в методике используются линейные АР на частоту $5 \pm 0,5$ МГц, что позволяет достичь высокой разрешающей способности изображения при высоком уровне полезного сигнала. При выполнении УЗК через наплавленный металл (через шов) используются линейные АР с более низкой частотой – $2,25 \pm 0,225$ МГц. Режим контроля на низкой частоте 2,25 МГц (далее НЧ-режим) обеспечивает обнаружение дефектов,

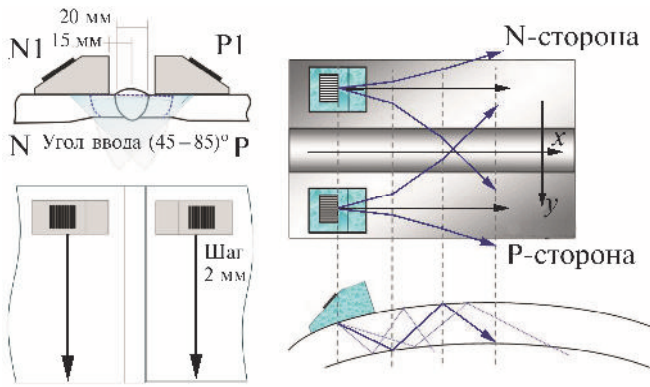


Рис. 1. Схемы сканирования и прозвучивания для поиска продольных и поперечных несплошностей

расположенных перед швом и на противоположной стороне шва, а также определение протяженности несплошности. Режим контроля на высокой частоте 5,0 МГц (далее ВЧ-режим) надежно выявляет дефекты, расположенные со стороны проведения контроля, а также обеспечивает определение их протяженности и высоты.

Номинальный угол ввода поперечной волны в аустенитную сталь составляет для поиска продольных несплошностей от 52 до 60°, а для поиска поперечных несплошностей – от 41° до 58°. На рис. 1 приведены схемы сканирования при записи данных контроля.

Анализ данных контроля в целях оценки качества шва и определения параметров несплошностей осуществляется с использованием ПО АВГУР. Проводится анализ изображений (в виде В-, С-, D-, S-изображений) для всех положений АР вдоль оси сварного соединения. Анализ изображений проводится в следующей последовательности:

- определяется наличие и размеры областей потери акустического контакта;
- фиксируется наличие несплошностей;
- определяется место расположения несплошностей, выполняется объединение близко расположенных несплошностей;
- для продольно ориентированных несплошностей, расположенных со стороны проведения контроля, определяются их размеры.

Для извлечения размерных показателей из полученных данных используется детально расписанная методика, обеспечивающая максимальную объективность результатов, а также классификацию выявленных несплошностей по типам.

Погрешность измерения размеров трещин

Испытания проводились на трех образцах реальных сварных соединений с искусственными дефектами и на 26 образцах реальных сварных соединений Ду300, содержащих эксплуатационные дефекты различной ориентации: продольной и попе-

речной, локализованные в области сварного соединения. Испытания на трех образцах с искусственными плоскостными дефектами установили следующие значения показателей назначения для 18 дефектов высотой более 2 мм, расположенных со стороны шва:

- обнаружены все 18 дефектов;
- погрешность измерения высоты дефектов составляет ±2 мм в 95%-ном доверительном интервале;
- погрешность измерения длины дефектов составляет ±5 мм в 95%-ном доверительном интервале.

Также были получены экспериментальные результаты, позволяющие определить погрешность измерения высоты продольных дефектов на основе сопоставления данных дефектометрии и металлографических исследований. Всего измерения проводили по 53 дефектам, содержащимся в 23 катушках со сварными соединениями [8].

По данным металлографических исследований при сопоставлении были использованы трещины МКРПН различной длины от 20 до 136 мм и высотой от 1,7 до 12,8 мм (рис. 2, а), т.е. представительность выборки была обеспечена как по длине, так и по высоте реальных дефектов. На рис. 2, б приведено распределение вероятности ошибки измерения высоты трещин для 120 случаев слепых измерений.

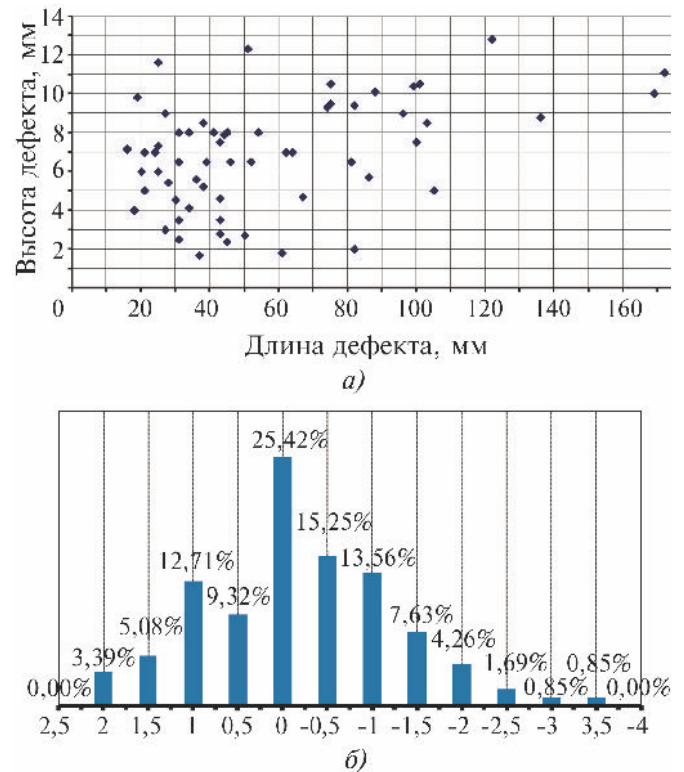


Рис. 2. Распределение трещин МКРПН по высоте и длине (а) и распределение величины погрешности (мм) для 120 измерений высот при сравнении с данными металлографических исследований (б)

Анализ полученных результатов показал, что средняя величина модуля погрешности измерения высоты дефектов составляет 1,7 мм. Измерения длины трещин в этих катушках дали погрешность измерения ± 8 мм. Погрешность определения размеров нормировалась только для несплошностей, имеющих высоту в диапазоне от 3 до 9 мм. Таких несплошностей в представленной выборке содержалось 40 штук. Для этого диапазона высот дефектов погрешность измерения их высоты составила ± 2 мм в 95%-ном доверительном интервале.

Технологии ФР и ЦФА для контроля толстостенных кольцевых сварных соединений Ду1200 парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

Для измерительного УЗК кольцевых сварных соединений узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов Ду1200 реакторов типа ВВЭР-1000 была разработана и аттестована методика с использованием традиционных одноэлементных преобразователей, синтезирующих апертуру методом механического сканирования и использующих алгоритм 2D-ПСП для получения изображений [9]. Необходимость дальнейшего совершенствования контроля этого ответственного узла АЭС привело к задаче применения методов ФР и ЦФА с оценкой их возможностей в сравнении с действующей измерительной методикой АУЗК с традиционными преобразователями.

Объектом контроля является узел приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1200 паро-

генераторов ПГВ-1000, ПГВ-1200 (рис. 3). Патрубок парогенератора и коллектор изготовлены из стали перлитного класса 10ГН2МФА. Сварной шов выполняют ручной или автоматической сваркой. Между патрубком Ду1200 (со стороны корня сварного шва) и корпусом коллектора имеется пространство – карман, расположенный во втором контуре реактора. С другой стороны от патрубка по отношению к сварному шву узел включает коллектор со скосом 65° (или 60°) и 50° . Скос выходит на патрубок коллектора с антикоррозионной наплавкой, к которому приваривается трубопровод главного циркуляционного контура. Наиболее часто встречающимися и одновременно наиболее опасными дефектами являются трещины, зарождающиеся на поверхности кармана коллектора и растущие в сторону поверхности узла по механизму замедленного деформационного коррозионного растрескивания. Данные трещины могут быть продольными, продольно-поперечными (диагональными) и поперечными.

При контроле объекта по методике ФР сканирование по цилиндрической части осуществляется по схемам N и P на продольно ориентированные несплошности; РТ и NT на поперечно ориентированные несплошности, а сканирование по конусной поверхности – по схемам K1 (рис. 4). Тип антенной решетки для контроля выбран как оптимальный компромисс между величиной активной апертуры и достигаемой разрешающей способности: частота 5 МГц, 32 элемента, шаг решетки 0,6 мм.

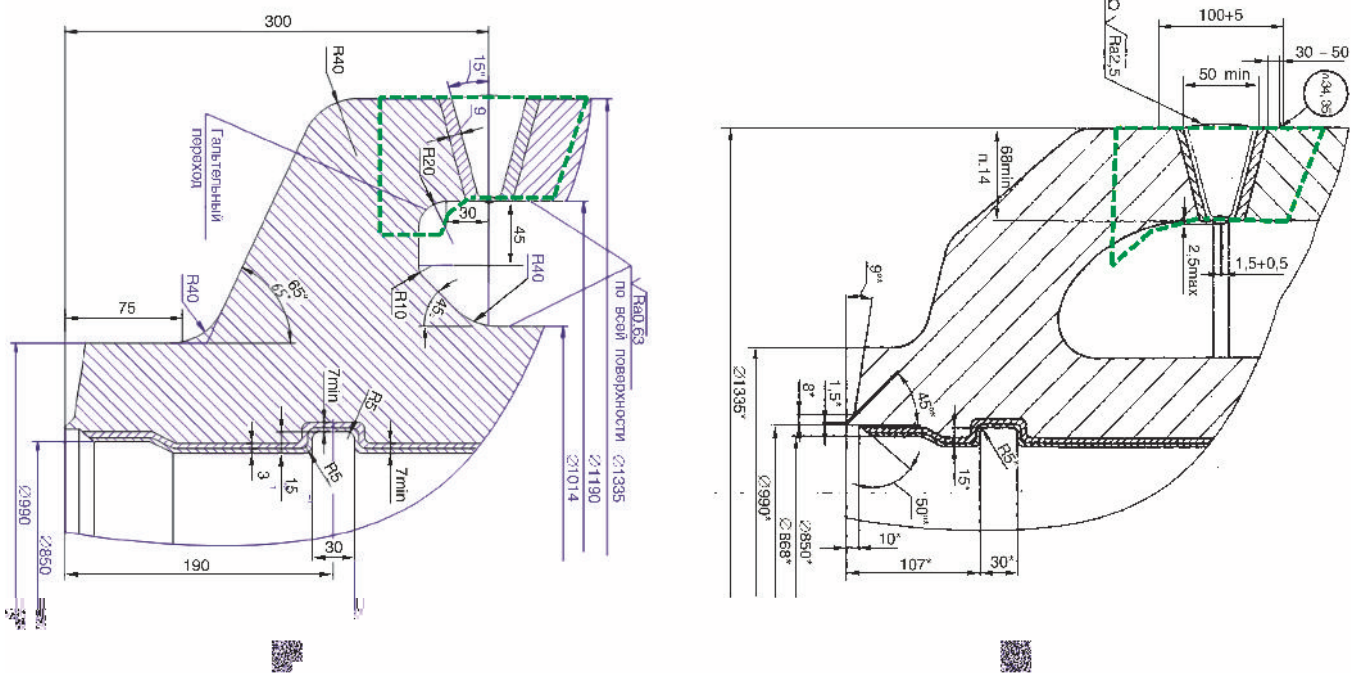


Рис. 3. Эскиз сварного соединения для парогенераторов ПГВ-1000 (а) и ПГВ-1000МКП (б). Зеленым пунктиром выделена область контроля

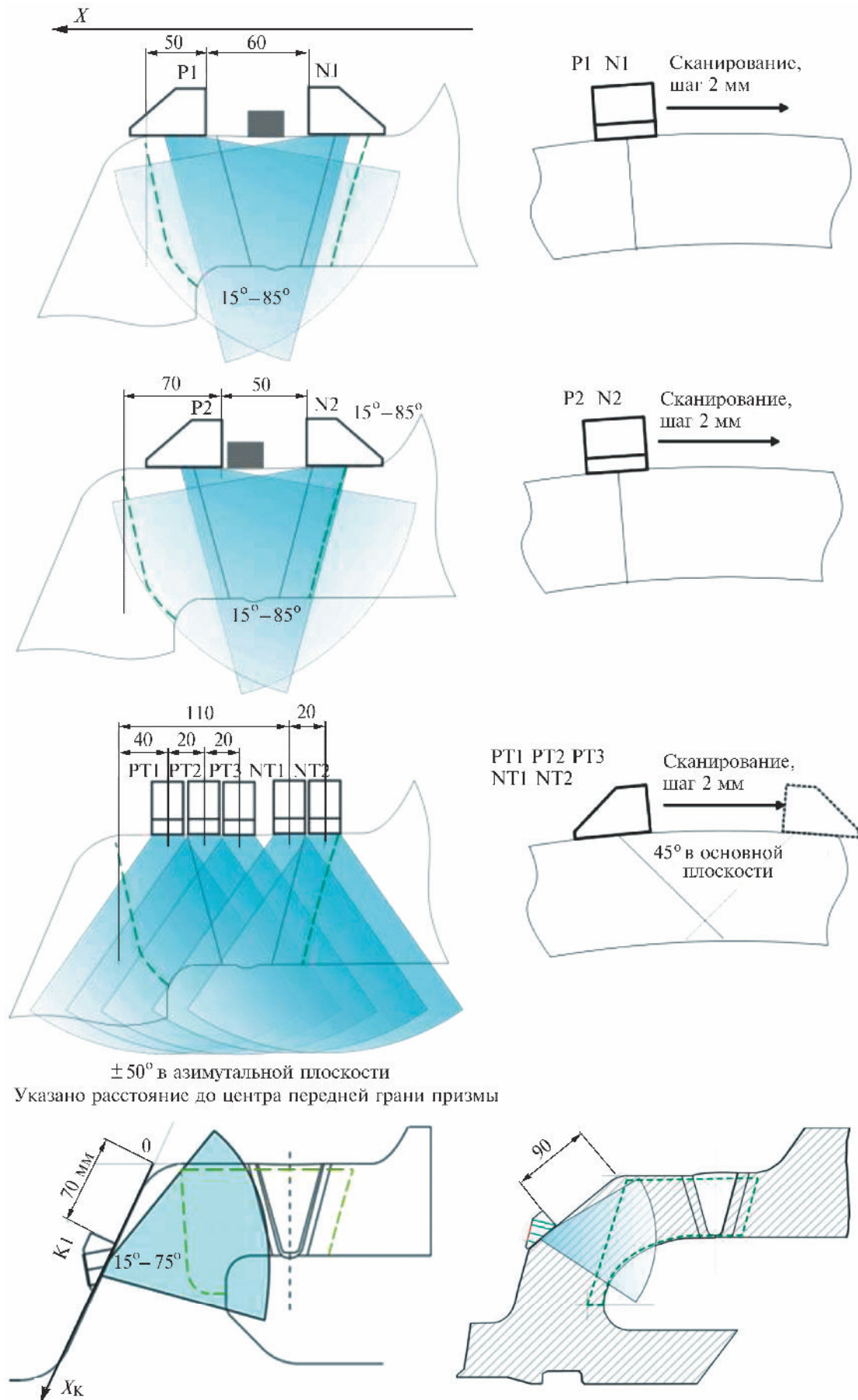


Рис. 4. Схемы контроля N, P, NT, PT и K1 с применением антенных решеток

Выявление слабо раскрытых и заполненных отложениями трещин

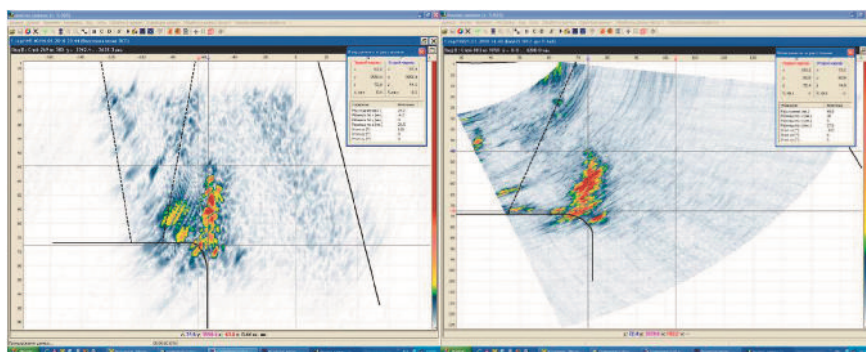
Характерные повреждения узлов приварки, по данным металлографических исследований, представляют собой трещины, развивающиеся от внутренней поверхности, которые могут быть заполнены окислами железа и металлической медью [10]. Для улучшения показателей выявляемости подобных несплошностей в методике приняты меры, приведенные в табл. 1. В ней же приводятся резуль-

таты применения этих мер. Сравнение выполнялось для действующих методик ручного и автоматизированного контроля.

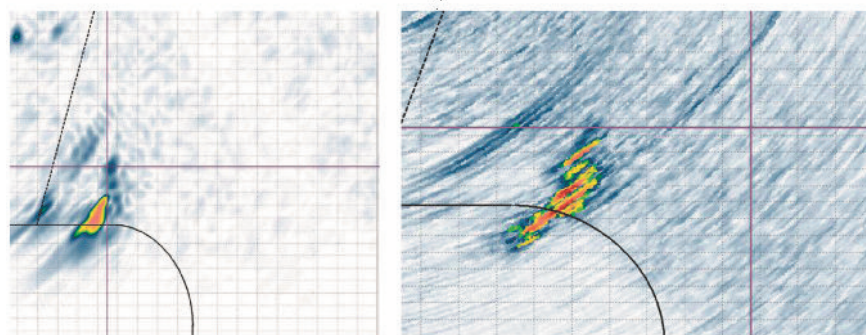
На рис. 5 приведены примеры изображений реальных трещин, по которым видно улучшение качества изображения при контроле с использованием технологии ФР. Данные отражатели не выявляются по данным ручного УЗК, находятся ниже уровня по данным системы «АВГУР-Т» и более уверенно выявляются по данным ФР.

1. Меры по повышению выявляемости трещин

| | Меры | Результаты |
|---|--|---|
| 1 | Повышение разрешающей способности (лучевой и фронтальной) | Фронтальная разрешающая способность сохраняется на уровне методики АУЗК с традиционными преобразователями и значительно превышает возможности ручного УЗК. Лучевая разрешающая способность за счет перехода на частоту 5 МГц увеличивается не менее чем вдвое |
| 2 | Расширение диапазона углов, используемых при выявлении дефектов | Расширение диапазона углов обеспечивает более надежную фиксацию несплошностей, имеющих разнонаправленные отражающие грани |
| 3 | Повышение рабочей частоты с 2,5 до 5,0 МГц | Улучшает отражение УЗ-волн от дефектов с малым раскрытием (плоскостные дефекты). Повышение чувствительности контроля на 4 – 6 дБ (показано при выполнении моделирования) |
| 4 | Снижение влияния неровной поверхности (за счет уменьшения области сканирования) | Для несплошностей, расположенных в области между корнем сварного соединения и галтелью, существенно уменьшается уровень шумов, связанных с влиянием неровной поверхности в области сварного соединения |
| 5 | Выявление дефектов с отражательной способностью ниже уровня фиксации, установленной правилами контроля | Отражающая способность выявляемых несплошностей соответствует уровню шумов наплавленного металла и границы сплавления (порядка $0,5 \text{ мм}^2$), что превосходит уровень фиксации по действующим методикам ($3,5 \text{ мм}^2$) на 15 – 17 дБ |



a)



б)

Рис. 5. Примеры повышения отношения сигнал/шум на реальных отражателях:

a – два изображения одного отражателя; б – другого отражателя; изображения слева – «АВГУР» (2,5 МГц), справа – ФР (5 МГц). На данных «АВГУР» видны ложные сигналы в области корня шва, вызванные неровностями внешней поверхности

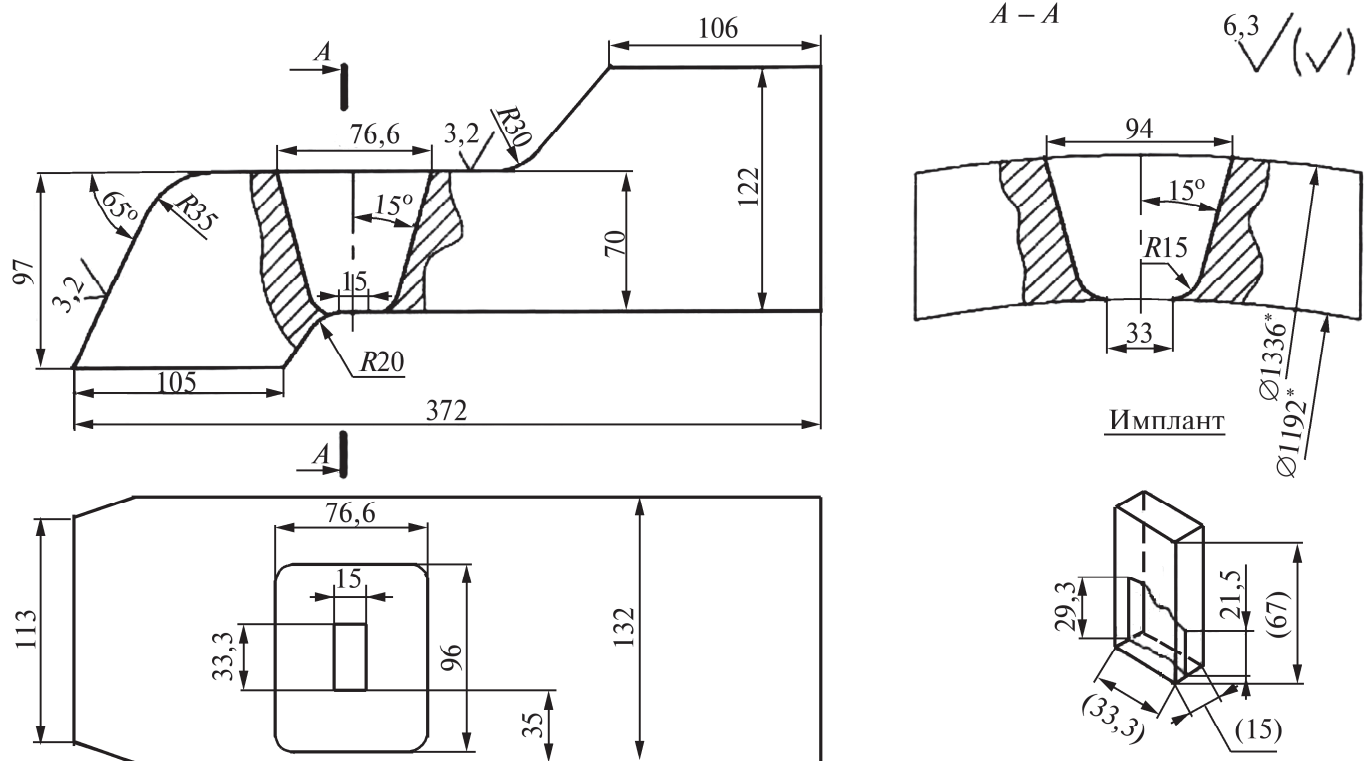
Результаты экспериментов на модельных образцах

Из большого количества результатов измерений на образцах реального узла приварки к патрубку парогенератора с искусственными отражателями приведем наиболее сложный пример. Рассмотрим испытательный образец, изготовленный в ОАО «НПО «ЦНИИТМАШ», имитирующий собой фрагмент реального объекта контроля. Образец содержит сваренный темплет с реальной трещиной. Длина темплета 33 мм, высота трещины меняется от 21,5 до 29,3 мм (на торцах) (рис. 6).

Образец изготовлен для проверки возможности выявления реальных трещин, расположенных внутри ремонтных заварок, и оценки возможности определения формы такой заварки.

На рис. 7 представлено изображение трещины, полученное по схемам N2, P2 и K1. Помимо трещины на изображении отчетливо видны границы сварки импланта (около 100 мм по данным АУЗК,

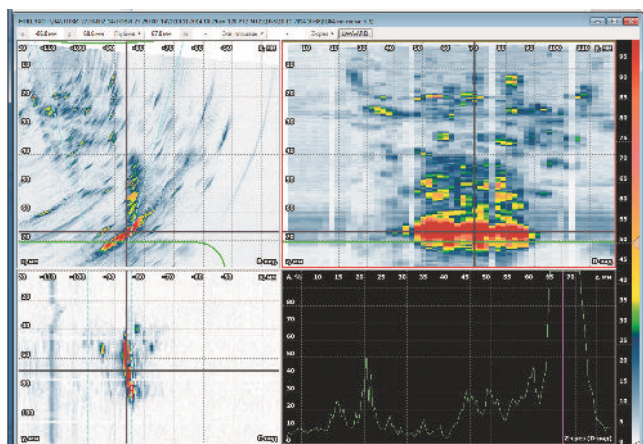
что соответствует данным чертежа). Результаты контроля показали следующие результаты: максимальная отражающая способность уголкового отражателя более 30 мм^2 , от тела трещины – $6 - 7 \text{ мм}^2$, от вершины трещины – $2 - 3 \text{ мм}^2$. По результатам измерений протяженность трещины составила 40 мм, а максимальная высота – 30,0 мм. Тень на донной поверхности достаточно точно соответствует длине трещины и составляет 31 мм. На том же рисунке представлено изображение по схеме контроля K1 с конусной поверхности. Трещина отлично выявляется на фоне сигналов от несплошностей, внесенных при сварке импланта. Максимальная отражающая способность трещины при этом превышает 40 мм^2 . Также были выполнены множественные другие эксперименты с реалистичными отражателями, искусственно введенными в образцы сварных соединений, показавшие надежное выявление дефектов различной ориентации и требуемую точность измерений.



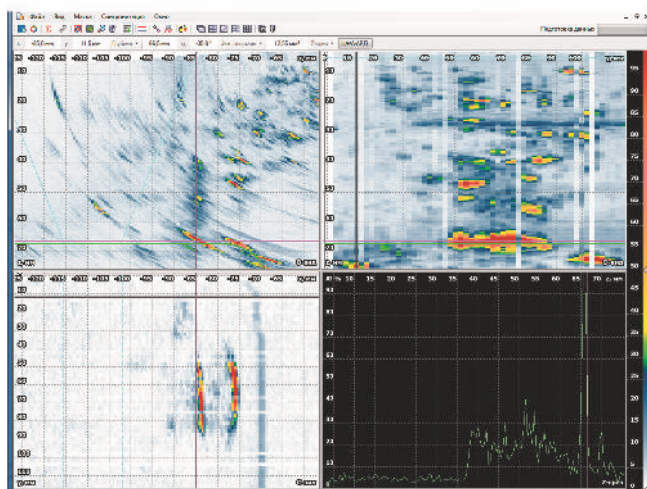
1. *Размеры для справок
2. Размеры в скобках – размеры имплантов

3. Н12; h12; Н12/2
4. Выборка на глубину – 72 мм – до момента вскрытия дна диаметра $\varnothing 1192$

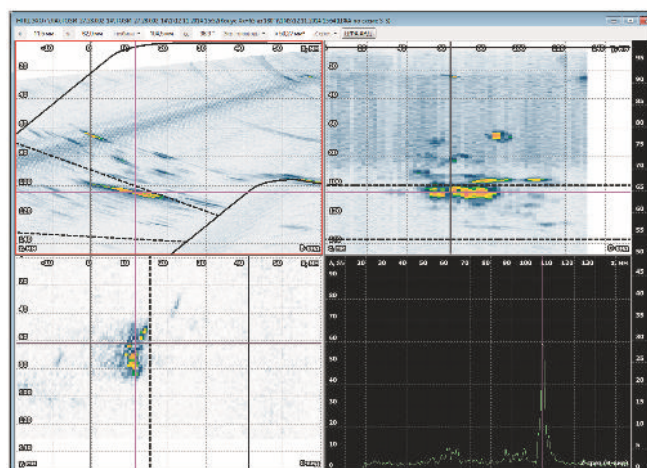
Рис. 6. Эскиз образца с сваренным имплантом, содержащим реальную трещину



а)



б)



в)

Рис. 7. Изображение сваренной трещины по схемам N2 (а), P2 (б) и К1 (в)

Результаты опытно-промышленной эксплуатации методики

В 2013–2014 годах проводилась опытно-промышленная эксплуатация методики, основной целью которой было сопоставление полученных

результатов с результатами контроля аттестованных ранее методик. За этот период проведен сравнительный анализ результатов контроля по двум методикам автоматизированного УЗК – методике контроля с применением системы «АВГУР 5.2» и методике с применением ФР.

Для сопоставительного анализа привлекались данные АУЗК с 12 энергоблоков АЭС с ВВЭР. При проведении сравнения результатов контроля использовалось следующее правило: несплошности, выявленные по разным методикам, считались совпавшими, если их координаты вдоль оси шва отличались не более чем на 30 мм (принимая во внимание погрешности, связанные с установкой локального трека системы «АВГУР 5.2») и не более чем на 6 мм по его глубине. Общее количество несплошностей, зафиксированных по обеим методикам, составило 588 штук. Сопоставление результатов контроля по методикам с применением технологии ФР («АВГУР-АРТ» и др.) и с применением системы «АВГУР 5.2» показало, что:

- около 85 % от общего количества зафиксированных несплошностей совпало для обеих методик, при этом подавляющее большинство различий в выявлении относится к несплошностям, имеющим высоту, равную 2 мм и менее, протяженностью 14 мм и менее; различия в возможностях выявления несплошностей чаще всего объясняются особенностями формирования УЗ-полей по данным методикам;
- среднеквадратичное отклонение измерения размеров одних и тех же несплошностей по двум методикам составило 0,5 мм для высоты несплошностей и 5 мм для их протяженности, что подтверждает заданную в методиках точность определения этих параметров несплошностей;
- все критические несплошности (приведшие к ремонту) выявлены обеими методиками; для них подтверждены точность измеренных параметров локализации, высоты и протяженности;
- подтверждается выявляющая способность и погрешность измерений, указанные в сопоставляемых методиках.

За весь период применения дефектометрии на данном объекте контроля за период с 2004 года кроме допустимых несплошностей выявлено также 13 недопустимых несплошностей (дефектов), по которым выполнены ремонтные мероприятия. По результатам исследований 13 случаев ремонтных мероприятий за период 2004 по 2018 годы подтверждены значения погрешностей, установленные в процессе аттестационных испытаний. На основании этого впервые в РФ были утверждены размерные критерии дефектов для оценки качества данного типа сварных соединений по результатам АУЗК с дефектометрией.

На основании полученных результатов методика с применением ФР и метода ЦФА была допущена для проведения эксплуатационного и предэксплуатационного неразрушающего контроля узла приварки к патрубку парогенераторов реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 и в настоящее время активно используется на АЭС РФ.

Применение метода ЦФА-ХУ для АУЗК сварных соединений роторов

Контроль качества сварных соединений колец роторов весьма актуален из-за жестких условий их эксплуатации и опасных последствий аварийных ситуаций. Специалисты Ленинградского машиностроительного завода (ЛМЗ) при освоении технологии изготовления роторов паровых турбин для АЭС нового поколения решали также задачу высококачественного контроля сварных соединений колец этих роторов. Толщина свариваемых деталей ротора около 200 мм, что осложняет проведение радиографического контроля. Очень жесткие требования к величине фронтальной разрешающей способности, которая по всему сечению объекта контроля до глубины 200 мм не должна превышать 3 мм, исключают применение традиционных автоматизированных и ручных методов.

При выборе основного метода восстановления изображений для сварных соединений роторов был проведен сравнительный анализ трех методов – метода 3D-ПСП с применением системы «АВГУР-Т», метода ФР и метода ЦФА, в том числе ЦФА-Х и ЦФА-ХУ с применением дефектоскопа «АВГУР-АРТ».

На рис. 8 приведена фотография образца сварного соединения ротора толщиной 205 мм, предназначенного для проверки фронтальной разрешающей способности, с отверстиями бокового сверле-

ния. На том же рис. 8 показано изображение, восстановленное методом 2D-ПСП системой «АВГУР-Т». Ограниченная пространственная апертура, ширина диаграммы направленности, равная примерно 15° , привели к тому, что изображение отверстий бокового сверления, расположенные у донной поверхности, не удается увидеть. Фронтальную разрешающую способность изображения при использовании преобразователя сдвиговых волн на 2,5 МГц можно оценить как 6 мм с учетом условий ограничения области сканирования.

На рис. 8 показано изображение (в центре) для одного из положений антенной решетки на апертуре сканирования при использовании ФР-дефектоскопа Harfang X-32. Так как сварное соединение достаточно узкое, то законы фокусировки были выбраны «по смещению». По изображению можно оценить фронтальную разрешающую способность около 10 мм. Множество изображений полученных в разных положениях вдоль оси x затрудняет анализ всего объема образца. Отсутствие динамической фокусировки по глубине в ФР-дефектоскопе привело к тому, что разрешающая способность отражателей на глубине 30 мм и удаленных от линии фокусировки значительно ухудшилось. Следует отметить, что на изображениях полученных методом ФР присутствуют ложные блики.

Также на рис. 8 представлено изображение, восстановленное по эхосигналам, измеренным в ЦФА-Х как когерентная сумма 40 парциальных изображений, полученных в 40 положениях АР. В отличие от контроля ФР-дефектоскопом нужно анализировать всего одно суммарное изображение. Видно, что фронтальное разрешение в основной плоскости для глубин около 200 мм можно оценить как 2 мм.

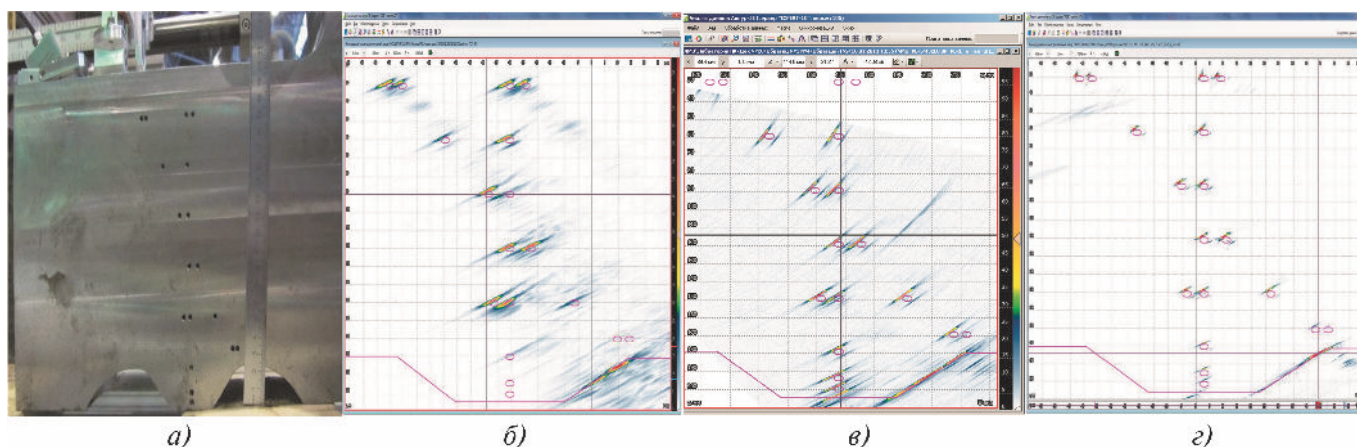


Рис. 8. Фотография образца (а) и В-изображения, полученные методами 2D-ПСП (б), методом ФР при одном положении антенной решетки (в) и методом ЦФА-Х (г)

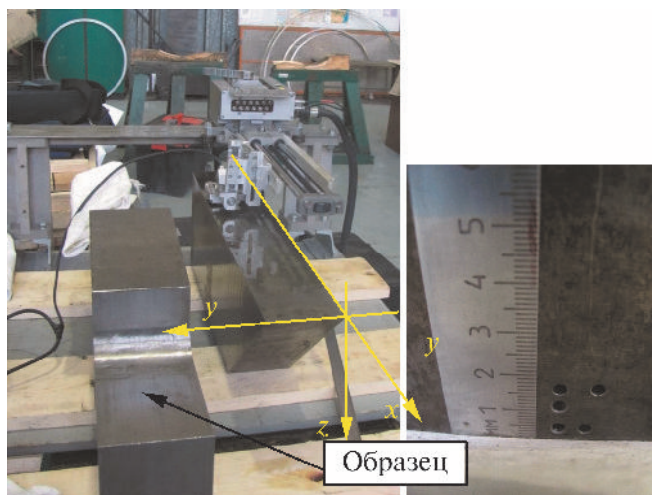


Рис. 9. Образец для определения разрешающей способности:

слева – антенная решетка на образце в конце области сканирования по оси y ; линиями желтого цвета показана система координат

Для определения фронтального разрешения в основной и дополнительной плоскостях из реального объекта контроля был изготовлен образец толщиной 200 мм с плоскодонными отверстиями диаметром 3 мм, просверленными на глубину 20 мм с нанесенной на него системой координат xuz . Фотография образца приведена на рис. 9.

Использовалось двухкоординатное сканирование, при этом измерения по оси y проводились в 47 слоях с шагом от 1,49 мм при размещении призмы у края образца. Вдоль оси x измерения эхосигналов выполнялись в 40 позициях с шагом 4,96 мм.

На рис. 10 показаны сложенные по максимуму изображения С-типа, восстановленные методами ЦФА-ХУ и ЦФА-Х. На этом же рисунке представлена фотография отверстий со стороны грани, наклоненной под углом 45° . Восстановление изображений дна отверстий методом ЦФА-ХУ не менее чем в 2 раза повысило фронтальное разрешение в дополнительной плоскости, что позволило

разрешить согласно критерию Рэлея блики от отверстий на расстоянии 5 мм друг от друга.

Восстановление изображений по дополнительным акустическим схемам с учетом профиля донной поверхности позволяет получить дополнительную информацию об отражателях.

Полученные результаты показали, что для поперечной волны фронтальное разрешение в основной плоскости xz на глубине 200 мм можно оценить как 1 мм, что удовлетворяет требованиям задачи. Фронтальное разрешение в дополнительной плоскости xu составляет не меньше 6 мм. Использование прореженных решеток с шестнадцатью элементами с размерами $0,9 \times 5$ мм с шагом не менее 4 мм позволит достичь аналогичных результатов при использовании более дешевой аппаратуры с шестнадцатью параллельными каналами и коммутатором 16×64 . Многосхемный подход в данной задаче дает возможность получать дополнительную информацию о типе и форме отражателя.

В результате было создано оборудование и методика АУЗК, обеспечившие поиск и определение параметров несплошностей, расположенных в сварном соединении ротора, включая его корень, линию сплавления и околошовную зону основного металла. Методика АУЗК имеет ряд особенностей, связанных с геометрией объекта контроля: большая глубина возможного залегания дефектов (до 195 мм) и ограниченность области сканирования и размещения сканера на объекте (рис. 11).

Такого свободного места слишком мало для получения качественных изображений на сдвиговых волнах. Используются прореженные антенные решетки с рабочей частотой 5 МГц, установленные на призмы для возбуждения продольных волн, что дает возможность увеличить длину ближней зоны, выполнять контроль на малых углах ввода и обеспечить высокую чувствительность контроля. В условиях ограниченной зоны доступа контроль осуществляется четырьмя антенными решетками продольного и поперечного прозвучивания с углами ввода 27° . Для реализации такой схемы

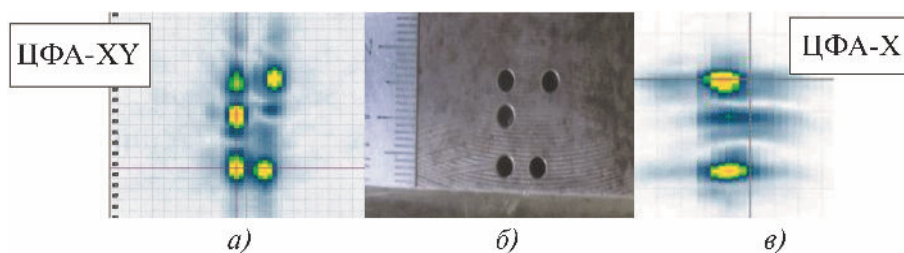


Рис. 10. Плоскодонные отверстия (б), расположенные на глубине 200 мм, полученные методами ЦФА-ХУ (а) и ЦФА-Х (в)

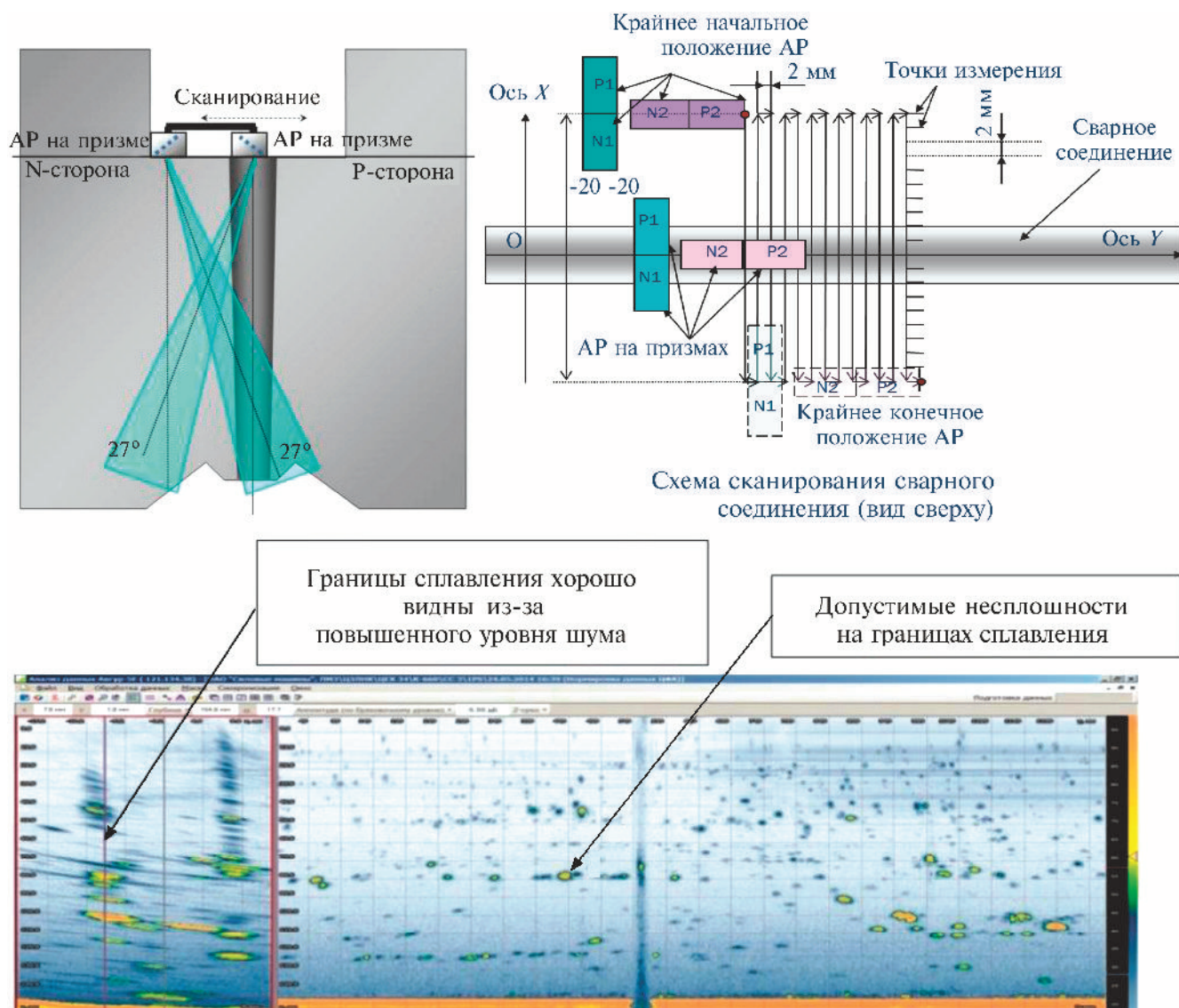


Рис. 11. Схема прозвучивания и сканирования сварного соединения (два верхних рисунка) и результирующее изображение (суммарные В- и D-изображения внизу) области сварного соединения с несплошностями по одному из каналов

сканирования для системы «АВГУР-АРТ» было создано специализированное сканирующее устройство, умещающееся между дисками ротора и обеспечивающее продольное и поперечное сканирование АР по всему периметру сварного соединения.

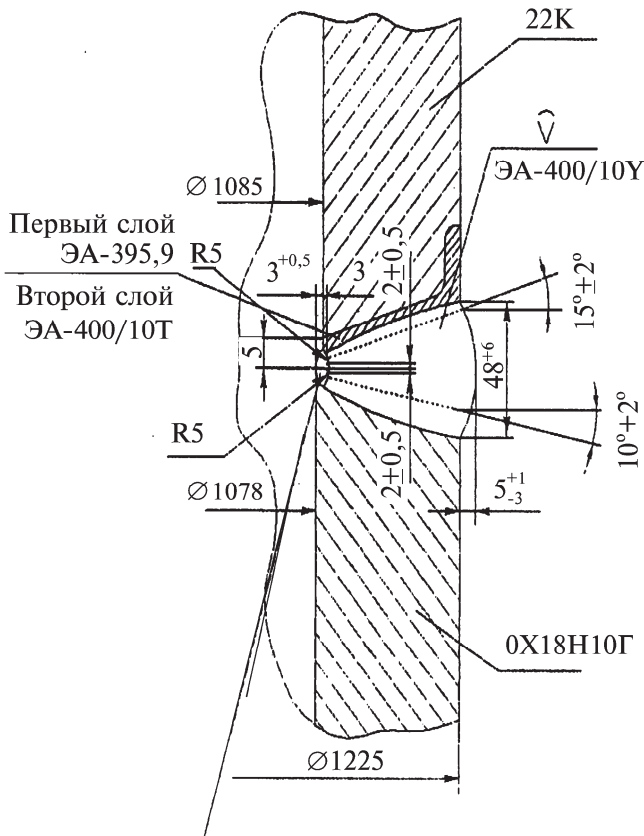
Применение антенных решеток для измерительного АУЗК разнородных сварных соединений переходного кольца и патрубка парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР-440

Объект контроля

Эскиз одного из наиболее характерных вариантов сварного соединения переходного кольца и патрубка Ду1100 парогенераторов реакторной уста-

новки ВВЭР-440 приведен на рис. 12. Основные параметры сварного соединения:

- тип сварки – ручная электродуговая с аргонодуговой подваркой корня шва проволокой марки 04X19Н11М3;
- материал патрубка парогенератора Ду1100 – сталь марки 22К;
- материал переходного кольца – сталь марки 08X18Н10Т;
- наплавка на патрубок – первый слой электродами марки ЭА-395/9, второй слой – электродами марки ЭА-400/10Т;
- заполнение разделки сварного соединения выполняется электродами марки ЭА 400/10У;
- диапазон толщин патрубка и переходного кольца – 70 – 85 мм.



Аргонно-дуговая сварка под наддувом аргона изнутри парогенератора (сварная проволока св-04X19Н11М3)

Рис. 12. Сварное соединение переходного кольца и патрубка парогенератора Ду1100

Большинство несплошностей, выявленных в зоне контроля Ду1100, обусловлены образованием трещин различной глубины и протяженности, которые во всех зафиксированных случаях образовывались в зоне сплавления перлитной стали 22К с наплавкой по механизму межкристаллитной коррозии.

При исследовании вырезанных темплетов из зон повреждения выяснилось, что на всех макрошлифах обнаружены трещины, берущие начало на

внутренней поверхности сварного соединения, расположенные на линии сплавления металла наплавки с основным металлом патрубка Ду1100 (сталь 22К).

Внешний вид макроструктуры сварного соединения и расположение трещин представлены на рис. 13. Темплеты включают зоны разнородного сварного соединения: основной металл – сталь 22К, линию сплавления, предварительную наплавку кромок, корень и наплавленный металл шва.

Аттестация измерительного режима для методики с одноэлементными преобразователями

Впервые такие трещины были обнаружены по результатам АУЗК системой «АВГУР 5.2» с помощью методики с применением технологии SAFT для одноэлементных преобразователей [11]. Первый же АУЗК, проведенный по этой методике в июне 2007 года, выявил недопустимую трещину высотой 42 мм и протяженностью 971 мм, а также множество несплошностей по всему периметру шва, расположенных в основном по границе наплавки сварного соединения. Выполненный ремонт и проведенные металлографические исследования подтвердили данные АУЗК.

Опыт применения технологии АУЗК по методике с одноэлементными преобразователями за период с 2007 года подтвердил эффективность ее применения: за этот период на шести блоках с реакторными установками ВВЭР-440 по результатам АУЗК было отремонтировано 19 сварных соединений с подтверждением результатов контроля, а также зафиксировано 197 допустимых несплошностей.

Измерительная методика с применением технологии ЦФА-ХУ

Изображение отражателей в режиме ЦФА-ХУ получаются за счет когерентного сложения множества изображений, полученных для каждого положения антенной решетки. В этом режиме можно



Рис. 13. Макрошлифы темплетов с трещинами

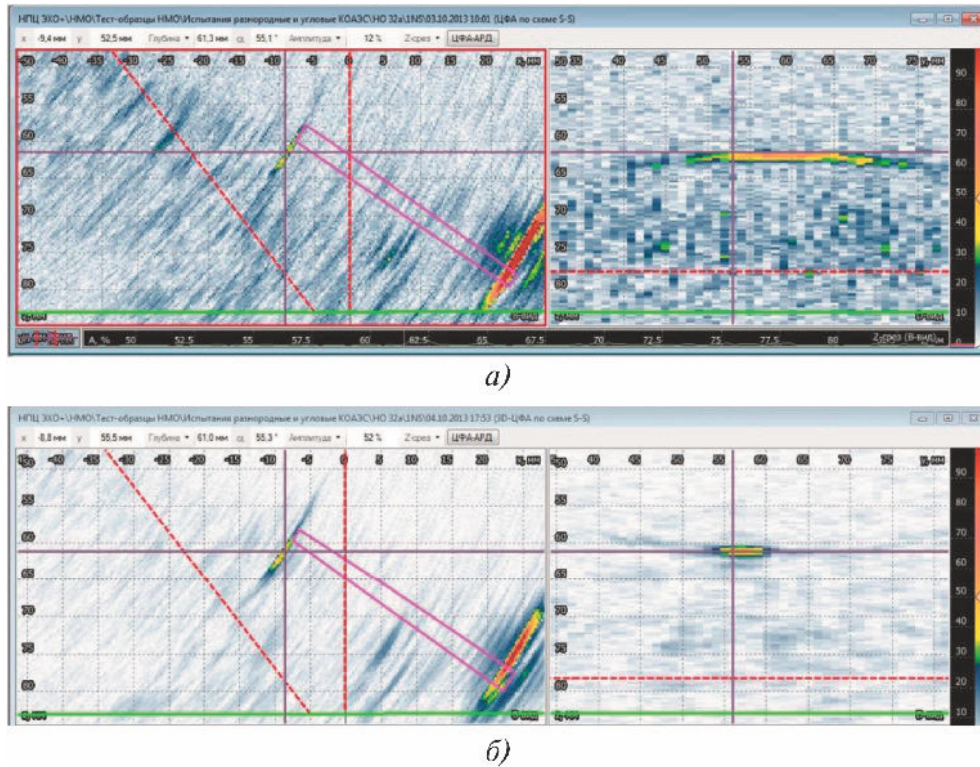


Рис. 14. Пример применения алгоритма ЦФА на объекте толщиной 90 мм:
 а – ЦФА-Х; б – ЦФА-ХУ

получать сфокусированные изображения и за пределами ближней зоны АР, что особенно актуально для объектов контроля толщиной более 70 мм. Обработка ЦФА-Х или ЦФА-ХУ обобщает этот подход при совместной обработке нескольких положений ФР поперек апертуры сканирования. Дополнительно обеспечивается повышение отношения сигнал/шум, повышение разрешающей способности по координате вдоль сварного шва. На рис. 14 приведен пример эффективности применения ЦФА-Х на объекте большой толщины (90 мм). Разрешающая способность в сравнении с ЦФА-Х увеличилась в 4,5 раза. Обработка ЦФА-Х позволяет не использовать схему ТRL [12], что упрощает конструкцию призм, сокращает требования к количеству каналов в аппаратуре. При этом ЦФА-Х имеет преимущество в том, что в отличие от ТRL фокусировка во всем объеме обеспечивается более равномерно.

При проведении контроля используются несколько схем контроля. Две из них - схемы сканирования N2M и P2M для СС с валиком усиления и симметричным двухсторонним доступом приведены на рис. 15. При контроле применяются линейные АР с призмами, формирующие продольную волну и обеспечивающие при подключении к дефектоскопу диапазон углов качания луча от -5 до $+85^\circ$. Применяются АР с рабочей частотой $1,8 \pm 0,18$ и $5,0 \pm 0,5$ МГц.

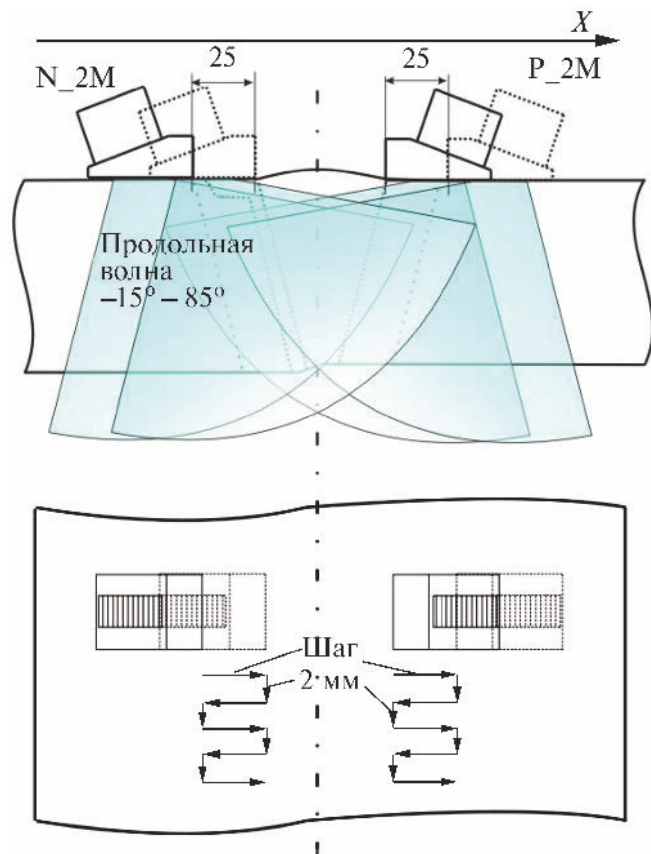


Рис. 15. Схемы сканирования N2M и P2M при наличии валика усиления

Подтверждение точности измерения высоты трещин

Для аттестации измерительного режима методики использовался метод прямого сопоставления результатов измерений и параметров отражателей, внесенных по отработанным технологиям. Были использованы следующие образцы.

Образец ИО Ду1100-Б-70-П-Кмп-1 содержал:

- восемь плоскостных отверстий, выполненных под углом 55° относительно вертикальной плоскости, площадью 15 мм^2 , что соответствует минимальной фиксируемой эквивалентной площади несплошности;

- семь плоскостных отверстий, расположенных по границе сплавления перлит – переходная наплавка (выявляются через наплавленный металл шва);

- одно отверстие, расположенное на границе сплавления наплавленный металл шва – аустенит (выявляется через основной металл). На данных отражателях проверяется возможность выявления минимально фиксируемых несплошностей, а также расстояния, на которых разрешаются несплошности.

Другой образец ИО Ду1100-Б-70-П-Кмп-2 содержал:

- пять пазов, выполненных электроэрозионным способом, протяженностью 15 и 20 мм, высотой 2 и 3 мм. Паза имеют выход на донную поверхность. Три паза расположены в области границы сплавления основной металл – наплавка, а два паза – в середине СС;

- шесть отверстий бокового сверления диаметром 3 мм глубиной 25, 30 и 35 мм. Три боковых отверстия выполнены в середине СС. Центры этих отверстий лежат на расстоянии 4; 7,5 и 10 мм от наружной поверхности образца для проверки значения мертвой зоны. Остальные три боковых отверстия глубиной 30 мм выполнены в основном металле 08X18H10T на расстоянии 20 мм от линии

сплавления основной металл – наплавленный металл шва для проверки обеспечения контроля требуемой зоны.

Третий образец ИО Ду1100-Б-70-П-Кмп-3 содержал:

- шесть поперечных пазов, выполненных электроэрозионным способом, протяженностью 20 и 30 мм, глубиной 3, 5 и 10 мм. Паза имеют выход на донную поверхность. Три паза расположены в основном металле, прилегающем к границе основной металл – наплавленный металл шва. Три других паза расположены в наплавленном металле сварного соединения;

- два плоскостных отверстия площадью 15 и 30 мм^2 в основном металле, прилегающем к границе основной металл – наплавленный металл шва;

- два плоскостных отверстия площадью 15 и 30 мм^2 , расположенных в наплавленном металле в середине сварного соединения.

Образец Ду1100-Б-70-П-Кмп-4, выполненный по ремонтной технологии, содержал:

- пять пазов, выполненных электроэрозионным способом, протяженностью 15 и 20 мм, высотой 2 и 3 мм. Паза имеют выход на донную поверхность. Три паза расположены в области границы сплавления основной металл – наплавка, а два паза – в середине СС.

Также при испытаниях были использованы образцы, принадлежащие UJV Rez Institut, 307-1-КО и 307-3-КО, приведенные на рис. 16. Эти образцы изготовлены по монтажной технологии Vitkovice, применяемой при строительстве чешских АЭС с РУ ВВЭР-440, они имеют разделку аналогичную той, что представлена на рис. 12, включают 68 несплошностей разного типа.

Образец 307-1-КО содержит:

- сегментные паза, выполненные электроэрозионным способом, имеющие малое раскрытие в верхней части (40 – 80 мкм);



Рис. 16. Образцы 307-1-КО и 307-3-КО

- усталостные трещины, выращенные в темплете методом трехточечного изгиба, и вваренную в корневую часть СС;

- непровары по границам сплавления, провисание корня и непровар корня.

Образец 307-3-КО содержит:

- три сегментных паза с размерами 38,4×12,0; 66,2×25,0 и 40,5×15,0 мм, выполненных электроэрозионным способом, имеющих малое раскрытие в верхней части (40 – 80 мкм); все пазы расположены на донной поверхности в области корня СС;

- четыре паза с размерами 25×7, мм, выполненные фрезерованием; все пазы расположены на донной поверхности в области корня СС;

- боковые отверстия на оси СС;

- реальную усталостную трещину 20×7 мм, выращенную в темплете методом трехточечного изгиба и вваренную в корневую часть СС. В процессе сварки внесены непреднамеренные непровары по границам заварки.

Для получения дополнительной информации о размерах дефектов помимо измерения дефектов, доступных для прямых измерений, был выполнен контроль по методике [11] с использованием аттестованного измерительного режима.

Проведенные измерения показали, что применение схем контроля с рабочей частотой 5 МГц обеспечивает получение изображений, на которых лучше проявляется форма сварного соединения, это помогает в идентификации несплошностей. Применение обработки ЦФА-У позволяет не использовать схему TRL, что упрощает конструкцию призм, снижает требования к количеству каналов в аппаратуре. При этом ЦФА-У имеет преимущество в том, что в отличие от TRL фокусировка во всем объеме обеспечивается более равномерно.

Среднеквадратические отклонения измерения координат и размеров несплошностей по всем ис-

2. Сравнение СКО измерения координат и размеров несплошностей для разных схем контроля

| Схема контроля | СКО измерения, мм | | | |
|------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|
| | координаты вдоль сварного соединения | глубины залегания несплошности | протяженности несплошности | высоты несплошности |
| N2M, P2M, T1, T2 | 10,5 | 7,0 | 5,7 | 2,3 |
| N5M, P5M | 4,1 | 3,0 | 4,3 | 2,0 |

пытательным образцам приведены в табл. 2. Можно видеть, что применение схем с частотой 5 МГц (схемы N5M и P5M) во всех случаях дает лучшие результаты.

В результате испытаний было установлено, что вероятность выявления несплошностей в зависимости от их геометрических размеров при доверительной вероятности 0,95 составляет 0,87 для несплошностей высотой от 2 включительно до 5 мм; 0,89 – для несплошностей высотой от 5 мм включительно до 10 мм и 0,92 – для несплошностей высотой не менее 10 мм.

Аттестация методологии полного цикла автоматизации для контроля сварных соединений корпусов парогенераторов реакторных установок ВВЭР-1000

Методика АУЗК с полным циклом автоматизации была подвергнута комплексу испытаний, в том числе и в целях установления точности измерения размеров дефектов. В качестве объекта контроля для применения технологии полного цикла автоматизации были выбраны кольцевые сварные соединения обечаек парогенераторов ПГВ-1000 и ПГВ-1000М реакторных установок ВВЭР-1000. Корпус парогенератора ПГВ-1000М (ПГВ-1000) представляет собой цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 4000 мм, состоящий из четырех сваренных между собой кованых обечаек: двух центральных толщиной 145 мм и двух боковых толщиной 105 мм, заглушенных штампованными днищами толщиной 120 мм.

Основные параметры объекта:

- номинальный внутренний диаметр обечаек 4000 мм;

- номинальная толщина сварных соединений: 103, 105, 145 мм;

- материал обечаек и днища – перлитная сталь 10ГН2МФА.

Для обоснования возможностей технологии были выполнены следующие работы:

- анализ влияющих параметров объекта контроля, дефектов, аппаратуры контроля;

- математическое моделирование процесса УЗК;

- обоснование конструкции настроечных и испытательных образцов;

- множественные эксперименты на образцах с отражателями различного типа;

- опытно-промышленная эксплуатация технологии на действующей АЭС и сравнение полученных результатов с другими методами неразрушающего контроля.

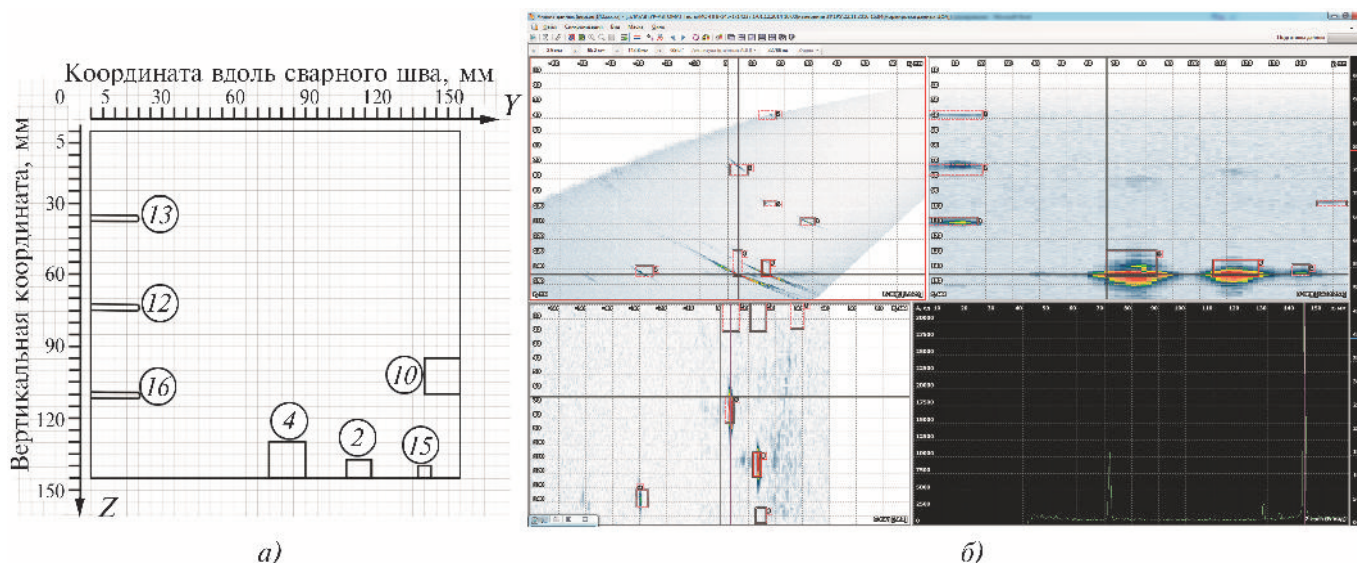


Рис. 17. Дефектограмма испытательного образца (а) и пример трех видов одного из изображений с рамками выявленных несплошностей (б)

Для проведения испытаний были разработаны и изготовлены испытательные образцы ИО-ПГВ-145-1, ИО-ПГВ-105-1 толщиной 145 и 105 мм соответственно. Дефектограмма испытательного образца ИО-ПГВ-145-1 представлена на рис. 17, а. В образце выполнено:

- три отверстия бокового сверления (12, 13, 16);
- три придонных паза (2, 4, 15);
- один висячий паз (10).

На рис. 17 представлено изображение с автоматически выявленными несплошностями в образце ИО-ПГВ-145-1.

Во время опытно-промышленной эксплуатации технологии проводился контроль реальных сварных соединений на действующих АЭС. Он показал, что при выполнении рутинной работы по поиску и измерению несплошностей, в особенности по нескольким схемам контроля, неизбежно влияние человеческого фактора. Автоматический анализ позволяет свести к минимуму влияние этого фактора. При этом, по данным автоматического анализа ложных срабатываний не было, все несплошности подтверждены при повторном ручном анализе данных. Показано хорошее соответствие результатов тщательного ручного УЗК и АУЗК с учетом особенностей, характерных для каждого из методов.

На основании анализа полученных при проведении опытно-промышленной эксплуатации данных установлено, что рассматриваемая технология УЗК с полным циклом автоматизации может применяться при проведении эксплуатационного контроля на АЭС при условии проведения соответствующих аттестационных испытаний для объектов контроля, отличных от сварных соединений обечак парогенераторов.

Направления совершенствования методологии УЗК с дефектометрией на АЭС

В результате проделанной большой работы по внедрению методов УЗ-дефектометрии в практику НК на АЭС можно определить следующие пути дальнейшего совершенствования методов УЗ-дефектометрии:

- расширение применения методов автоматического анализа данных контроля;
- применение антенных матриц для повышения качества изображений и измерения дефектов различной направленности;
- применение когерентных многосхемных методов восстановления изображений, учитывающих изменения упругих свойств и конструктивные особенности объекта контроля;
- более широкое применение УЗ-дефектометрии на основе методов ЦФА-ХУ на опасных производственных объектах, в том числе вместо радиографического метода контроля;
- обязательность применения математического моделирования для подтверждения свойств методик УЗ-дефектометрии.

Библиографический список

1. Тихонов Д. С. Разработка методов и аппаратуры для ультразвуковой дефектометрии сварных соединений трубопроводов АЭС: дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.02.11 / Центр. науч.-исслед. ин-т технологии машиностроения. М., 2007. 177 с.
2. Бадалян В. Г., Самарин П. Ф., Тихонов Д. С. Технологии ультразвукового контроля толстостенных кольцевых сварных соединений парогенераторов реакторов типа ВВЭР-1000 // Контроль. Диагностика. 2009. № 6 (132). С. 59 – 70.

3. **Методика** автоматизированного ультразвукового контроля сварного соединения № 10 приварки переходной втулки к патрубку реактора ВВЭР-440 с применением системы «АВГУР 5.2», МА5-АЭ1-П0С/8-К-03 / АО «Концерн Росэнергоатом». М., 2003.

4. **Методика** автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду500 реакторов ВВЭР-1000 с применением системы «АВГУР 5.2», МА5-АЭ2-Т2М/2-К-06 / АО «Концерн «Росэнергоатом». М., 2006.

5. **Методика** автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений приварки патрубков трубопроводов Ду500 к корпусам главных запорных задвижек реакторов ВВЭР-440 с применением системы «АВГУР 5.2», МА.АЭ-П2С/9-К-06 / АО «Концерн Росэнергоатом». М., 2006.

6. **Методика** автоматизированного ультразвукового контроля сварного соединения (композитного) переходного кольца и патрубка Ду1100 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-440 с применением системы «АВГУР 5.2», МА5-АЭ1-ПК0Б/9-К-05 / АО «Концерн Росэнергоатом». М., 2005.

7. **Методика** ультразвукового контроля сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 с применением технологии фазированных решеток МФАР.АЭ2. Т2М/2-К-10 / АО «Концерн Росэнергоатом». М., 2010.

8. **Технический отчет** ЦНИИ КМ «Прометей» по договору № 2009/4.1.1.1.10.9/34733/406/652 от 29.06.09 г. «Проведение испытаний применяемых на АЭС методик УЗК сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 с целью определения их соответствия разработанным главным конструктором требованиям». Т. 1. СПб., 2010.

9. **Бадалян В. Г., Самарин П. Ф., Тихонов Д. С.** Технологии ультразвукового контроля толстостенных кольцевых сварных соединений парогенераторов реакторов типа ВВЭР-1000 // Контроль. Диагностика. 2009. № 6 (132). С. 59 – 70.

10. **Обследование металла** узлов приварки коллектора к патрубку Ду1200 (С.С. № 111) парогенераторов блока 3 ВВЭР-1000 Ривненской АЭС и сопоставительный анализ с результатами исследования поврежденного металла на других АЭС Украины и России: Заключение / ОП «Ривненская АЭС» ГП НАЭК «Энергоатом»; Государственный научный центр Российской Федерации ОАО НПО «ЦНИИТМАШ». М., 2009.

11. **Методика** автоматизированного ультразвукового контроля сварного соединения (композитного) переходного кольца и патрубка Ду1100 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-440 с применением системы «АВГУР 5.2». МА5-АЭ1-ПК0Б/9-К-05 / АО «Концерн Росэнергоатом». М., 2004.

12. **Anderson M. T., Cumblidge S., Doctor S.** Through Weld Inspection of Wrought Stainless Steel Piping Using Phased Array Ultrasonic Probes // 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, 2004. P. 568 – 575.



НПЦ ЭХО+. 000

123458, РФ, г. Москва,
ул. Твардовского, д. 8,
Технопарк «СТРОГИНО»
Тел./факс: +7 (495) 780-92-50
e-mail: echo@echoplus.ru
www.echoplus.ru

000 «НПЦ «ЭХО+» – разработка и производство оборудования, оказание высокопрофессиональных услуг в области ультразвукового и других видов неразрушающего контроля. Компания основана в 1990 г.

НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

- разработка, производство, обслуживание автоматизированных ультразвуковых систем для опасных производств;
- разработка методик ультразвукового контроля, в том числе с режимом дефектометрии, применением фазированных решеток, цифровой фокусировки (TFM), зональной фокусировки и TOFD;
- услуги по диагностике и контролю состояния сварных соединений и основного металла.

Научные исследования в области ультразвуковой интроскопии изображений объектов.

ПРОДУКЦИЯ:

- системы «АВГУР-Т», «АВГУР-АРТ», «АВГУР-ТФ»;
- оборудование для УЗК: сканирующие устройства, электронные блоки, преобразователи, антенные решетки;
- программное обеспечение.

ОСНОВНЫЕ ЗАКАЗЧИКИ:

концерн «Росэнергоатом», АЭС, ПАО «Газпром», ПАО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС», ОАО «Силовые машины», АО «Уралхиммаш», АО «Газпромнефть-МНПЗ», АО «Промфинстрой».

ЗАМЕНА РАДИОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ С ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ДАННЫХ



А. Е. Базулин,
канд. техн. наук,
гл. конструктор



Е. Г. Базулин,
д-р техн. наук,
зам. ген. директора
по научным вопросам,
нач. системного отдела



А. В. Бутов,
ведущ. инженер
системно-методической
лаборатории



А. Х. Вopilкин,
д-р техн. наук, проф.,
ген. директор



Д. С. Тихонов,
канд. техн. наук,
зам. ген. директора

Обоснование замены радиографического контроля (РГК) на другой вид контроля, который при более подходящих эксплуатационных характеристиках мог бы обеспечить, по крайней мере, не худшее качество контроля, является крайне актуальной задачей. Эта задача возникает, например, при монтаже трубопроводов, когда наличие рентгеновского облучения сварных соединений вынуждает удалять персонал со стройки и останавливать монтажные работы. Также потребность в замене радиографии возникает при большой тол-

Рассматриваются практически значимые случаи обоснования замены радиографического контроля на автоматизированный ультразвуковой. Обоснования выполняются путем сравнения технических возможностей существующих методик для конкретных объектов контроля. Сравнение выполняется по следующим определяющим направлениям: возможностям выявления несплошностей в зависимости от их опасности; информативности результатов контроля; возможности визуального представления и долговременности хранения результатов контроля. Приводятся примеры обоснования такой замены для случаев контроля толстостенного аустенитного соединения опоры дивертора термоядерного реактора ИТЭР, кольцевых сварных соединений трубопроводов различного назначения, роторов турбин, сварных соединений трубопроводов системы компенсации давления на АЭС.

щине объектов контроля, когда ее эффективность заметно снижается.

В ряде зарубежных документов анализируется возможность замены радиографического контроля ультразвуковым и даже сформулированы общие требования к ультразвуковому контролю, при выполнении которых он может быть использован вместо радиографии, например [1]. В европейских рекомендациях по выбору методов неразрушающего контроля сварных соединений [2] предлагается в основном применять ультразвуковой контроль вместо радиографии для дефектоскопии сварных соединений толщиной более 40 мм.

В настоящей статье рассматривается индивидуальный подход при обосновании замены радиографического контроля ультразвуковым контролем путем сравнения технических возможностей существующих методик для конкретного объекта контроля. Сравнение выполняется по следующим определяющим направлениям: 1) возможностям выявления несплошностей в зависимости от их опасности; 2) информативности результатов контроля; 3) возможности визуального представления и долговременности хранения результатов контроля.

Для проведения максимально корректного сравнения используются: математическое моделирование обоих видов контроля, сравнение результатов контроля, полученных на открытых и слепых образцах, содержащих дефекты, и разрушающий

контроль образцов с металлографическими исследованиями темплетов. По результатам такого рода сопоставительных испытаний принимается обоснованное решение о замене одного вида контроля на другой.

В большинстве случаев применения методов автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) с дефектометрией сравнение по информативности, возможности визуализации и долговременности хранения результатов, безусловно, в пользу АУЗК. Поэтому сравнение УЗ-дефектометрии с рентгенографическими методами сосредоточено на вопросах качества выявления дефектов и точности определения их параметров.

Основные принципы сопоставления

Как показывает многолетний опыт сопоставления РГК и УЗК, обобщенный в работе [3], с точки зрения обнаружения дефектов УЗК лучше выявляет более опасные плоскостные дефекты, а наиболее

сложно выявляемые дефекты для УЗК при сравнении с РГК – шлаковые включения и неровности в корне шва. В радиографии применяются излучения с очень короткими длинами волн, и получаемые изображения дефектов близки к оптическим, что позволяет их сравнительно легко расшифровывать и оценивать. При использовании АУЗК с визуализацией:

- вид изображения существенно зависит от примененных алгоритмов его построения;
- в большинстве случаев вид изображения не совпадает с его оптическим образом, что связано с большей длиной используемой звуковой волны по сравнению с оптической;
- объемные дефекты (поры, шлаковые включения) обнаруживаются достаточно легко, но оценить размеры таких несплошностей и различить их типы не позволяет разрешающая способность метода.

Сравнение информативности АУЗК с дефектометрией и радиографического контроля приведено в таблице.

Сравнение информативности АУЗК и радиографического контроля

| Оцениваемая характеристика дефекта | АУЗК с дефектометрией | Радиографический контроль |
|------------------------------------|--|---|
| Форма дефекта | Точность определения границ несплошности не превышает длину ультразвуковой волны | Высокая точность изображения объемных дефектов. Для плоскостных дефектов определяются протяженность и азимут, но не высота. Направление и величина раскрытия плоскостных несплошностей оказывает значительное влияние на их выявляемость |
| Измерение размеров дефектов | Геометрические размеры несплошности определяются по протяженности (вдоль и поперек шва) и составляют величину порядка нескольких миллиметров. Высота несплошностей определяется ее типом и величиной λ . Для несплошностей с размерами меньше $(1 \dots 2)\lambda$ высоту дефектов можно определить, сопоставляя амплитуды изображения несплошности и опорного отражателя. Для несплошностей больших размеров при определении высоты дефекта важным является элемент изображения, связанный с дифракцией краев несплошностей, погрешность определения размеров порядка λ | Точность определения протяженности дефектов (вдоль и поперек шва) весьма высока. Высота дефектов определяется при сопоставлении оптической плотности изображения дефектов на снимке с канавочным эталоном. Так как оптическая плотность сильно зависит от формы и размеров дефекта, то в нормативных документах не предусматривается определение размеров дефектов в направлении просвечивания (т.е. высоты дефекта) |

Сопоставление результатов контроля на образцах с реальными дефектами

Сварное соединение горячего изостатического прессования

Рассмотрим сравнение данных АУЗК с когерентной обработкой и данных радиографического контроля для толстостенного аустенитного соединения опоры дивертора термоядерного реактора ИТЭР. Для АУЗК был разработан оригинальный способ диагностики этих объектов, нацеленный на замену рентгенографического контроля [4]. Объект контроля представляет собой биметаллическую деталь с габаритными размерами 400×400×400 мм с разнородным сварным соединением, выполненным методом горячего изостатического прессования (ГИП). Для верхней части опоры используется аустенитная сталь марки ХМ19, для нижней – аустенитная сталь марки 316L, глубина залегания соединения от поверхности сканирования около 130 мм. Методика АУЗК основана на применении ФР-дефектоскопа (ФР – фазированные решетки), фокусирующего поле излучения–приема практически на поверхность изделия с продольно-поперечным механическим сканированием антенной решетки (АР) и последующей трехмерной когерентной обработкой методом 3D-SAFT (рис. 1).

Для проведения сравнительных испытаний был изготовлен образец с двумя плоскодонными отверстиями диаметром 2 мм и шестью закладками в форме дисков, имитирующих несплавления, диаметром 5 мм, толщиной 0,6 мм, заполненных вольфрамом, и диаметром 3 мм, толщиной 1,1 мм, заполненных окисью алюминия (рис. 2). В результате АУЗК установлено (рис. 3), что разработанный способ АУЗК имеет преимущества перед традиционным методом ФР и позволяет выявлять с запасом более 12 дБ несплошности с отражающей способностью, эквивалентной отражающей способности плоскодонного отверстия диаметром 2 мм на глубине 140 мм, и определять размеры несплошностей в сварном соединении с точностью ± 1 мм. При сравнении результатов АУЗК с рентгенографическим контролем использовался фрагмент заготовки опоры дивертора, анало-

гичной описанному образцу, но с меньшим размером закладок: диаметром 2 мм, толщиной 0,6 мм, заполненной окисью алюминия, и диаметром 2 мм, толщиной 1,1 мм, заполненной вольфрамом. Так как для обеспечения высокой чувствительности рентгенографического контроля толстостенных объектов необходимо использование линейных ускорителей,

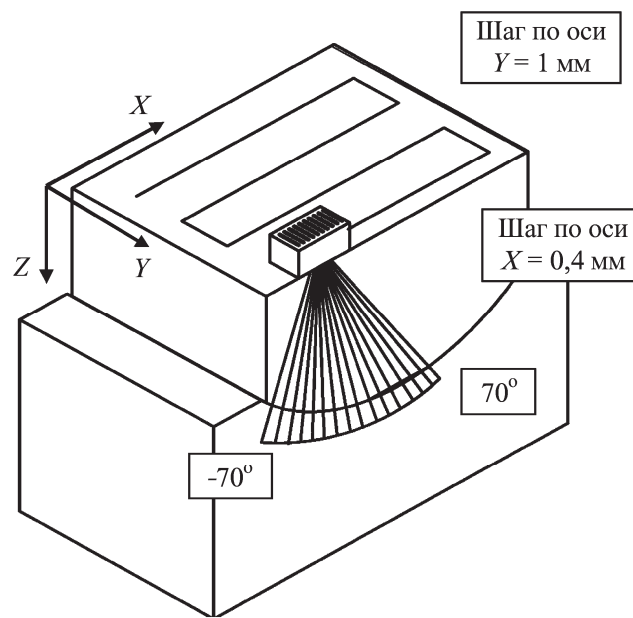


Рис. 1. Схема сканирования АР при проведении АУЗК

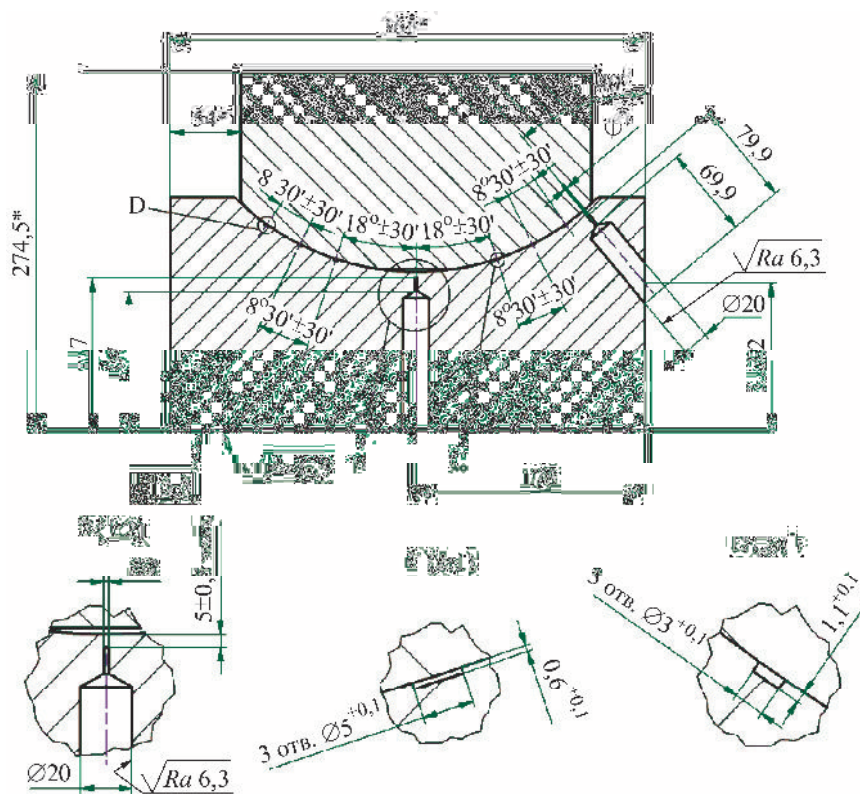


Рис. 2. Испытательный образец с имитаторами дефектов

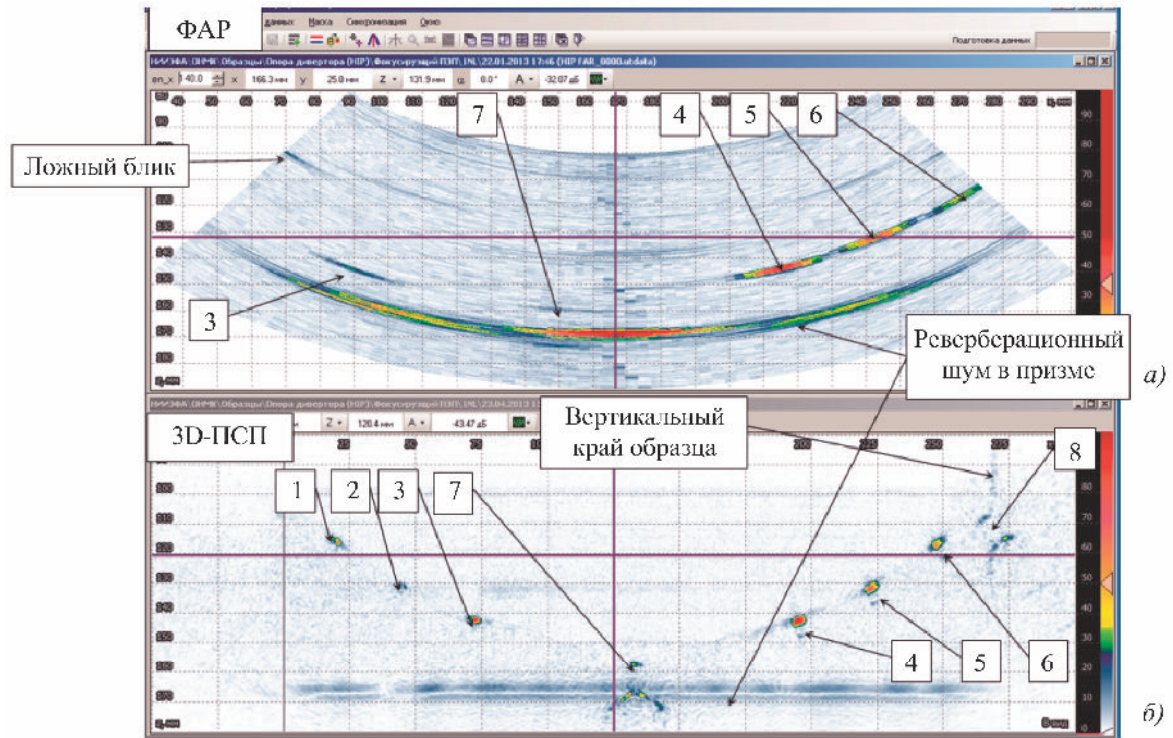


Рис. 3. Два изображения – полученные по традиционной методике ФР (а) и по методике АУЗК методом 3D-SAFT с дефектометрией (б): цифрами обозначены искусственно внесенные несплошности

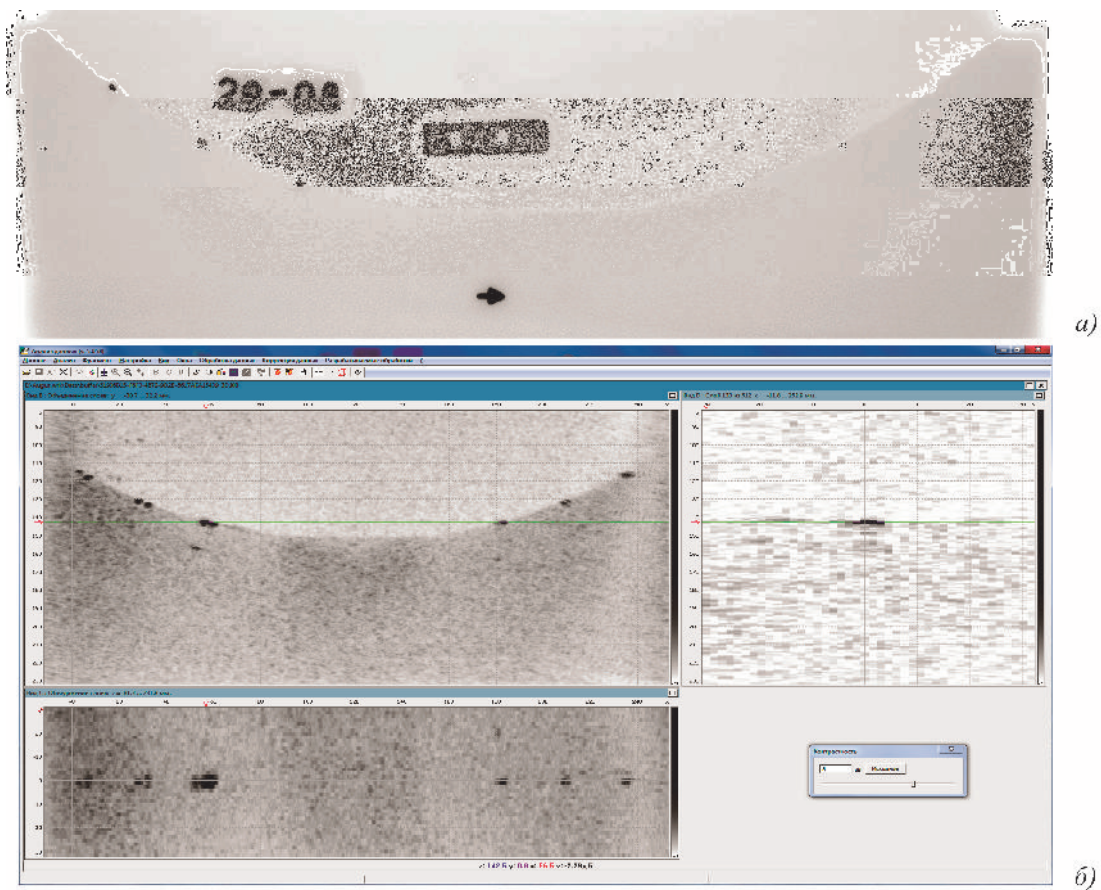


Рис. 4. Результат радиографического контроля в поперечном направлении (а) и изображения, полученные при АУЗК (б)

образец был сделан толщиной 20 мм, а контроль проводился не в вертикальном, а в поперечном направлении. Сравнение результатов контроля представлено на рис. 4, палитра изображений УЗК приведена для сопоставимости в серой цветовой шкале.

Полученный результат показывает преимущества АУЗК с точки зрения выявления всех заложенных типов дефектов и их локализации, но не имеет возможности в отличие от радиографического контроля зафиксировать материалы закладок с разной плотностью.

Кольцевое сварное соединение Ø720×25

Подобный эксперимент был проведен на образце кольцевого сварного соединения труб из перлитной стали диаметром 720 мм и толщиной 25 мм. В образце в процессе автоматической сварки через 20 – 40 мм искусственно нарушалась технология автоматической сварки в целях получения максимального количества технологических дефектов разного типа и размера. Для проведения АУЗК с дефектометрией применялась система «АВГУР-ТФ» в режиме синхронного использования технологий ФР и TOFD.

Для рентгеновского контроля применялись люминесцентные запоминающие цифровые пластины и панорамная схема просвечивания. Всего в образце была выполнена 21 дефектная область с дефектами, расположенными в разных областях шва. Типы внесенных дефектов: непровар корня, непровар по разделке, утяжины, избыточный проплав, цепочки и скопления пор, отдельные поры и подрезы. На рис. 5 приведены изображения межваликовых непроваров, полученные рентгеновским методом, методом ФР и методом TOFD. Методом АУЗК не были выявлены одна одиночная пора и две области скопления пор в валике усиления шва (облицовочный шов). А при рентгеновском контроле не была выявлена одна область с межваликовым непроваром.

Кольцевые сварные соединения аустенитных труб АЭС

Аналогичный подход использовался при принятии технического решения по замене радиографического контроля сварных соединений аустенитных трубопроводов системы расхолаживания бассейна выдержки Ø325 мм и толщиной 12 мм

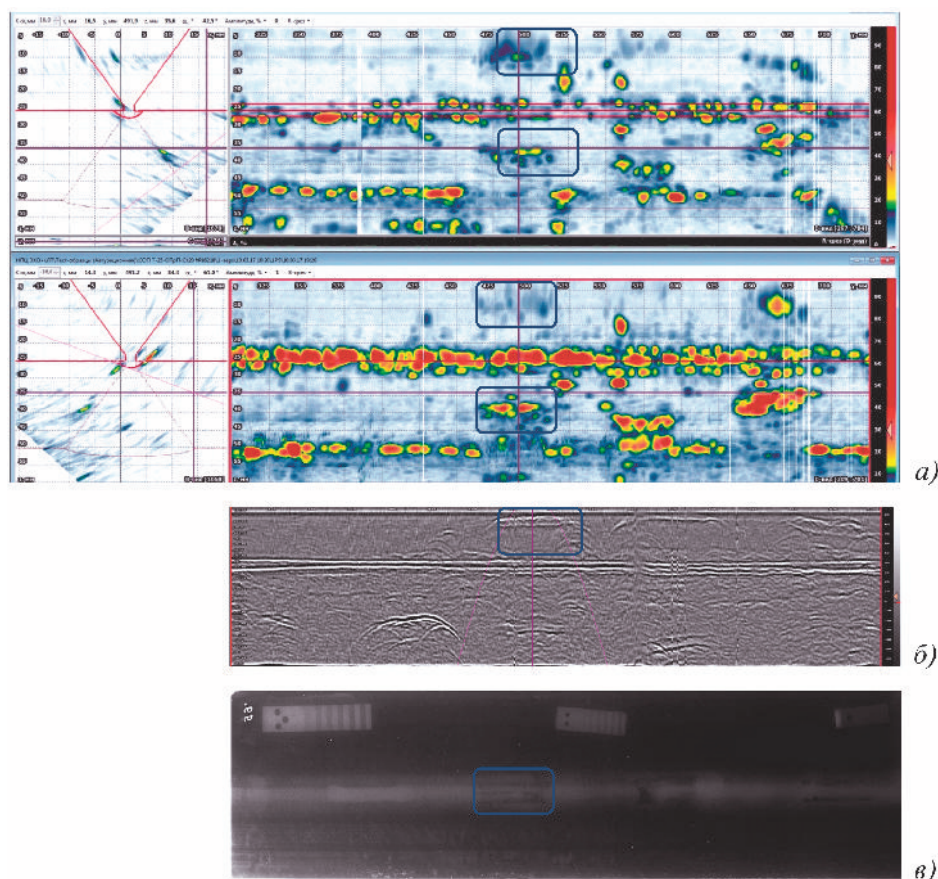


Рис. 5. Изображения межваликовых непроваров, полученное методом ФР с двух сторон от шва (а), TOFD (б) и рентгеновским методом (в): рамками обведены области, относящиеся к одному дефекту

($\varnothing 325 \times 12$) ультразвуковым контролем. По этому решению 100% радиографический контроль после монтажа заменяется на АУЗК по утвержденной методике [5]. Соединения имеют следующие основные характеристики: способ сварки – ручная аргодуговая; марка основного металла свариваемых труб – 08X18H10T; марка сварочных материалов – 04X19H11M3; номинальная толщина сварного соединения в зоне сварки – 17 – 19 мм, форма подготовки кромок – V-образная. По этому техническому решению сварные соединения трубопроводов системы расхолаживания бассейна выдержки, относящиеся к категориям Пв и Пс, контролируются по методике [5], относящейся к сварным соединениям более высокой категории I. АУЗК проводится автоматическим двухкоординатным сканированием одиночными преобразователями, данные в виде А-сканов записываются для последующей когерентной обработки на управляющий компьютер системы «АВГУР 5.2». Критерии оценки качества базируются только на амплитудных признаках, размерных критериев недопустимости дефектов не предусматривается. В случае получения положительных результатов АУЗК радиографический контроль не проводится, однако при обнаружении недопустимых дефектов решение о необходимости ремонта или допуска в эксплуатацию принимается по результатам радиографического контроля. При проведении ультразвукового контроля сварных соединений по этому решению недопустимых дефектов не выявлено, и все соединения были допущены в эксплуатацию.

Аналогичное техническое решение было принято по замене радиографического контроля ультразвуковым для трубопроводов компенсации давления, трубопроводов системы аварийного охлаждения зоны, аварийного и планового расхолаживания – аустенитных трубопроводов $\varnothing 159 \times 17$ мм, $\varnothing 219 \times 20$ мм, $\varnothing 133 \times 14$ мм, $\varnothing 245 \times 19$ мм, $\varnothing 273 \times 20$ мм и плакированных трубопроводов $\varnothing 351 \times 36$ мм, $\varnothing 426 \times 40$ мм. Для контроля указанных соединений категорий Па, Ша, Шв применялись ранее утвержденные методики [5, 6] на аналогичные объекты категории I и II. Порядок применения методов контроля в этом техническом решении совпадает с порядком, приведенным выше: проводится 100%-ный АУЗК с когерентной обработкой данных. Если результаты положительные, то радиографический контроль не проводится и соединение допускается в эксплуатацию; при обнаружении недопустимых дефектов при АУЗК выполняется радиографический контроль, и решение о допустимости дефектов принимается на основе результатов радиографиче-

ского контроля. При проведении АУЗК сварных соединений по этому решению недопустимых дефектов не выявлено и соединения были допущены в эксплуатацию.

Экспериментальное обоснование замены рентгеновского контроля сварных соединений роторов

При разработке методики АУЗК с дефектметрией для сварных соединений роторов [7] также решалась задача обоснования замены радиографического контроля. Для этого кроме прямого сопоставления результатов двух видов контроля использовалось математическое моделирование [8] и разрушающий контроль с металлографическими исследованиями областей, в которых методом АУЗК были обнаружены и образмерены различные типы несплошностей.

Был выполнен АУЗК четырнадцати сварных соединений роторов. По семи сварным соединениям контроль проводился на максимальной чувствительности, ограниченной уровнем шумов, по другим семи – при заданной чувствительности браковочного уровня $S_{\text{брак}} = 30 \text{ мм}^2$. На рис. 6 приведены изображения участка сварного соединения одного из роторов на предельной чувствительности контроля. Во всех случаях на графике в больших количествах присутствовали четкие изображения точечных несплошностей эквивалентным размером $S_s = 1,0 - 1,5 \text{ мм}^2$. В дополнение к данным моделирования это подтверждает, что чувствительность контроля с запасом обеспечивает требуемый по ОСТ 108.129.13–81 [9] уровень фиксации $\varnothing 2$ мм ($S_s = 3 \text{ мм}^2$) для точечных дефектов.

Для определения характера возможных дефектов были рассмотрены результаты радиографического, ручного ультразвукового и капиллярного видов контроля. Для подтверждения полноты выявления дефектов по методике АУЗК с дефектметрией в местах с дефектами максимального размера были вырезаны шесть кернов из сварных соединений, в том числе один – в месте расположения единственного поперечного дефекта. Два керна были дополнительно проконтролированы радиографическим и ультразвуковым методами, подтвердившими наличие крупных недопустимых дефектов – трещины глубиной 140 мм и несплошности с размерами 20×3 мм (рис. 8, а). По другим четырем кернам (№ 1 – 4) было выполнено сравнение результатов АУЗК с дефектметрией и результатов металлографии, радиографического контроля, ультразвукового контроля и капиллярного контроля.

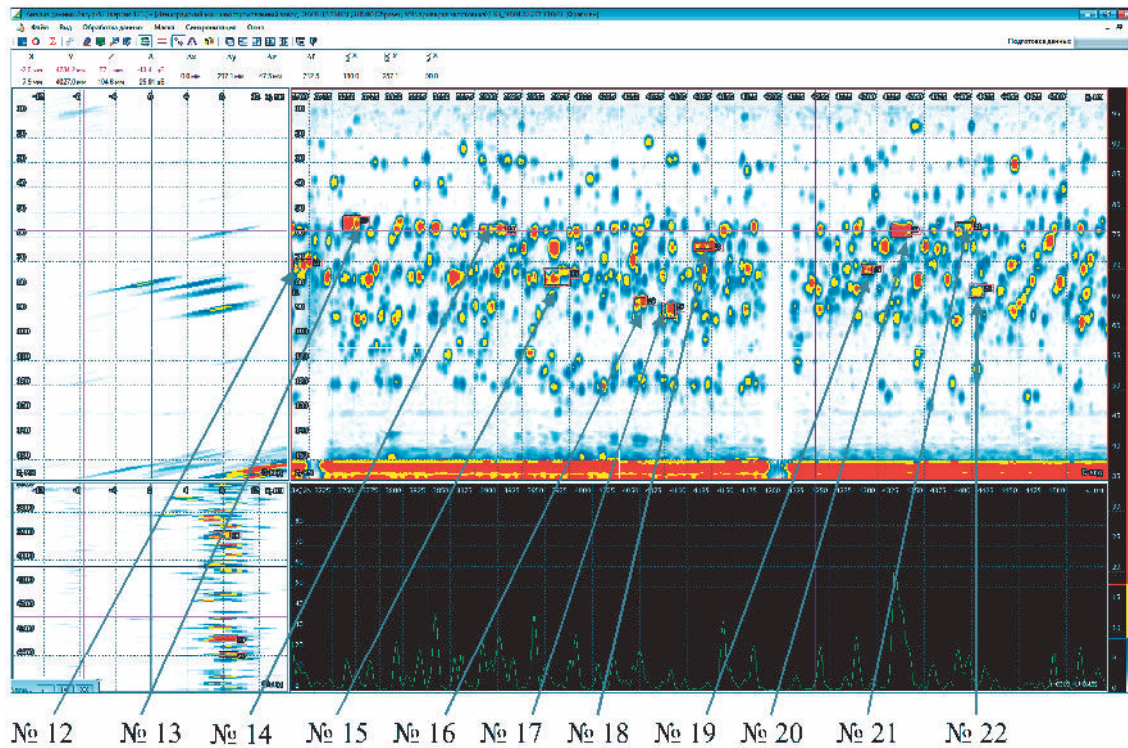


Рис. 6. Изображения участка сварного соединения № 3 ротора К-1200 от $Y = 3700$ мм до $Y = 4600$ мм на предельной чувствительности контроля:
показаны номера протяженных несплошностей, зафиксированных на данном участке сварного соединения

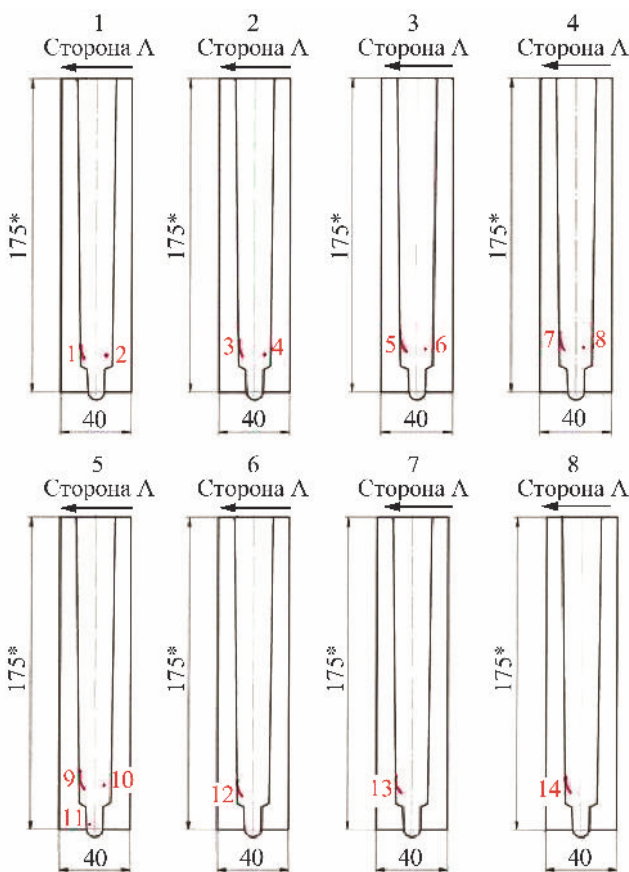


Рис. 7. Положения несплошностей на первых восьми шлифах керна № 1

Всего при металлографических исследованиях было выполнено (рис. 7):

- керна № 1 – 13 шлифов с шагом 0,5 мм или 20 % протяженности керна вдоль шва;
- керна № 2 – 22 шлифов с шагом 0,5 мм или 33 % протяженности керна вдоль шва;
- керна № 3 и 4 – выполнены шлифы на торцах.

Результаты сравнения, приведенные в ОСТе [10], показывают следующее (см. рис. 8, б, в):

- по кернам № 1, 2: по данным металлографии подтверждены три выявленных дефекта с эквивалентным диаметром более 3,0 мм;
- у попавших в шлифы керна № 1, 2: четыре дефекта с эквивалентным диаметром 2,0 – 3,0 мм, также отмечается наличие индикаций в районе их расположения по данным АУЗК;
- по кернам № 3, 4: по данным ультразвукового и радиографического контроля металла керна имеются индикации, подтверждающие наличие двух крупных дефектов $S_3 = 33 \text{ мм}^2$ и $S_4 = 20 \text{ мм}^2$, выявленных по результатам АУЗК;
- кроме указанных дефектов, по всем кернам по результатам АУЗК выявлено еще 16 дефектов с эквивалентным диаметром отражателя более 2,0, но менее 3,5 мм, в восьми случаях есть соответствие индикаций на данных ультразвукового или радиографического контроля металла керна.

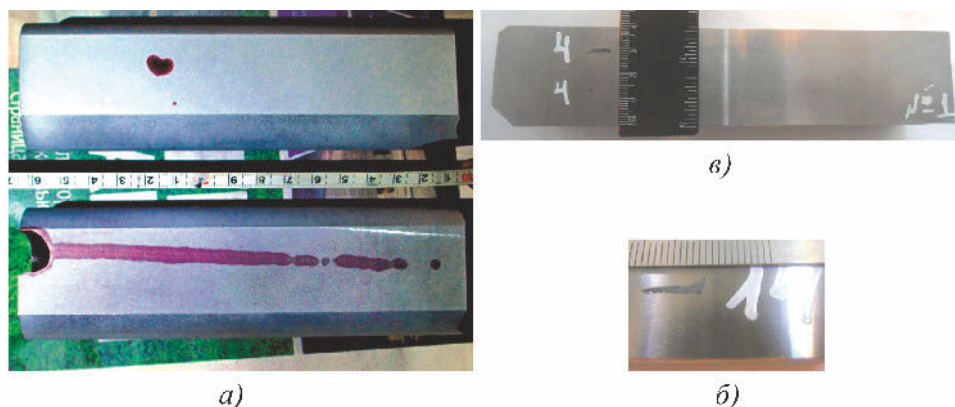


Рис. 8. Положения дефектов по первым шлифам зерна № 1 (а) и фотографии первого (б) и восьмого (в) шлифов зерна № 1

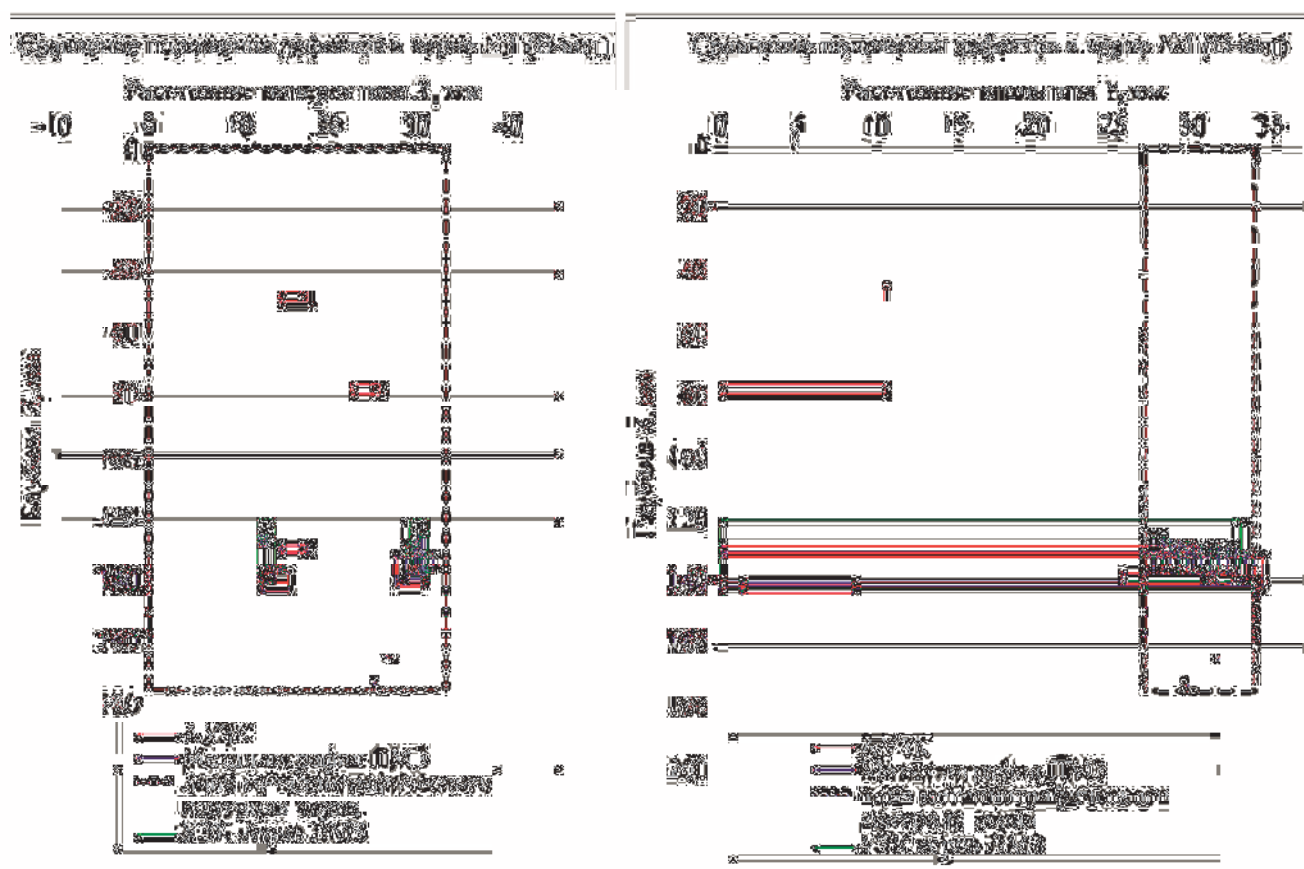


Рис. 9. Сопоставление положения и контуров дефектов по результатам контроля и металлографических исследований зерна № 1

На рис. 9 в графическом виде приведено сопоставление положения и контуров дефектов по результатам контроля и металлографических исследований зерна № 1, а на рис. 10 – В-, С- и D-изображения несплошностей, полученные в результате АУЗК с дефектометрией на продольные дефекты слева (канал 1NS) и справа (канал 1PS) от оси шва в районе зерна № 1.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие важные выводы:

- радиографический контроль обеспечивает меньшую чувствительность, чем АУЗК с дефектометрией;
- подтверждено наличие всех выявленных методом АУЗК несплошностей (не зафиксирована перебраковка);

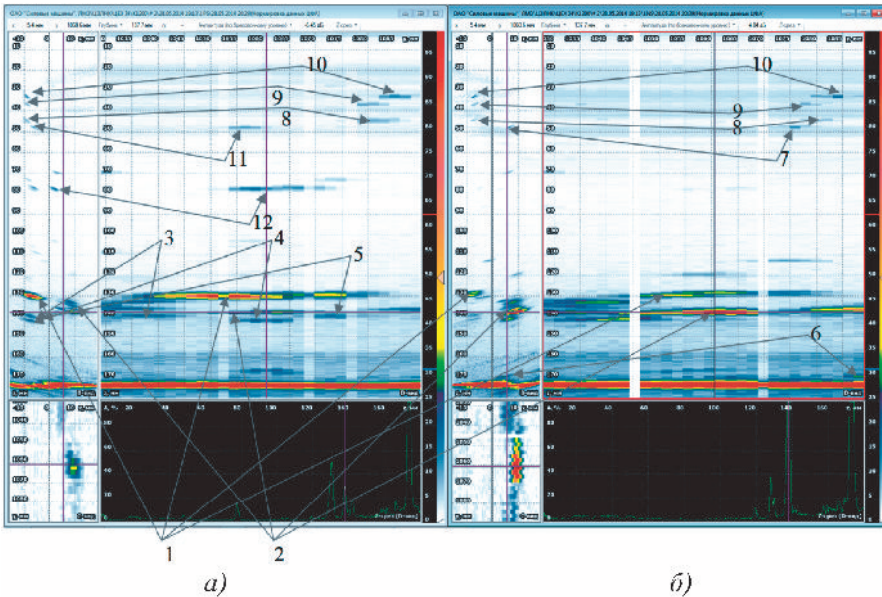


Рис. 10. Изображения дефектов по данным АУЗК в районе керна № 1:
а – канал IPS; *б* – канал INS; цифрами обозначены зафиксированные несплошности

- выявляются несплошности эквивалентной площадью менее 1 мм²;
- подтверждено наличие недопустимых дефектов: большой поперечной трещины и протяженного объемного дефекта;
- погрешность определения высоты методом АУЗК не превысила ±2 мм.

Контроль трубопровода Ду800

Модельные эксперименты по сравнению результатов УЗК и РГК проводились с образцом кольцевого шва трубопровода типа Ду800, харак-

терного для атомной энергетики, со сварным соединением, в котором было сделано семь искусственных отражателей. Трубопроводы Ду800 с толщиной стенки 38 мм изготавливают из стали Крезелсо-Луар 330Е (типа 22К) и плакируют нержавеющей сталью Х18Н10Т с номинальной толщиной 4 мм. Тип сварки контролируемых сварных соединений может быть ручной или автоматической электродуговой. Контролируемые сварные соединения изготавливаются с внешним и внутренним валиками усиления, которые могут быть удалены заподлицо с основным металлом. На рис. 11 семь искусственных отражателей в образце схематически изображены линиями красного цвета. Отражатели

1 – 4 – это модели внутренних продольных трещин высотой около 5 мм и длиной от 32 и до 36 мм, отражатель 6 – это модель внутренней поперечной трещины высотой 5 мм и длиной 20 мм, отражатель 5 – это модель трещины высотой около 7 мм, выходящей на нижнюю поверхность образца, а отражатель 7 – это сверление диаметром 3 мм на глубину 7 мм от нижней поверхности образца. Отражатели с номерами 3 и 4 имеют наклон +20° и -14° к оси *z*. Трещины моделировались фрезерованными пазами шириной 1 мм. Сварное соединение на рис. 11 показано темным прямоугольником с градиентной заливкой.

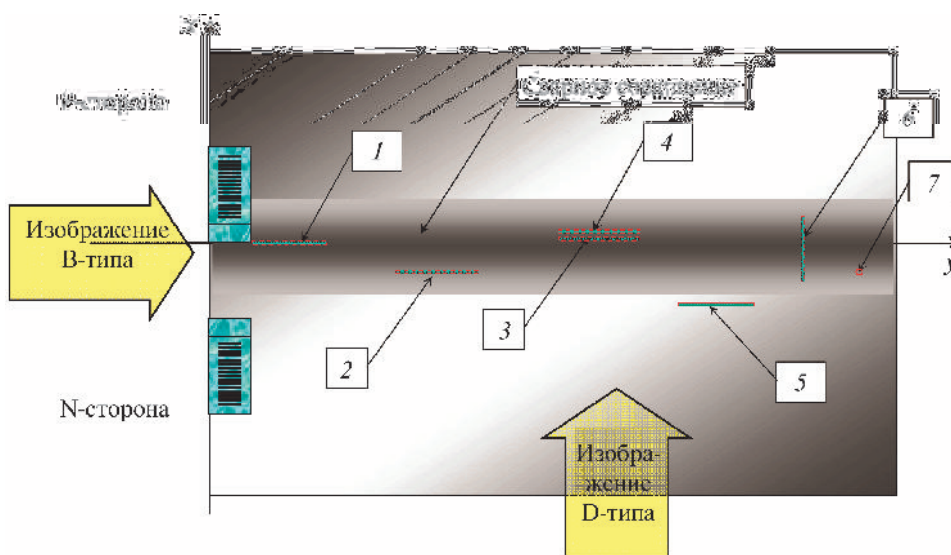


Рис. 11. Схема проведения измерений на образце кольцевого шва трубопровода Ду800:

ФР показаны в начале апертуры сканирования; фигурами красного цвета схематически показаны заложенные в образец модели дефектов; пунктирная линия означает, что отражатель не выходит на поверхности образца, а сплошная указывает, что отражатель выходит на дно образца

На рис. 12 показан результат рентгеновского контроля с применением цифрового матричного детектора и свернутое по максимуму изображение С-типа в черно-белой палитре при объединении как среднего ЦФА-Х-изображений, восстановленных по акустической схеме TdT по N-, P- и NP-каналам, при использовании двух антенных решеток и 35-градусных призм. На рентгеновском изображении хорошо заметно плоскодонное отверстие (отражатель 7), а на ЦФА-Х-изображении уверенно обнаружить его блик не удается. И, наоборот, индикация

паза 1 уверенно видна на ультразвуковом изображении, а на рентгеновском малозаметна. На рентгеновском изображении хорошо видны незаложенные отражатели, отмеченные выносками «6?»», которые возникли при создании поперечного паза (отражатель б). На ЦФА-Х-изображении, которое было получено при использовании двух антенных решеток, индикации этих отражателей незаметны. На ЦФА-Х-изображении хорошо заметны индикации незаложенных отражателей, отмеченные выносками «?», которые в свою очередь на рентгеновском

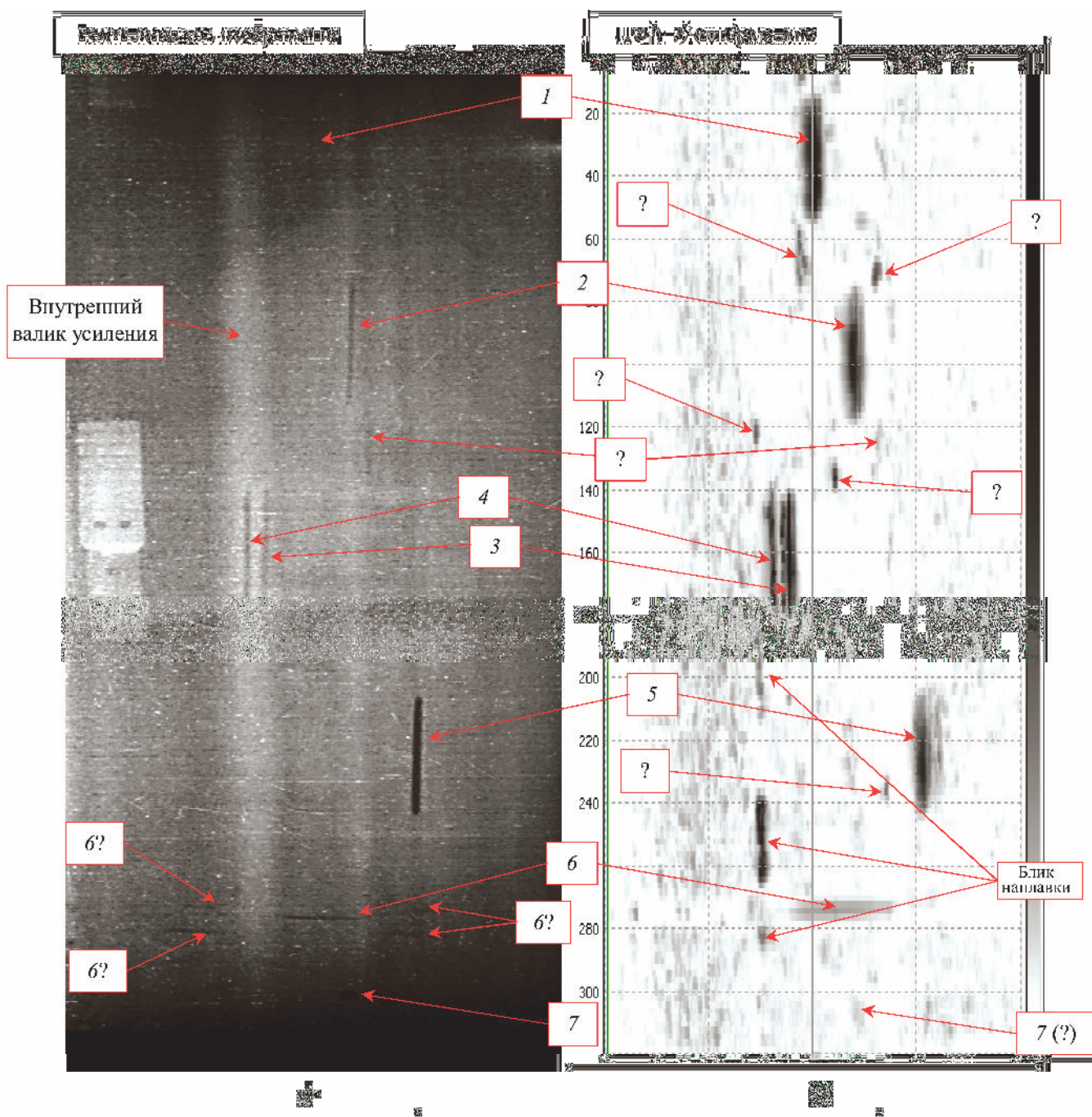


Рис. 12. Рентгенограмма всего образца (а) и свернутое по максимуму изображение С-типа, полученное как объединение по среднему на поперечной волне в режиме тройного сканирования (б)

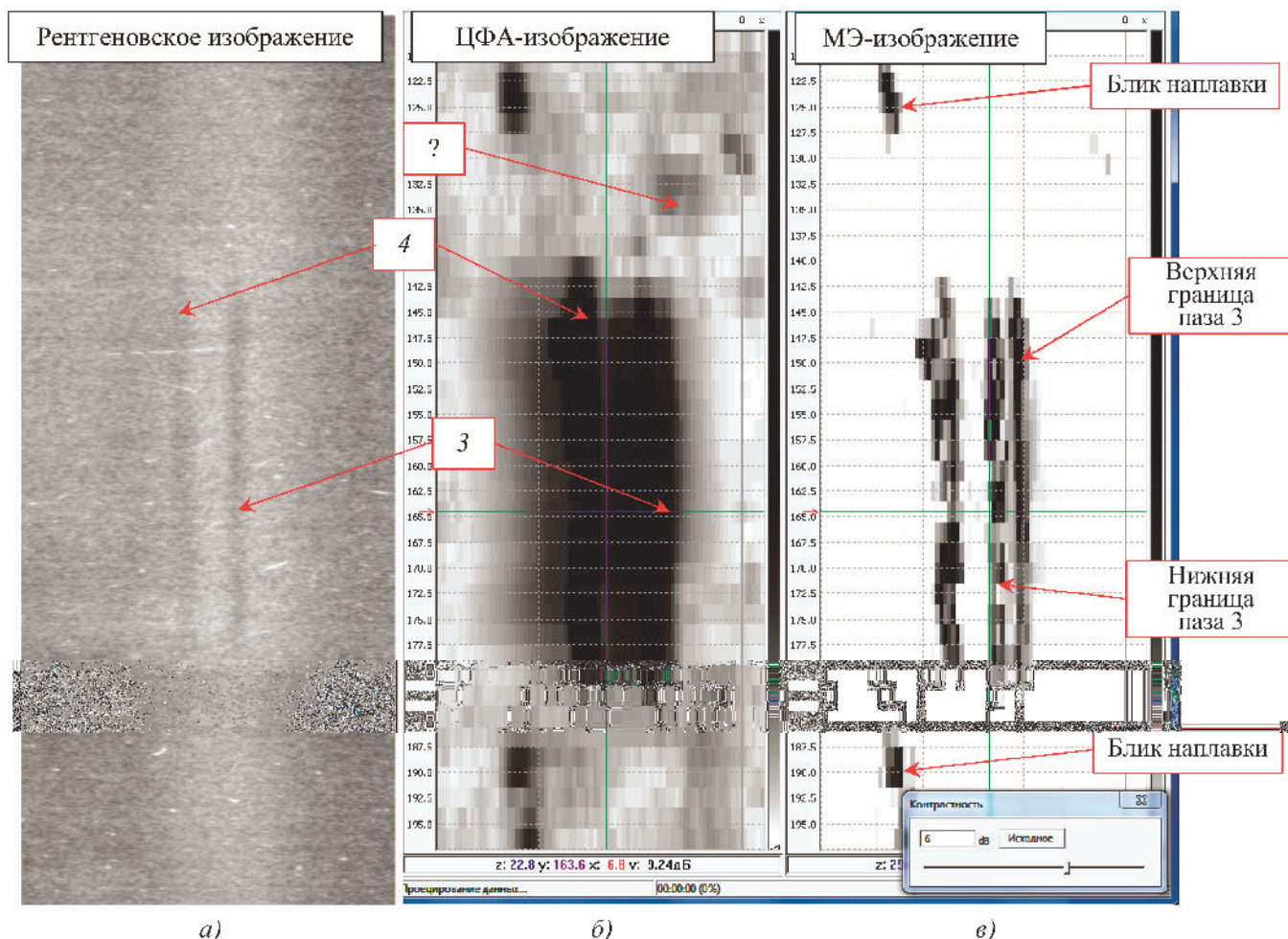


Рис. 13. Фрагмент рентгенограммы с пазами 3 и 4 (а), ЦФА-изображение С-типа (б), МЭ-изображение С-типа (в)

изображении не видны. Не следует забывать и о том, что изображения В-типа, восстановленные при ультразвуковом контроле, позволяют определять местонахождение отражателей и их размеры в плоскости xz .

Изображения отражателей для повышения его качества восстанавливались методом максимальной энтропии (МЭ) [11]. На рис. 13 показан фрагмент рентгенограммы с пазами 3 и 4 и приведено ЦФА-изображение С-типа, полученное как объединение по среднему изображений по трем каналам на поперечной волне. Изображения С-типа свернуты по максимуму, а их контрастность увеличена на 6 дБ. На изображениях, полученных по результатам ультразвукового контроля, трещиноподобные отражатели 3 и 4 существенно легче обнаружить, нежели на рентгеновском изображении. На МЭ-изображении можно уверенно различить верхнюю и нижнюю границы паза 3 с углом поворота 20° относительно оси z .

АУЗК вместо РГК при монтаже трубопроводов

Только в последние годы на основании имеющегося большого объема обосновывающего материала по применению АУЗК, а также богатого зарубежного опыта системы АУЗК серии «АВГУР» были использованы вместо РГК при строительстве:

- комплекса глубокой переработки нефти ОАО «ТАИФ-НК» (г. Нижнекамск) в 2015 – 2016 годы;
- комплекса гидрокрекинга на ПАО «Орскнефтеоргсинтез» (г. Орск) в 2017 году;
- комплексной установки переработки нефти «Евро+» на Московском нефтеперерабатывающем заводе в 2018 году;
- площадки диагностических и очистных устройств берегового участка газопровода «Северный поток – 2» в 2019 году;
- энергоблоков АЭС в 2014 – 2019 годы.

Замена радиографического контроля на автоматизированный ультразвуковой контроль в стандартах ASME

ASME Code Case 2235-9 [1] описывает условия замены радиографии ультразвуковым контролем на сосудах, работающих под давлением, и энергетических котлах (Section I, para. PW-11; Section VIII, Division 1, para. UW-11(a); Section VIII, Division 2, Table AF-241.1; and Section XII, TE-230.1) на сварных соединениях с диапазоном толщин от 13 до 300 мм. Там описываются все условия замены радиографического контроля автоматизированным ультразвуковым контролем. Проведение контроля системами «АВГУР-Т» и «АВГУР-АРТ» удовлетворяет всем требованиям к АУЗК по данному документу. Для полного соответствия требованиям данного стандарта необходим контрольный образец, выполненный согласно п. (с) ASME Code Case 2235-9.

Возможность замены радиографии ультразвуковым контролем указана в п. UW-11.a.7 ASME Section VIII Division 1 (сосуды, работающие под давлением) [12] для контроля замыкающего шва сосуда, если конструкция сосуда не позволяет выполнить радиографию этого шва. В п. UW-51.3.b разрешается использовать ультразвуковой контроль как альтернативный способ приемки отремонтированных сварных соединений. Однако для такой замены предписано отдельно согласовывать такую замену с заказчиком.

Еще один пример замены радиографического контроля на ультразвуковой контроль – стандарт ASME Section VIII, Division 2 [13] (этот стандарт применяется для сосудов, работающих под давлением, установленных вблизи рабочих мест персонала), п. 7.5.5 содержит условия, при которых возможна замена радиографического контроля на АУЗК. Требования п. 7.5.5 соответствуют требованиям упомянутого ASME Case 2235-9, а критерии допустимости несплошностей в этих нормативах полностью идентичны.

Выводы

Практические приложения унифицированной методологии УЗК с дефектметрией сварных соединений открывают новые возможности применения УЗК вместо радиографического контроля. В случае применения методов АУЗК с дефектметрией по изображениям, полученным когерентными методами обработки, сравнение по направлениям информативности, возможности визуализации и долговременности хранения результатов, безусловно, в пользу АУЗК с дефектметрией. Результаты сравнения двух методов в вопросах выявления опасных дефектов и точности определения их параметров для многих актуальных производственных задач доказывают обоснованность замены радиографического контроля на АУЗК с дефектметрией.

Библиографический список

1. ASME Case 2235-9. Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography Section I; Section VIII, Divisions 1 and 2; and Section XII of October 11, 2005.
2. BS EN ISO 17635:2010. Non-destructive testing of welds – General rules for metallic materials, 2010.
3. Бадалян В. Г., Вовилкин А. Х. Рентгенография или ультразвук – что лучше? // Ультразвуковая дефектметрия, 25 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М. – СПб.: СВЕН, 2015. С. 26 – 32.
4. Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Гурьева Т. М., Кокколев С. А. Использование ультразвуковых дефектоскопов с фазированной антенной решеткой для регистрации эхосигналов с целью восстановления изображения отражателей методом проекции в спектральном пространстве // Дефектоскопия. 2014. № 6. С. 3 – 15.
5. Методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых аустенитных сварных соединений трубопроводов впрыска $\varnothing 226 \times 19$, $\varnothing 219 \times 19$ и трубопроводов сброса $\varnothing 245 \times 18$, $\varnothing 219 \times 17$, $\varnothing 273 \times 17$ КД реакторов ВВЭР-1000 с применением системы «АВГУР 5.2». МА5-АЭ1-Т2М/2-К-07 / АО «Концерн «Росэнергоатом». М., 2007.
6. Методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений дыхательных трубопроводов $\varnothing 426 \times 40$ компенсатора давления реакторов ВВЭР-1000 с применением системы «АВГУР 5.2». МА5-АЭ1-Т0С/4-К-07 / АО «Концерн «Росэнергоатом». М., 2007.
7. Тихонов Д. С. Визуализация данных и автоматизация ультразвукового контроля для измерения несплошностей в сварных соединениях АЭС // Ультразвуковая дефектметрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 25 – 41.
8. Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Тихонов Д. С. Моделирование при разработке и аттестации методик УЗК // Ультразвуковая дефектметрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 137 – 152.
9. ОСТ 108.129.13–81. Роторы сварные паровых и газовых турбин. Контроль ультразвуковой. Оценка качества сварных швов по результатам контроля. М., 1981.
10. Сравнительный анализ эффективности ручного ультразвукового контроля, автоматизированного ультразвукового контроля и радиографического контроля сварных соединений роторов. Технический отчет № 2. ТО2-ЛМЗЦФА-2015 / ООО «НПЦ «ЭХО+». М., 2015. 43 с.
11. Базулин Е. Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 2. С. 235 – 254.
12. ASME Section VIII Division 1. The American Society of Mechanical Engineers – Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1, 2019.
13. ASME Section VIII Division 2. The American Society of Mechanical Engineers – Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII, Division 2, 2019.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ РУЧНОЙ ДЕФЕКТОСКОП НА ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТКАХ «АВГУР-АРТ²⁰²⁰»



А. Е. Базулин,
канд. техн. наук,
гл. конструктор



А. Х. Вopilкин,
д-р техн. наук, проф.,
ген. директор



В. Л. Козлов,
зам. нач. отд. информ.
технологий



Д. С. Тихонов,
канд. техн. наук,
зам. ген. директора



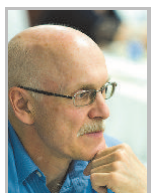
Г. В. Тишин,
нач. лаборатории электроники



С. В. Ромашкин,
канд. техн. наук,
нач. системно-методической
лаборатории



Е. А. Рубен,
ведущ. инженер-электроник
лаборатории электроники,



А. М. Штерн,
нач. отд. информ. технологий

За 30 лет работы ООО «НПЦ «ЭХО+» появилось шесть поколений автоматизированных систем ультразвукового контроля. Все эти системы объединяло решение задачи визуализации изображений дефектов и обеспечение измерения их параметров. Развитие вычислительной техники позволило все возможности «больших» автоматизированных систем реализовать в портативном исполнении. О самом новом поколении системы «АВГУР-АРТ» в ручном исполнении будет рассказано в этой статье.

Название «АВГУР» сопровождает наши системы вот уже 30 лет. За это время появилось шесть поколений автоматизированных систем ультразвукового контроля (АУЗК) [1, 2]. Все эти системы объединяло решение задачи визуализации изображений дефектов и обеспечения измерения их параметров. Эти разработки позволили ООО «НПЦ «ЭХО+» стать лидером в области автоматизированного ультразвукового контроля портативными системами. С развитием вычислительной техники все возможности «больших» автоматизированных систем удалось выполнить в портативном исполнении.

В 2020 году были созданы модификация ручного дефектоскопа «АВГУР-АРТ», реализующего технологии фазированных решеток, цифровой фокусировки антенны и TOFD. О возможностях, предоставляемых указанными технологиями, сказано немало [3, 4, 5, 6]. Важным является то обстоятельство, что все преимущества этих технологий проявляют себя лишь при обеспечении записи данных, синхронизированной с положением энкодера, т.е. в режиме механизированного ультразвукового контроля.

Поэтому, реализуя все необходимые функции прибора РУЗК (ручного УЗК), в первую очередь «АВГУР-АРТ²⁰²⁰» (общий вид представлен на рис. 1, пример при контроле в режиме ФР – на рис. 2) нацелен на решение задач МУЗК (механизированного УЗК) и АУЗК (автоматизированного УЗК) для любых отраслей промышленности.

Основные возможности

Варианты исполнения

«АВГУР-АРТ²⁰²⁰» – это первый отечественный ручной дефектоскоп на фазированных решетках с 32 и 64 независимыми каналами. О преимуществах при увеличении числа активных каналов от 16 до 32

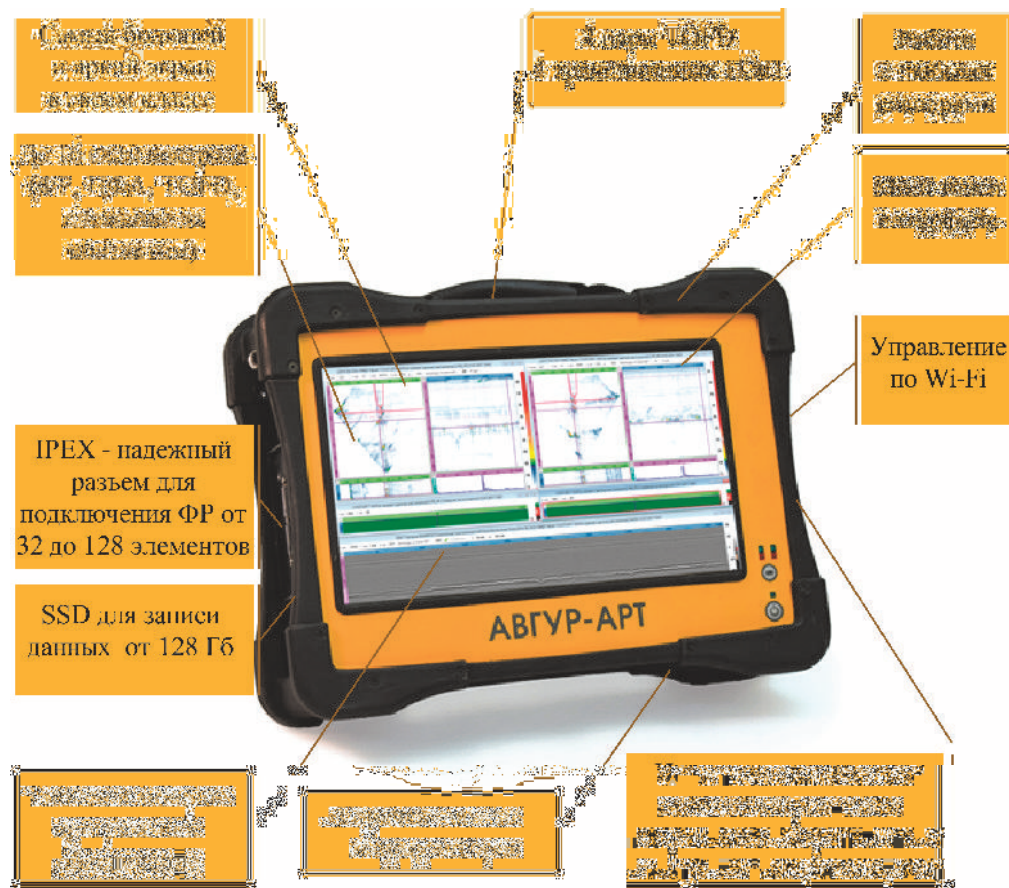


Рис. 1. Общий вид дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰» и его особенности

рассказывается в отдельной статье данного сборника [7]. Для обеспечения всех типовых и нестандартных задач УЗК дефектоскоп поставляется в конфигурациях, указанных в таблице ниже. Обо-

значение конфигурации каналов ФР соответствует указанию числа одновременно активных каналов и общего числа каналов. Следует отметить, что и в конфигурации с коммутатором, когда число

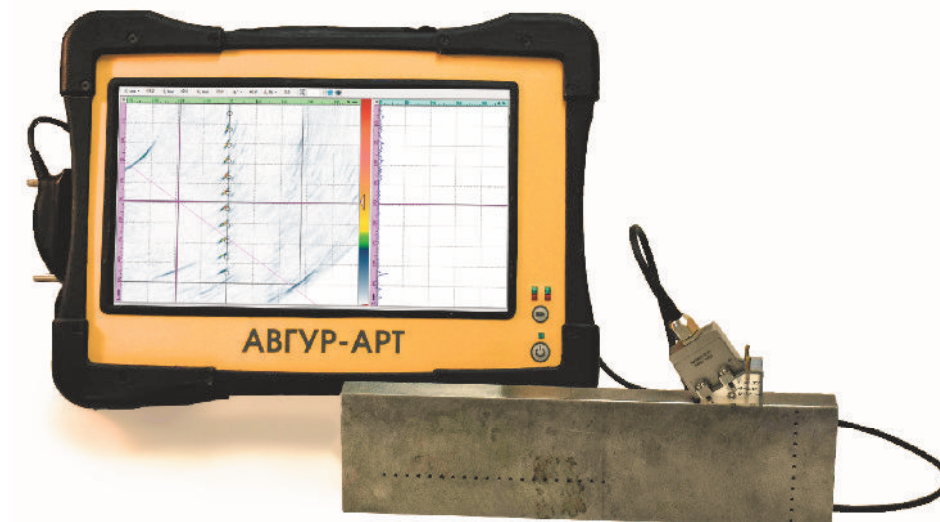


Рис. 2. Изображение экрана дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰» в режиме ФР. Группа боковых цилиндрических отверстий в образце, расположенных вдоль вертикальной оси

**Варианты конфигурации дефектоскопа
«АВГУР-АРТ²⁰²⁰»**

| Конфигурация каналов ФР | Артикул |
|-------------------------|----------|
| 32×32 + TOFDx2 | D0190005 |
| 32×64 + TOFDx2 | D0190006 |
| 64×64+ TOFDx2 | D0190007 |
| 32×128 + TOFDx2 | D0190008 |
| 64×128 + TOFDx2 | D0190009 |
| Только TOFDx2 | D0190010 |

активных каналов менее общего числа каналов (например, 32×64), запатентованная технология [8] позволяет полноценно использовать антенные решетки с числом каналов, большим, чем число активных каналов (например, 64), как в режиме ЦФА, так и в режиме ФР.

Как указано в таблице, в любую из указанных конфигураций может быть добавлен контроль традиционными ПЭП (4 канала) или методом TOFD (2 пары каналов). Дефектоскоп выпускается также в чисто TOFD-комплектации, реализуя сбор данных по двум каналам TOFD. При этом в дефектоскоп встроены модуль управления сканером на магнитных колесах типа «ПАУК», что дает возможность выполнять контроль в механизированном режиме и в случае необходимости сократить бригаду контролеров МУЗК до одного человека.

Особенности дефектоскопа

Рассмотрим отличительные особенности дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰».

Конструкция и технологии

Наличие большого (до 13") экрана позволяет детально анализировать данные контроля на месте, не удаляясь от объекта, используя множество каналов для сбора данных. Быстродействие и емкость памяти дефектоскопа позволяют решать любые задачи ручного, механизированного и автоматизированного ультразвукового контроля. Скорость получения данных до 200 Мб/с, размер сохраняемого файла данных не менее 15 Гб.

Поддержка трехосевого энкодера позволяет решать как простые задачи при сканировании вдоль сварного шва по одной линии, так и строить карты дефектов, карты толщины при двухкоординатном сканировании. А если сканер поддерживает и третью координату (например, поворот пьезопреобразователя по азимуту), то можно получать максимально полную картину состояния объекта контроля.

При подключении по Ethernet модуля автоматизированного визуального контроля АВИК программное обеспечение дефектоскопа поддерживает измерение наружных геометрических параметров кольцевых, угловых, тавровых, нахлесточных сварных соединений по отдельному каналу сбора данных [9]. При подключении видеокамеры также по Ethernet обеспечивается совмещение записи данных УЗК с видеоизображением.

Поскольку дефектоскоп работает на основе промышленного одноплатного компьютера под управлением операционной системы Windows 10, фактически он служит гибко настраиваемым цифровым комбайном для решения задач НК.

Программное обеспечение

Программное обеспечение дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰» построено вокруг базы данных, которую ООО «НПЦ «ЭХО+» создает уже более 15 лет.

База данных содержит:

- оборудование (преобразователи, призмы, сканирующие устройства);
- методики контроля;
- эскизы объектов контроля;
- изображения дефектных и бездефектных объектов контроля;
- отраслевые нормы оценки качества.

Дефектоскоп поставляется с базой данных, наполненной записями с параметрами фазированных решеток, призм, сканеров наиболее широко известных производителей.

В базу данных по заявке заказчика также могут быть включены учебные примеры, показывающие изображения типовых дефектов – непровары, трещины, шлаковые включения, коррозионный износ для методов контроля ФР, ЦФА, TOFD. Подобный пример с изображением непровара, полученным по трем различным каналам, приведен на рис. 3.

Пепровар по кромке на глубине 7 мм, угол разделки 8°

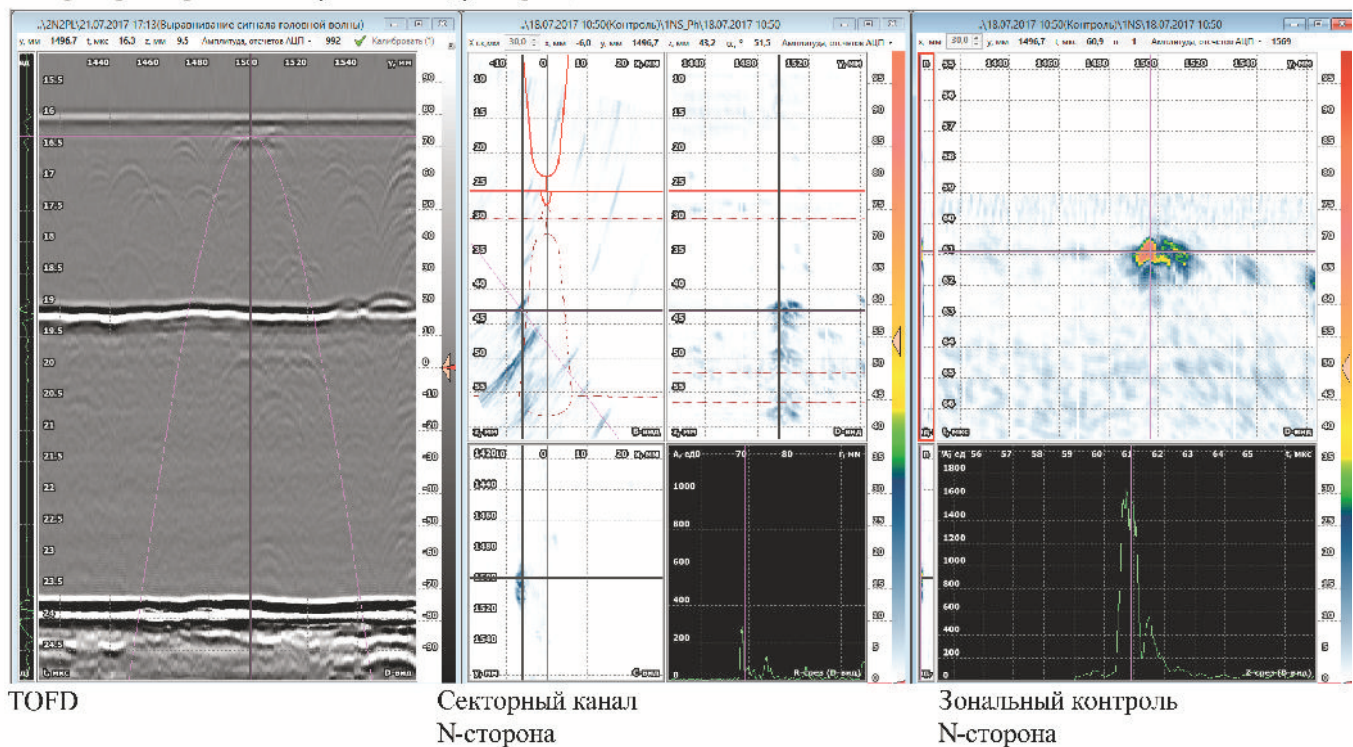


Рис. 3. Пример фрагмента базы данных «АВГУР» с изображениями реального дефекта

Программное обеспечение дефектоскопа «АВГУР-АРТ» поддерживает работу с фактически неограниченным набором логических каналов (групп) сбора данных и программных стробов, что позволяет гибко реализовывать всевозможные технологии контроля (рис. 4):

- секторное, линейное, комбинированное сканирование;
- зональная фокусировка и представление в виде диаграммы strip-chart;
- слежение за акустическим контактом по совмещенным и разделным каналам;
- контроль и толщинометрия в иммерсионном или псевдоиммерсионном режиме (рис. 5).

Для расчета схемы контроля создается эскиз сварного соединения с указанием его типа (кольцевое, угловое, тавровое, нахлесточное), параметров разделки, наличия разнотолщинности, конусных переходов и фасок (рис. 6). Поддерживается задание параметров сварных швов в соответствии с документами:

- ГОСТ 16037–80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры;

- СТО Газпром 2-2.2-136–2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. Часть I;

- ОСТ 5P.9673–94. Соединения сварные из стали типа АК. Основные положения. Часть 1. Типовой технологический процесс.

Для задания нестандартных объектов контроля применяется универсальная программа «Редактор эскизов». Примеры объектов контроля, созданные с помощью этой программы, приведены на рис. 7. На эскизы объекта в соответствующих сечениях накладывается изображение, полученное при контроле. На этой же схеме отображаются фазированные решетки и традиционные датчики, визуализируется как ход лучей для выбранной схемы контроля, так и приближенно рассчитываемые амплитуды полей излучения/приема по различным схемам контроля (рис. 8). Пользуясь предоставляемыми расчетами, разработчик методики выбирает наиболее подходящие схемы контроля для данного объекта.

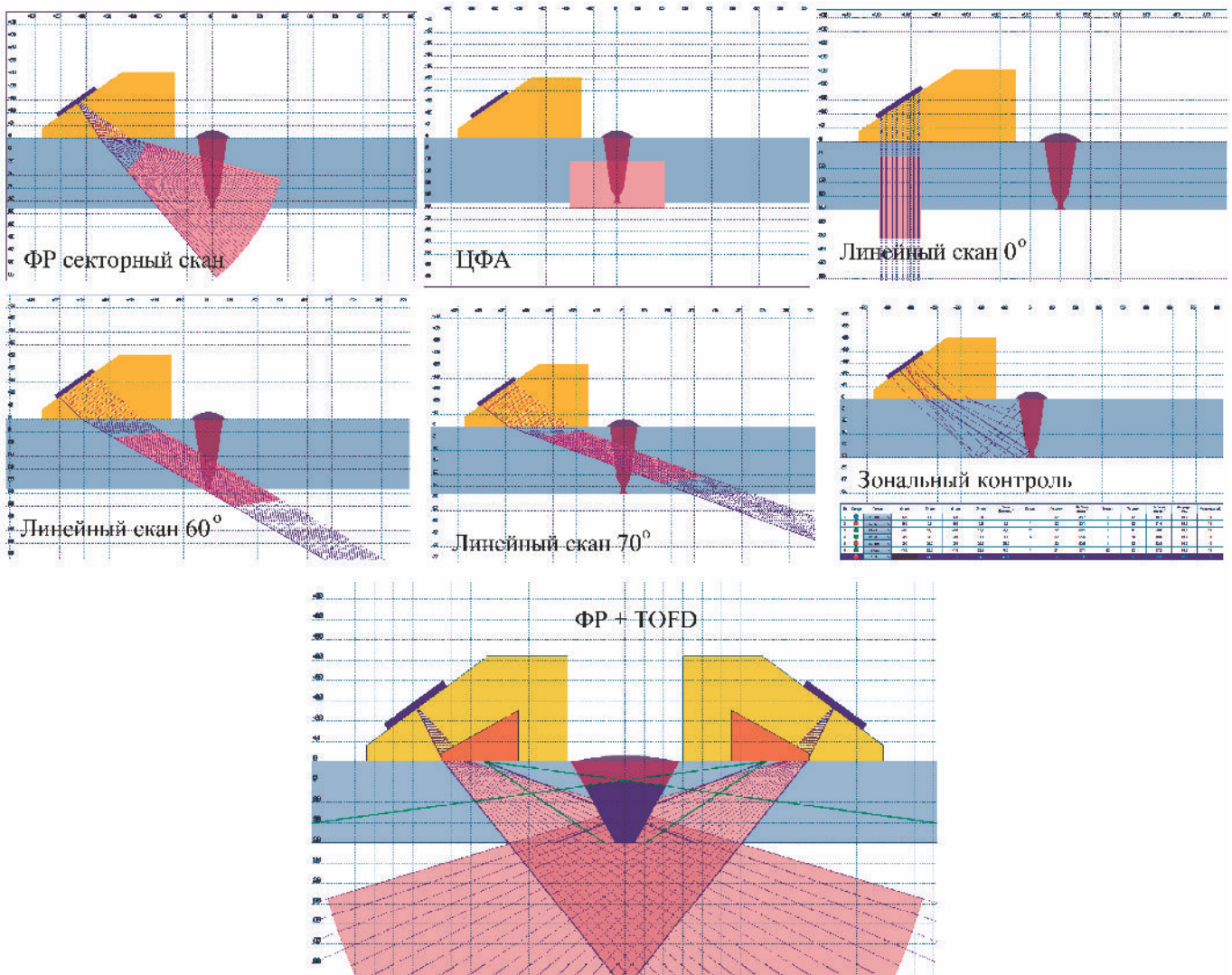


Рис. 4. Примеры расчетов схемы контроля

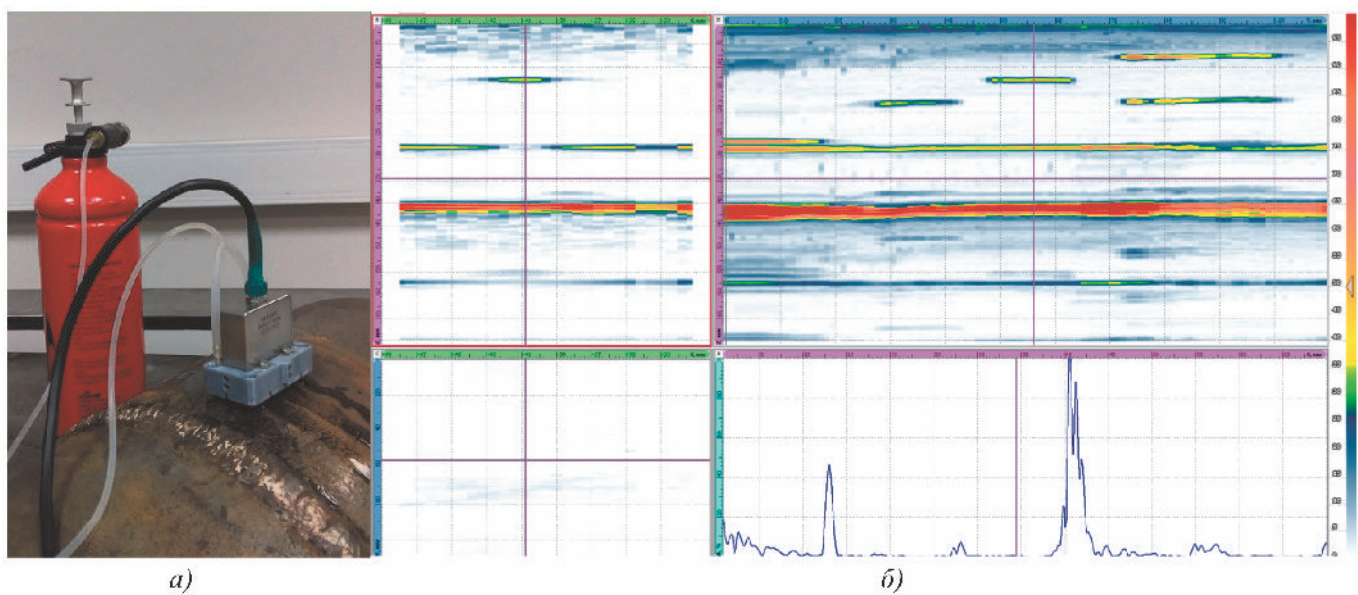


Рис. 5. Обойма для проведения толщинометрии с применением дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰» с локальной иммерсионной ванной (а) и результаты измерений на образце с имитацией коррозионного износа (б)

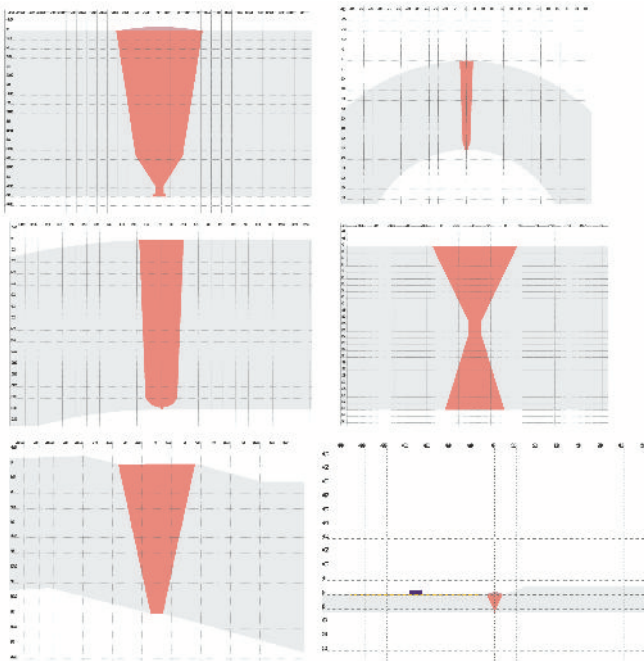


Рис. 6. Примеры задания параметров объекта контроля (различные параметры швов)

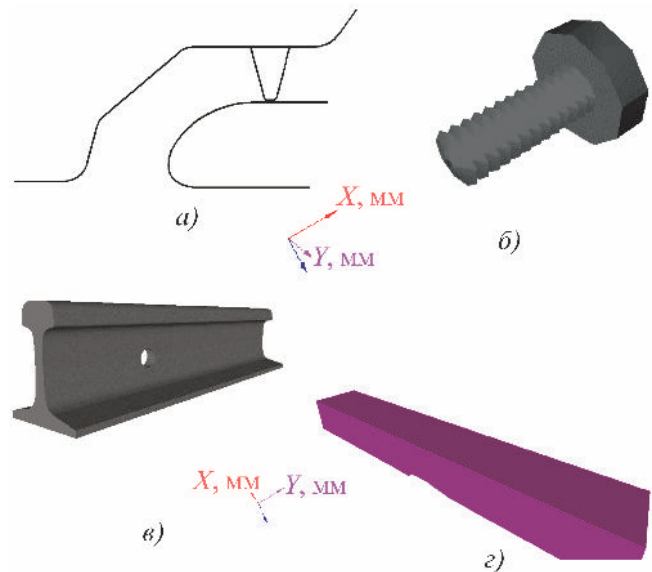


Рис. 7. Примеры задания нестандартных объектов контроля:

a – сварное соединение с «карманом»; *б* – болт; *в* – рельс с болтовым отверстием; *г* – настроечный образец с проточкой

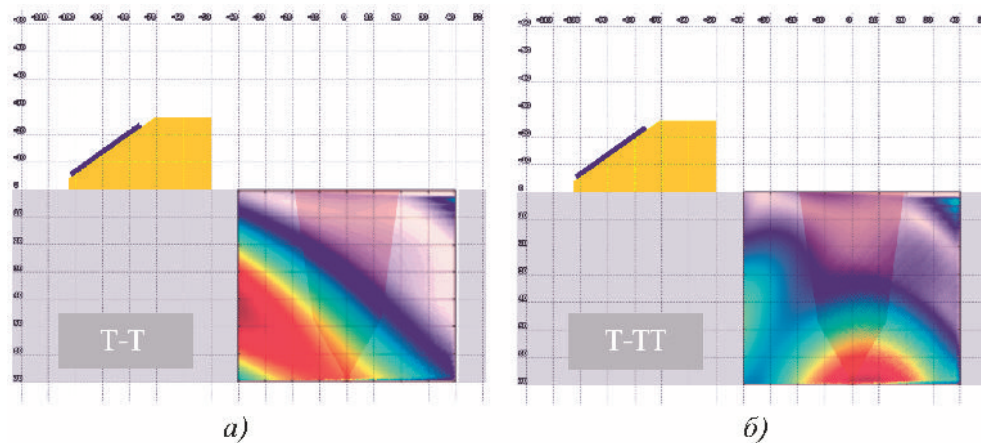


Рис. 8. Примеры расчетов поля для разных схем контроля ЦФА:

a – схема Т-Т на прямом луче; *б* – схема Т-ТТ с отражением от донной поверхности для выявления вертикально ориентированных дефектов

Расчет схем контроля среди прочих поддерживает и контроль с применением матриц, раздельно-совмещенных преобразователей ФР, что особенно важно при контроле на больших коэффициентах усиления, при контроле сварных соединений из аустенитных материалов. На рис. 9 показан пример существенного увеличения отношения сигнал/шум за счет применения двух ФР по 32 элемента в каждой, подключенных по раздельной схеме в сравнении с применением одной ФР с 32 элементами, но работающей по традиционной совмещенной схеме. Проводился контроль сварного соединения толщиной 40 мм.

В плане автоматизации и документирования соответствия установленным процедурам в дефектоскопе «АВГУР-АРТ²⁰²⁰» реализованы функции автоматического или полуавтоматического:

- поэлементной проверки каналов дефектоскопа;
- поэлементной проверки пьезоэлементов фазированной решетки, в том числе проверки качества акустического контакта между ФР и призмой;
- калибровки фазированной решетки, установленной на призму;
- проверки качества собранных данных УЗК (наличие акустического контакта, пропуски данных).

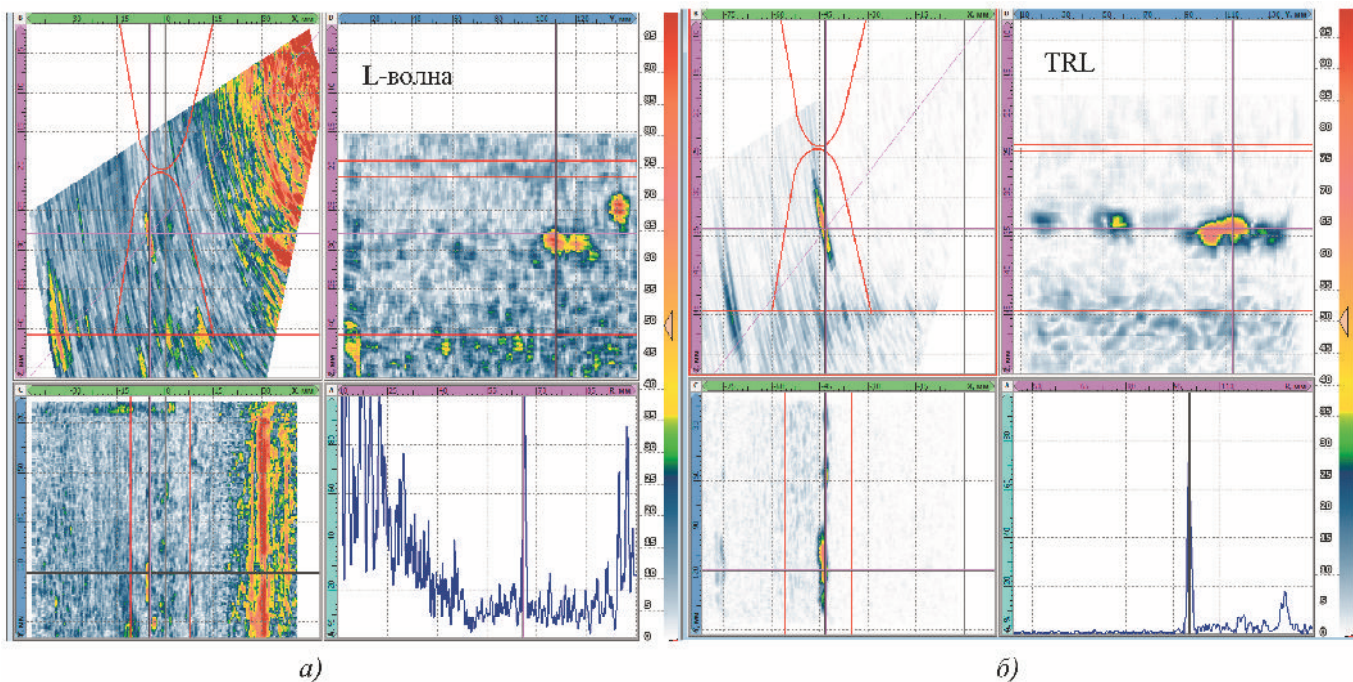


Рис. 9. Преимущество применения TRL-схемы для контроля аустенитных сварных швов:

a – применение ФР из 32 элементов на продольной волне; *б* – применение двух ФР по 32 элемента на продольной волне, подключенных по раздельной схеме

В процессе настройки и сбора данных возможны те или иные отклонения от наперед заданных параметров, зон сканирования и пр. Программное обеспечение «АВГУР» позволяет выполнять такие отклонения, но автоматически документирует их в привязке к данным контроля, давая специалисту II или III уровня проанализировать наличие таких отклонений и принять окончательное решение о соответствии полученных настроек и данных контроля исходным требованиям.

Программа «АВГУР-Анализ» входит в пакет программного обеспечения дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰» и устанавливается непосредственно на одноплатный компьютер под управлением Windows. При подключении «мыши» дефектоскоп становится рабочим местом для расшифровки данных УЗК с применением всех необходимых и требуемых стандартами документов. На рис. 10 показаны виды представления данных контроля при анализе.

Уникальные особенности

Тридцатилетний опыт разработчиков систем автоматизированного ультразвукового контроля положен в основу созданного дефектоскопа, его возможностей и программного обеспечения. Мы не оставляем нашего пользователя наедине со сложной техникой – обеспечиваем при поставке обучение

основам теории ФР и TOFD, практическим приемам при выполнении АУЗК и МУЗК, проводим тренинг по анализу данных контроля.

По согласованию с заказчиком в рамках обучения работе с прибором могут быть созданы эскизы сварных соединений, специфических для конкретного предприятия или отрасли, типовые конфигурации для контроля. Обучение можно совместить с разработкой технологических карт контроля, каждой из которых будет соответствовать свой конфигурационный файл.

Совмещение электронного и механического сканирования с привязкой данных к системе координат объекта позволяет применять наиболее мощные методы трехмерной визуализации дефектов, такие как ЦФА-Х и ЦФА-ХУ. Для того чтобы выполнять сканирование с применением любого из множества сканеров, разработанных ООО «НПЦ «ЭХО+», достаточно подключить по интерфейсу USB внешний блок управления сканером.

Одной из сложностей при внедрении технологий ЦФА и ФР в различных отраслях промышленности в России является привязка норм оценки качества (уровень фиксации и браковочный уровень) к отражательной способности, определяемой по плоскостным отражателям. Стандартизованные методы выравнивания чувствительности

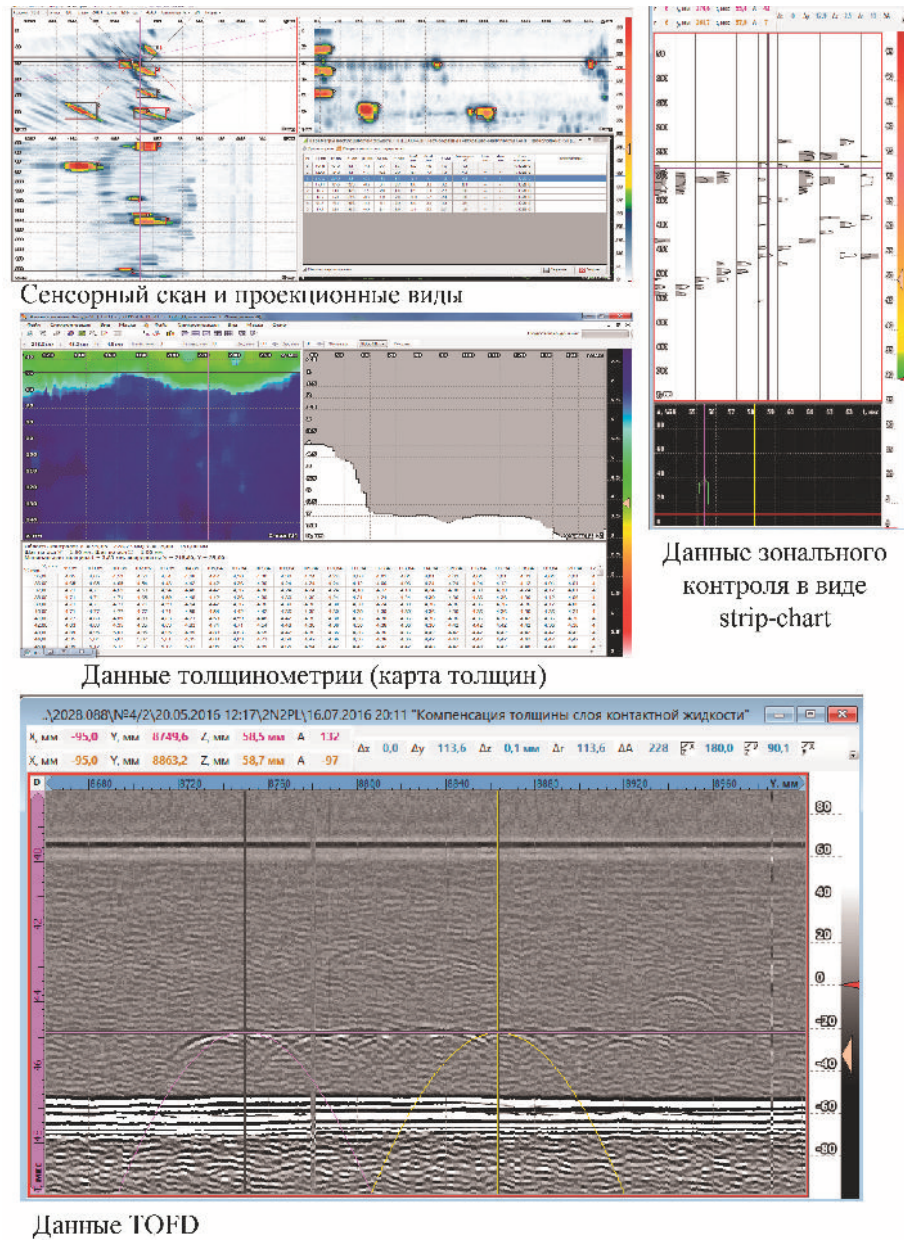


Рис. 10. Виды представления данных при анализе

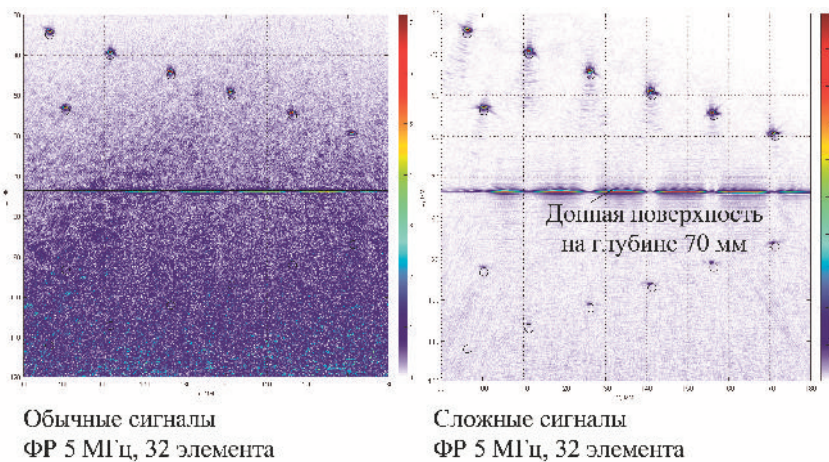


Рис. 11. Пример визуализации отверстий в образце СО-1, обладающем большим затуханием ультразвука. Применение фазоманипулированных сложных сигналов и обработки ЦФА

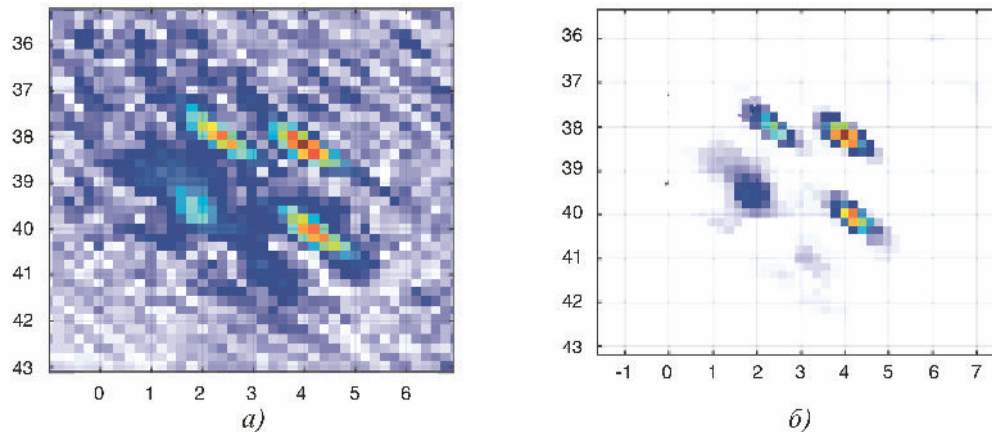


Рис. 12. Изображение четырех моделей объемных дефектов в алюминиевом образце на глубинах 38 – 40 мм: а – обычное изображение; б – CF-изображение

по боковым отверстиям оказываются неприменимы, поскольку законы ослабления эхосигналов для боковых отверстий и плоскодонных отражателей в зависимости от расстояния по лучу различаются [10].

Решить задачу оценки отражательной способности дефекта в терминах эквивалентной площади позволяет АРД-диаграмма. Расчет АРД-диаграмм для ФР-дефектоскопов затрудняется тем, что простые методы расчета, аналогичные расчету АРД-диаграмм для традиционных ПЭП, не принимают во внимание параметров фокусировки поля. Для решения этой задачи в ООО «НПЦ «ЭХО+»» разработан и внедрен алгоритм расчета АРД-диаграмм для произвольно заданной ФР, призмы и закона фокусировки. Для привязки чувствительности по образцу достаточно выбрать любой из доступных плоскодонных отражателей (диаметр, глубина, угол), вывести амплитуду от него на 80 % экрана и сообщить программе, какой именно отражатель выбран в качестве опорного.

Все дефектоскопы и системы серии «АВГУР» включают в свой состав многоканальный программируемый секвенсор. Применение сложных фазоманипулированных сигналов [11], что осуществляется за счет использования секвенсора и последующей математической обработки, позволяет повышать качество изображения при контроле материалов с высокими коэффициентами затухания ультразвука. На рис. 11 показан пример применения сложных фазоманипулированных сигналов для повышения качества изображений боковых отверстий в образце.

Для повышения качества изображения применяется также метод когерентного фактора (CF) [12]. На рис. 12 приведен пример повышения качества для CF-изображения для четырех боковых отвер-

стий диаметром 0,5 мм на глубинах 38 – 40 мм в алюминиевом образце.

Открытая архитектура программного обеспечения позволяет подключать для обработки данных, полученных дефектоскопом «АВГУР-АРТ», внешние модули. Таким образом, в ООО «НПЦ «ЭХО+»» ведутся научные разработки по освоению новых приложений УЗК: определение напряженно-деформированного состояния по данным ЦФА, решение коэффициентной задачи, учет анизотропных свойств материала объекта контроля и пр. За счет такой открытости сокращается путь от разработки нового алгоритма до его внедрения в работающей системе.

Особенности дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰»

Конструкция и технологии

- Большой (до 13,3", 1920×1080 пикселей) и яркий экран с сенсорной панелью
- Гибкость методологии: контроль ультразвуковыми фазированными решетками (до 16 схем контроля одновременно)
 - Быстрота: частота посылок по отдельному каналу до 20 кГц, частота обновления экрана определяется возможностями экрана (60 Гц)
 - Точность: работа в режиме ЦФА (при подключении внешнего управляющего компьютера – визуализация до 4 млн точек)
 - Универсальность: работа с любыми сканерами для ультразвукового контроля поддерживается до трех датчиков положения, что позволяет проводить контроль сварных соединений с двухкоординатным сканированием, а также построение карт толщины, карт дефектов с применением сложных сканеров

- Надежный IPЕХ-разъем для подключения фазированных решеток, разъем совместим со стандартными разъемами для подключения EASY LATCH (применяются в аппаратуре Olympus, Eddify)
- Скоростной USB 3.0 (скорость обмена до 200 Мб/с)
- Внутренний SSD-диск объемом от 128 Гб
- Управляемость: подключение по Wi-Fi
- Масштабируемость: интеграция с модулем автоматизированного визуально-измерительного контроля, видеокамерами, автоматизированными сканирующими устройствами (внешний блок управления сканером)
- Выносимость: работа от батарей (до 4 ч с двумя батареями) + «горячая» замена

Программное обеспечение

- Гибкое программное обеспечение для настройки, сбора и анализа данных механизированного и автоматизированного УЗК
- Поддержка линейного, секторного, комбинированного сканирования
- Калибровка антенных решеток на призме
- Работа в режиме зонального контроля
- Поддержка всех функций технологии TOFD
- Поддержка технологий TRL (Transmitter Receiver Longitudinal [13]) с фазированными решетками и DMA (Dual Matrix Array [14]) для контроля толстостенных изделий из аустенитных материалов
- Задание произвольного полосового частотного фильтра
- Режим слежения за акустическим контактом
- Построение карты коррозии с применением контактных и иммерсионных способов ввода ультразвуковой волны
- Неограниченное число стробов
- Мощная программа анализа данных контроля

Уникальность

- Применение сложных сигналов для контроля объектов с высоким затуханием ультразвука
- Применение обработки ЦФА-Х, ЦФА-ХУ для повышения разрешающей способности при контроле толстостенных объектов (при использовании сканеров)
- Использование технологии ФР-АРД для оценки эквивалентной отражающей способности несплошностей [15]
- Многосхемность (Multi-ЦФА) для решения задачи классификации выявляемых дефектов

- Методы повышения качества изображения – когерентный фактор
 - Поддержка разработчиков. Консультацию по применению оказывают разработчики дефектоскопа – признанные специалисты в области ультразвукового контроля
 - Функция удаленного управления дефектоскопом
 - База данных: оборудование, методики, учебные примеры
 - Открытая архитектура: подключаемые внешние модули для обработки данных

Характеристики дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰»

| | |
|--|------------------------|
| Количество независимых каналов ... | от 32 до 64 |
| Количество коммутируемых каналов | от 64 до 128 |
| Количество схем сбора данных, не менее | 16 |
| Количество законов фокусировки | 2048 |
| Максимальное количество точек в А-скане | 8192 |
| Рабочая полоса частот, МГц | от 0,4 до 25 |
| Частота посылок импульса возбуждения, кГц | до 20 |
| Масса с одной батареей (в зависимости от конфигурации), кг | от 4,5 до 6,5 |
| Время работы от двух батарей в конфигурации 32×64, ч | 4 (+ «горячая» замена) |

Результаты испытаний

Опытные образцы дефектоскопа были подвергнуты испытаниям на соответствие техническим условиям и типу средств измерений «АВГУР-АРТ».

Дефектоскоп соответствует требованиям стандартов и технических условий:

- ISO 18563-1:2015 Non-destructive testing – characterization and verification of ultrasonic phased array equipment. Part 1: Instruments.

- ASTM E 1961. Standard Practice for Mechanized Ultrasonic Testing of Girth Welds Using Zonal Discrimination with Focussed Search Units.

- Р Газпром 2-4.3-1166–2018. Сварка и неразрушающий контроль. Оборудование и материалы для подготовки, сборки и нагрева при выполнении сварочно-монтажных работ. Общие технические условия.

- ГОСТ 2020 50.05.13–2019. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Ультразвуковой контроль сварных соединений с применением технологии фазированных решеток. Порядок проведения.



Рис. 13. Климатические испытания

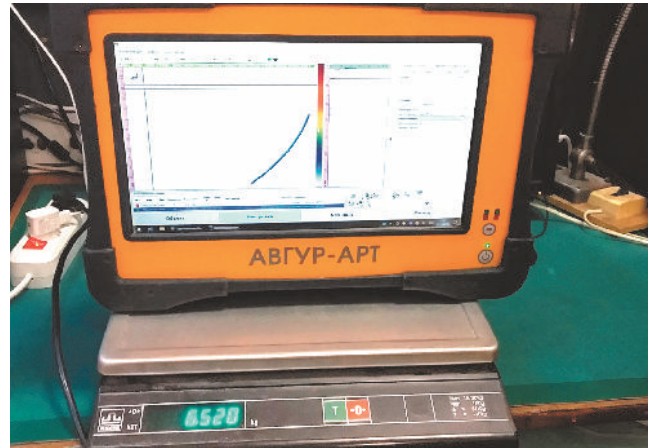


Рис. 14. Механические испытания

○ EN ISO 10863:2011. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковая дефектоскопия. Использование дифракционно-временного метода (TOFD).

Дефектоскоп подвергался климатическим испытаниям как в климокамере, так и фактически в

поле (рис. 13), прошел механические испытания и тесты (рис. 14), проверена работа в режиме контроля сварных швов с применением ФР и TOFD (рис. 15), сплошной толщинометрии (рис. 16) и подготовлен к проведению демонстрации и контролю в производственных условиях (рис. 17).



Рис. 15. Дефектоскоп со сканером для контроля сварных швов

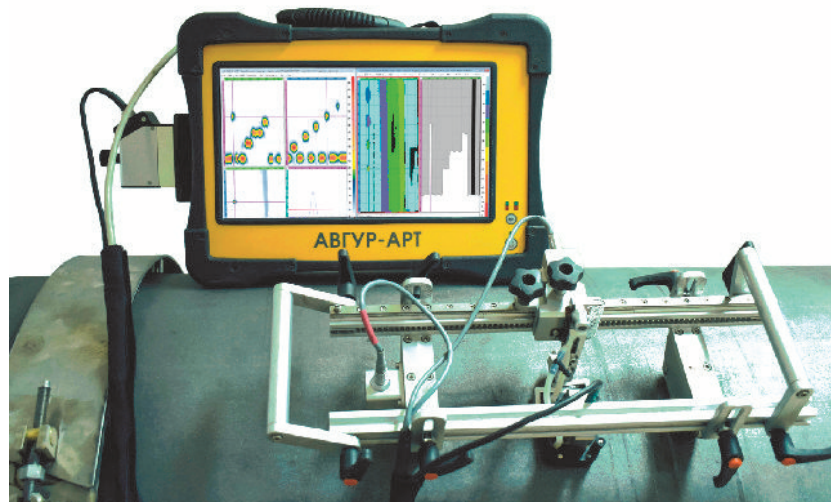


Рис. 16. Дефектоскоп со сканером для сплошной толщинометрии

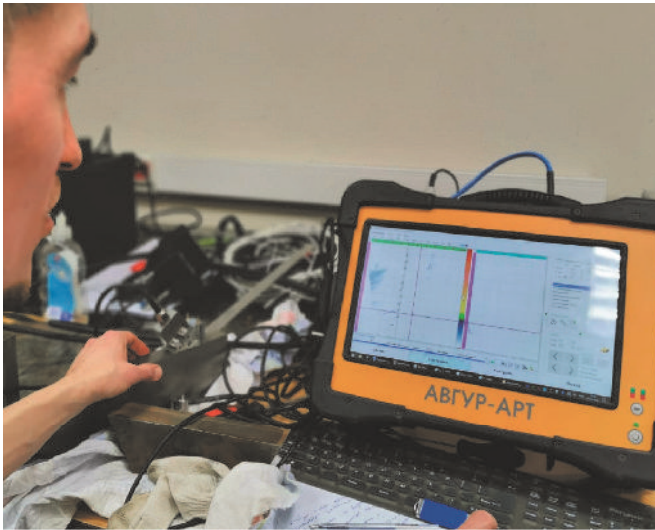


Рис. 17. Настройка дефектоскопа в лаборатории

Выводы

Разработан новый ручной ультразвуковой дефектоскоп «АВГУР-АРТ²⁰²⁰», реализующий все современные и востребованные наработки, такие как: технология фазированной решетки, метод цифровой фокусировки (TFM), дифракционно-временной метод TOFD, сплошная толщинометрия, объединенные с механизированным или автоматизированным сканированием.

Ранее разработанные методики контроля [1, 16] могут быть реализованы на базе нового дефектоскопа, обеспечивая, во-первых, преемственность в качестве и формате данных, во-вторых, обеспечивая пользователям значительно большую гибкость в применении (АУЗК, МУЗК, РУЗК).

Весь опыт разработчиков и контролеров ООО «НПЦ «ЭХО+» положен в основу нашего флагманского продукта, призванного заменить устаревшее оборудование, ранее поставленное нашим заказчикам, и конкурировать с импортными и отечественными дефектоскопами на новых рынках.

Библиографический список

1. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г., КокOLEV С. А. и др.** Система автоматизированного контроля «АВГУР-АРТ» – от искусства новых возможностей к практической диагностике // Ультразвуковая дефектометрия. 25 лет: юбилейный сб. тр. ООО НПЦ «ЭХО+» / под ред. А.Х. Вopilкина. М.–СПб.: СВЕН, 2015. С. 76 – 85.
2. **Бадалян В. Г., Самарин П. Ф., Тихонов Д. С.** АУЗК сварных соединений оборудования АЭС с применением систем «Авгур 5.2» // В мире неразрушающего контроля. 2010. № 1(47). С. 24 – 27.
3. **Воронков В. А., Воронков И. В., Козлов В. Н. и др.** О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64 – 70.

4. **Базулин Е. Г.** Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12 – 22.

5. **Базулин Е. Г., Голубев А. С., КокOLEV С. А.** Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов // Дефектоскопия. 2009. № 2. С. 18 – 32.

6. **Базулин А. Е., Бутов А. В., Тихонов Д. С. и др.** Применение технологии TOFD в разработках ООО «НПЦ «ЭХО+» // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 84 – 92.

7. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Вopilкин А. Х., Тихонов Д. С.** ФР-дефектоскоп: почему 32 канала лучше, чем 16 // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 167 – 172.

8. **Пат. РФ № 2697725.** Способ ультразвукового контроля методом фазированной решетки с использованием дефектоскопа с малым количеством каналов / Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, С. А. КокOLEV, Д. С. Тихонов. Заявка 2018143589 от 2018.12.10. опублик. 2019.08.19.

9. **КокOLEV С. А., Ромашкин С. В.** Комплект средств автоматизированного визуального и измерительного контроля // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 109 – 115.

10. **Ермолов И. Н., Вopilкин А. Х., Бадалян В. Г.** Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. М.: НПЦ «ЭХО+», 2000. 108 с.

11. **Авагян В. К., Базулин Е. Г.** Использование псевдоортогональных сигналов для уменьшения уровня шума при проведении ультразвукового контроля материалов с большим поглощением // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 3 – 13.

12. **Базулин Е. Г.** Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 5 – 17.

13. **Anderson M., Diaz A., Morra1 M., et al.** Through-weld inspection of wrought stainless steel piping using phased-array ultrasonic probes. WCND-2014. URL: <http://www.ndt.net/abstract/wcndt2004/460.htm> (дата обращения 13.02.2020)

14. **Ravichandran Y. G., Sanath Thampi P. S., Jakkula Suresh et al.** Phased Array Ultrasonic Testing for Heavy Wall Austenitic Stainless Steel Welds // 26th National Seminar & International Exhibition NON-DESTRUCTIVE EVALUATION, 15 –17 December 2016, Thiruvananthapuram, India. Thiruvananthapuram, 2016. URL: <https://www.ndt.net/article/nde-india2016/papers/A124.pdf> (дата обращения 20.01.2020).

15. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Исмаилов Г. М.** Расчет АРД-диаграмм для систем ультразвукового контроля с применением фазированных решеток // Дефектоскопия. 2014. № 1. С. 38 – 46.

16. **Бадалян В. Г., Базулин А. Е., Вopilкин А. Х.** Методическое обеспечение приборов ультразвукового контроля, использующих метод синтезированной апертуры // Ультразвуковая дефектометрия. 25 лет: юбилейный сб. тр. ООО НПЦ «ЭХО+» / под ред. А. Х. Вopilкина. М. – СПб.: СВЕН, 2015. С. 33 – 42.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ



А. Е. Базулин,
канд. техн. наук,
гл. конструктор



Е. Г. Базулин,
д-р техн. наук,
зам. ген. директора
по науч. вопросам,
нач. системного отдела



А. Х. Вopilкин,
д-р техн. наук, проф.,
ген. директор



Д. С. Тихонов,
канд. техн. наук,
зам. ген. директора

Возможности ультразвуковой аппаратуры неразрушающего контроля определяются, как правило, параметрами пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП). Проведение контроля по определенной методике предполагает взаимозаменяемость типовых ПЭП, поэтому очевидна необходимость измерения параметров ПЭП и их контроля на стадии изготовления экспериментальных, опытных и серийных образцов, входной проверки и периодической поверки в процессе эксплуатации. Методики измерения параметров ПЭП определены в ГОСТ 23702–90 «Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний» [1], европейском стандарте EN 12668-2 «Неразрушающий контроль. Характеристика и проверка ультразвукового оборудования. Часть 2. Преобразователи» [2] и стандарте Американского общества по испытаниям и материалам ASTM-E 1065 [3].

Описана автоматизированная система для измерения параметров ультразвуковых пьезопреобразователей «АВГУР 5.4», приведены ее характеристики, конфигурация, измеряемые параметры ПЭП, приведены сведения об испытаниях и достигнутых метрологических характеристиках.

Калибровка ПЭП является необходимой процедурой при проведении автоматизированного ультразвукового контроля системами серии «АВГУР» [4]. Для измерения параметров ПЭП на практике необходимо иметь аппаратуру и стандартные образцы, представляющие собой средство измерения, позволяющее быстро получить индивидуальный паспорт конкретного ПЭП. При этом ГОСТ 23702 рекомендует использование 19 приборов и образцов для выполнения процедуры измерения параметров ПЭП. Ранее в НПЦ «ЭХО+» были разработаны системы калибровки ПЭП «АВГУР 2.2» [5] и «АВГУР 4.4».

Данные системы много лет применяются в различных промышленных и научных организациях России. Важной целью создания новой системы являлось удовлетворение требованиям стандарта EN 12688-2 в части перечня определяемых характеристик с тем, чтобы экспортная продукция российских предприятий подвергалась контролю с применением ПЭП, прошедших паспортизацию в соответствии с международными стандартами. При этом использование новой элементной базы и технических решений позволило расширить перечень измеряемых характеристик ПЭП, повысить точность измеряемых величин, увеличить быстродействие системы.

Описание системы «АВГУР 5.4»

Подробное описание системы «АВГУР 5.4» приведено в статье [6]. На рис. 1 показана данная система в нескольких вариантах комплектации. Система «АВГУР 5.4» состоит из персонального компьютера, блока системного, представляющего собой цифровой ультразвуковой дефектоскоп, содержащий платы управления приемно-передающим трактом и шаговыми двигателями; прецизионного двухкоординатного или однокоординатного

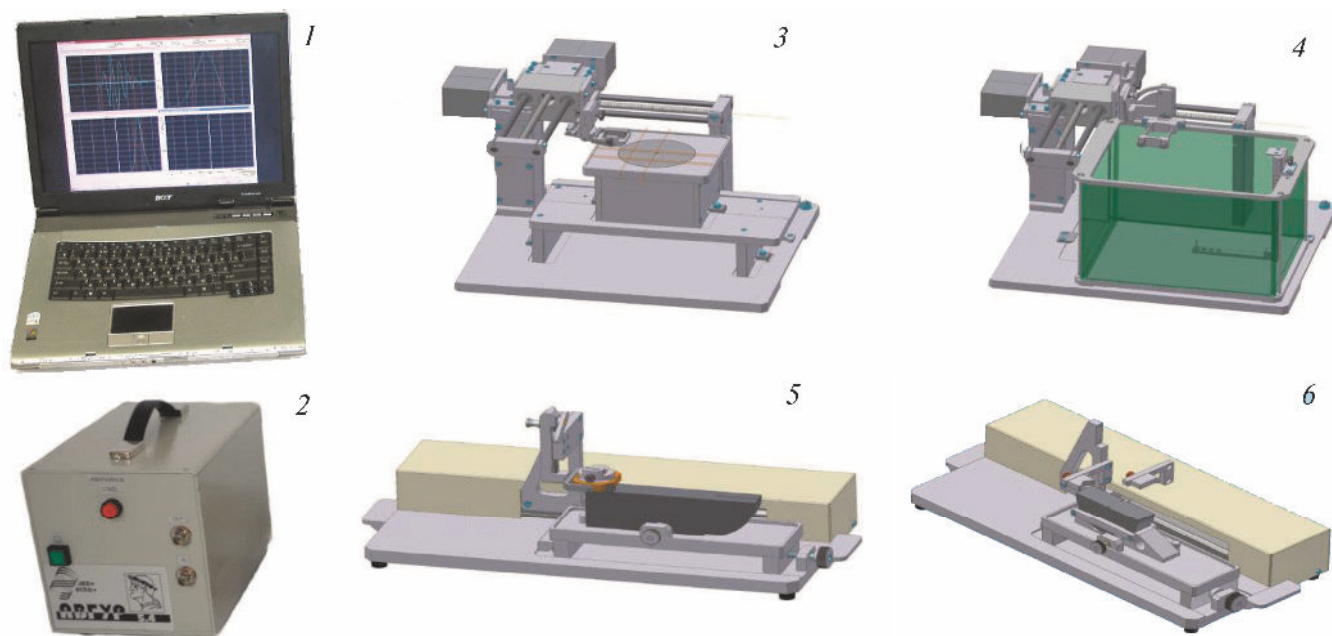


Рис. 1. Общий вид системы калибровки «АВГУР 5.4»:

1 – ноутбук; 2 – блок системный; 3, 4 – двухкоординатный сканер с установленным полусферическим образцом и иммерсионной ванной соответственно; 5 – однокоординатный сканер со стандартным образцом СО-3Р; 6 – однокоординатный сканер со стандартным образцом СО-3, универсальными прижимами для ПЭП в круглых и в прямоугольных корпусах

сканирующего устройства, обеспечивающего перемещение ПЭП по поверхности стандартного образца или в одной плоскости в пределах иммерсионной ванны. Система предназначена для измерения параметров контактных и иммерсионных пьезоэлектрических преобразователей. Поддерживается измерение параметров прямых и наклонных, совмещенных и раздельно-совмещенных, фокусирующих и нефокусирующих ПЭП с эффективными частотами от 0,8 до 10 МГц.

При комплектации двухкоординатным планшетным сканером и специально разработанным полусферическим образцом СОП-СФ-55 система позволяет измерять параметры поля ПЭП в дополнительной плоскости. При комплектации компактной иммерсионной ванной и двухкоординатным сканером выполняется измерение параметров иммерсионных ПЭП. Набор прижимов и держателей, входящих в состав системы, позволяет проводить измерение параметров ПЭП в круглых и прямоугольных корпусах различных типоразмеров.

Основные отличия системы калибровки «АВГУР 5.4» от систем предыдущего поколения состоят в том, что в новой системе:

- поддерживается двухкоординатный сканер и иммерсионный режим калибровки ПЭП;
- значительно расширен перечень определяемых параметров; выполнено обоснование возмож-

ности измерения параметров ПЭП в соответствии с европейским стандартом EN 12668-2 и американским стандартом ASTM-E 1065;

- предусмотрена автоматическая выдача паспорта ПЭП по настраиваемому шаблону с указанием выхода фактических параметров за пределы допустимого диапазона;

- обоснована возможность выполнения измерений параметров контактных ПЭП при выполнении единственного измерения набора эхосигналов на стандартном образце СО-3 (СО-3Р) или полусферическом образце СОП-СФ-55;

- предусмотрено измерение параметров ПЭП разных типов, предназначенных для работы с различными дефектоскопами, благодаря наличию настраиваемой амплитуды ударного генератора и демпфирующих сопротивлений приемного тракта, расширенного диапазона усиления приемного тракта;

- с применением метода акустической голографии возможен расчет поля иммерсионного ПЭП по эхосигналам от точечного отражателя, измеренным в ближней зоне, построение трехмерной диаграммы направленности и определение параметров фокуса ПЭП, не увеличивая при этом размеры иммерсионной ванны и ограничившись двумя шаговыми двигателями сканирующего устройства.

Основные технические характеристики системы «АВГУР 5.4»

| | |
|---|--------------|
| Длительность зондирующего сигнала ударного типа на активной нагрузке 50 Ом и максимальной амплитуде, нс, не более | 100 |
| Длительность переднего фронта зондирующего сигнала ударного типа на активной нагрузке 50 Ом и максимальной амплитуде, нс, не более | 10 |
| Максимальная амплитуда зондирующего импульса, В | 200 ± 20 |
| Максимальное значение эффективного выходного импеданса генератора зондирующего сигнала, измеренное при максимальной амплитуде, Ом, не более | 5 |
| Диапазон регулировки усиления, дБ, не менее | 70 |
| Предел допускаемой абсолютной погрешности установки коэффициента усиления, дБ | ±0,5 |
| Максимальное измеряемое значение амплитуды входного сигнала (при минимальном значении коэффициента усиления), В .. | 10 ± 0,1 |
| Полоса пропускания приемного тракта по уровню -3 дБ (при неравномерности ±1 дБ), МГц | 0,5 – 15,0 |
| Динамический диапазон ВРЧ, дБ, не менее | 40 |
| Банк демпфирующих сопротивлений приемного тракта, Ом | от 50 до 500 |
| Эквивалентное среднеквадратичное значение напряжения шумов, приведенное к входу усилителя в полной полосе пропускания, мкВ, не более | 80 |
| Минимальный шаг сканирования по осям X и Y, мм, не более | 0,02 |
| Габариты (Д×Ш×В), мм: | |
| двухкоординатного сканирующего устройства | 560×430×394 |
| однокоординатного сканирующего устройства | 570×240×250 |
| блока системного | 160×270×230 |

Методика измерения параметров

В табл. 1 приведены измеряемые и рассчитываемые параметры ПЭП, наименования и обозначения параметров приведены в соответствии с ГОСТ 26266–90 «Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования» [7]. Цветом отмечены параметры ПЭП, которые не измерялись системами калибровки ПЭП «АВГУР» предыдущих поколений.

Форма эхоимпульса фиксируется как донный эхосигнал от отражателя в дальней зоне, имеющий максимальную амплитуду. Эхосигнал может быть получен при сканировании ПЭП под управлением оператора с фиксацией эхосигнала, имеющего максимальную амплитуду, а также при автоматическом сканировании ПЭП по заданной траектории. *Амплитудно-частотная характеристика* рассчитывается через преобразование Фурье от импульсной

1. Изменяемые параметры ПЭП

| Обозначение | Параметр |
|--|---|
| U | Форма эхоимпульса (эхоимпульс) |
| t_{20} | Длительность эхоимпульсной характеристики по уровню -10 дБ от максимального значения |
| $K_{UU}(\omega)$ | Амплитудно-частотная характеристика (спектральная характеристика) |
| f_3 | Эффективная частота эхоимпульса, МГц |
| Δf_{UU} | Полоса пропускания (полоса частот), МГц |
| $K_{UU}^И$ | Импульсный коэффициент двойного преобразования (эхоимпульсная чувствительность), дБ |
| K_{UU} | Коэффициент преобразования, дБ |
| АРД | АРД-диаграмма |
| $A(z)$ | Функция шумов (реверберационно-шумовая характеристика) |
| $A_{\Delta\tau}$ | Уровень шума, мВ |
| H_M | Мертвая зона (по ГОСТ 23667–85), мм |
| l | Стрела, мм |
| $\tau_{пр}$ | Время распространения (задержки) в призме (акустической задержке), мкс |
| α | Угол ввода в основной плоскости, ° |
| θ_1 | Ширина диаграммы направленности в основной плоскости, ° |
| α' | Угол ввода в дополнительной плоскости, ° |
| θ_2 | Ширина диаграммы направленности в дополнительной плоскости, ° |
| N, F | Величина ближней зоны (фокусное расстояние), мм |
| χ_1, χ_2, χ_3 | Протяженность фокальной области (длина фокуса, ширина фокуса в основной и дополнительной плоскости) |
| e | Смещение оси луча*, мм |
| a_{ef}, b_{ef} | Эффективные размеры пьезоэлемента*, мм |
| A_{CT} | Подавление помех излучатель–приемник (для раздельно-совмещенных ПЭП)*, дБ |
| * Обозначение и наименование даны в соответствии с EN 12668-2. | |

характеристики, *эффективная частота, полоса пропускания, длительность эхоимпульса* рассчитываются согласно ГОСТ 23702 или EN 12668-2. *Импульсный коэффициент двойного преобразования* $K_{UU}^И$ и *коэффициент преобразования* K_{UU} изме-

ряются в соответствии с ГОСТ 23702 при автоматическом измерении формы импульса возбуждения и эхоимпульса. *Подавление помех излучатель–приемник* (для раздельно-совмещенных ПЭП) автоматически измеряется как отношение амплитуды эхосигнала от поверхности ввода к амплитуде донного эхосигнала.

Стрела в основной плоскости (по оси X) автоматически определяется как координата точки относительно передней грани, в которой наблюдается максимальное значение амплитуды эхосигнала от донной поверхности образца при перемещении ПЭП вдоль оси X. *Стрела в дополнительной плоскости (по оси Y)* автоматически определяется как координата точки относительно центра передней грани, в которой наблюдается максимальное значение амплитуды эхосигнала от полусферической поверхности образца при перемещении ПЭП вдоль оси Y. Для определения стрелы наклонного ПЭП привязка выполняется к центру передней грани ПЭП, для прямого ПЭП рекомендуется выполнять привязку к геометрическому центру ПЭП. Таким образом, для прямого ПЭП может быть вычис-

лено *смещение луча* (параметр, измеряемый по EN 12668-2). *Точка выхода луча* может быть отмечена на корпусе ПЭП с использованием измеренного значения стрелы по оси X или нанесена оператором на этапе ручной настройки максимальной амплитуды эхосигнала от цилиндрической или полусферической поверхности образца по риску в геометрическом центре стандартного образца. *Время распространения (задержки) в призме (акустической задержке)* автоматически вычисляется по времени прихода эхосигнала от отражателя, заданному расстоянию до отражателя и скорости звука в образце.

Параметры *диаграммы направленности (ДН) в основной плоскости (угол ввода, ширина диаграммы направленности)* рассчитываются по набору эхосигналов (В-скану), полученному от цилиндрической поверхности стандартного образца (например, СО-3, СО-3Р, V1). Считая, что такой отражатель эквивалентен элементарному отражателю в центре симметрии (рис. 2), с применением метода угловых спектров [8] выполняется пересчет эхосигналов на произвольную глубину, что эквивалентно экспериментальному измерению В-скана от отвер-

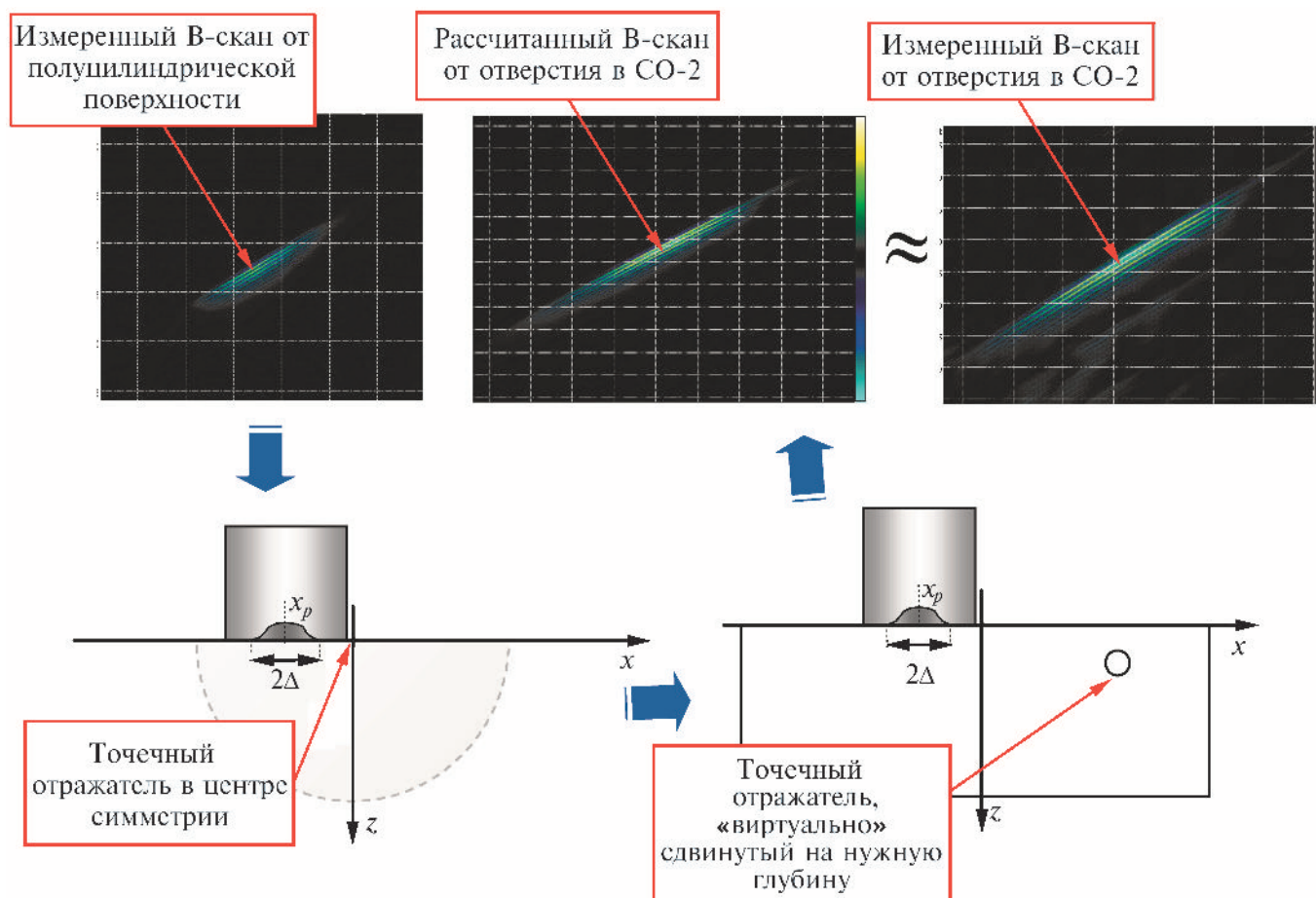


Рис. 2. Принцип расчета параметров характеристики направленности по измерениям В-сканов в совмещенном режиме на СО-3

ствия бокового сверления, например на глубине 15 или 44 мм. Это позволяет применить стандартную методику измерения угла ввода в соответствии с ГОСТ 14782 [9]. Подробное обоснование данного метода измерения параметров диаграммы направленности изложено в статьях [10, 11].

Угол ввода определяется как угол, отвечающий максимуму диаграммы направленности, верхняя и нижняя границы диаграммы направленности находят по уровню -6 дБ от максимума диаграммы направленности. Необходимо учитывать, что диаграмма направленности, измеряемая таким способом, искажается из-за расхождения волнового фронта при отражении от бокового отверстия, отклонение возрастает при увеличении глубины отверстия. Поэтому в программном обеспечении системы реализовано переключение показа диаграммы направленности с учетом и без учета глубины отражателя по известной формуле ослабления амплитуды сигнала от цилиндрического бокового отверстия [13]. При указании коэффициента затухания в акустической нагрузке также учитывается квазиискривление, обусловленное затуханием.

При измерении параметров поля иммерсионных ПЭП в качестве отражателя используется стержень с полусферическим концом в иммерсионной ванне, который может находиться в ближней или дальней зоне ПЭП. Диаграмма направленности рассчитывается по алгоритму, реализованному ранее в системе «АВГУР 4.4», путем разложения многочастотных голограмм от ненаправленного отражателя в пространственный спектр плоских волн, приходящих из дальней зоны [12]. При использовании полусферического образца (или в иммерсионном режиме) и при обеспечении сканирования по координате Y выполняется расчет *диаграммы направленности в дополнительной плоскости* по тем же принципам, что и в основной плоскости с переходом от одномерного пространственного преобразования Фурье к двумерному. Подробное описание метода расчета сечений трехмерной диаграммы направленности изложено в статье [6]. Отметим, что в терминологии EN 12668-2 угол ввода в дополнительной плоскости называется «угол скоса».

Эффективные размеры пьезоэлемента и величина *ближней зоны* рассчитываются по другим известным параметрам ПЭП – ширине диаграммы направленности, центральной частоте и скорости звука в среде. Расчет проводится либо в соответствии с формулами, рекомендованными EN 12668-2 [2], либо по формулам, принятым в практике УЗК в России [13]. *АРД-диаграммы* рассчитываются автоматически по определенным на предыдущем этапе калибровки параметрам ПЭП. В ближней зоне

преобразователя необходимо учитывать сложную структуру акустического поля, поэтому в каждом сечении рассчитывается максимальный сигнал от моделей плоскодонных отражателей. Такой метод расчета повторяет реальную методику экспериментального определения АРД-диаграмм. Поддерживается расчет АРД-диаграмм совмещенных и раздельно-совмещенных ПЭП. Сопоставление расчетных АРД-диаграмм с известными аналитическими выражениями для поля на оси ПЭП, с безразмерными АРД-диаграммами и АРД-диаграммами производителей ПЭП показало отклонение не более $0,5 - 1,5$ дБ.

Функция шумов (реверберационно-шумовая характеристика, РШХ) сохраняется и отображается вместе с АРД-диаграммами. Программа автоматически повышает усиление при увеличении глубины, повторяя методику ручного измерения функции шумов, рекомендованную ГОСТ 23702. В случае если амплитуда сигнала превышает диапазон аналого-цифрового преобразователя, то усиление автоматически уменьшается. Для повышения надежности измерения собственной шумовой характеристики ПЭП выполняется медианная фильтрация по пяти последовательно полученным эхосигналам. По функции шумов в указанном диапазоне рассчитывается *уровень шума* (мВ). Методика определения *мертвой зоны*, реализованная в системе, заключается в автоматическом определении глубины, при которой АРД-диаграмма, соответствующая эквивалентной площади отражателя 3 мм^2 (или иного), на 6 дБ превышает амплитуду шумов, хранящуюся в РШХ. В результате определяется принадлежность величины мертвой зоны одному из стандартных диапазонов: $3 - 6$ мм, $6 - 8$ мм, $8 - 12$ мм, $12 - 24$ мм или более 24 мм.

Фокусное расстояние фокусирующего иммерсионного ПЭП рассчитывается как глубина максимума амплитуды поля излучения, восстановленного методом угловых спектров [8] по эхосигналам, измеренным от точечного отражателя в ближней зоне на едином расстоянии от ПЭП. Для нефокусирующего ПЭП в качестве фокуса принимается максимум рассчитанной АРД-диаграммы, т.е. величина ближней зоны. *Протяженность фокальной области* (длина фокуса, ширина фокуса в основной и дополнительной плоскости) измеряется как разница координат соответственно z , x и y , при которых амплитуда от отражателя превышает уровень -6 дБ от максимума, соответствующего фокусному расстоянию. Более подробное описание методики измерения параметров ПЭП системой «АВГУР 5.4» изложено в статье [6]. Примеры паспортов ПЭП, полученных системой «АВГУР 5.4», приведены на рис. 3.

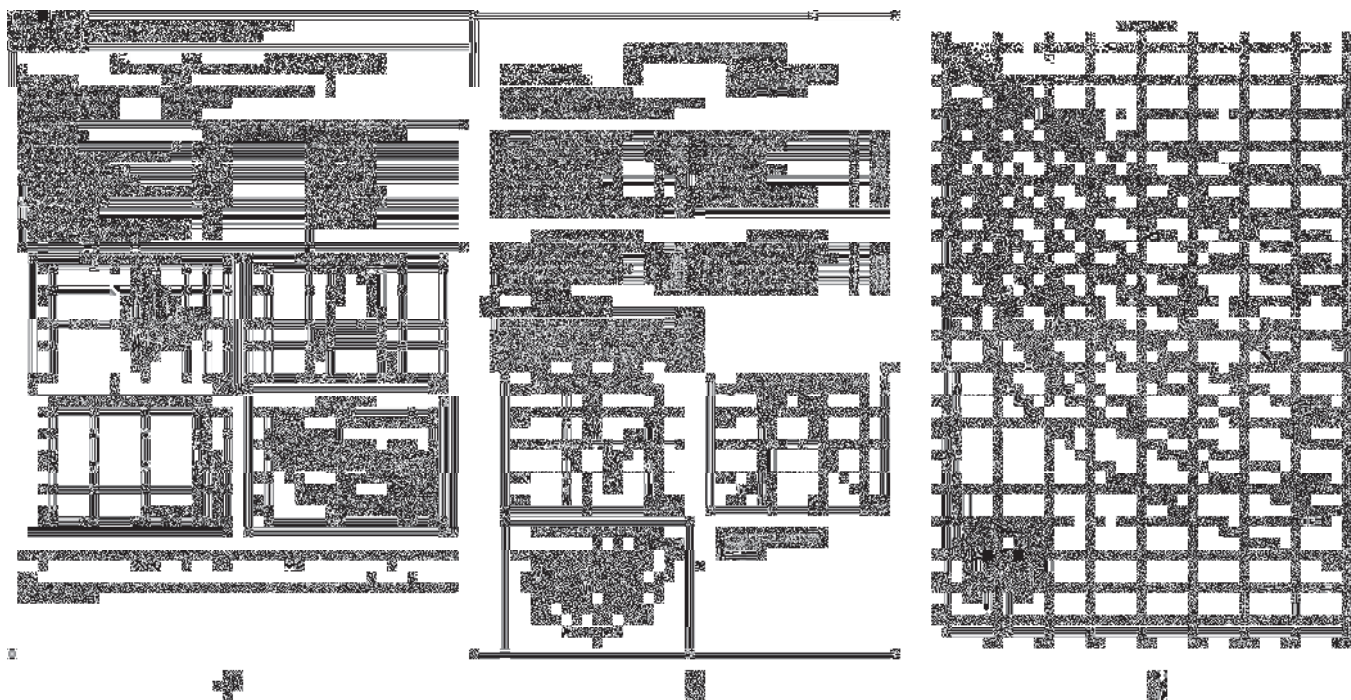


Рис. 3. Примеры паспортов ПЭП, выданных в соответствии с требованиями эксплуатационной документации на штатные средства дефектоскопии рельсов (а) и в соответствии с требованиями EN 12688 (б)

Оценка точности измерения параметров ПЭП

Важнейшей характеристикой любой измерительной системы является точность измерения значений физических величин, определяемая сравнением результата измерения с истинным или действительным (условно истинным) значением. Подробный анализ погрешностей измерения параметров ПЭП системой «АВГУР 5.4» приведен в статье [14]. Рассмотрены инструментальные погрешности, связанные с параметрами аппаратной части, такими как эффекты дискретизации аналоговых сигналов, погрешность усилителей сигналов и методические погрешности, определяемые методикой проведения измерений и субъективным фактором. Проведенный эксперимент по оценке повторяемости и воспроизводимости показал, что собственные метрологические характеристики систем «АВГУР 5.4» обеспечивают повторяемость измерения параметров, близкую к воспроизводимости, т.е. идентичность результатов измерений при серийном производстве систем. Различие этих показателей может быть связано главным образом с параметрами стандартных образцов. Были рассмотрены различные функции влияния и показано, что частью функций влияния можно пренебречь (затухание в призме, погрешность отработки элементарного шага сканером), часть функций влияния (таких как влияние температуры, затухания в образце) можно учесть по известным закономерностям. Наиболее существенной функцией влияния можно считать влияние точ-

ности задания скорости звука в стандартном образце. Показано, что для погрешности задания скорости звука в образце 1,0 % систематическая ошибка расчета угла ввода ПЭП с номинальным углом ввода 70° составит почти 2° .

Предельные допустимые погрешности измерения параметров ПЭП приведены в ГОСТ 23702–90 [1]. Указана формула для вычисления пределов допустимых погрешностей применяемого средства измерений:

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_a^2 + \delta_m^2},$$

где δ_m^2 – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностями методов и средств измерения; δ_a^2 – составляющая, обусловленная вариацией акустического контакта.

По ГОСТ 23702–90 нормируется только величина δ_m^2 , однако при экспериментальном определении пределов погрешности измерений затруднительно оценить только одну составляющую. Для уменьшения влияния δ_a^2 рекомендуется выполнять многократные измерения с последующей статистической обработкой результатов.

В табл. 2 приведены значения пределов погрешностей измерения для ПЭП класса А (т.е. с повышенным уровнем требований к точности) в соответствии с ГОСТ 23702–90 и значения погрешностей измерения, реализуемые системой «АВГУР 5.4»,

2. Пределы погрешности измерения параметров ПЭП

| Измеренный параметр | Предел погрешности измерений параметров | |
|---|---|------------------------|
| | ГОСТ 23702–90 | Система «АВГУР 5.4» |
| Длительность эхоимпульса, t_{\max} , % | ± 7 | $\pm 4^1$ |
| Импульсный коэффициент двойного преобразования K_{UU}^I , % | ± 15 | $\pm 15^2$ |
| Эффективная частота f_3 , % | ± 5 | $\pm 0,5^3$ |
| Полоса пропускания Δf_{UU} , % | ± 4 | $\pm 1^4$ |
| Стрела (точка выхода луча) l , мм | $\pm 0,5$ | $\pm 1,0$ |
| Угол ввода α , °: до 60 свыше 60 | $\pm 0,75$ $\pm 1,0$ | $\pm 0,7$ $\pm 1,0$ |
| Время задержки в призме $\tau_{пр}$, % | ± 10 | $\pm 5^5$ |

¹ Для номинальной длительности импульса 2,5 мкс.
² Не учитывая изменение качества акустического контакта и без учета затухания в образце.
³ Для номинальной частоты 5 МГц.
⁴ Для номинальной частоты 5 МГц.
⁵ Для номинального времени задержки в призме 3,4 мкс, исключая систематическую погрешность, связанную с параметрами образца.

установленные экспериментально. Все пределы погрешностей не превышают указанных в ГОСТ 23702–90, кроме стрелы. Вообще говоря, этот ГОСТ нормирует погрешность измерения не стрелы, а отклонения точки ввода Δl , которое системой в автоматическом режиме не измеряется, а в ручном режиме с механизированным перемещением ПЭП погрешность измерения Δl не может быть больше, чем при чисто ручной методике.

Показано, что результаты измерения таких параметров, как угол ввода и время задержки в призме, требуют знания скорости звука в стандартном образце с точностью не менее $\pm 0,5^\circ$. При этом экспериментально обнаружена значительная систематическая погрешность при измерениях параметров одного и того же ПЭП на серии из 10 стандартных образцов СО-ЗР. Погрешность измерения коэффициента двойного преобразования определенная экспериментально достигает ± 2 дБ, что хорошо согласуется с общеизвестным критерием одинаковости амплитуд в практике ультразвуковой дефектоскопии.

Заключение

Процедура измерения основных параметров ПЭП с применением системы калибровки «АВГУР 5.4» сводится к автоматизированному измерению единственного файла с эхосигналами (В- или С-скана), автоматической записи реверберационно-шумовой характеристики и дальнейшему автоматическому расчету параметров. Время измерения основных параметров одного серийного ПЭП до выдачи паспорта не превышает 2 мин при использовании однокоординатного сканера. При использовании двухкоординатного сканера и определении параметров в дополнительной плоскости время на измерение параметров одного ПЭП составляет около 10 – 15 мин. Автоматизированная система позволяет упростить процедуру и сократить время проведения измерений. Снижаются требования к квалификации оператора, системы, уменьшается влияние субъективного фактора.

Система «АВГУР 5.4» прошла испытания типа средств измерений, внесена в Государственный реестр средств измерений (под номером 36623-07) и может использоваться как средство для метрологической поверки ПЭП на предприятиях, производящих и эксплуатирующих ПЭП. Система прошла ведомственные испытания в Департаменте пути и сооружений ОАО «РЖД», на которых была показана пригодность системы для выполнения поверки ПЭП, входящих в состав штатных средств дефектоскопии рельсов.

В настоящий момент системы «АВГУР 5.4» применяются в ОАО «ВМЗ» (Выксунский металлургический завод), в метрологических центрах в Томске, Тюмени, Хабаровске, Калининграде.

Пределы погрешностей автоматизированных измерений параметров ПЭП не превышают указанных в ГОСТ 23702–90, кроме стрелы. Точность измерения стрелы определяется главным образом точностью ручного измерения расстояния от передней грани ПЭП до центра образца. Рекомендуется трехкратное повторение измерения стрелы и усреднение полученных результатов.

В планах расширить область применения системы калибровки на работу с ультразвуковыми антенными решетками.

В заключение авторы с благодарностью вспоминают И. Н. Ермолова, инициировавшего работу по сопоставлению российских и европейских стандартов на методы испытаний ПЭП и предложившему создание системы, определяющей параметры ПЭП по обоим стандартам, а также выражают признательность А. Ф. Захарову (ОАО «ВМЗ») за постоянный интерес и ценные замечания к системе.

Библиографический список

1. **ГОСТ 23702–90.** Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1990.
2. **Европейский стандарт. EN 12668-2:2001.** Неразрушающий контроль. Характеристика и проверка ультразвукового оборудования. Часть 2. Преобразователи, 2001.
3. **ASTM-E 1065.** Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units / ASTM International, 2003.
4. **Тихонов Д. С.** Основные этапы автоматизированного УЗК с определением размеров дефектов системами серии «АВГУР» // В мире неразрушающего контроля. 2006. № 3 (33). С. 24 – 28.
5. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Бычков И. В. и др.** Компьютерная система для исследования и паспортизации пьезопреобразователей ультразвукового неразрушающего контроля «Авгур 2.2» // Дефектоскопия. 1993. № 2. С. 43 – 49.
6. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Вовилкин А. Х., Тихонов Д. С.** Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей «АВГУР 5.4». Часть I. Описание системы и методики калибровки // Контроль. Диагностика. 2009. № 9. С. 8 – 18.
7. **ГОСТ 26266–90.** Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2010.
8. **Гудмен Дж.** Введение в Фурье-оптику. М: Мир, 1970. 364 с.
9. **ГОСТ 14782–86.** Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Стандартинформ, 2005.
10. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г.** Измерение диаграммы направленности пьезоэлектрических преобразователей на стандартном образце СО-3 // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 278 – 283.
11. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г.** Об измерении угла ввода пьезоэлектрического преобразователя на стандартном образце СО-3 // Дефектоскопия. 2010. № 2. С. 56 – 62.
12. **Качанов Е. И., Пигулевский Е. Д., Яричин Е. М.** Методы и средства гидроакустической голографии. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
13. **Неразрушающий контроль:** справочник. в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. 2-е изд., добраб. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
14. **Базулин А. Е.** Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей «АВГУР 5.4». Часть II. Погрешности измерений // Контроль. Диагностика. 2010. № 2. С. 8 – 20.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ «АВГУР-ТФ»: ОСОБЕННОСТИ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ



А. Х. Вопилкин,
д-р техн. наук, проф.,
ген. директор



С. В. Ромашкин,
канд. техн. наук,
нач. системно-методической
лаборатории



Д. С. Тихонов,
канд. техн. наук,
зам. ген. директора



С. А. КокOLEV,
нач. лаборатории
разработки алгоритмов



А. В. Бутов,
ведущ. инженер системно-
методической лаборатории



А. М. Штерн,
нач. отд. информ. технологий

Непрерывное развитие технологий сварки приводит к широкому внедрению сварных соединений, имеющих те или иные особенности конструкции, которые затрудняют эффективный их контроль, оставаясь в рамках существующих традиционных способов ультразвуковой диагностики. К таким объектам вполне можно отнести сварные соединения с узкой разделкой, у которых угол наклона

Рассматриваются особенности ультразвукового контроля сварных соединений с узкой разделкой. Для автоматизированного контроля таких сварных соединений предлагается применять комбинацию различных схем и методов контроля, например эхо- и теневой методы УЗ-контроля с использованием технологий фазированной антенной решетки (ФАР), зональную фокусировку по схеме тандем, TOFD, визуальный и измерительный контроль. Отдельно отмечаются преимущества контроля методом ЦФА и его разновидностей. Рассматриваются особенности системы «АВГУР-ТФ», включая ее программное обеспечение, реализующей перечисленные методы контроля. Приводятся некоторые результаты контроля сварных соединений, полученные по технологии ФАР и TOFD.



В. Л. Козлов,
зам. нач. отд. информ.
технологий



Е. А. Рубен,
ведущ. инженер-электроник
лаборатории электроники



Г. В. Тишин,
нач. лаборатории
электроники

кромки менее 20° , и сварные соединения дисков роторов паровых турбин.

В первом случае возникают проблемы обнаружения плоскостных дефектов, расположенных по линии сплавления наплавленного металла сварного шва и основного металла свариваемых деталей по всей ее длине, так как оставаясь в рамках контроля по совмещенной схеме, необходимо выполнять ввод ультразвука в объект контроля на значительном расстоянии от сварного соединения. Во втором случае имеют место ограниченный доступ к сварному соединению и сложная форма донной поверхности свариваемых деталей, которая в большинстве случаев делает невозможным использование отраженного луча.

Решением задачи контроля сварных соединений с узкой разделкой является применение комбинации

таких методов контроля, как: секторное сканирование фазированной антенной решеткой (ФАР), зональная фокусировка антенной решеткой [3] и контроль методом TOFD [1, 2]. Комбинация этих методов позволяет обнаруживать практически все внутренние дефекты сварных соединений, при этом методы дополняют друг друга, компенсируя недостатки один другого. Обнаружение же поверхностных дефектов может быть выполнено с помощью автоматизированного визуального и измерительного контроля.

Задача контроля сварных соединений в условиях ограниченной зоны сканирования и профилированной донной поверхности может быть успешно решена с применением технологии цифровой фокусировки антенны (ЦФА) [4] и ее разновидностей [5]. Это достигается за счет учета профиля донной поверхности при контроле на отраженном луче и применением продольных волн.

Контроль сварных соединений с узкой разделкой

Учитывая отмеченное, для достижения максимальной эффективности и достоверности ультразвукового контроля применяемые дефектоскопы должны позволять реализовывать несколько методов контроля, при этом сочетание различных методов получения визуальных данных позволяет совместить производительность, высокое качество и полную документированность контроля. Примером такого совмещения служит новая система «АВГУР-ТФ», успешно прошедшая аттестационные испытания во ВНИИГАЗ в 2017 г.

Система «АВГУР-ТФ» – одна из немногих, в которой в целях обеспечения высокопроизводительного и максимально информативного ультразвукового контроля реализованы следующие методы:

- эхо- и теневой методы УЗ-контроля с использованием технологий ФАР;
- ФАР с возможностью зональной фокусировки как по совмещенной схеме, так и по тандем-схеме контроля;
- ЦФА и его варианты: ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ, Multi-ЦФА;
- дифракционно-временной метод (ДВМ или TOFD).

TOFD-метод контроля может быть реализован с использованием как специализированных одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей со сменным набором призм, так и антенных решеток.

Для использования при контроле всех преимуществ антенных решеток и получения акустических изображений внутренней структуры объекта контроля самого высокого качества применяется технология ЦФА и ее многосхемный вариант Multi-ЦФА. В технологии ЦФА, особенно в многосхемном режиме, для получения изображений используется существенно больший объем исходных данных (чем в режиме ФАР),

поэтому в практическом контроле этот способ получения изображений применяется как экспертный, уточняющий режим, используемый при необходимости. В основном режиме контроль сварных соединений выполняется антенными решетками, расположенными с обеих сторон сварного соединения и работающими в режиме секторного сканирования с фокусировкой на разных глубинах по границе сплавления шва. Метод TOFD применяется для повышения надежности обнаружения вертикальных плоскостных и горизонтальных плоскостных дефектов.

Контроль формы внешнего валика усиления сварного соединения и повышение достоверности обнаружения поверхностных дефектов обеспечивается использованием в системе «АВГУР-ТФ» дополнительного комплекта для автоматизированного визуального и измерительного контроля (АВИК). В состав комплекта для АВИК входит лазерный триангуляционный 2D-модуль со встроенной микропроцессорной системой управления, который позволяет с высокой точностью измерять профиль объекта без механического контакта с ним. С помощью комплекта АВИК можно регистрировать и сохранять трехмерную информацию о форме поверхности объекта контроля и определять следующие параметры: ширину и высоту валика усиления; ширину, длину и высоту межваликовых западаний; наружное смещение кромок; чешуйчатость; размеры поверхностных дефектов (поры, трещины, подрезы). Для получения трехмерной формы поверхности объекта используется перемещение лазерного модуля с помощью сканирующего устройства вдоль оси сварного соединения, при этом синхронизация измерений профиля выполняется по сигналам датчика перемещения.

Система автоматизированного ультразвукового контроля «АВГУР-ТФ»

Система «АВГУР-ТФ» представляет собой системный блок, в состав которого входит TOFD-модуль, многоканальный ФАР/ЦФА-модуль и модуль управления сканирующим устройством. Система может комплектоваться как трековым однокоординатным сканером, так и сканером на магнитных колесах, которые обеспечивают быстрое кольцевое сканирование преобразователей вокруг трубы вдоль оси сварного соединения (рис. 1). На сканере устанавливаются: ФАР, TOFD-преобразователи и лазерный модуль. Подключение сканирующего устройства, ФАР и TOFD-преобразователей к дефектоскопу выполнено одним бронированным кабелем или кабелем в полимерной оболочке, что обеспечивает необходимую защиту электрических соединений в условиях строительства трубопроводов. Трековое сканирующее устройство наиболее целесообразно применять в случае, когда положение оси сварного соединения известно с точностью ± 1 мм и при контроле используется метод зональной фоку-

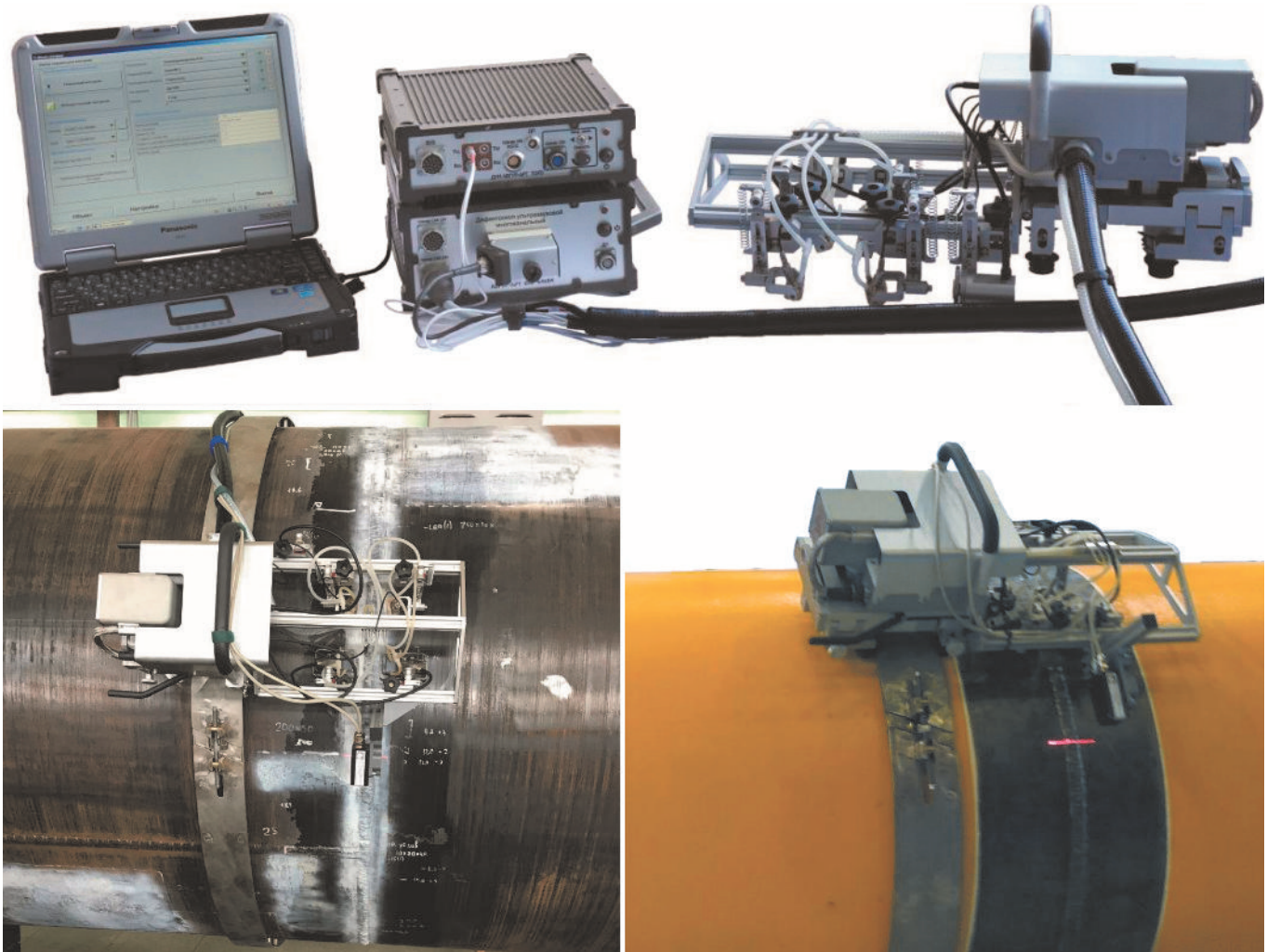


Рис. 1. Система «АВГУР-ТФ» с управляющим компьютером и однокоординатным сканером с установленными антенными решетками, TOFD-преобразователями и лазерным модулем

сировки. Конструктивное исполнение сканирующих устройств позволяет применять воду и водоспиртовые смеси в качестве контактной жидкости и рассчитаны на эксплуатацию в температурном диапазоне от -40 до $+50$ °С.

Технические характеристики системы «АВГУР-ТФ»

| | |
|--|----------------------------|
| Диапазон диаметров контролируемых труб, мм | от 159 до 1420 |
| Толщина стенки контролируемых труб, мм | от 6,0 до 32,0 |
| Скорость сканирования, м/мин, не менее | 1,5 |
| Количество каналов дефектоскопа, шт. | 64; 128 |
| Диапазон установки амплитуд импульсов возбуждения, В | от 30 до 100 с шагом 10 |
| Допускаемое отклонение установки амплитуды импульсов возбуждения, % | ± 10 |
| Диапазон установки длительности импульсов возбуждения, мс | от 50 до 400 |
| Допускаемое отклонение установки длительности импульсов возбуждения, % | ± 10 |

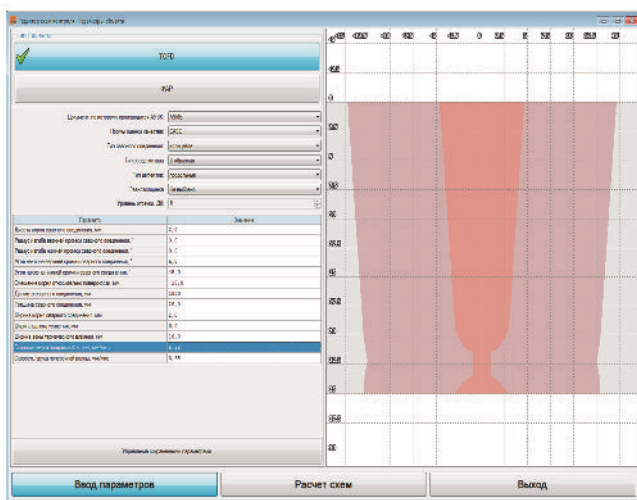
| | |
|---|-------------------|
| Полоса пропускания приемного тракта по уровню -3 дБ, МГц | от 0,6 до 25,0 |
| Диапазон регулировки коэффициента усиления приемного тракта, дБ | от 0 до 80 |
| Шаг регулировки коэффициента усиления приемного тракта, дБ | 0,5 |
| Линейность по вертикали, % экрана | ± 1 |
| Диапазон регулировки задержки развертки, мкс | от 1 до 600 |
| Диапазон регулировки длительности развертки (при частоте оцифровки сигнала 20 МГц), мкс | от 1 до 200 |
| Габаритные размеры блока системного (длина×ширина×высота), мм, не более ... | 400×300×150 |
| Масса дефектоскопа, кг, не более | 6 |
| Масса сканера, кг, не более | 12 |
| Средний срок службы, лет | 10 |
| Условия эксплуатации сканирующего устройства: | |
| температура окружающего воздуха, °С .. | от -40 до $+50$ |
| относительная влажность воздуха при температуре $+35$ °С, % | 98 |

Система обеспечивает проведение АУЗК кольцевых сварных соединений и основного металла трубопроводов в процессе их монтажа и эксплуатации с измерением координат, размеров дефектов, а также амплитуд сигналов от них. Внешний диаметр сварных соединений от 159 мм до плоскости. Толщина сварных соединений от 5 до 80 мм. Материал сварных деталей: стали углеродистые, низколегированные, низколегированные теплоустойчивые, а также стали мартенситно-ферритного, аустенитного и аустенитно-ферритного классов.

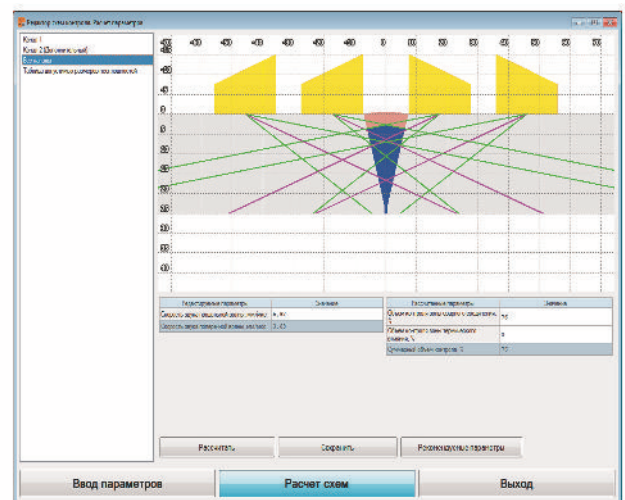
Управление дефектоскопом и сканером выполняется от переносного компьютера с помощью пакета программного обеспечения, включающего в себя три основные программы: «Редактор схем контроля», «Регистрация данных» и «Анализ». В пакет программного обеспечения также входит база данных, в которой хранятся все настроеч-

ные параметры контроля, параметры оборудования, параметры объекта контроля и результаты контроля.

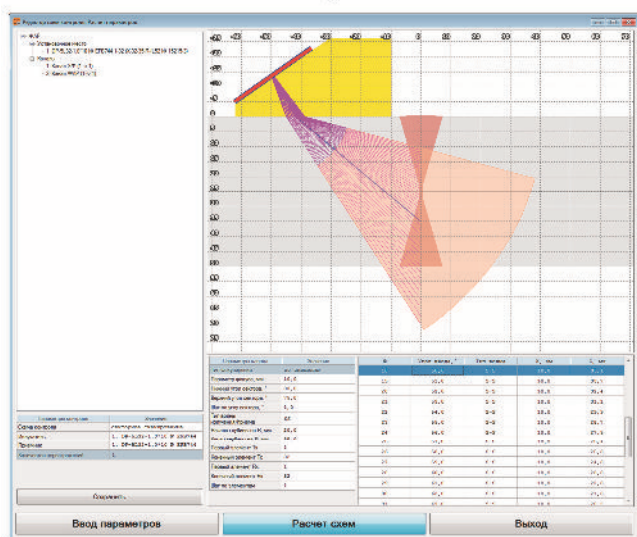
Программа «Редактор схем контроля» предназначена для предварительного автоматического расчета параметров контроля по задаваемой геометрии разделки сварного соединения (рис. 2). Благодаря уникальным функциональным возможностям она позволяет в несколько раз уменьшить время на разработку новых технологических карт контроля и сократить время настройки параметров контроля, что наиболее актуально для каналов зональной фокусировки. На рис. 2, б – г представлены окна с расчетом параметров контроля методом TOFD, контроля в режиме секторного сканирования и контроля в режиме зональной фокусировки соответственно для различных геометрий границы разделки сварного соединения.



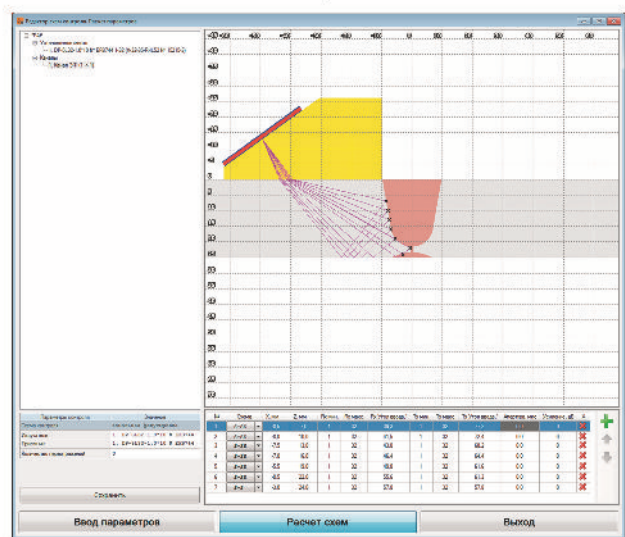
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Редактор схем контроля:

а – ввод параметров сварного соединения; б – расчет параметров контроля методом TOFD; в – расчет параметров контроля методом ФР; г – расчет параметров зонального контроля

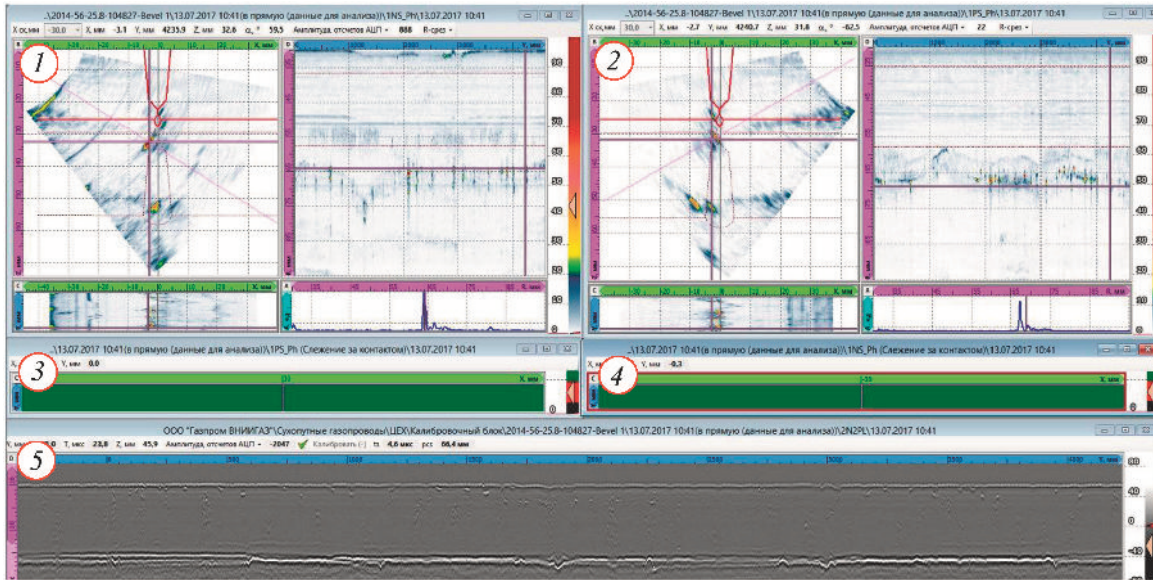


Рис. 3. Вид окна программы «Регистрация данных» при проведении контроля:
 1, 2 – данные по каналу с ФР №1 и №2 соответственно; 3, 4 – информация об акустическом контакте на стороне ФР №1 и №2 соответственно; 5 – данные по каналу TOFD

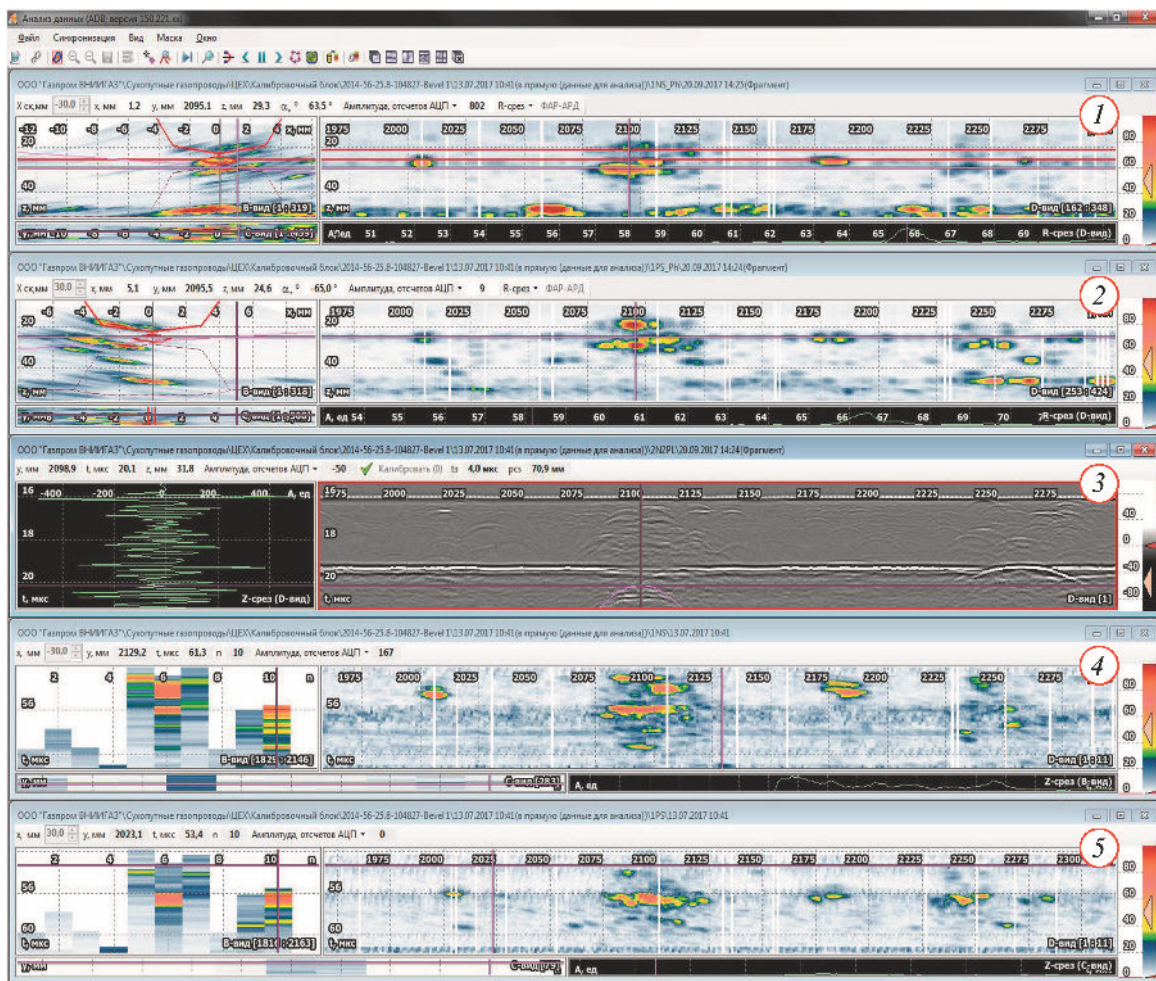


Рис. 4. Представление результатов контроля в программе «Анализ данных»:
 1, 2 – данные по каналу с ФР №1 и №2 соответственно; 3 – данные по каналу TOFD; 4, 5 – данные зонального контроля ФР №1 и №2 соответственно

Для контроля методом TOFD по заданным параметрам сварного соединения автоматически рассчитывается минимально необходимое количество пар преобразователей, их центральные частоты, размеры пластин, углы ввода и расстояния между точками ввода приемного и излучающего преобразователя. Критерием оптимизации является максимизация озвучиваемой площади поперечного сечения сварного соединения. При расчете параметров для АУЗК фазированной решеткой в режиме секторного или линейного сканирования программа на эскизе сварного соединения отображает ход лучей, точки фокусировки, соответствующие установленным параметрам: тип призмы и ФР, нижний угол сектора, верхний угол сектора, излучающие элементы, принимающие элементы, закон фокусировки, параметр фокусировки, положение ФР относительно сварного соединения. Изменяя указанные параметры, оператор подбирает необходимые для контроля значения. Для АУЗК методом зональной фокусировки на основе заданных координат точек фокусировки, соответствующих серединам зон, вычисляются необходимые параметры: углы ввода и приема, из-

лучающие и принимающие элементы ФР и временная развертка для контроля каждой зоны. Все определенные в программе «Редактор схем контроля» параметры сохраняются и загружаются в программе «Регистрация данных» для проведения контроля.

Окончательная настройка системы выполняется на образце с настроечными отражателями: устанавливается чувствительность контроля, корректируется временная развертка и настраиваются параметры каналов слежения за акустическим контактом.

В процессе проведения контроля 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. Информация об акустическом контакте в каждой точке сканирования представляется для каждой ФР в отдельных окнах. Зеленый цвет соответствует наличию акустического контакта, а красный – отсутствию.

После проведения контроля зарегистрированные данные доступны для анализа в программе «Анализ данных» (рис. 4). Данные визуального и измерительного контроля (рис. 5) также доступны для анализа в

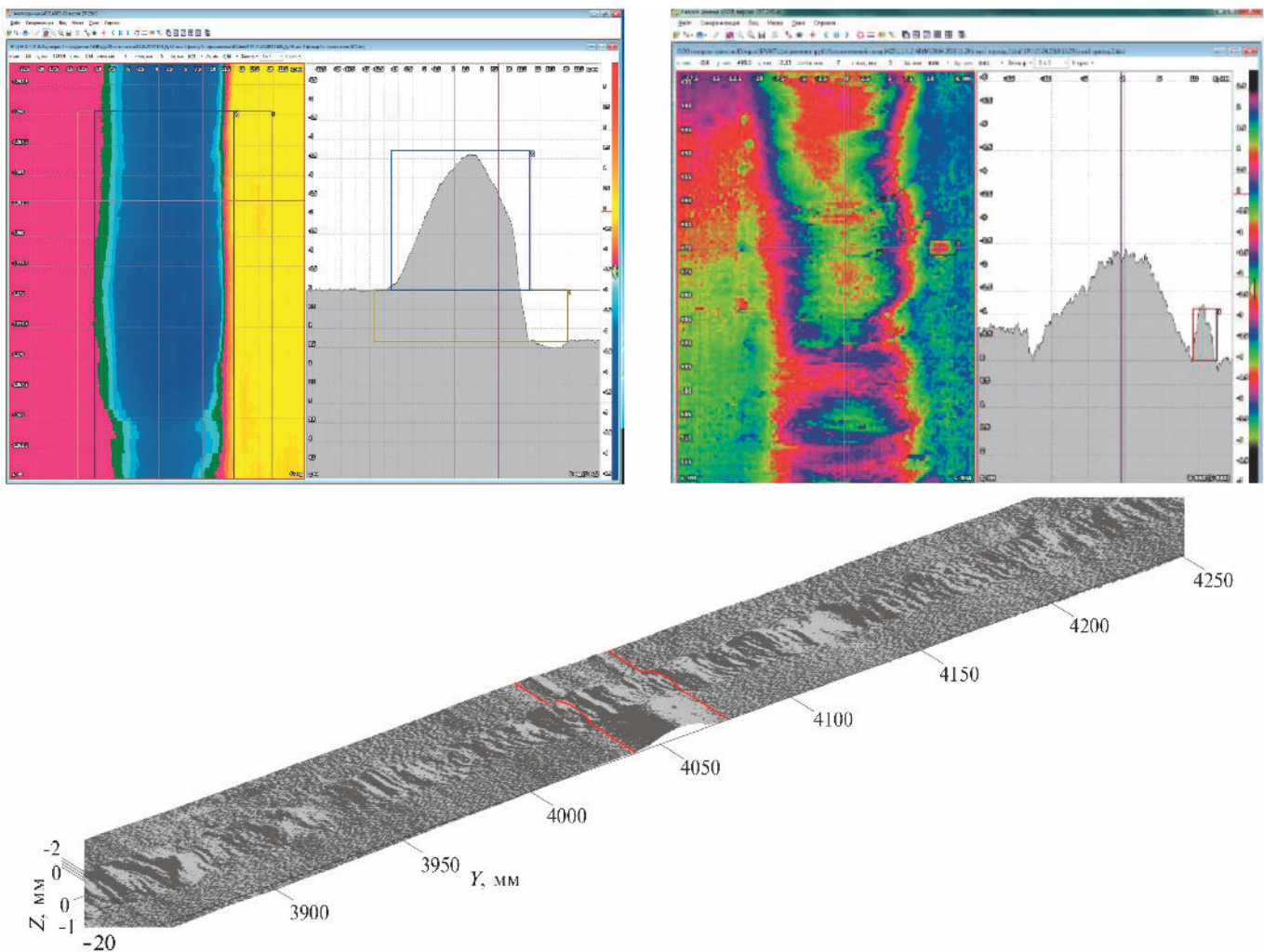


Рис. 5. Представление результатов визуального и измерительного контроля

той же программе «Анализ данных». Данные отображаются в виде проекций В(S)-, D-, С-типов и А-развертки [6]. Оператору доступны следующие функции просмотра и анализа: про-смотр данных по слоям на каждом виде, суммарное по всем слоям представление данных, произвольное масштабирование данных, смена цветовой палитры, наложение данных УЗК на эскизы сварных соединений, обнаружение дефектов по амплитудному признаку, удаление сигналов ниже заданного уровня, поиск локального максимума сигнала, различные маркеры для измерения параметров зарегистрированных сигналов и дефектов, включая параболические TOFD-маркеры, автоматическое определение параметров дефектов, функционал для создания записей о дефектах и их параметрах в базе данных. В результате с помощью программы анализа данных оператор формирует заключение контроля по заранее подготовленному шаблону. В случае если в базе данных для выбранного сварного соединения есть записи о наличии дефектов, то параметры дефектов будут автоматически занесены в заключение.

Результаты испытания системы АУЗК «АВГУР-ТФ»

В целях отладки методики контроля и подтверждения эксплуатационных характеристик системы в части выявления дефектов сварного соединения был изготовлен образец кольцевого сварного соединения диаметром 720 мм и толщиной 25 мм. Разделка сварного соединения V-образная с углом наклона кромок 20°. В процессе изготовления сварного соединения в него были внесены технологические дефекты: непровары корня шва, несплавления по границе разделки и межваликовые несплавления, шлаковые включения одиночные и скопления, поры одиночные и скопления, подрезы, утяжины, провисания корня.

В процессе отработки методики ультразвукового контроля сварных соединений системой «АВГУР-ТФ» проводилось сопоставление с данными рентгенографического контроля. Результаты сопоставления показали, что комбинация метода TOFD с методом фазированных решеток обеспечивает выявляемость дефектов не хуже, чем рентгенографический контроль.

В 2017 году на территории опытно-экспериментального центра ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (п. Развилка, Моск. обл.) были проведены квалификационные испытания системы «АВГУР-ТФ» в целях установления соответствия ее характеристик требованиям ПАО «Газпром» в области неразрушающего контроля. Квалификационные испытания системы АУЗК «АВГУР-ТФ» проводились в



Рис. 6. Проведение АУЗК «слепых» образцов сварных соединений

соответствии с СТО Газпром 2-3.5-046–2006 по «Программе проведения совмещенных квалификационных испытаний средств ультразвукового контроля (РУЗК, МУЗК, АУЗК) и радиационного контроля качества сварных соединений для определения возможности применения на объектах ПАО «Газпром». Испытания проводились на слепых образцах кольцевых сварных соединений (рис. 6), выполненных по различным технологиям сварки с различными типами подготовки кромок свариваемых деталей. Сварные соединения содержали заложенные технологические дефекты сварки разных типов, ориентации, размеров в соответствии с требованиями СТО Газпром 2-2.4-083. Всего на испытания было представлено пять образцов диаметром 1420 мм с толщиной стенки 25,8 мм и четыре образца диаметром 720 мм и толщиной 9 мм.

В процессе испытаний система «АВГУР-ТФ» показала высокую стабильность результатов контроля, которая определялась по величине отклонения амплитуд сигналов от одних и тех же отражателей при многократном сканировании в различных направлениях и при различных положениях сканирующего устройства (6, 9 и 12 ч). Также была подтверждена высокая эффективность работы системы слежения за акустическим контактом, чувствительность срабатывания которой может быть настроена в зависимости от предъявляемых требований к качеству регистрируемых данных.

Проверка выявляемости и оценка погрешности измерения параметров дефектов проводились способом сравнения и обработки результатов, полученных по результатам АУЗК «слепых» образцов

диаметром 1420 мм и диаметром 720 мм системой «АВГУР-ТФ» с данными о заложении дефектов. Контроль проводился с настройкой чувствительности на браковочный уровень от отражателя с эквивалентной площадью $2,5 \text{ мм}^2$ для контроля образцов диаметром 1420 мм, толщиной 25,8 мм и с эквивалентной площадью $1,05 \text{ мм}^2$ для контроля образцов диаметром 720 мм с толщиной 9 мм.

В результате испытаний были выявлены все заложенные недопустимые дефекты. Погрешность определения протяженности дефектов не превысила 3 мм, а погрешность определения высоты дефектов была не выше 1 мм.

По результатам испытаний установлено, что система АУЗК «АВГУР-ТФ» производства компании ООО «НПЦ «ЭХО+» может применяться на объектах ПАО «Газпром» для проведения АУЗК качества сварных соединений труб сухопутных участков магистральных газопроводов.

Результаты контроля сварных соединений

Опыт применения системы «АВГУР-ТФ» для АУЗК сварных соединений показал необходимость применения комбинации методов ФР и TOFD для достижения максимальной выявляемости дефектов. В качестве примера на рис. 7 представлены акустические изображения части сварного соединения диаметром 720 мм с толщиной одной стенки 28,5 мм,

а другой стенки – 33,5 мм, полученные по ФР- и TOFD-каналам. На данном примере несплошность может быть обнаружена по результатам контроля как методом ФР, так и методом TOFD. В то же время возможна ситуация, когда несплошность обнаруживается только по данным метода TOFD. Это может быть в случае плоскостной несплошности, имеющей преимущественно горизонтальную ориентацию (рис. 8). На рисунке видно, что индикации от несплошности на ФР-изображении находятся на уровне фоновых шумов, что не позволяет выполнить их фиксацию. На данных, полученных TOFD-методом контроля, сигналы от несплошности надежно фиксируются.

В 2019 году система «АВГУР-ТФ» успешно применялась для проведения АУЗК сварных соединений (рис. 9) диаметром 720, 426 и 160 мм в процессе монтажа трубопроводов на площадке размещения диагностических и очистных устройств газопровода «Северный поток – 2». Всего было проконтролировано: 42 сварных соединения диаметром 720 мм с толщинами стенки 28,5 мм и 33,5 мм; 4 сварных соединения диаметром 406 мм с толщиной стенки 17,5 мм и 49 сварных соединений диаметром 152 мм с толщиной стенки 11 мм. В процессе выполнения работы возникла необходимость проведения контроля сварных соединений сложной геометрии: разнотолщинные соединения трубы диаметром 152 мм

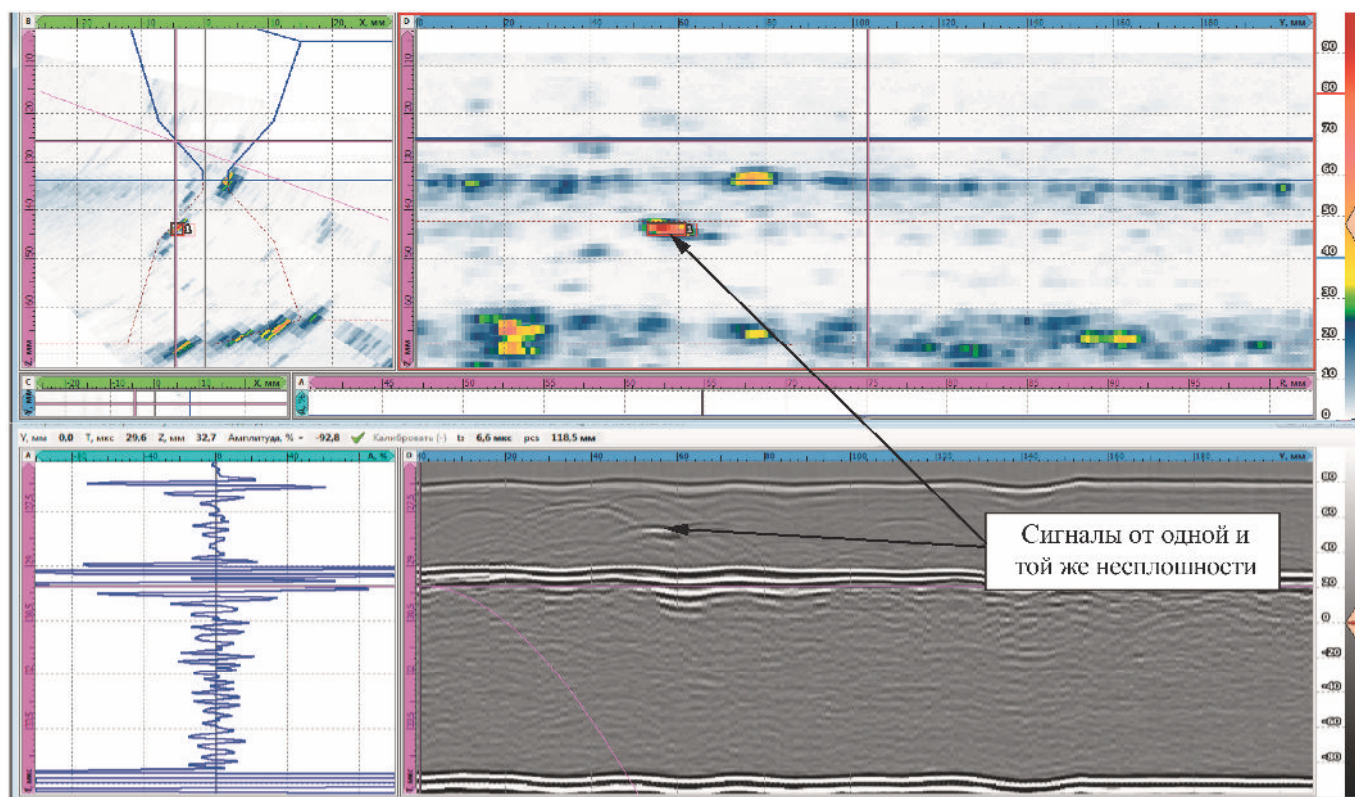


Рис. 7. Данные контроля сварного соединения диаметром 720 мм, полученные методами ФР и TOFD

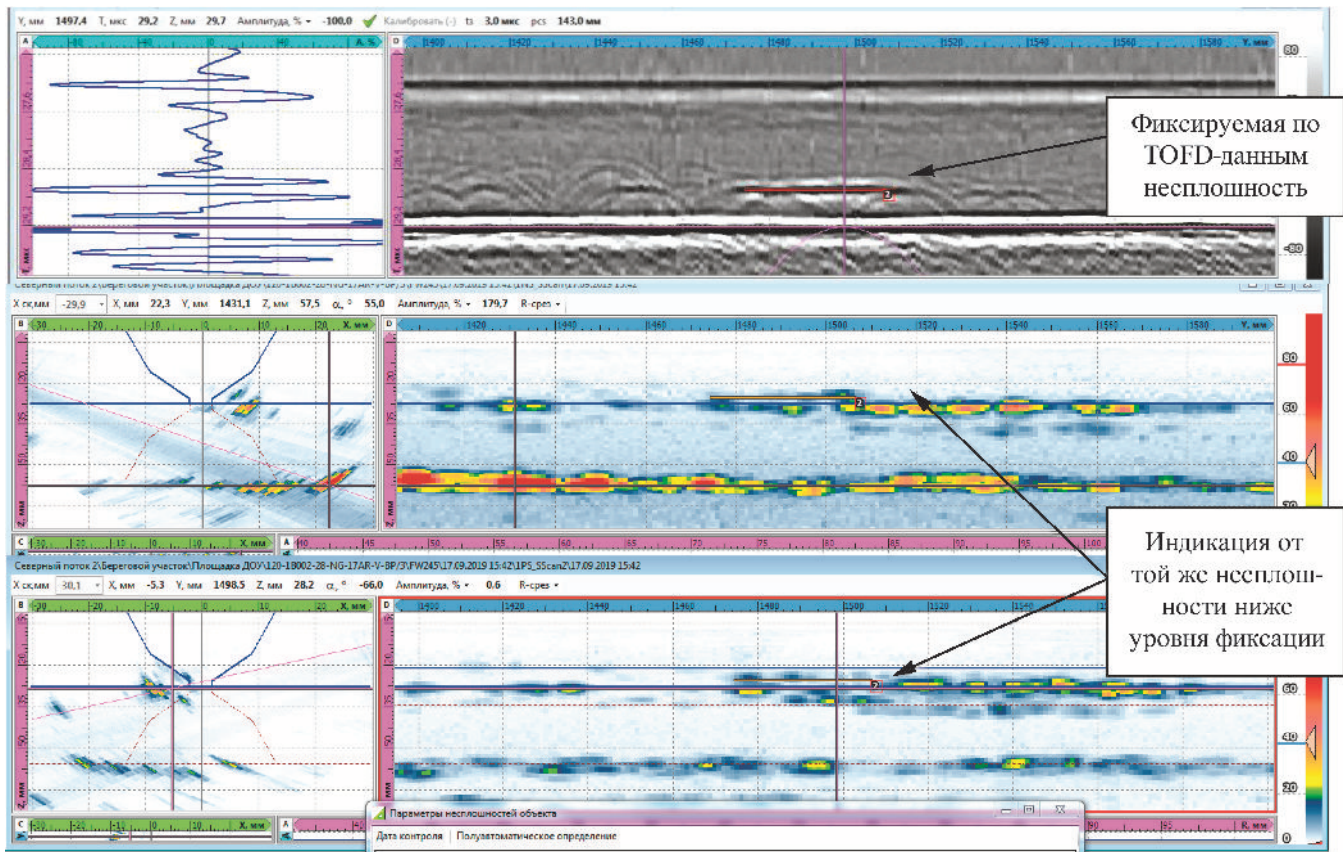


Рис. 8. Обнаружение несплошности по данным TOFD-метода контроля



Рис. 9. АУЗК сварного соединения диаметром 720 мм системой «АВГУР-ТФ» со сканером на магнитных колесах

с коническим переходом на внешней поверхности при изменении толщины от 11 до 16 мм в одном случае и от 11 до 36 мм в другом случае. Широкие функциональные возможности программы «Редактор схем контроля» помогли в сжатые сроки разработать технологическую карту контроля таких сварных соединений методами ФР и TOFD. На рис. 10 представлены схемы контроля методом ФР, а на рис. 11 – методом TOFD сварных соединений со сложной геометрией, полученные в программе «Редактор схем контроля».

Из приведенных схем контроля видно, что в случае толщин 11 – 16 мм прозвучивание всего объема сварного соединения обеспечивается на однократно и двукратно отраженном луче, а в случае 11 – 36 мм – на прямом и однократно отраженном луче. Контроль, проводимый методом TOFD, обеспечивает прозвучивание только нижней части данных разнотолщинных сварных соединений.

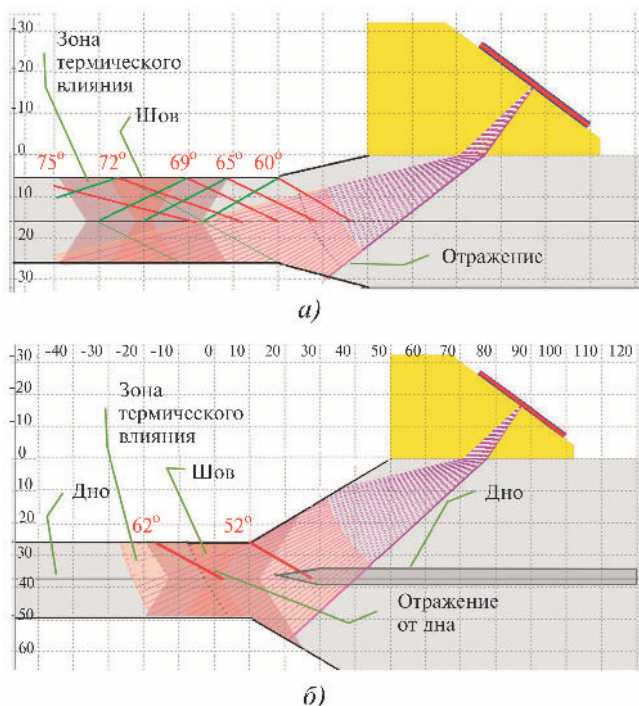


Рис. 10. Схемы контроля методом ФР сварных соединений сложной геометрии. Настройка секторного сканирования на стороне приварки кранов XV 1A005/1B005 со стороны патрубка крана (а), тройника (б):

а – прозвучивание сварного соединения секторным сканированием ФР с толщиной стенки трубы 11 мм и коническим переходом на толщину 16 мм; б – прозвучивание сварного соединения секторным сканированием ФР с толщиной стенки трубы 11 мм и коническим переходом на толщину 36 мм; красные линии – лучи поперечных волн (S), лучи продольных волн не показаны; зеленые линии – дважды отраженные лучи

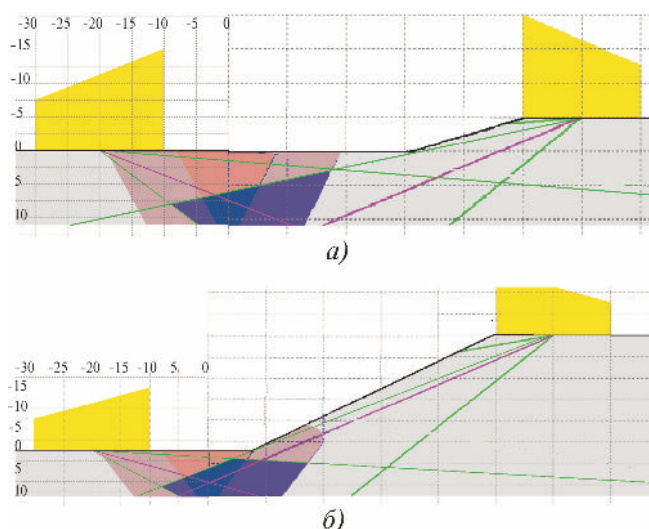


Рис. 11. Схемы контроля методом TOFD сварных соединений сложной геометрии:

красные линии – акустические оси ПЭП; зеленые линии – края диаграммы направленности; а – схема контроля сварного соединения с толщиной стенки трубы 11 мм и коническим переходом на толщину 16 мм; б – схема контроля сварного соединения с толщиной стенки трубы 11 мм и коническим переходом на толщину 36 мм

Выводы

Система «АВГУР-ТФ» – первая система для автоматизированного ультразвукового контроля, в которой реализованы следующие методы контроля: ФР в режимах секторного/линейного сканирования с фокусировкой на постоянную глубину, по вертикальной прямой, по сектору окружности, по отрезку произвольной прямой; зональная фокусировка; ЦФА, ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ, Multi-ЦФА; TOFD; АВИК.

Испытания системы «АВГУР-ТФ» и опыт ее применения для АУЗК сварных соединений показали ее высокую эффективность по обнаружению и определению параметров дефектов сварных соединений, что достигается применением комбинацией таких методов контроля, как ФР, TOFD, ЦФА.

Функциональные возможности системы, включая ее программное обеспечение, позволяют эффективно, в сжатые сроки решать задачи разработки методики контроля сварных соединений со сложной геометрией и выполнять сам контроль.

Свою эффективность система «АВГУР-ТФ» показала в процессе проведения ультразвукового контроля сварных соединений на площадке размещения диагностических и очистных устройств газопровода «Северный поток – 2»

Библиографический список

1. Ермолов И. Н. Комментарии к Британскому стандарту по дифракционно-временному методу контроля // Дефектоскопия. 2001. № 8. С. 3 – 28.
2. Алешин Н. П., Григорьев М. В. Дифракционные методы – новая реальность повышения информативности ультразвукового контроля // Сборник тезисов XXII Петербургской конференции УЗДМ-2016 «Ультразвуковая дефектоскопия металлов и перспективных материалов», Санкт-Петербург, Россия, 24 – 27 мая 2016 г. СПб., 2016.
3. Moles M., Dube N., Labbe S. and Ginzl E. Pipeline Girth Weld Inspections using Ultrasonic Phased Arrays // WCNDT 2004 – World Conference on NDT, Aug. 30 – Sep. 3, 2004, Montreal, Canada. Montreal, 2004. Paper code 85.
4. Ковалев А. В., Козлов В. Н., Самокрутов А. А. и др. 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. Коколев С. А., Ромашкин С. В. Комплект средств автоматизированного визуального и измерительного контроля // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 109 – 115.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ TOFD В РАЗРАБОТКАХ ООО «НПЦ «ЭХО+»



А. Е. Базулин,
канд. техн. наук,
гл. конструктор



А. В. Бутов,
ведущий инженер
системно-методической
лаборатории



Д. С. Тихонов,
канд. техн. наук,
зам. ген. директора



С. В. Ромашкин,
канд. техн. наук,
нач. системно-методической
лаборатории



А. В. Заушицын,
ведущ. научный сотрудник
системно-методической
лаборатории

Основы метода TOFD

Технология дифракционно-временного метода (Time of Flight Diffraction) была детально проработана в 1970-х годах [1] в Великобритании и доведена до широко применяемого промышленного стандарта. По этому методу проведено множество испытаний, обоснована замена радиографического контроля на метод TOFD [2, 3, 4]. Методы, использующие дифракционные сигналы, применялись в оборудовании ООО «НПЦ «ЭХО+» с момента создания компании [5, 6]. В то же время применение метода TOFD в России длительное время сдерживалось отсутствием нормативной базы и норм оценки качества.

С момента создания ООО «НПЦ «ЭХО+» особое внимание уделялось методам ультразвукового контроля, обеспечивающим визуализацию изображений дефектов и измерение их размеров. Дифракционные методы за счет своей высокой чувствительности и высокой точности во многих случаях позволяют решить задачу выявления, классификации и определения параметров дефектов. Приведен обзор возможностей оборудования и программного обеспечения, разработанного ООО «НПЦ «ЭХО+» в целях реализации технологии TOFD.

На рис. 1 представлены принцип сбора данных по технологии TOFD и пример файла данных, показывающих выявленный плоскостной дефект (непровар по кромке).

Технология TOFD при контроле стыковых сварных соединений подразумевает использование:

- как минимум двух ПЭП, работающих в раздельном режиме, обеспечивающих короткий (не более двух периодов) зондирующий импульс;
- маломощного усилителя с большим диапазоном усиления с тем, чтобы регистрировать сигналы дифракции, которые могут быть на 20 дБ ниже, чем отражение от бокового отверстия;
- высокой частоты оцифровки радиосигнала (в 8 раз выше, чем рабочая частота преобразователя);
- специального программного обеспечения с курсорами, дающими возможность анализа фазы и времени прихода сигнала.

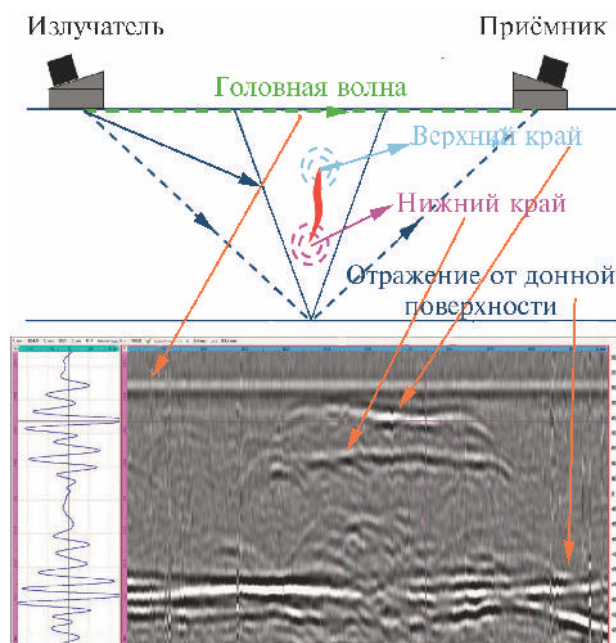


Рис. 1. Принцип TOFD и пример выявления вертикально ориентированного плоскостного дефекта

Главные достоинства технологии TOFD:

- высокая чувствительность к дефектам различного типа – от отдельных пор до трещин различной ориентации;
- скорость контроля, которая ограничивается лишь частотой посылок зондирующего импульса, что в особенности удобно для контроля толсто-стенных сварных соединений;
- возможность измерения размеров: проведено множество испытаний на перлитных сварных соединениях, показавших погрешности измерения высоты, составляющие доли миллиметра;
- практически отсутствие зависимости процедуры настройки и анализа данных в зависимости от формы сварного соединения;
- запись данных и возможность интерпретации в режиме офлайн, что позволяет документировать результаты контроля.

Недостатки технологии TOFD:

- отсутствие возможности измерения эквивалентной площади выявленных дефектов;
- необходимость двухстороннего доступа к сварному соединению;
- неопределенность в координате несплошности в направлении, перпендикулярном оси сварного соединения;
- сложности при контроле сварных соединений с применением аустенитных материалов или иных материалов с высоким затуханием и зернистостью;
- наличие мертвой зоны при наружной поверхности, сложность интерпретации сигналов от дефектов в области донной поверхности, особенно на фоне смещения кромок;
- необходимость подготовки квалифицированного оператора, обученного на представительной выборке типичных изображений дефектов.

Документ API RP 2X [7] не рекомендует применение исключительно TOFD для измерения несплошностей, а требует дополнения эхометодом. Разрабатываемый проект СТО ГАЗПРОМ на контроль сварных соединений [8] предполагает использование параллельно технологий контроля ФР (фазированными решетками) и TOFD в автоматизированном режиме.

ASME допускает применение TOFD с применением фазированных решеток [9], в опыте ООО «НПЦ «ЭХО+» имеется пример, когда контроль корня сварного соединения на наличие размывов выполнялся с помощью дефектоскопа на фазированных решетках [10].

Реализация в системах «АВГУР»

Электроника

В дефектоскопах систем «АВГУР-Т» и «АВГУР-ТФ» встроены платы, реализующие шести- и двухканальные варианты TOFD. Частота дискрети-

зации составляет до 100 МГц с применением интерполяции до 400 МГц.

Поскольку дифрагированные эхосигналы имеют достаточно малую амплитуду в сравнении с сигналом от донной поверхности, особенно при использовании длинных высокочастотных кабелей (более 7 м), используется малошумящий предусилитель на 40 дБ.

Полосовая фильтрация по настраиваемой пользователем полосе частот позволяет получать менее зашумленные сканы, аппаратное усреднение сигналов (до 16 реализаций на канал) позволяет повысить отношение сигнал/шум в случае необходимости, но за счет замедления скорости сбора данных.

Таким образом, TOFD в системах «АВГУР» реализуется как для автоматизированного, так и для механизированного ультразвукового контроля с применением портативного прибора с аккумуляторным питанием.

Преобразователи

Для проведения УЗК методом TOFD в широком диапазоне толщин объектов контроля от 8 до 300 мм (и даже более) используются пьезоэлектрические преобразователи с частотами 2; 5 и 10 МГц производства ООО «НПЦ «ЭХО+» (рис. 2, табл. 1) или иных производителей.



Рис. 2. Призмы и ПЭП TOFD производства ООО «НПЦ «ЭХО+»

1. Параметры ПЭП TOFD производства ООО «НПЦ «ЭХО+»

| Маркировка и артикул | Частота, МГц | Диаметр пьезоэлемента, мм | Диаметр корпуса ПЭП, мм |
|----------------------|--------------|---------------------------|-------------------------|
| L2D0-12C (P0180005) | 2 | 12 | 17 |
| L5D0-03C (P0180002) | 5 | 3 | 9,5 |
| L5D0-06C (P0180001) | 5 | 6 | 9,5 |
| L10D0-03C (P0180003) | 10 | 3 | 9,5 |
| L10D0-06C (P0180004) | 10 | 6 | 9,5 |

Сканеры

Для перемещения групп преобразователей TOFD возможно применение различных сканирующих устройств – от простейших и миниатюрных до больших сканеров, несущих до восьми пар TOFD. На рис. 3 показаны три сканера для



Рис. 3. Сканеры производства ООО «НПЦ «ЭХО+» для проведения контроля по технологии TOFD (ручной, механизированный и автоматизированный)

TOFD: ручной «ХАМЕЛЕОН», механизированный «МЫШЬ» и автоматизированный «СЛОН». Главное требование – минимизация люфтов в механизмах крепления преобразователей. В арсенале ООО «НПЦ «ЭХО+» имеются все типы таких сканеров. Практика, однако, показала, что наиболее удобным является вариант, когда на сканер устанавливается не более двух пар TOFD, иначе затрудняется оперативное слежение за акустическим контактом и реакция на ухудшение акустического контакта.

Программное обеспечение

Калькулятор TOFD

Для расчета схем контроля в программное обеспечение «АВГУР» встроен калькулятор схем контроля TOFD (рис. 4), который позволяет:

- параметрически задать конструкцию сварного соединения (кольцевое, продольное, сварка разнотолщинных деталей и детали обечайка-днище);
- автоматически подобрать схемы контроля для нескольких пар преобразователей и призм с типовыми значениями размеров пьезопластин, частот, углов ввода продольной волны;
- рассчитать зону прозвучивания сварного шва и околшовной зоны по выбранным схемам контроля;
- рассчитать размерные критерии приемки (соотношение высоты и протяженности для внутренних и поверхностных дефектов), например в соответствии с ASME Section VIII Code Case 2235 on Ultrasonic Examination of Welds in Lieu of Radiography [11].

Калибровка курсоров

По умолчанию шкала глубин на TOFD-скане является нелинейной, что затрудняет анализ данных. Для привязки шкалы глубин к истинной глубине необходимо выполнять калибровку по сигналу головной волны и сигналу от донной поверхности объекта с известной толщиной. В программном обеспечении «АВГУР» такая калибровка выполняется за несколько щелчков «мышкой» при ручном указании сигнала от головной волны и от донного сигнала. В ближайшем будущем такая калибровка будет полностью автоматизирована.

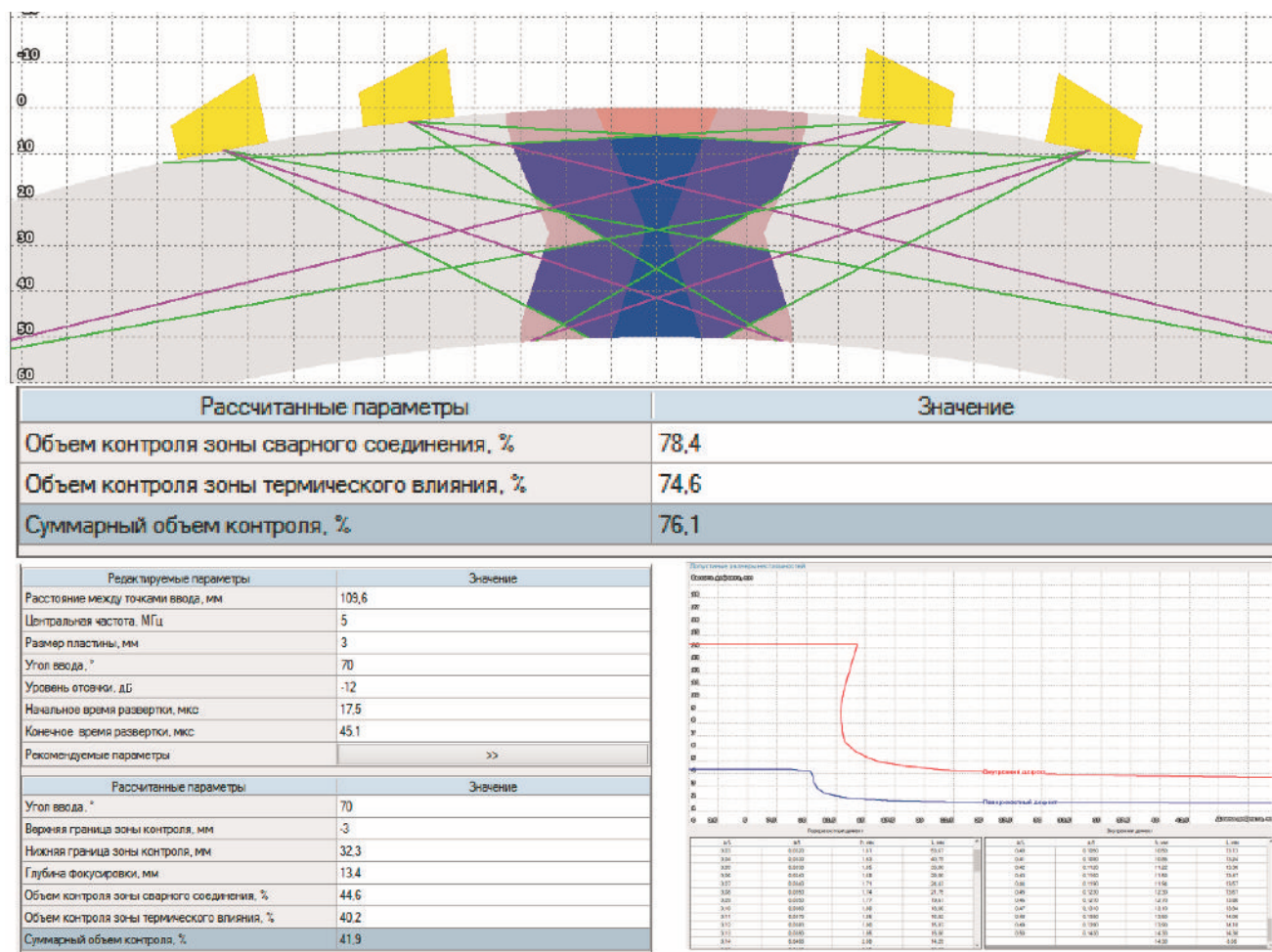


Рис. 4. Работа калькулятора параметров TOFD (графическое задание схемы контроля, параметры канала и размерные критерии)

Применение интерполяции

В программное обеспечение «АВГУР» встроена функция интерполяции данных TOFD с целью получить более сглаженную картину. Интерполяция используется за счет применения быстрого

преобразования Фурье и увеличения длины вектора в 2 – 4 раза [12]. На рис. 5 показан фрагмент TOFD-изображения до и после выполнения интерполяции с 40 до 160 МГц. Показан также параболический курсор, установленный на непротяженный дефект.

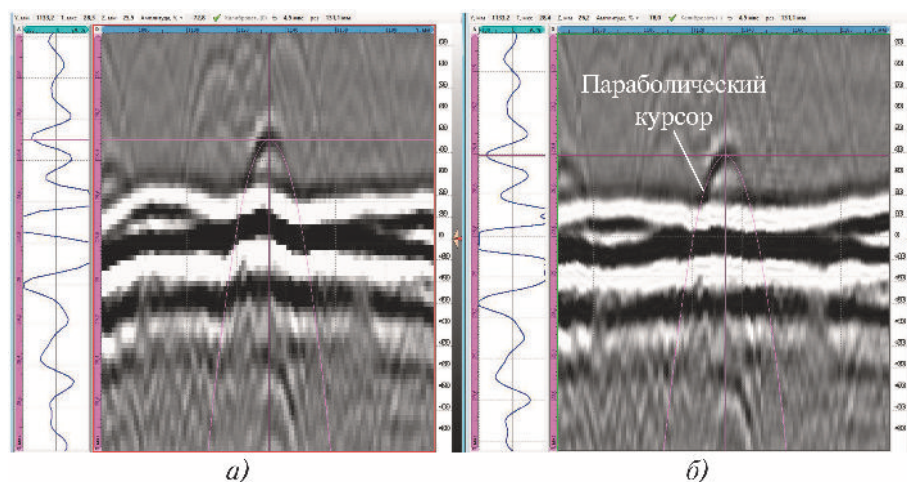


Рис. 5. Применение интерполяции: а – частота 40 МГц; б – 160 МГц

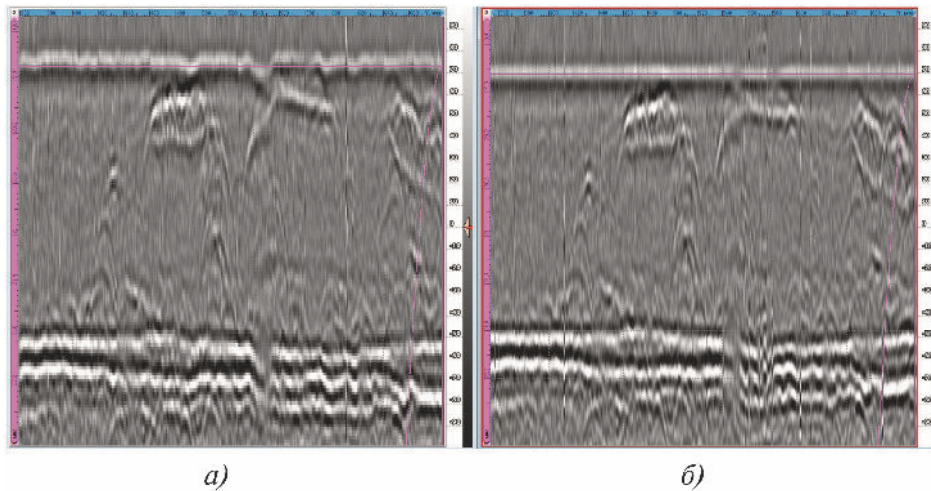


Рис. 6. Выравнивание по сигналам от головной волны:
a – исходные данные; *б* – обработанные

Выравнивание по головной волне

Компенсация изменяющего слоя контактной жидкости под призмой и механических люфтов в конструкции прижима выполняется при вызове обработки, выравнивающей все сигналы по фронту головной волны. На рис. 6 показан пример применения такой обработки.

SAFT для TOFD

Как уже было указано, по умолчанию шкала глубин является нелинейной, а широкая диаграмма направленности ПЭП TOFD приводит к появлению характерных параболических «усов» (см. рис. 5). Для приведения координат к декартовым, а также для наглядной классификации дефектов на

протяженные и непротяженные применяется обработка типа фронтального SAFT. На рис. 7 показан пример такой обработки при визуализации боковых отверстий и паза в настроечном образце.

Когерентный фактор

Уменьшить уровень ложных бликов изображения дна и сократить размеры мертвой зоны можно с использованием метода когерентного фактора (CF) [13]. На рис. 8 показаны фрагменты SAFT-изображения и SAFT-CF-изображения образца сварного соединения обечаек парогенератора толщиной 145 мм. Блики границ паза, имитирующего подповерхностную трещину, сохранили фазовые соотношения TOFD-эхо-сигналов и находятся в противофазе. На SAFT-CF-

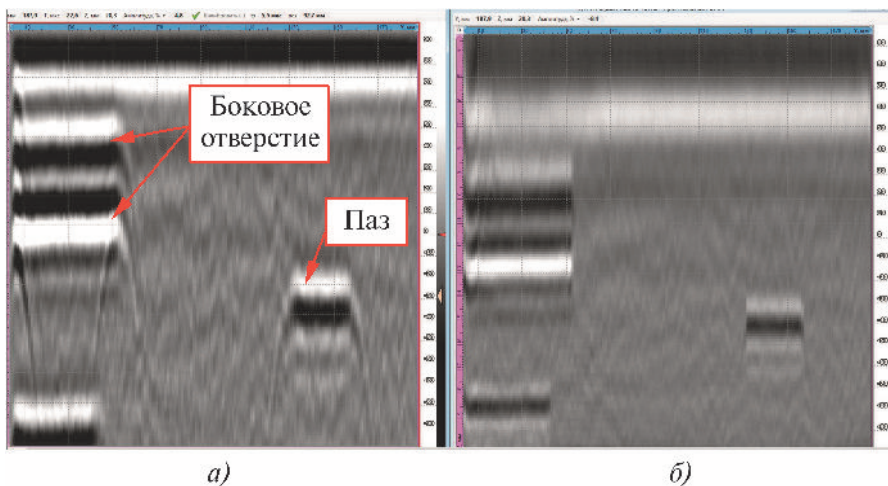


Рис. 7. Обработка SAFT для данных TOFD
a – исходные данные; *б* – обработанные данные

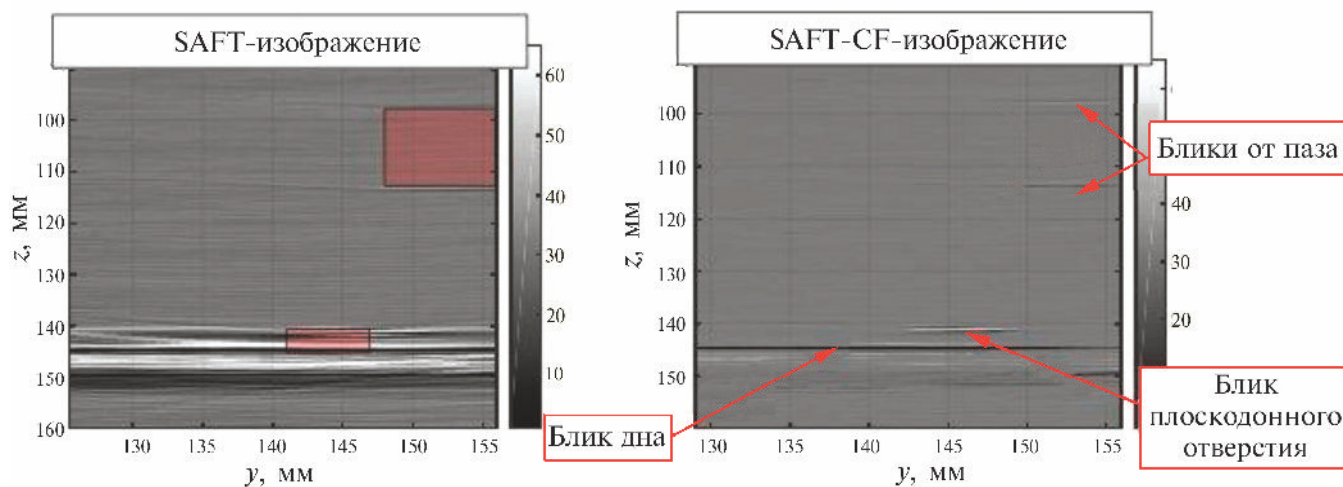


Рис. 8. Пример применения когерентного фактора для уменьшения размеров мертвой зоны при выявлении придонных дефектов

изображении уверенно обнаруживается блик вершины вертикального плоскостонного отверстия глубиной 5 мм и диаметром 5 мм, выполненного на донной поверхности, протяженность обоих дефектов определяется как близкая к фактической.

Базы данных с альбомами дефектов

В силу особенностей данных TOFD от оператора требуется проверка зрения на способность различать градации серого цвета и навык расшифровки данных, полученных на различных типах дефектов. Для подготовки операторов необходимо отсмотреть значительный объем таких данных. Принцип построения базы данных «АВГУР» позволяет отобрать из нее данные TOFD, полученные на различных объектах контроля, как содержащие дефекты, так и бездефектные.

Методики применения

Для применения технологии TOFD в ООО «НПЦ «ЭХО+» разработан и опробован ряд методик контроля, в том числе:

- для контроля сварных швов магистральных газопроводов [14];
- для контроля сварных швов берегового участка трубопровода «Северный поток – 2» [15];
- для контроля сварных швов сосудов с толщиной стенки от 12 до 300 мм [16].

Методики разработаны с учетом требований международных и российских стандартов и включают требования к аппаратуре, настроечным образцам, порядку настройки, проведения контроля и анализа данных контроля.

Примеры применения

Контроль кольцевых сварных швов трубопроводов

Силами и оборудованием ООО «НПЦ «ЭХО+» проводился контроль сварных соединений трубопроводов:

- диаметром от 159 до 720 мм на береговом участке трубопровода «Северный поток – 2» (рис. 9);
- диаметром от 426 до 1420 мм при испытаниях системы «АВГУР-ТФ» в ООО «Газпром ВНИИГАЗ».



Рис. 9. Контроль системой «АВГУР-ТФ» (ФР+TOFD) кольцевых сварных соединений трубопроводов

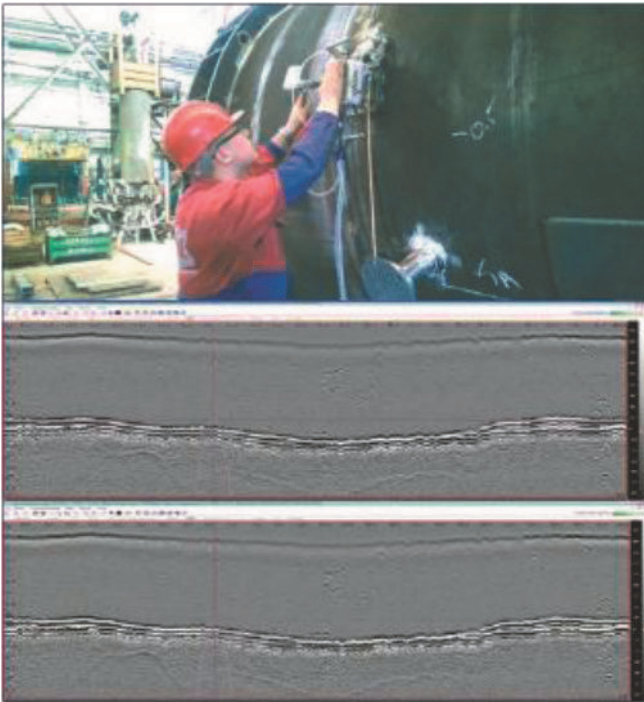


Рис. 10. Контроль сварных соединений сосудов. Перемещение механизированного сканера и сканограмма по двум каналам TOFD

Контроль сварных швов сосудов

С применением оборудования ООО «НПЦ «ЭХО+» проводился контроль сосудов и емкостей толщиной до 350 мм, производимых АО «Ижорские заводы», АО «Уралхиммаш» (рис. 10), АО «Красный котельщик» и емкостей, эксплуатируемых на Омском НПЗ.

Контроль коррозии в корне шва

Лаборатория по применению оборудования ООО «НПЦ «ЭХО+» провела демонстрационный контроль испытательного тест-образца сварного соединения с дефектами износа корня шва. Образец вырезан из забракованной по данным толщинометрии трубы и содержит реальные дефекты, которые образовались в результате вымывания корня шва рабочей средой (рис. 11). На рис. 12 приведен характерный вид изображения TOFD, полученного при сканировании по образцу сканером «МышьАвто» с предусилителем TOFD A2×2 (арт. S0170002). При измерениях использовалась схема контроля с ПЭП TOFD с частотой 5 МГц и призмами с углом ввода в сталь 70°. На TOFD-изображении видно раздвоение донного сигнала, которое говорит об уменьшении толщины в области СС. Дефекты 1 и 2

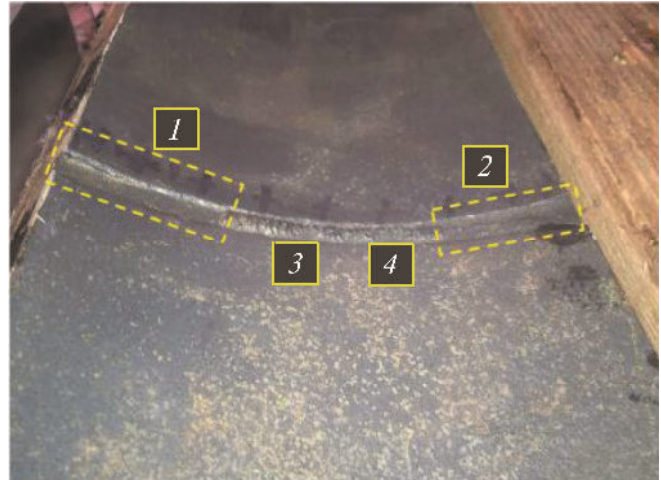


Рис. 11. Вид образца с размывом, вид со стороны корня: 1, 2 – размывы корня; 3, 4 – точечные дефекты в корне

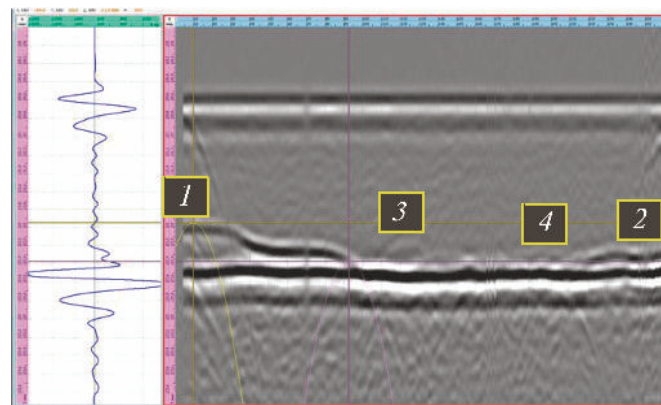


Рис. 12. Пример выявления размывов (индикации 1 и 2) и точечных неровностей (3, 4) в корне шва

по классификации ASME представляют собой волгнутый корень.

Сопоставление высот размывов 1 и 2, измеренных по данным TOFD и с помощью ВИК, приведено в табл. 2. Разница в результатах не превысила 0,2 мм. На изображении TOFD слабо видны и точечные дефекты в корне шва (3 и 4), которые также обнаруживаются визуально.

2. Результаты замеров параметров выемок

| № дефекта | Максимальная глубина выемки, мм | |
|-----------|---------------------------------|-----|
| | TOFD | ВИК |
| 1 | 3,0 | 2,9 |
| 2 | 4,2 | 4,0 |

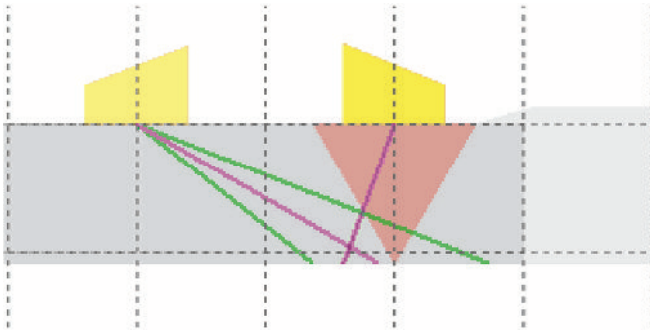


Рис. 13. Пример расчета схемы асимметричного TOFD

Асимметричный TOFD

При невозможности установить симметрично ПЭП TOFD из-за наличия конусных проточек, наличия отводов и прочего (что в ряде случаев, к сожалению, встречается, особенно при эксплуатационном контроле) можно применять так называемый асимметричный TOFD, когда один из датчиков устанавливается посередине шва и принимает (излучает) продольную волну под углом 0° или близким к этому. В отечественной литературе это называется дельта-методом [17]. В данном режиме существенно ослабевают или вовсе отсутствуют сигналы головной волны, но результаты по выявлению дефектов не хуже, чем при классическом TOFD. Калькулятор схем контроля «АВГУР» также поддерживает эту схему контроля (рис. 13).

Выявление поперечных дефектов

Особенность технологии TOFD не позволяет без особых ухищрений отличить одиночный непротяженный дефект типа поры от реальной попереч-

ной трещины. Теоретически задача различения непротяженного дефекта от поперечного может быть решена при наличии второго канала сбора данных, когда пара ПЭП TOFD развернута вдоль одной линии на 45° [18]. В этом случае по изменению характерной формы «усов» при изменении схемы можно диагностировать наличие поперечного дефекта, а затем окончательно подтвердить его иным способом контроля (например, просто эхометодом). Разница в упомянутом изменении формы незначительна, и в реальном случае представляет сложность для оператора эту разницу выявить. Кроме того, при контроле труб малого диаметра затруднительно разместить ПЭП TOFD по схеме с поворотом. Однако по мере накопления сигналов от подобных дефектов есть все основания полагать, что для классификации по типу дефекта будет применен некий алгоритм из области машинного обучения.

Выявление и определение формы аустенитных заварок

Применение TOFD для контроля материалов с зернистой структурой не показало многообещающих результатов, однако специалисты компании DEKRA продемонстрировали [19], что при контроле главного циркуляционного трубопровода с аустенитными и высоконикелевыми заварками с использованием технологии TOFD удобно определять длину и глубины заварок, выполненных с наружной стороны трубопровода (рис. 14). Подобный подход применяется ООО «НПЦ «ЭХО+» и с использованием эхометода и визуализации, но в варианте с TOFD получить результат можно быстро и наглядно.

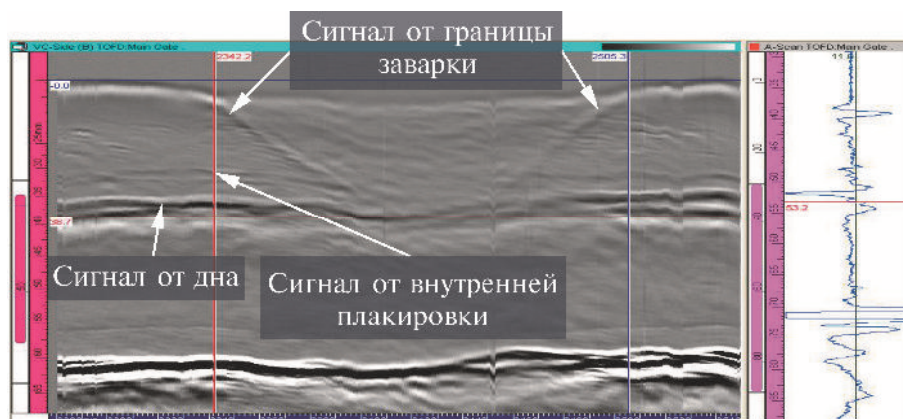


Рис. 14. Пример определения формы аустенитной ремонтной заварки (изображение получено компанией DEKRA):

курсоры установлены на начало и конец заварки. Видно, что заварка достигает слоя плакированного металла

Выводы

Метод TOFD, разработанный в 1970-х годах, продолжает демонстрировать свою эффективность при проведении контроля различных объектов.

Применение оборудования (дефектоскопы, сканеры, пьезоэлектрические преобразователи, призмы, настроечные образцы) и программного обеспечения «АВГУР», разработанных ООО «НПЦ «ЭХО+», позволяет реализовать все составляющие технологии TOFD и обеспечить выявление и определение параметров дефектов в сварных швах опасных промышленных объектов.

Большой ценностью являются альбомы изображений типичных дефектов. Каждая из компаний, выполняющих работы по АУЗК, накапливает характерные изображения дефектов, полученных на испытательных образцах и реальных дефектах, подтвержденных результатами вырезки. База данных «АВГУР» постоянно пополняется такими изображениями для обучения дефектоскопистов лабораторий «ЭХО+» и специалистов заказчиков.

Многообещающие результаты получены при автоматическом анализе данных TOFD с определением типа дефекта [20], в планах ООО «НПЦ «ЭХО+» применить методы машинного обучения к таким данным.

Библиографический список

1. **Silk M. G., Lidington B. H.** Defect Sizing using an Ultrasonic Time Delay Approach // *British Journal of NDT*. 1975. V. 17. No. 2. P. 33 – 36.
2. **ISO 16828:2012.** Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Дифракционно-временной метод как метод для обнаружения и оценки размеров несплошностей, 2012.
3. **ISO 10863:2011.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод. Применение дифракционно-временного метода (TOFD), 2011.
4. **Verkooijen J.** TOFD used to replace radiography // *INSIGHT*. 1995. V. 37. No. 6. P. 433 – 435.
5. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Вopilкин А. Х. и др.** Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / под ред. А. Х. Вopilкина. М: Машиностроение, 2008. 386 с.
6. **Базулин Е. Г., Вopilкин А. Х., Тихонов Д. С.** Использование волн дифракции для ультразвуковой дефектометрии в алгоритмах когерентного восстановления высококачественных изображений отражателей // *В мире неразрушающего контроля*. 2012. № 3 (57). С. 20 – 25.
7. **API RP 2X.** Recommended Practice for Ultrasonic and Magnetic Examination of Offshore Structural Fabrication and Guidelines for Qualification of Technicians, 2004.
8. **СТО Газпром 15-1.3-004–2019.** Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Неразрушающие методы контроля качества сварных соединений промысловых и магистральных газопроводов, 2019.
9. **Brillon C., Armitt T., Dupuis O.** TOFD Inspection with Phased Arrays // 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25 – 28 Oct. 2008, Shanghai, China. Shanghai, 2008.
10. **Базулин А. Е., Пронин В. В., Тихонов Д. С. и др.** Сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла и сварных швов // *В мире НК*. 2014. № 4 (66). С. 20 – 26.
11. **ASME Section VIII Code Case 2235 on Ultrasonic Examination of Welds in Lieu of Radiography**, 1996.
12. **Базулин А. Е.** Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей «АВГУР 5.4». Часть II. Погрешности измерений // *Контроль. Диагностика*. 2010. № 3. С. 8 – 20.
13. **Базулин Е. Г.** Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // *Дефектоскопия*. 2017. № 6. С. 5 – 17.
14. **МФАРТ-НГ1-Т1-А/24-К-16.** Инструкция по автоматизированному ультразвуковому контролю сварных соединений газопроводов толщиной стенки от 8 до 40 мм системой автоматизированного ультразвукового контроля «АВГУР-ТФ». М., 2016, 40 с.
15. **W-RU-PIP-ONR-PRO-878-000556ER.** Северный поток – 2. Строительство наземного участка трубопровода в России. Процедура механизированного ультразвукового контроля с применением фазированных решеток и TOFD. Трубопроводы. М., 2019, 270 с.
16. **МТОFD-НХП-ТС1А-20-КП-17.** Автоматизированный ультразвуковой контроль сварных соединений толщиной от 12 до 300 мм дифракционно-временным методом TOFD. Инструкция по проведению контроля. М., 2018, 47 с.
17. **Щербинский В. Г., Алешин Н. П.** Ультразвуковой контроль сварных соединений. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 496 с.
18. **Morgan L. L.** Transverse Cracking in the Manual and Automated Ultrasonic Testing of Welds // *e-Journal of Nondestructive Testing (NDT)*. 2018. № 2.
19. **Бенитез Дж., Вилонас Ж.** Автоматизированный ультразвуковой контроль сварных соединений Ду800 контура многократной принудительной циркуляции реакторов РБМК // Миссия технической поддержки WANO. Москва, 10 – 11 августа 2011 г. М., 2011.
20. **C'Shekhar N. Shitole, Zahran O. W** Al-Nuaimy Combining fuzzy logic and neural networks in classification of weld defects using ultrasonic time-of-flight diffraction // *NDT 2006, the 45th Annual British Conference on NDT*, Stratford-upon-Avon, UK, September 2006. Stratford-upon-Avon, 2006.

ОПЫТ СПЛОШНОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ ФР-ДЕФЕКТОСКОПОВ



В. Г. Федотовских,
ведущ. науч. сотрудник



Д. С. Тихонов,
зам. ген. директора,
канд. техн. наук



С. В. Ромашкин,
нач. системно-методической
лаборатории,
канд. техн. наук

Рассматриваются две методики проведения ультразвуковой толщинометрии, разработанные ООО «НПЦ «ЭХО +», одна из которых предназначена для проведения сплошной толщинометрии основного металла (СУЗТ), другая – для толщинометрии сварных соединений. Кратко описаны ультразвуковые методы, используемые в данных методиках. Представлены результаты их применения. Также описаны средства контроля, изготовленные ООО «НПЦ «ЭХО+» для проведения толщинометрии по данным методикам.

Анализ зафиксированных случаев ЭКИ на пилотном энергоблоке Курской АЭС в период за 2011 – 2014 годы показал, что ЭКИ в области сварных соединений составляет 70 %.

На сегодняшний день используется широкий спектр различных методов и технологий неразрушающего контроля для определения толщины выявления коррозионных поражений изделия. Весьма эффективны ультразвуковые методы толщинометрии (УЗТ), основанные на свойстве отражения ультразвуковых волн на границах раздела сред. Их основные достоинства состоят в возможности контроля при одностороннем доступе, высокой производительности и относительно простых требованиях к подготовке участка измерения.

Однако известные методы контроля не обеспечивают достоверного выявления коррозионных поражений в зонах с неэквидистантными внешней и внутренней поверхностями изделий.

Реализация УЗТ в системах «АВГУР»

В 2015 году ООО «НПЦ «ЭХО+» разработало для АО «Концерн «Росэнергоатом» две методики с применением фазированных решеток для проведения толщинометрии: методику МТ 1.2.1.15.001. 1086–2015 [1] для проведения сплошной УЗТ (СУЗТ) основного металла и методику МТ 1.2.1.15.001.1087–2015 [2] для СУЗТ сварных соединений.

Средства контроля

Также ООО «НПЦ «ЭХО+» разработало следующие средства контроля для проведения СУЗТ по данным методикам:

Трубопроводы в процессе эксплуатации подвержены эрозионно-коррозионному износу (ЭКИ). Под воздействием транспортируемой среды происходит эрозионное разрушение защитной оксидной пленки на внутренней поверхности, что способствует протеканию процесса коррозии, возникновению коррозионных трещин, в результате чего разрушается металл стенки трубопровода.

Анализ случаев эрозионно-коррозионного износа показывает, что области сварных соединений (случай неэквидистантных поверхностей) перлитных трубопроводов являются наиболее подверженными ЭКИ.

Примеры ЭКИ в области сварных соединений представлены на рис. 1.



- С высоким содержанием хрома
- С низким содержанием хрома

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

– дефектоскоп «АВГУР-АРТ»; на рис. 2 представлена ручная модификация дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰»;

– призмы с толщиной, соответствующей толщине объекта контроля (ОК), и притертые под его диаметр (рис. 3);

– настроечные образцы; пример настроечного образца для СУЗТ трубопроводов диаметром 426 мм и толщиной 25 мм приведен на рис. 4;

– двухкоординатный сканер «Хамелеон», обеспечивающий перемещение ФР по двум осям вдоль и поперек шва (рис. 5).

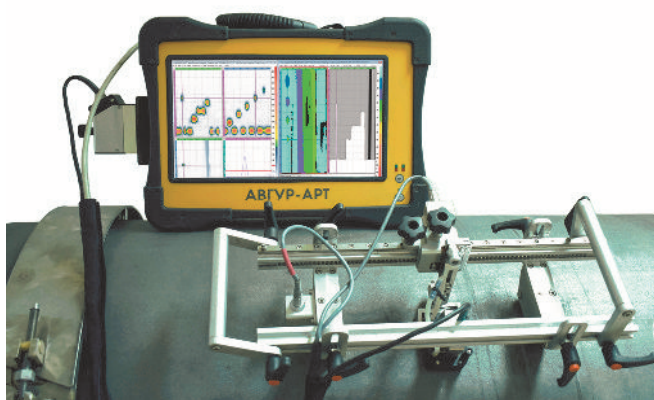


Рис. 2. Ручной дефектоскоп «АВГУР-АРТ²⁰²⁰»

Для выполнения анализа данных СУЗТ ООО «НПЦ «ЭХО+» разработано специализированное программное обеспечение (ПО) «АВГУР-СМ».

ПО «АВГУР-СМ» по данным СУЗТ строит карту толщины проконтролированного участка и профиль донной поверхности.

Также ПО имеет следующие возможности:

– определение значения толщины в каждой точке с формированием таблицы значений;

– изменение сетки с соответствующим изменением количества столбцов/строк таблицы со значением толщины;

– поиск минимального значения толщины с фиксацией координат;

– возможность выдачи заключения с таблицей со значениями толщины с выбранным шагом по координатам X и Y ;

– возможность применения фильтрации (медианная, сглаживающая);

– возможность объединения двух или нескольких файлов данных в один и просмотр общей карты толщины.

Пример изображения данных СУЗТ в программе «АВГУР-СМ» и карты толщины, построенной по этим данным, приведен на рис. 6.



Рис. 3. Призмы для проведения СУЗТ



Рис. 4. Настроечный образец:

толщина образца $H = 25$ мм, радиус наружной поверхности $R = 213$ мм

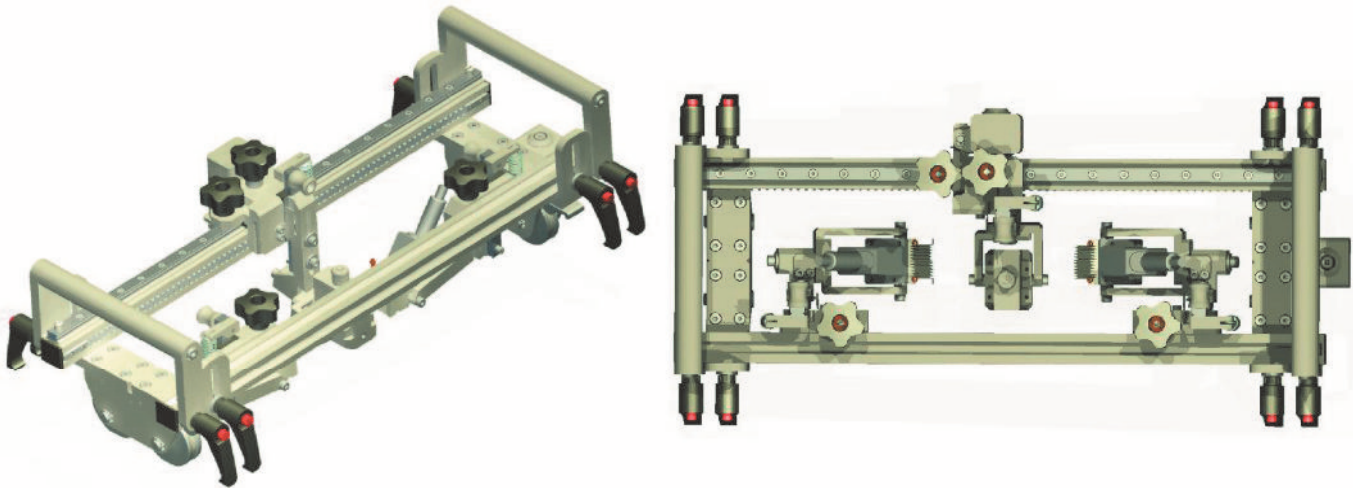
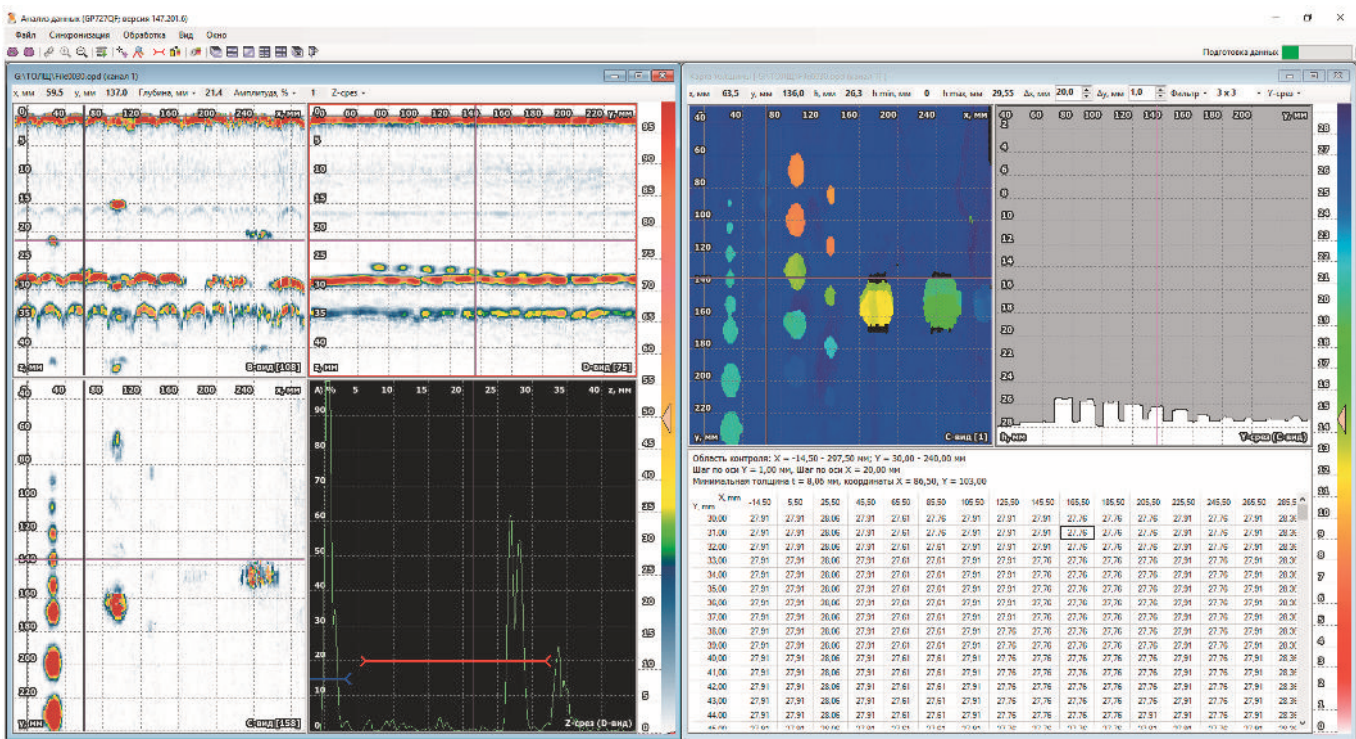


Рис. 5. Ручной двухкоординатный сканер «Хамелеон»



а)

б)

Рис. 6. Изображения в программе «АВГУР-СМ»: а – данные СУЗТ; б – карта толщины, построенная по этим данным

Методика МТ 1.2.1.15.001.1086–2015 [1] для проведения СУЗТ основного металла

Данная методика устанавливает порядок проведения сплошной ультразвуковой толщинометрии монометаллических стенок оборудования и трубопроводов АЭС с толщинами от 5,5 мм.

Измерение толщины по настоящей методике проводится с использованием технологии ультразвуковых фазированных решеток эхоимпульсным ультразвуковым методом, с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубо-

провода и с использованием сканирующих устройств. В процессе измерений применяются ФР, установленные на плоские задержки (призмы), контактная поверхность которых имеет вогнутую поверхность (притерта) под окружность трубопровода в зависимости от ориентации призмы на трубопроводе (рис. 7). В процессе регистрации данных используется продольная волна, сфокусированная на номинальную толщину ОК, и электронное сканирование. Рабочая частота измерений составляет $5,0 \pm 0,5$ МГц.

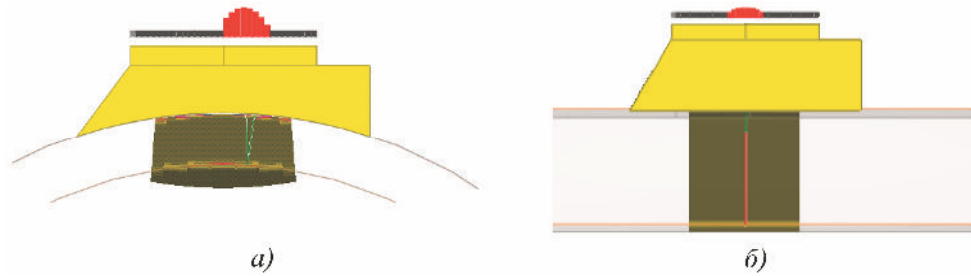


Рис. 7. Моделирование в программе CIVA [3] электронного сканирования вдоль апертюры ФР при расположении апертюры ФР поперек оси трубопровода (а) и вдоль оси трубопровода (б)

Измерение толщины проводится в двух основных режимах:

- линейное одномерное сканирование проводят в целях измерения толщины на линейной траектории;
- двумерное сканирование проводят в целях измерения толщины на заданной площади поверхности ОК.

Данная методика позволяет за счет изменения угла ввода ультразвукового луча контролировать ОК, в которых существует угловое отклонение между внутренней и наружной поверхностями.

В данной методике для измерения толщины используется метод измерения по времени прохождения сигнала [4]. По этому методу измеряется время между интерфейсным и первым донным сигналами.

Погрешность измерения, получаемая по данной методике, составляет:

- не более 0,2 мм для толщин менее 20 мм;
- не более $0,01 \cdot H$ для толщин 20 мм и более (H – значение контролируемой толщины, мм).

Методика МТ 1.2.1.15.001.1087–2015 [2] для проведения СУЗТ сварных соединений

Данная методика устанавливает порядок проведения ультразвуковой толщинометрии стыковых сварных соединений трубопроводов АЭС толщинами от 5,5 до 60 мм из сталей перлитного класса.

Измерение толщины по настоящей методике проводится с использованием технологий ультразвуковых фазированных решеток дифракционно-временным методом с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с применением сканирующих устройств.

Для построения и контроля профиля внутренней поверхности сварного соединения используют метод цифровой фокусировки антенны [5].

Толщинометрия сварного соединения с применением дифракционно-временного метода (ДВМ)

Технология измерения толщины с помощью ДВМ характеризуется следующими основными особенностями:

- устанавливается определенное расстояние между точками ввода призм (PCS);

- каждый активный элемент в выбранной группе элементов излучающей ФР возбуждается независимым генератором;
- УЗ-волна, отраженная донной поверхностью, достигает приемника; время пролета волны до каждого элемента принимающей ФР определяется заданной фокусной точкой, углом преломления и количеством активных элементов; сигналы всех активных элементов ФР, отраженные от несплошности, суммируются в фазе;
- для управления углом ввода и глубиной фокусировки луча рассчитывается время задержки при излучении и приеме для каждого элемента;
- выполняется электронное сканирование вдоль ФР с записью А-сканов при каждом положении ФР (рис. 8);
- измерение времени пролета донного сигнала позволяет вычислить толщину объекта контроля в точке отражения от дна.

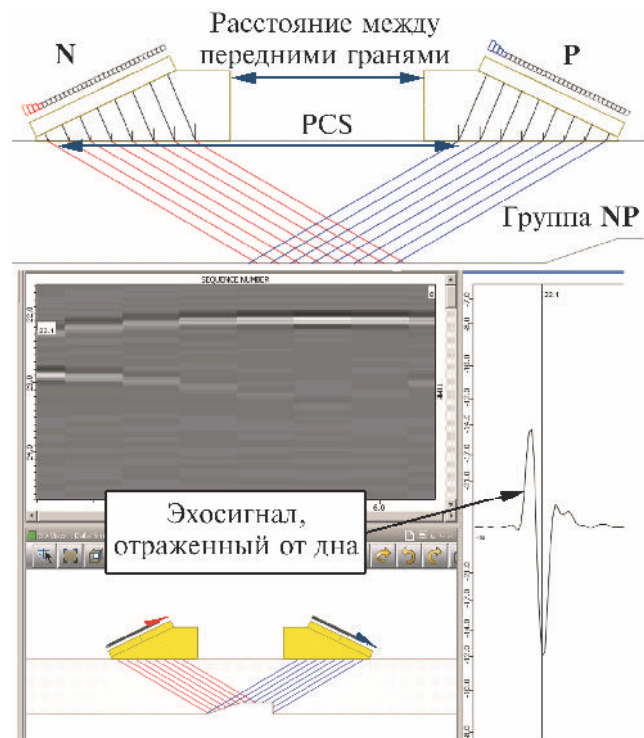


Рис. 8. Принцип измерения толщины по схеме ДВМ

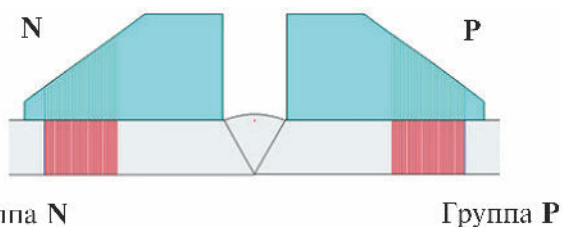


Рис. 9. Принцип измерения толщины в околошовной зоне

Измерение толщины в околошовной зоне выполняется с применением двух ФР, расположенных с обеих сторон сварного соединения, работающих в режиме электронного сканирования с углом ввода 0° , по времени прихода донного сигнала (рис. 9).

При использовании ДВМ в ПО «АВГУР-СМ» по данным, полученным при калибровке средств контроля на настроечном образце, вычисляется калибровочный параметр t_0 для каждого сигнала в В-скане, который учитывает время прохождения сигнала в призме. Данный калибровочный параметр t_0 используется при расчете толщины.

Также ПО «АВГУР-СМ» по времени прихода головной волны позволяет выполнять компенсацию изменения расстояния между передними гранями

призм и изменение толщины слоя контактной жидкости (рис. 10).

При проведении СУЗТ СС с применением ДВМ:

- погрешность измерения по отдельной схеме не превышает ± 1 мм;
- погрешность измерения по совмещенной схеме не превышает $\pm 0,2$ мм при толщине менее 20 мм;
- погрешность измерения по совмещенной схеме не превышает $\pm 0,01H$ мм при толщине 20 мм и более (H – значение номинальной толщины ОК, мм).

Толщинометрия с применением метода цифровой фокусировки антенны

Технология построения профиля донной поверхности на основе ультразвукового метода с применением цифровой фокусировки антенны (ЦФА) основана на излучении в ОК ультразвуковых волн и регистрации этих ультразвуковых волн, отраженных от внутренних границ ОК, а также последующей цифровой обработке ЦФА с формированием изображений из зарегистрированных сигналов.

Технология основана на применении двух ФР, работающих по двум схемам – отдельной и совмещенной схемам (рис. 11).

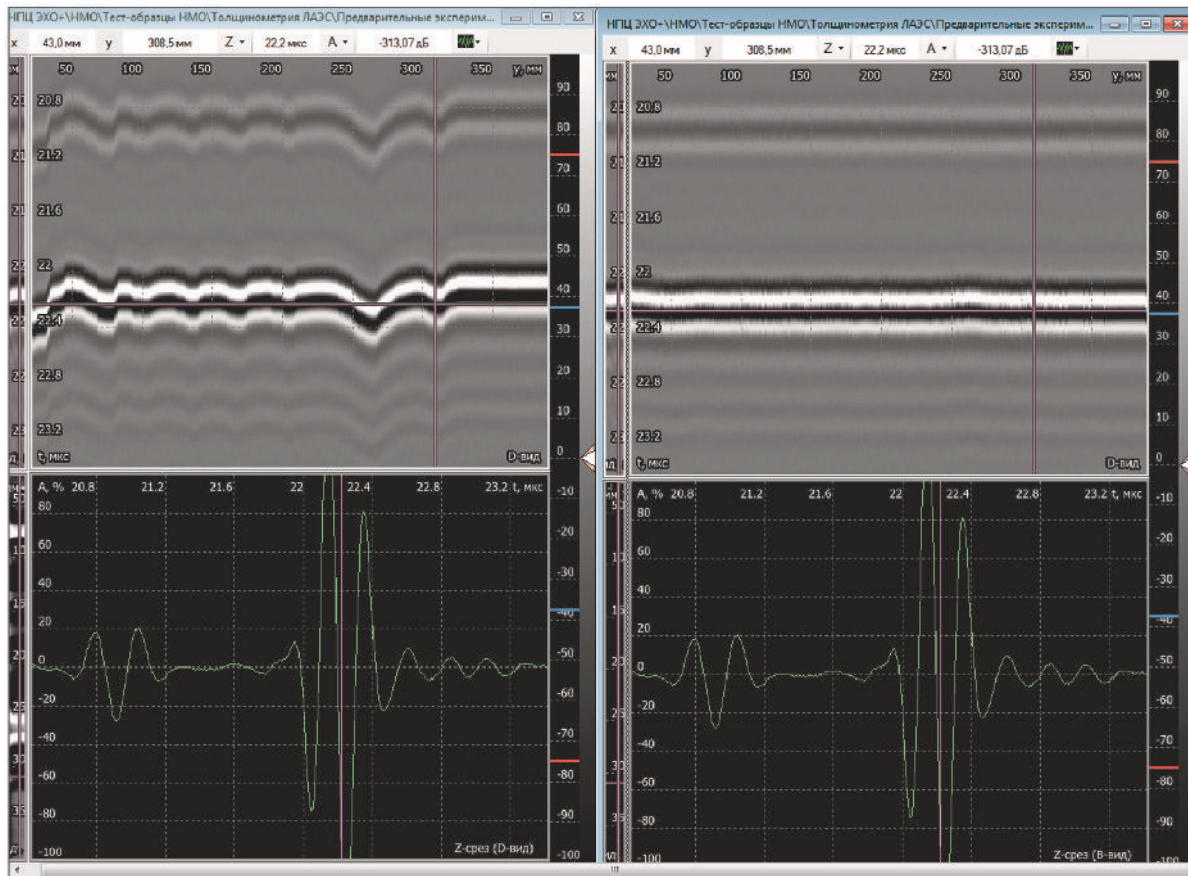


Рис. 10. Компенсация времени пробега головной волны

Технологию построения профиля донной поверхности можно разделить на три основных этапа.

Этап 1. Регистрация эхоимпульсов. На этом этапе проводится сбор данных путем излучения и регистрации эхосигналов. Регистрация выполняется как по раздельной, так и по совмещенной схемам. При применении раздельной схемы одна из ФР излучает эхоимпульсы в ОК каждым элементом независимо и последовательно, вторая ФР работает в режиме приемника всеми элементами одновременно.

Этап 2. Цифровая обработка сигналов. На этом этапе проводится обработка принятых эхосигналов методом ЦФА и восстанавливаются шесть изображений по следующим акустическим схемам (см. рис. 11):

- для поперечной волны по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 1), группа NP;

- для продольной волны по раздельной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 1), группа NP;

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

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

- для продольной волны по совмещенной схеме (траектория и область восстановления обозначена цифрой 4), группа N;

- для продольной волны по совмещенной схеме (траектория и область восстановления обозначены цифрой 5), группа P.

Этап 3. Алгоритм построения профиля дна. На этом этапе применяется алгоритм построения профиля донной поверхности. Здесь в качестве входных данных используются полученные на предыдущем этапе изображения. Затем выполняется их нормировка (выравнивание амплитуд относительно одного из изображений) и объединение в суммарное восстановленное изображение. По суммарному восстановленному изображению проводится по-

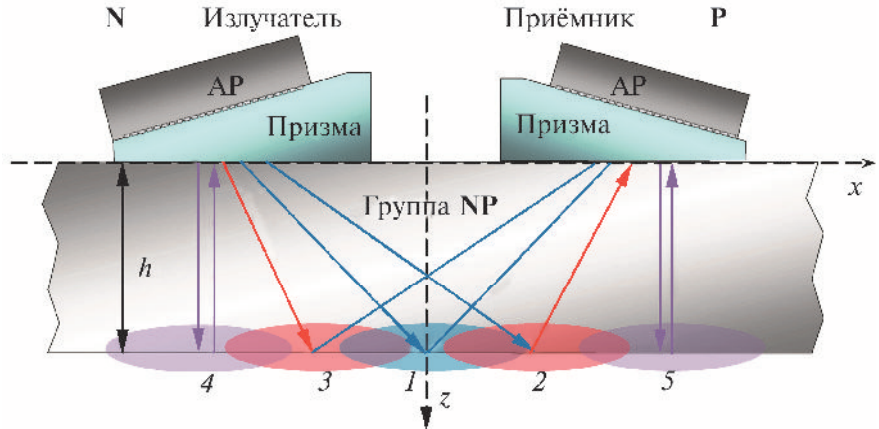


Рис. 11. Технология построения профиля донной поверхности с применением ЦФА

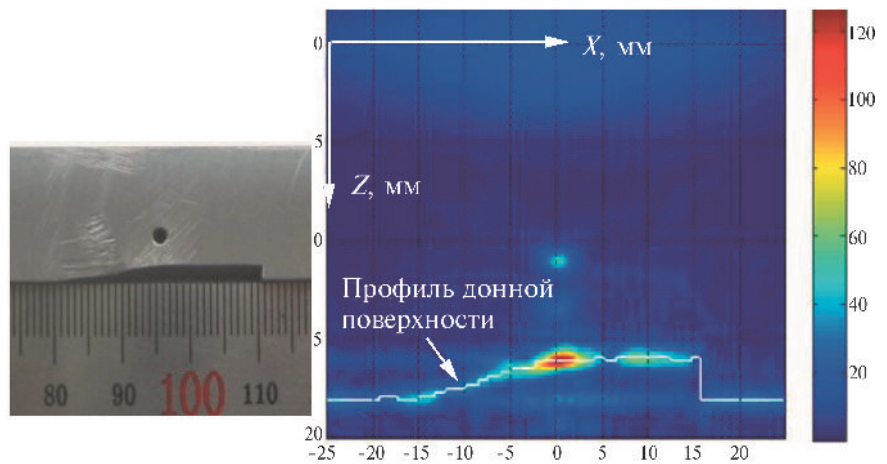


Рис. 12. Слева – фотография ОК, справа – суммарное восстановленное изображение с профилем донной поверхности

строение профиля донной поверхности. Восстановленный профиль дна объекта контроля изображен на рис. 12.

На рис. 13 представлены примеры восстановления донной поверхности методом ЦФА по результатам математического моделирования в программе CIVА.

При проведении СУЗТ СС с применением цифровой фокусировки антенны:

- погрешность измерения по раздельной схеме не превышает $\pm 0,2$ мм при толщине до 75 % от номинальной;

- погрешность измерения по раздельной схеме не превышает $\pm 0,8$ мм при толщине до 40 % от номинальной;

- погрешность измерения по совмещенной схеме не превышает $\pm 0,2$ мм при толщине менее 20 мм;

- погрешность измерения по совмещенной схеме не превышает $\pm 0,01H$ мм при толщине 20 мм и более (H – значение номинальной толщины ОК, мм).

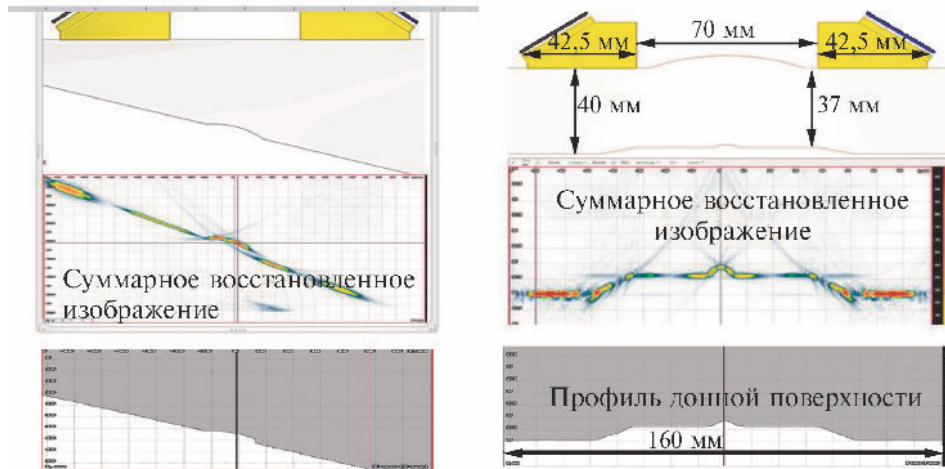


Рис. 13. Примеры восстановления донной поверхности методом ЦФА

**Примеры применения методик МТ
1.2.1.15.001.1086–2015 и
МТ 1.2.1.15.001.1087–2015**

Образец LNPP

На рис. 14 приведен эскиз демонстрационного образца LNPP (аббревиатура Ленинградской АЭС на английском языке). Остаточная толщина металла над буквами L, N, P и P равна 8, 7, 6 и 5 мм соответственно.

На рис. 15 приведена карта толщины демонстрационного образца LNPP, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1086–2015. Область контроля: $X = 2 - 251$ мм; $Y = -8,94 - 49,7$ мм. Минимальное значение толщины $t = 4,87$ мм в координатах $X = 238$ мм, $Y = -5,97$ мм.

Образец с внешним диаметром 325 мм

На рис. 16 приведен эскиз экспериментального образца, изготовленного из участка трубопровода с внешним диаметром 325 мм, в который внесены пазы, ориентированные в продольном и поперечном направлениях, с значениями глубины от 3 до 9 мм.

На рис. 17 представлена карта толщины при проведении УЗТ экспериментального образца, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1087–2015 методом ДВМ.

Погрешности измерений составили следующие значения:

- по совмещенной схеме $\pm 0,2$ мм;
- по отдельной схеме $\pm 1,0$ мм.

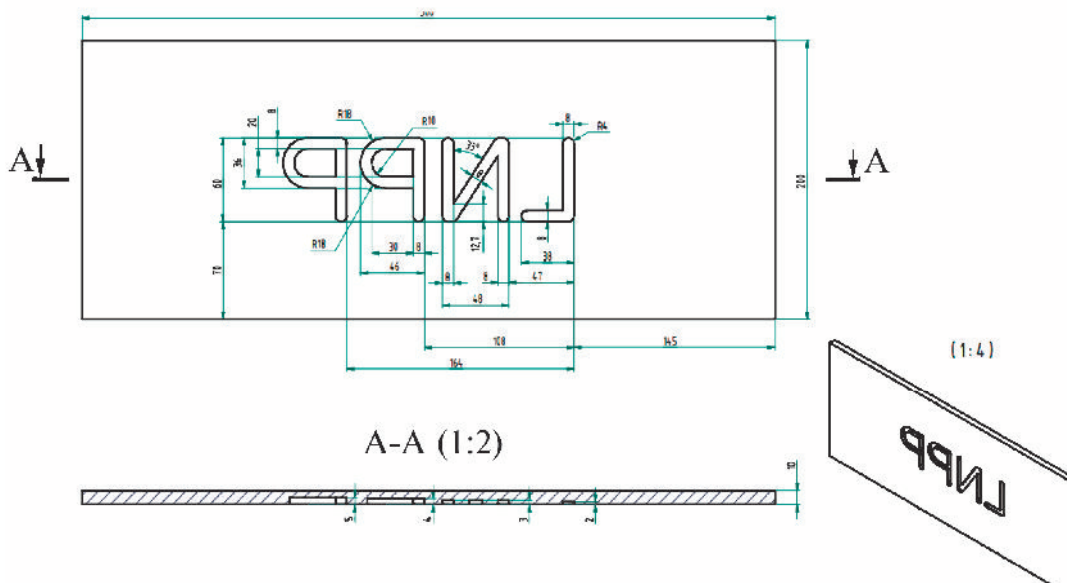


Рис. 14. Эскиз демонстрационного образца LNPP

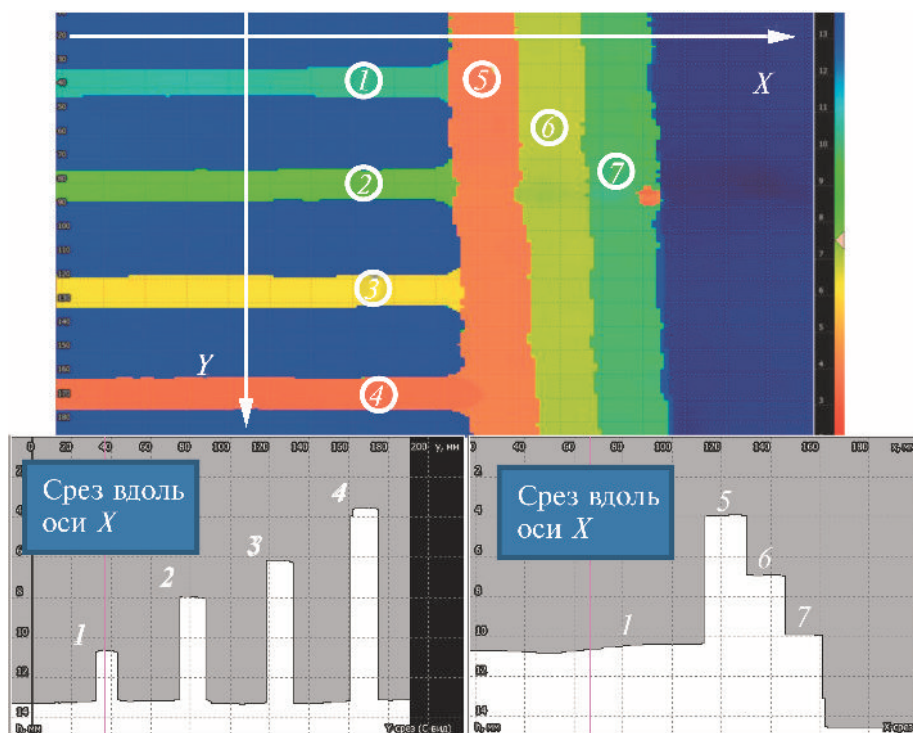


Рис. 18. Карта толщины экспериментального образца, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1086–2015 (1 – 7 см. рис. 16)

Карта толщины при выполнении СУЗТ основного металла экспериментального образца, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1086–2015, представлена на рис. 18. Погрешность измерения составила не более 0,2 мм.

Образец ИО ТВ-426-25

На рис. 19 приведены фотография внутренней поверхности и карта толщины испытательного образца ИО ТВ-426-25, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1086–2015.

Результаты СУЗТ ИОТВ-426-25 по методике МТ 1.2.1.15.001.1086–2015:

- минимально фиксируемая эквивалентная площадь участка изменения толщины соответствует плоскодонному отражателю диаметром $\varnothing 2$ мм;
- минимально фиксируемое утонение соответствует 0,8 мм; при настройке диапазона измеряемых толщин выявляются утонения до 0,2 мм;
- погрешность измерения толщины не превышает $\pm 0,2$ мм.

На рис. 20 приведена карта толщины ИО ТВ-426-25 в области имитации расточки корня шва глубиной 15 – 13 мм и 10 – 8 мм от внутренней поверхности, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1087–2015 методом ДВМ.

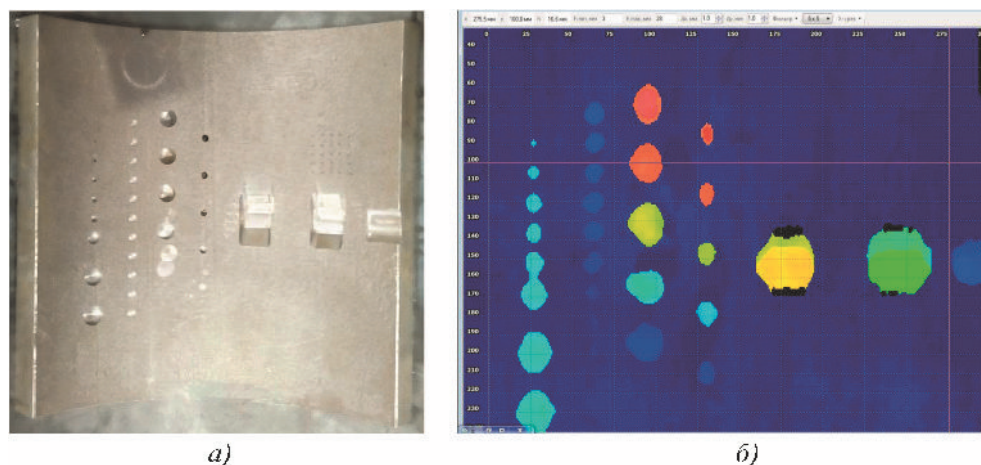


Рис. 19. Фото внутренней поверхности (а) и карта толщины ИО 426-25 (б)

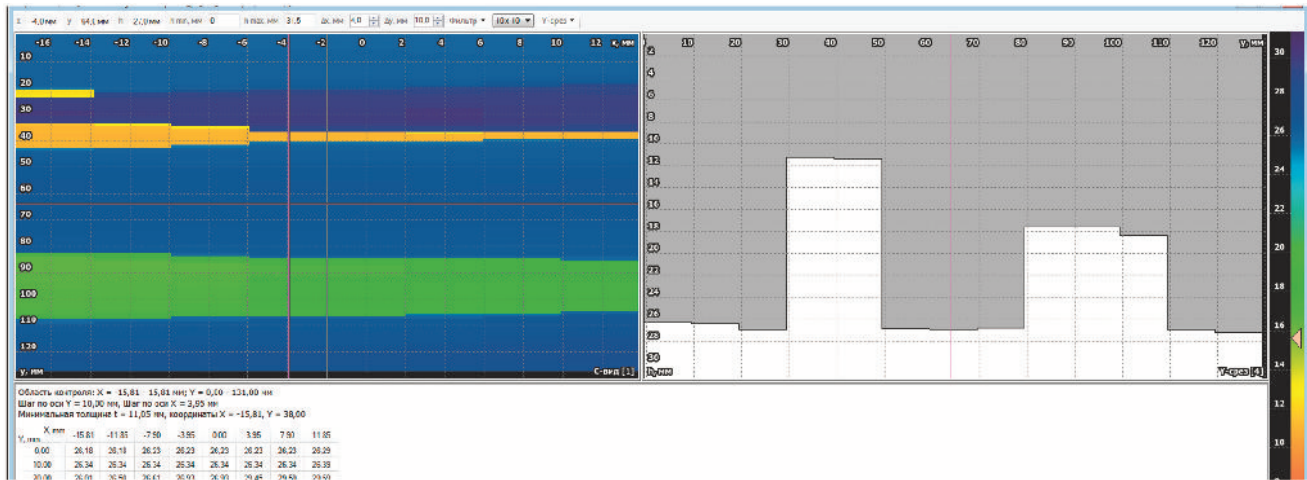


Рис. 20. Карта толщины в области имитации расточки в образце ИО ТВ-426-25, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1087–2015 методом ДВМ

Образец ИО ТВ-426-25

Результаты толщинометрии ИОТВ-426-25 по методике МТ 1.2.1.15.001.1087–2015 методом ДВМ:

- погрешность по раздельной схеме не превышает ± 1 мм;
- погрешность по совмещенной схеме не превышает $\pm 0,2$ мм при толщине менее 20 мм;
- погрешность по совмещенной схеме не превышает $\pm 0,01H$ мм при толщине более 20 мм (H – значение контролируемой толщины).

На рис. 21 приведена карта толщины ИО ТВ-426-25 в области имитации расточек корня шва глубиной, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1087–2015 методом ЦФА.

Результаты толщинометрии ИОТВ-426-25 по методике МТ 1.2.1.15.001.10876–2015 методом ЦФА:

- погрешность по раздельной схеме не превышает $\pm 0,2$ мм при толщине до 75 % от номинальной;
- погрешность по раздельной схеме не превышает $\pm 0,8$ мм при толщине до 40 % от номинальной;
- погрешность по совмещенной схеме не превышает $\pm 0,2$ мм при толщине менее 20 мм;
- погрешность по совмещенной схеме не превышает $\pm 0,01H$ мм при толщине более 20 мм (H – значение контролируемой толщины).

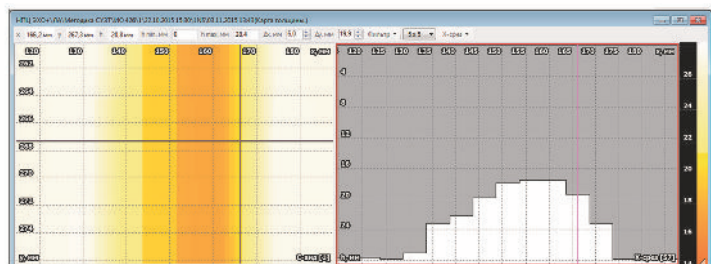
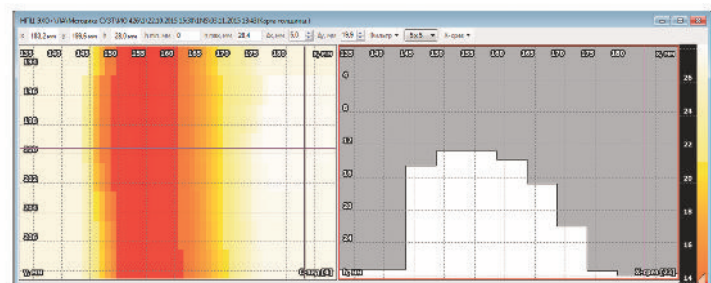
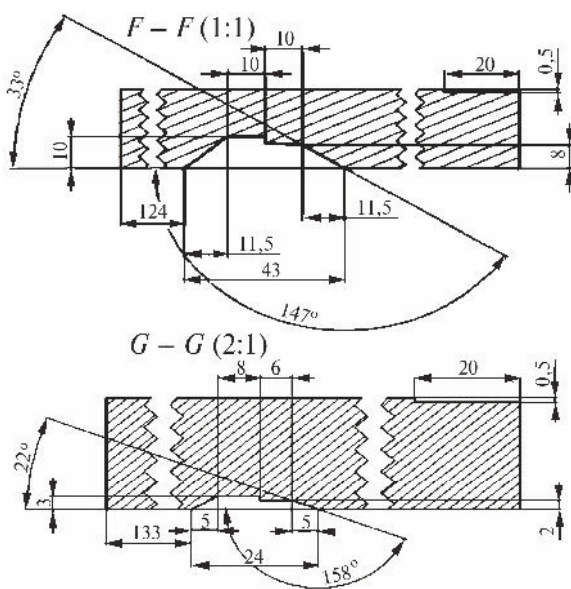


Рис. 21. Карта толщины в области имитации расточек в образце ИО ТВ-426-25, полученная по методике МТ 1.2.1.15.001.1086–2015 методом ЦФА

Образец ИО ТВ-159-5

На рис. 22 приведены фотография внутренней поверхности и карта толщины образца ИО ТВ-159-5.

Результаты СУЗТ ИОТВ-159-5:

- минимально фиксируемая эквивалентная площадь участка изменения толщины соответствует плоскодонному отражателю диаметром $\varnothing 4$ мм;
- минимально фиксируемое утонение соответствует 0,2 мм;
- погрешность измерения толщины равна $\pm 0,2$ мм.

Образец с реальным ЭКИ

На рис. 23 приведена фотография образца с реальным ЭКИ. Образец был паспортизован, и на него было получено свидетельство о калибровке.

На рис. 24 приведена карта толщины образца с реальным ЭКИ.

Минимальная остаточная толщина основного металла в образце с реальным ЭКИ $t = 3,83$ мм. Погрешность измерения толщины составила менее $\pm 0,2$ мм.

Образец сегмента перлитного трубопровода типоразмером 219×8 мм с ЭКИ

СУЗТ сегмента перлитного трубопровода типоразмером 219×8 мм с ЭКИ (рис. 25). Остаточная толщина данного образца от 6 до 1 мм.

На рис. 26 и 28 представлены карты толщин проконтролированных участков сегмента перлитного трубопровода типоразмером 219×8 мм, полученные по методике МТ 1.2.1.15.001.1086–2015. Минимальная остаточная толщина проконтролированных участков 1,95 и 2,2 мм соответственно.

А на рис. 27 и 29 приведено сопоставление внутренних поверхностей проконтролированных участков и карт их толщины. На данных изображениях показана корреляция внутренней поверхности измеренных участков сегмента трубопровода и карт толщины этих участков.

В ходе выполнения СУЗТ трубопроводов питания воды на Ленинградской АЭС в некоторых СС в основном металле околошовной зоны был обнаружен ЭКИ.

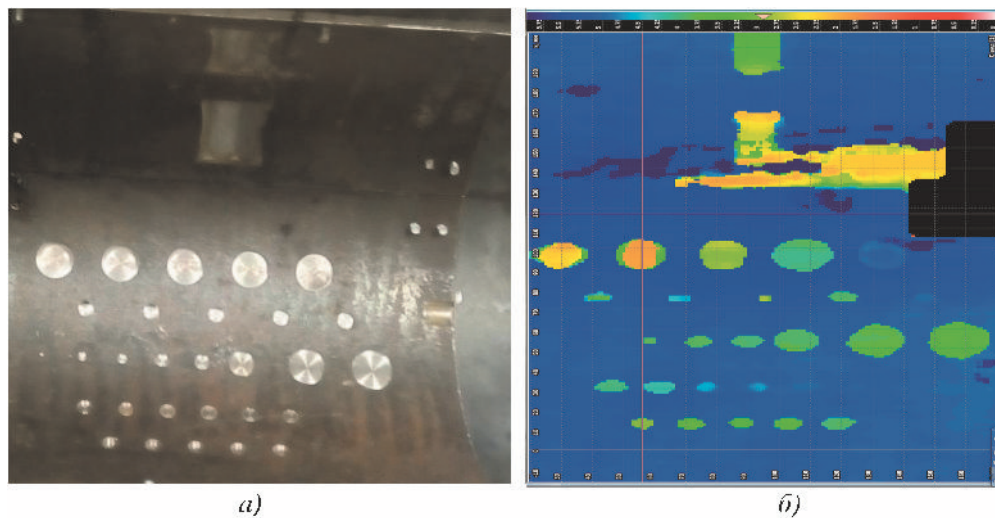


Рис. 22. Фото внутренней поверхности и карта толщины ИО ТВ-159-5



Рис. 23. Фотография образца с реальным ЭКИ

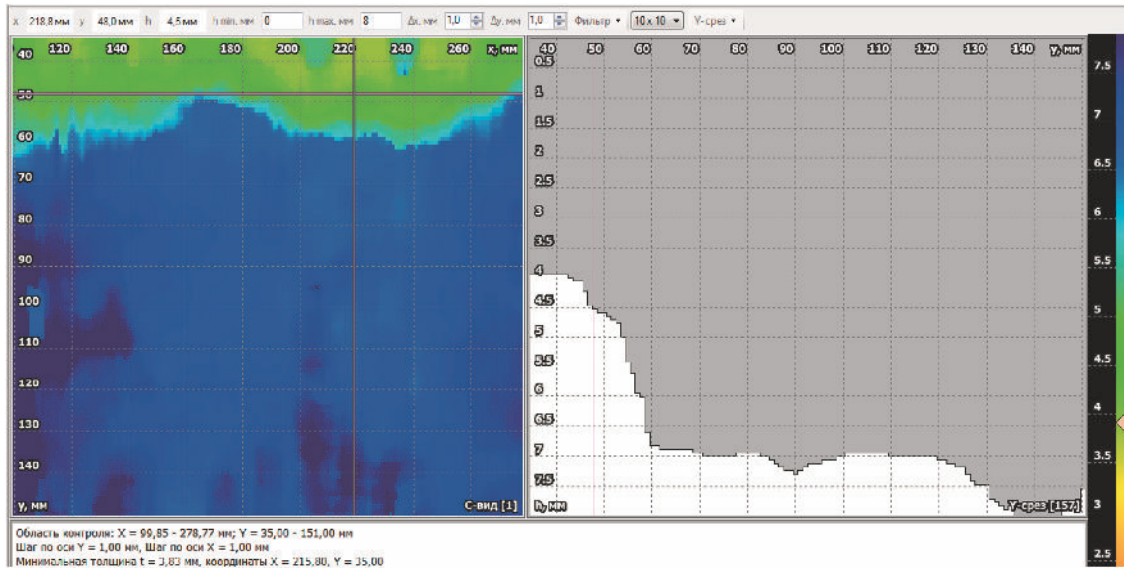


Рис. 24. Карта толщины образца с реальным ЭКИ в области основного металла

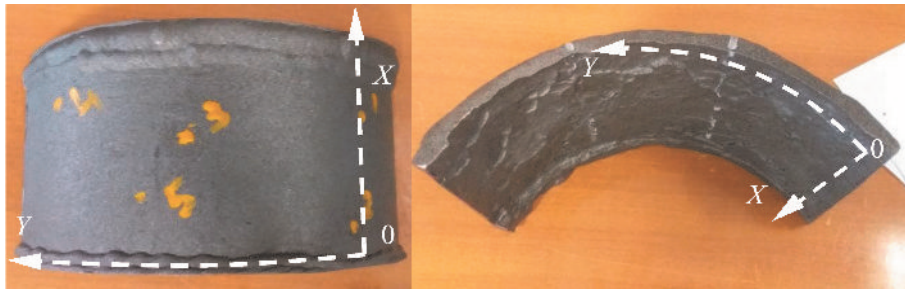


Рис. 25. Сегмент перлитного трубопровода типоразмером 219×8 мм

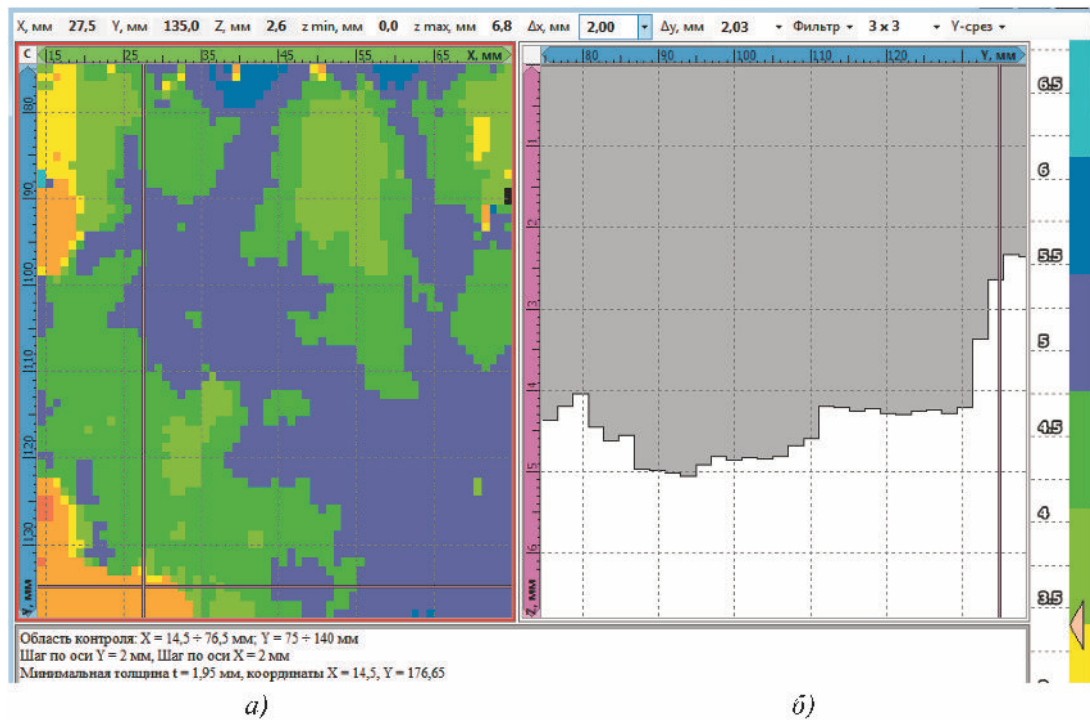


Рис. 26. Карта толщины проконтролированного участка сегмента (а) и срез по оси Y (б)

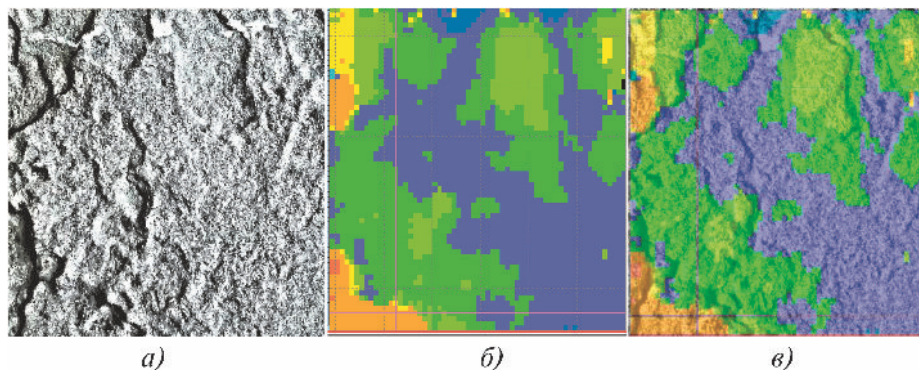


Рис. 27. Сопоставление внутренней поверхности проконтролированного участка сегмента и карты толщины: *а* – фото внутренней поверхности; *б* – карта толщины; *в* – совмещенное изображение

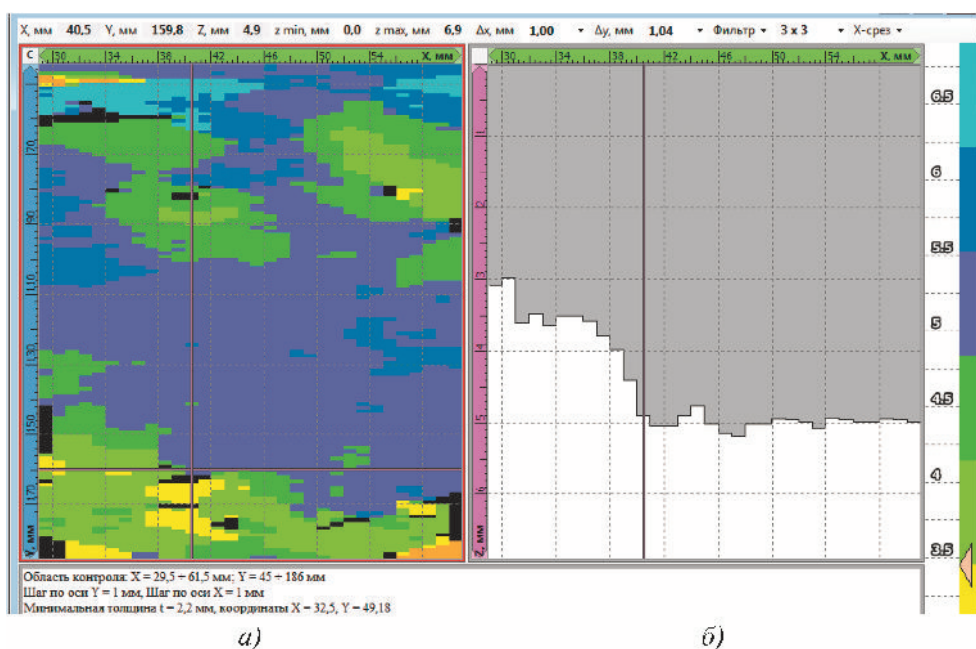


Рис. 28. Карта толщины проконтролированного участка сегмента (*а*) и срез по оси *X* (*б*)

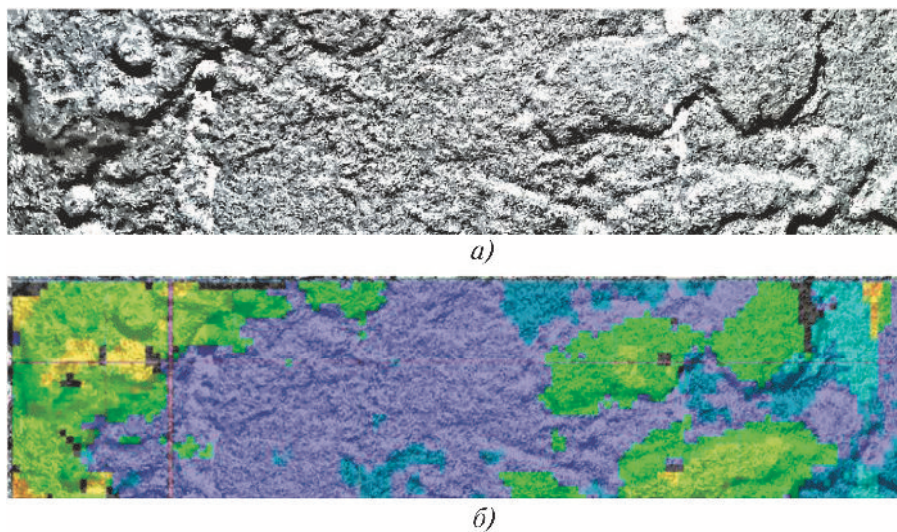
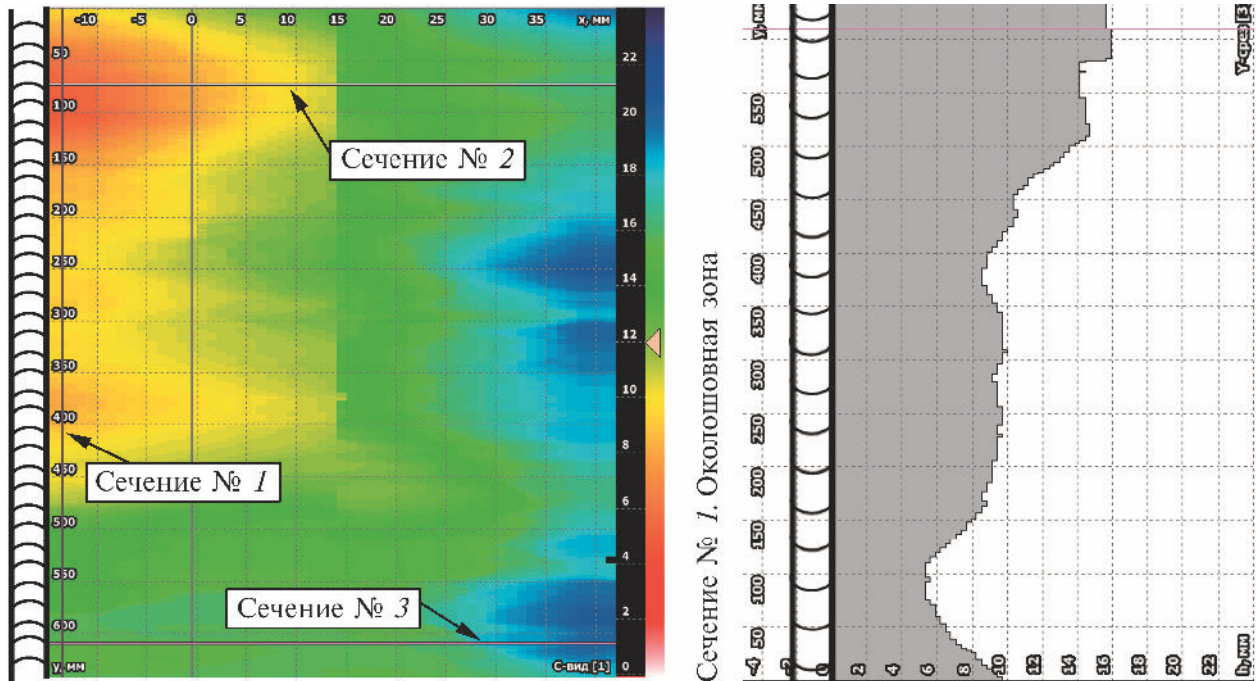


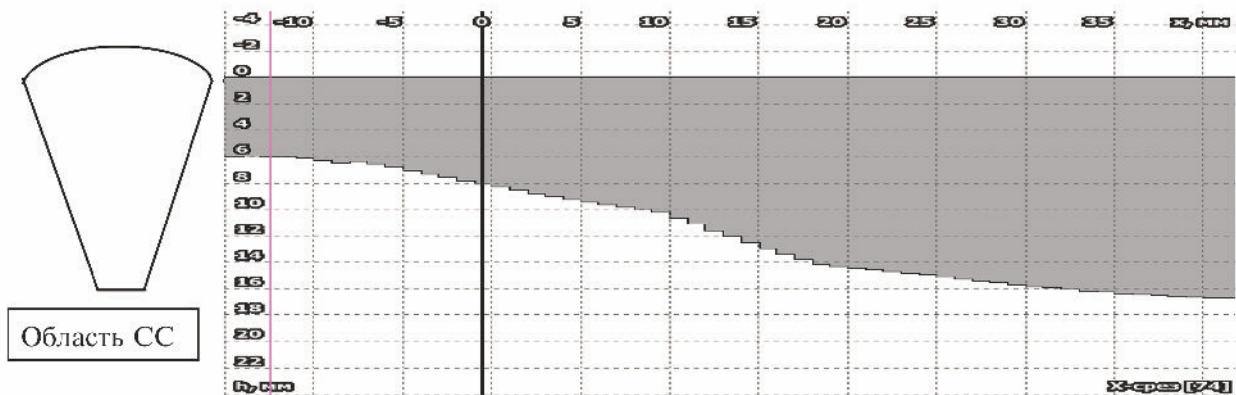
Рис. 29. Сопоставление внутренней поверхности проконтролированного участка сегмента и карты толщины: *а* – фото внутренней поверхности; *б* – совмещенное изображение

Результаты СУЗТ и карты толщин околошовной зоны двух СС с обнаруженным ЭКИ представлены на рис. 30 и 31. На карте толщин, представленной на

рис. 30, минимальная остаточная толщина составляет 6 мм, на карте толщин, представленной на рис. 31, минимальная остаточная толщина равна 12,3 мм.



Сечение № 2. Вдоль трубопровода. Координата $Y = 76$ мм



Сечение № 3. Вдоль трубопровода. Координата $Y = 812$ мм

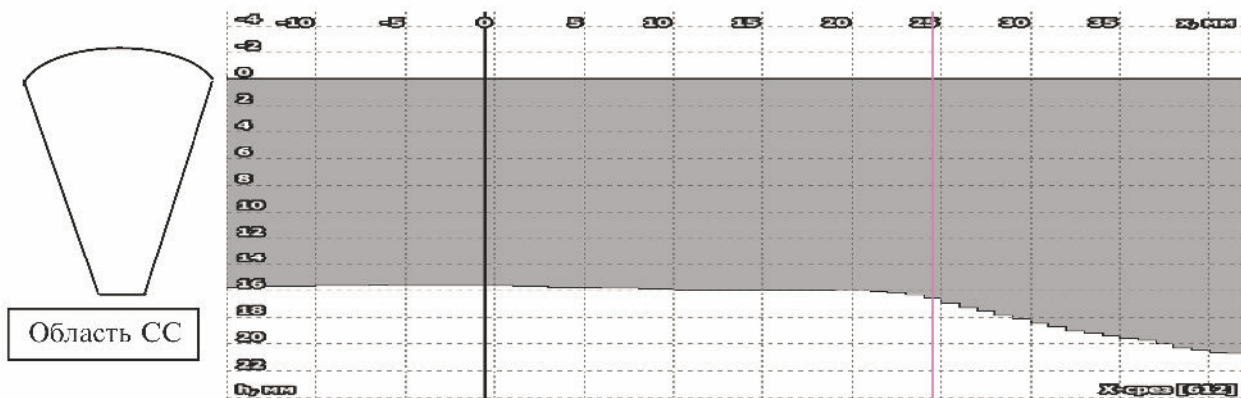


Рис. 30. Карта толщин основного металла в околошовной зоне сварного соединения и срезы по осям X и Y

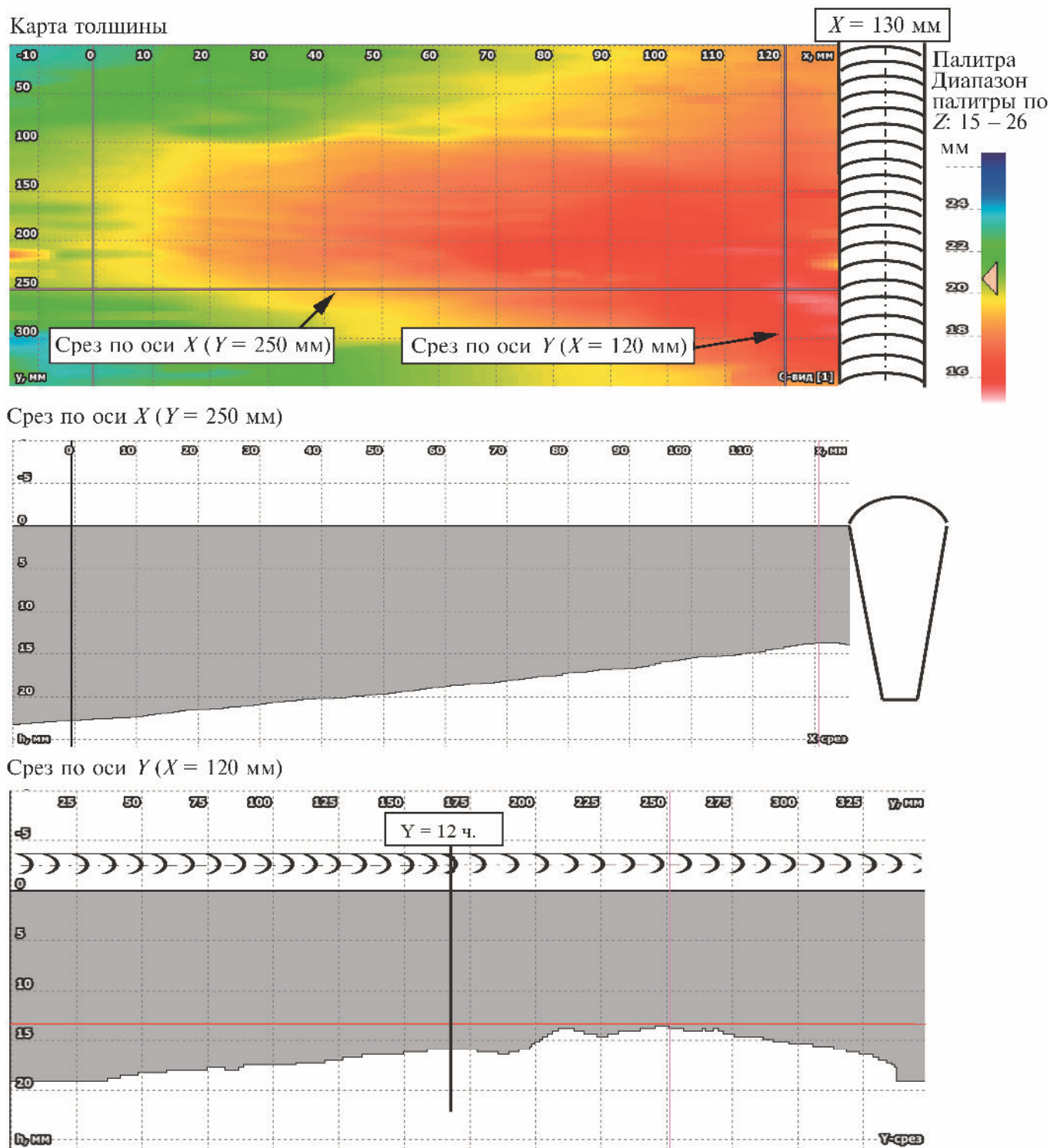


Рис. 31. Карта толщины основного металла в околошовной зоне сварного соединения

Минимальная толщина $t = 12,28$ мм, координаты $X = 120,0$; $Y = 250,0$

Размер области с толщиной менее 15 мм: по оси X 64,5 – 127,5 мм; $\Delta L = 63$ мм

по оси Y 127,5 – 321 мм; $\Delta L = 165$ мм

Размер области с ЭКИ: по оси X 9,5 – 127,5 мм; $\Delta L = 118$ мм

по оси Y 0 – 357 мм; $\Delta L = 357$ мм

Выводы

ООО «НПЦ «ЭХО+» разработало алгоритмы проведения сплошной ультразвуковой толщинометрии с применением технологии фазированных решеток, алгоритмы ультразвуковой толщинометрии сварных соединений дифракционно-временным методом и методом цифровой фокусировки антенны с использованием фазированных решеток методики.

Были разработаны и аттестованы методики контроля МТ 1.2.1.15.001.1086–2015 «Сплошная ультразвуковая толщинометрия оборудования и трубопроводов энергоблоков атомных электростанций. Сплошная ультразвуковая толщинометрия с применением фазированных решеток» [1] и МТ 1.2.1.15.001.1087–2015 «Сплошная ультразвуковая толщинометрия оборудования и трубопроводов энергоблоков атомных электростанций. Ультразвуковая толщинометрия металла сварных соединений с применением фазированных решеток» [2].

Также были разработаны и изготовлены средства контроля для проведения СУЗТ по данным методикам, включая дефектоскоп с программным обеспечением для проведения СУЗТ, сканирующие устройства, призмы, настроечные образцы. Данные средства контроля позволяют с высокой точностью проводить СУЗТ как основного металла, так и толщинометрию сварных соединений.

Методики и средства контроля, разработанные и изготовленные ООО «НПЦ «ЭХО+», успешно применяются на Ленинградской АЭС при проведении сплошной ультразвуковой толщинометрии и толщинометрии сварных соединений.

В настоящее время ООО «НПЦ «ЭХО+» разработало методику контроля СС с односторонним доступом на наличие ЭКИ, которая введена в действие в методике МТ 1.2.1.15.001.1086–2015 [2] с изменением № 1. Совмещение методов односторонней толщинометрии и УЗК СС позволяет выявлять не только дефекты в сварных соединениях плоскостного типа (трещины, непровары, несплавления кромок) и объемные дефекты (шлаковые включения, газовые поры), но и размывы в корне СС.

Библиографический список

1. **Методика МТ 1.2.1.15.001.1086–2015.** Сплошная ультразвуковая толщинометрия оборудования и трубопроводов энергоблоков атомных электростанций. Сплошная ультразвуковая толщинометрия с применением фазированных решеток. М., 2015.
2. **Методика МТ 1.2.1.15.001.1087–2015.** Сплошная ультразвуковая толщинометрия оборудования и трубопроводов энергоблоков атомных электростанций. Ультразвуковая толщинометрия металла сварных соединений с применением фазированных решеток. М., 2015.
3. **EXTENDE:** официальный сайт фирмы. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 19.08.2019).
4. **Базулин А. Е., Пронин В. В., Тихонов Д. С. и др.** Сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла и сварных швов // В мире НК. 2014. № 4(66). С. 20 – 26.
5. **Пронин В. В., Базулин А. Е., Тихонов Д. С., Шкатов П. Н.** Построение профиля внутренней поверхности трубопроводов ультразвуковым методом с применением технологии цифровой фокусировки антенны // Приборы. 2015. № 11. С. 16 – 26.

КОМПЛЕКТ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ



С. А. Коколев,
начальник лаборатории
разработки алгоритмов



С. В. Ромашкин,
Начальник системно-
методической лаборатории,
канд. техн. наук

Результатом диагностического обследования сварного соединения является решение о возможности его дальнейшей эксплуатации в составе оборудования. Такое решение применяется на основе результатов его контроля различными неразрушающими методами. К таким методам относится визуальный и измерительный контроль. Одним из путей повышения объективности, документированности и достоверности визуального и измерительного контроля является переход к автоматизированному визуальному и измерительному контролю, при котором возможна запись профиля сварного соединения вдоль всей его длины с последующим измерением его характеристик и обнаружением дефектов.

В настоящее время в ООО «НПЦ «ЭХО+» разработан комплект средств для автоматизированного визуального и измерительного контроля (АВИК) на основе лазерного триангуляционного модуля, который удовлетворяет требованиям нормативной документации ПАО «Газпром», предъявляемым к данному оборудованию. Рассматриваемый комплект средств АВИК предназначен для использования со сканирующим устройством, обеспечивающим его перемещение вдоль оси сварного соединения и удовлетворяющим ряду требований по его размещению. В качестве такого сканирующего устройства может выступать сканер из состава системы АУЗК «АВГУР-ТФ» [1]. В этом случае существует возможность совместного анализа данных АУЗК и данных АВИК, что повышает достоверность оценки дефектов на наружной поверхности сварного соединения по данным АУЗК.

Кроме того, в соответствии с требованиями нормативных документов ультразвуковой контроль

Описан принцип работы и проанализированы возможности контроля качества сварных соединений с использованием комплекта средств автоматизированного визуального и измерительного контроля (АВИК) на основе лазерного триангуляционного датчика. Описаны преимущества использования данного оборудования в составе системы автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) «АВГУР-ТФ».

необходимо выполнять после проведения ВИК. Объединение возможностей двух видов контроля в одной системе позволит значительно сократить затраты на проведение контроля. Так, если сварное соединение окажется негодным по результатам АВИК, то бессмысленно тратить время на проведение АУЗК.

Система АВИК на основе лазерного триангуляционного датчика

ООО «НПЦ «ЭХО+» разработало комплект средств АВИК на основе лазерного триангуляционного 2D-датчика LS2D производства ООО «НПП «Призма» [2].

Разработанный комплект средств АВИК прошел широкий круг испытаний, результаты которых подтверждают его соответствие действующим и разрабатываемым в настоящий момент требованиям ПАО «Газпром», предъявляемым к такого рода приборам.

В состав комплекта входят:

- лазерный триангуляционный датчик;
- сканер для перемещения вдоль СС;
- блок управления сканером;
- программное обеспечение (ПО) для регистрации данных;
- ПО для анализа данных.

Комплект АВИК может применяться как отдельное изделие, а также входить в состав других систем АУЗК, например «АВГУР-ТФ».

На рис. 1 представлена фотография комплекта АВИК, смонтированного на сканере СК.ТФ.К из комплекта системы АУЗК «АВГУР-ТФ». Система «АВГУР-ТФ» в такой конфигурации может одновременно проводить контроль кольцевого СС следующими методами:

- АУЗК методом TOFD;
- АУЗК методом ФР (фазированные решетки);
- АВИК с использованием лазерного триангуляционного датчика.

Принцип работы лазерного триангуляционного 2D-датчика

В лазерном датчике используется принцип триангуляции. Развернутый в идеальную прямую лазерный луч проецируется на поверхность контролируемого объекта. Световая линия повторяет форму профиля объекта в сечении. Изображение световой линии проецируется на КМОП-фотоматрицу. По координатам изображения на фотоприемнике микропроцессор производит вычисление реальных координат световой линии (профиль). В процессе измерений проводится динамический контроль мощности отраженного света и подавление фоновых засветок. Схема работы лазерного триангуляционного 2D-датчика представлена на рис. 2.

Получение трехмерной формы поверхности объекта достигается перемещением лазерного модуля с помощью сканирующего устройства. Для синхронизации измерений профиля в процессе движения сканирующего устройства используются сигналы датчика перемещения, входящего в состав комплекта.

Программное обеспечение «АВГУР» выполняет фильтрацию, обработку и сглаживание полученных наборов профилей для устранения различных ошибок съема профиля.

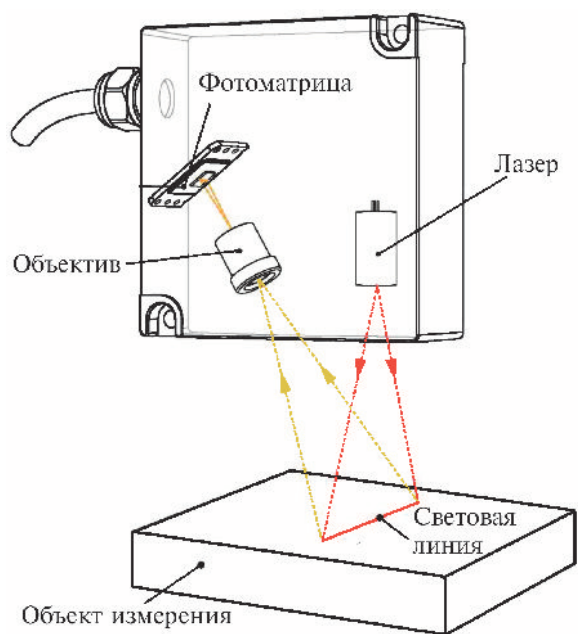


Рис. 2. Схема работы лазерного триангуляционного датчика

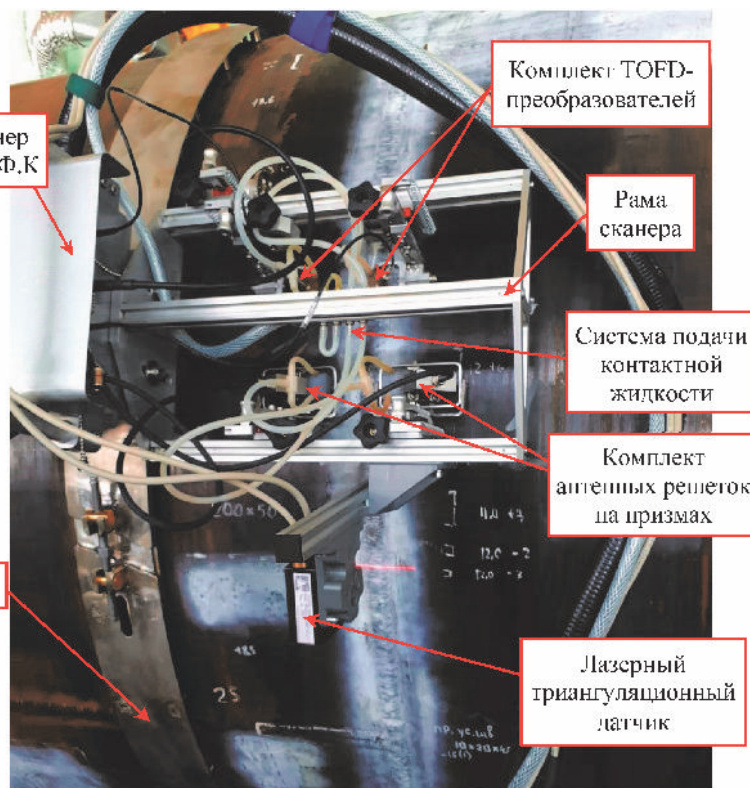


Рис. 1. Сканер СК.ТФ.К из комплекта системы АУЗК «АВГУР-ТФ» с установленным лазерным триангуляционным датчиком

Погрешность измерения профиля

Для определения величины погрешности измерения профиля по высоте и ширине с использованием комплекта АВИК была проведена серия измерений концевых мер длины различной высоты. Рис. 3 иллюстрирует измерение профиля концевых мер высотой 4,5; 5,0; 5,5; 6,5 и 7,0 мм.

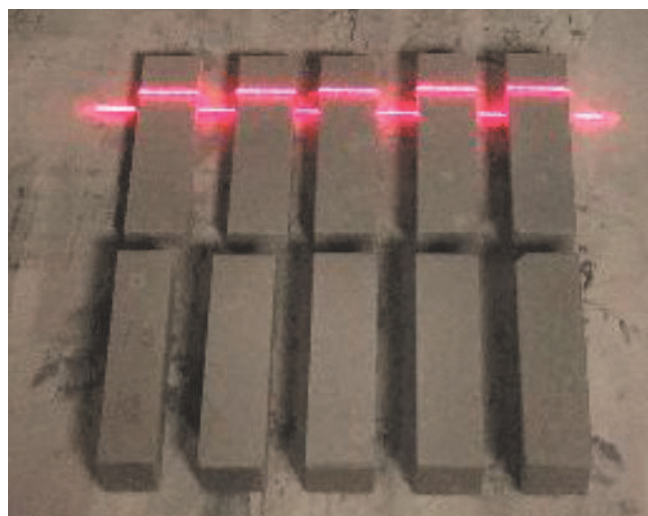


Рис. 3. Измерение профиля концевых мер длины

На рис. 4 представлены данные, полученные по результатам измерения профиля концевых мер длины комплектом АВИК. На рис. 4, а представлена проекция данных в горизонтальной плоскости XY (С-вид), на рис. 4, б – сечение данных в плоскости XZ (В-вид), представляющее собой профиль поверхности в текущей координате, и значения измеренных высоты и ширины.

В таблице представлены результаты измерения высоты и ширины каждой концевой меры длины и их сравнение с паспортными значениями. Погрешность при измерении высоты и ширины концевых мер составила не более 0,1 мм.

Результаты измерения высоты и ширины концевых мер длины

| Паспортное значение, мм | | Измеренное значение, мм | | Погрешность, мм | |
|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-----------------|--------|
| высота | ширина | высота | ширина | высота | ширина |
| 4,5 | 9 | 4,54 | – | 0,04 | – |
| 5,0 | 9 | 5,04 | 8,9 | 0,04 | 0,1 |
| 5,5 | 9 | 5,58 | 8,9 | 0,08 | 0,1 |
| 6,5 | 9 | 6,56 | 8,9 | 0,06 | 0,1 |
| 7,0 | 9 | 7,09 | 9,1 | 0,09 | 0,1 |

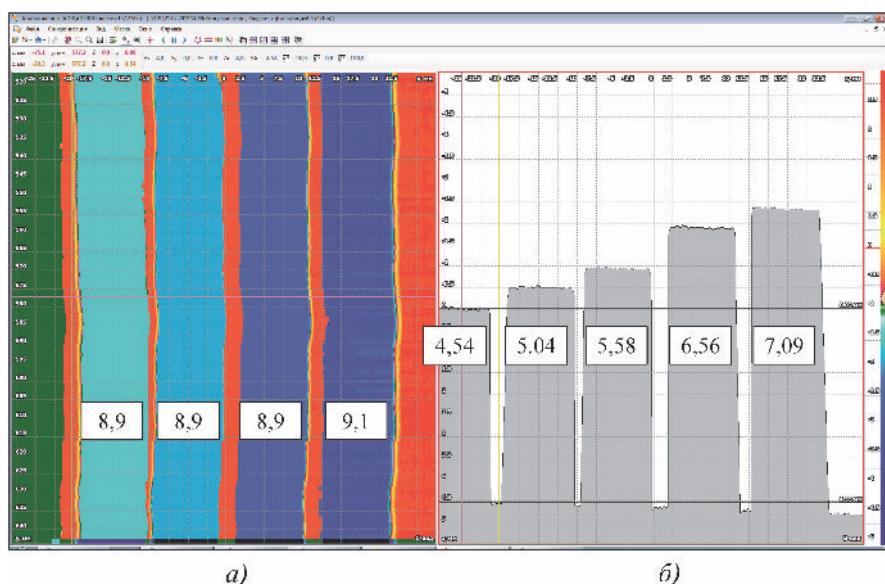


Рис. 4. Данные измерения высот концевых мер

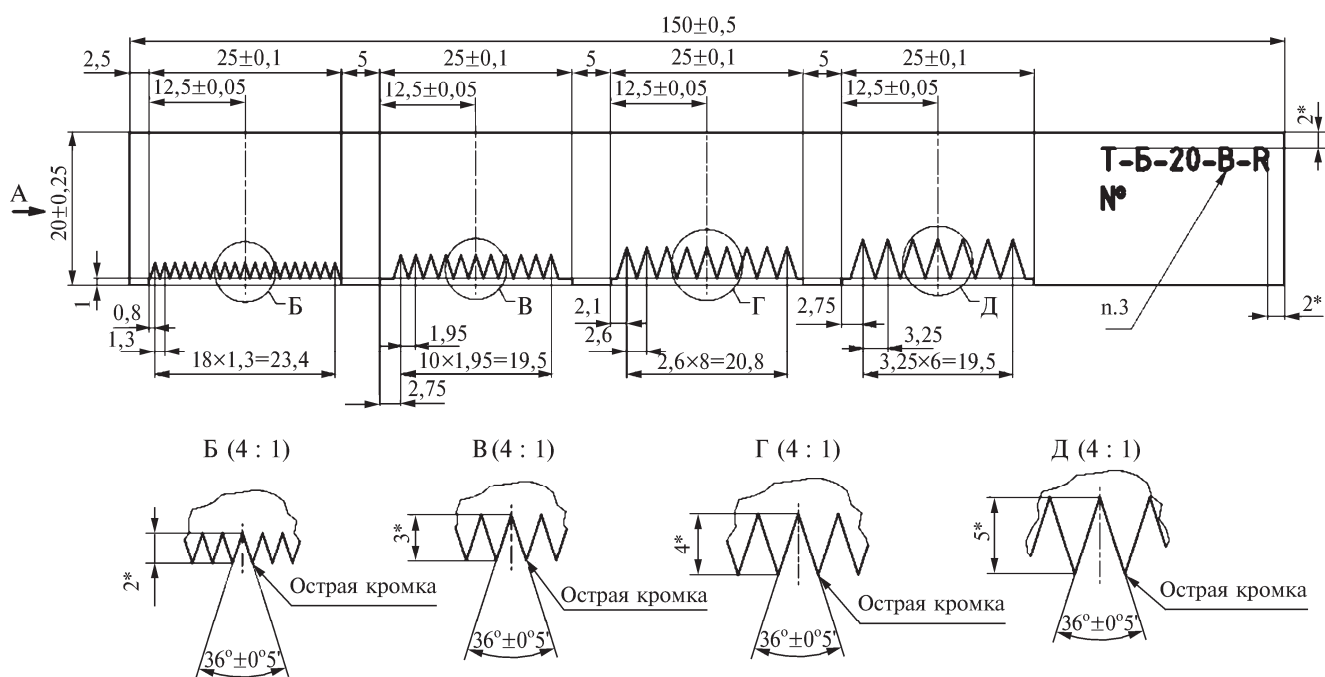


Рис. 5. Эскиз образца Т-Б-20-В-Р

Для определения возможности измерения профиля поверхностей со значительной степенью неровности комплектом АВИК было проведено измерение образца с гребенками различной глубины. Образец изготовлен из рексолита, и на его поверхности выполнены четыре гребенки разной глубины (от 2 до 5 мм), имитирующие поверхностные дефекты. Для повышения степени отражения лазерного луча поверхность образца перед проведением измерений была обработана проявителем из набора для капиллярного контроля, содержащим в своем составе белый пигмент. Эскиз образца представлен на рис. 5.

Измерение профиля поверхности образца Т-Б-20-В-Р показано на рис. 6.

Данные, полученные по результатам измерения профиля поверхности образца Т-Б-20-В-Р комплектом АВИК, представлены на рис. 7. Каждая из гребенок образца отражена в своей секции рисунка.

Измеренная по данным АВИК высота зубцов в каждой из групп составляет 4,7; 2,8; 3,7 и 1,8 мм соответственно.

Представленный тест показал, что система способна выявлять и позволять измерять геометрические характеристики поверхностных дефектов шириной от 1,3 до 3,25 мм и глубиной от 2 до 5 мм с регулярной структурой.

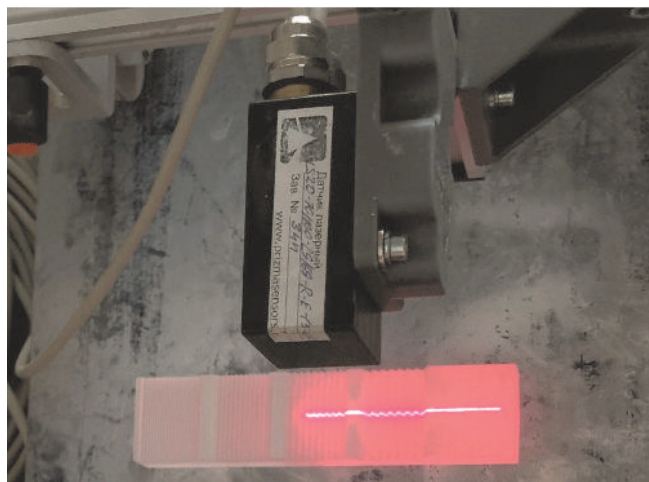


Рис. 6. Измерение профиля образца Т-Б-20-В-Р

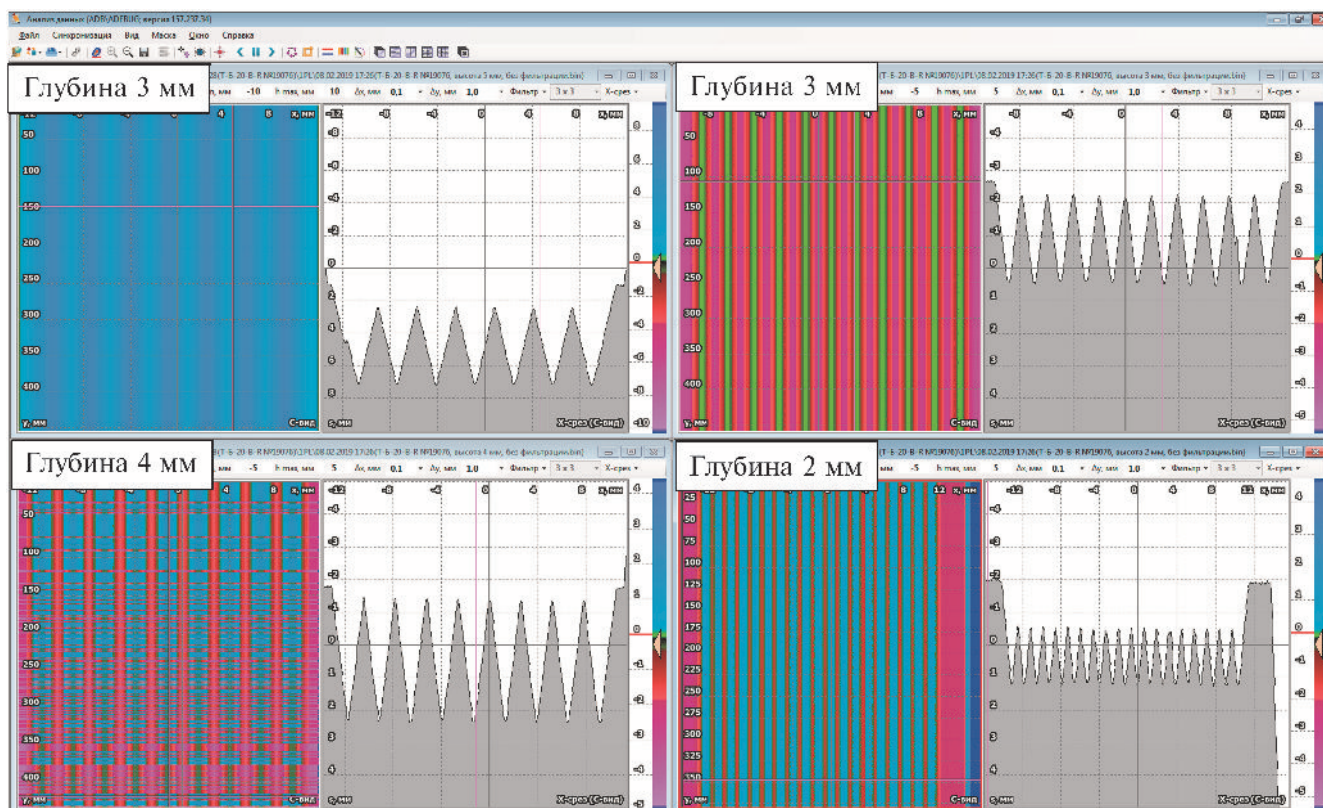


Рис. 7. Результаты измерений профиля образца Т-Б-20-В-Р комплектом АВИК

Анализ данных АВИК сварных соединений

Для анализа данных, полученных по результатам АВИК, используется ПО «АВГУР-Анализ» [3], зарегистрированное в государственном реестре программ ЭВМ, свидетельство № 2019610777 [4]. Анализ данных АВИК может проводиться как в ручном режиме (оператор вручную выделяет области, которые считает дефектными, а программа определяет их параметры), так и в автоматическом. При использовании автоматического режима необходимо выбрать нормативный документ, в соответствии с которым будет проводиться оценка качества СС, либо задать критерии оценки качества СС вручную. Программа сама обрабатывает данные, построит рамки вокруг дефектных областей и определит параметры дефектов, находящихся внутри рамок.

На рис. 8 представлены фрагменты данных АВИК кольцевого СС Ду720 и примеры определения параметров сварного соединения. На рис. 8 слева представлена проекция данных в плоскости

XY (С-вид), на которой цветом кодирована высота профиля в каждой точке, а справа – сечение данных в плоскости XZ (В-вид), представляющая собой профиль поверхности СС в текущей координате Y.

По данным рис. 8, а определены параметры геометрии СС:

- валик усиления:
ширина – 23 мм;
высота – 2,9 мм;
углы – 123, 112°;
- поверхностный дефект (подрез):
ширина – 1,9 мм;
глубина – 0,5 мм;
- протяженность – 13 мм.

По данным рис. 8, б определены параметры геометрии СС:

- валик усиления:
ширина – 23 мм;
высота – 2,9 мм;
- смещение кромок – 2,5 мм.

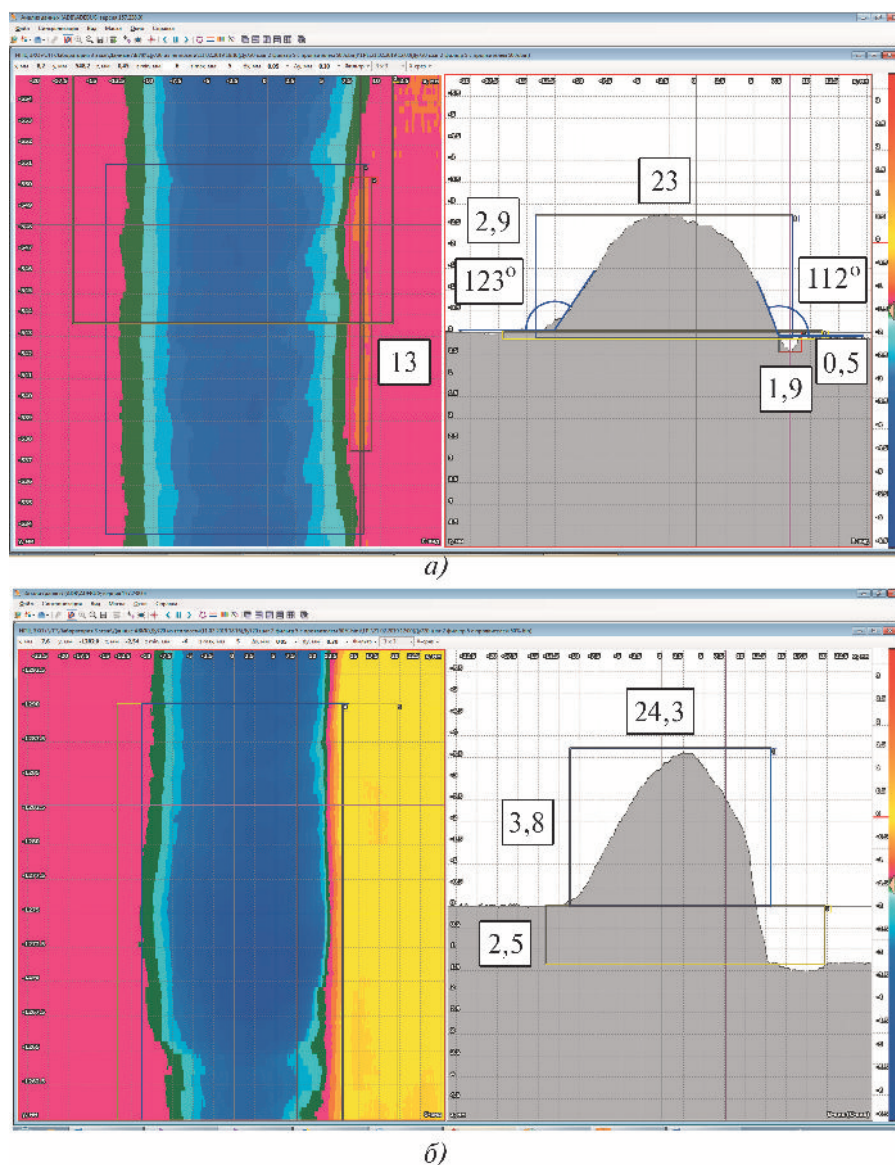


Рис. 8. Пример определения параметров СС по данным АВИК:
а – валик усиления и поверхностный дефект; б – валик усиления и смещение кромок

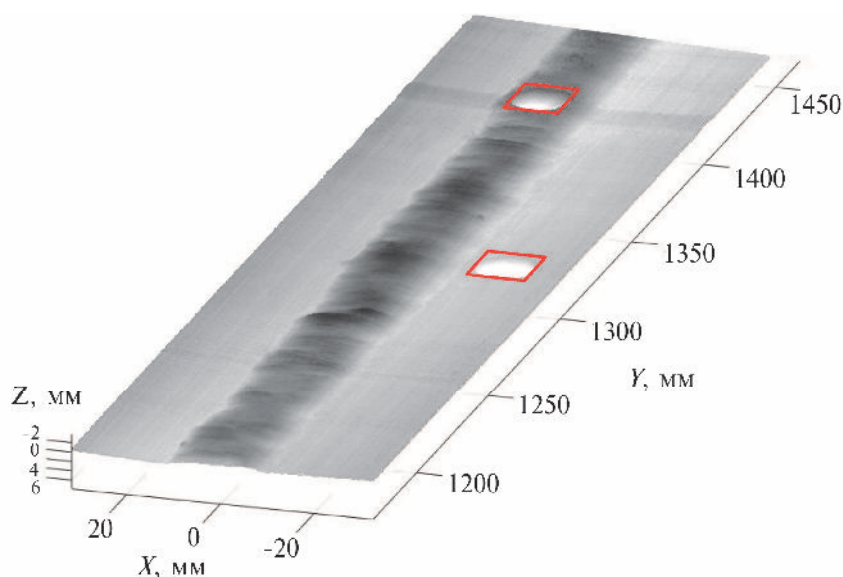


Рис. 9. Трехмерное изображение профиля поверхности участка кольцевого СС с двумя сверлениями

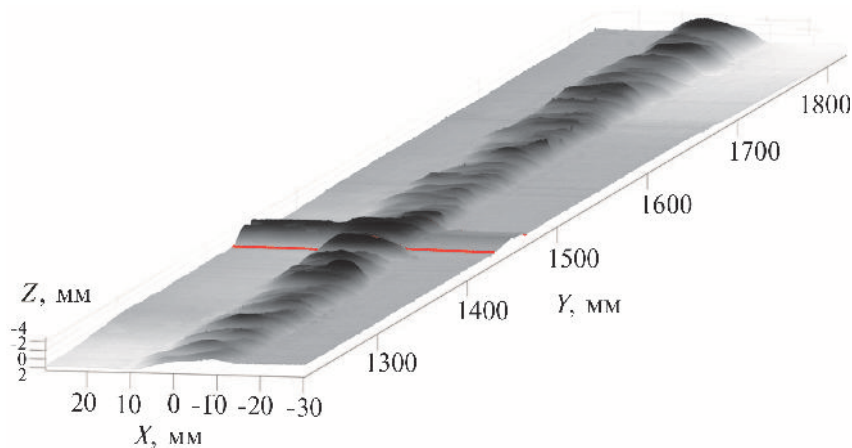


Рис. 10. Трехмерное изображение профиля поверхности участка кольцевого СС в месте пересечения с продольным СС

В ПО для анализа данных АВИК реализована возможность представления профиля поверхности СС в трехмерном виде. При таком представлении более отчетливо видны дефекты на поверхности валика усиления.

На рис. 9 представлено трехмерное изображение профиля поверхности участка кольцевого СС с двумя сверлениями. В программном обеспечении предусмотрена возможность автоматического поиска и оконтуривания дефектных зон в соответствии с заданными критериями оценки качества.

Также реализована возможность поиска продольных сварных соединений. На рис. 10 показано трехмерное изображение профиля участка поверхности кольцевого СС в районе пересечения с продольным СС. Найденные границы продольного СС отмечены красными линиями.

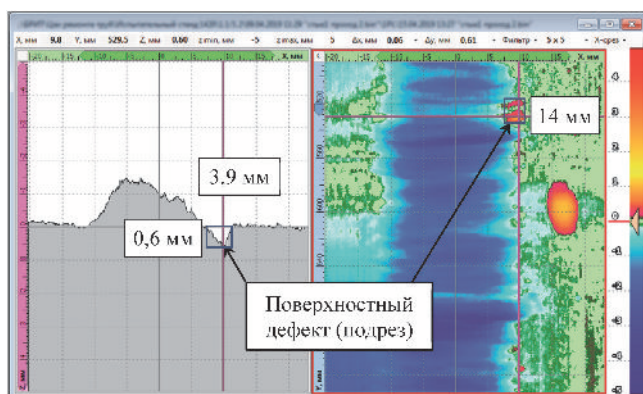
Совместный анализ данных АВИК и АУЗК методом ФР

В ПО «Анализ данных» реализована возможность совместного анализа данных АУЗК и АВИК.

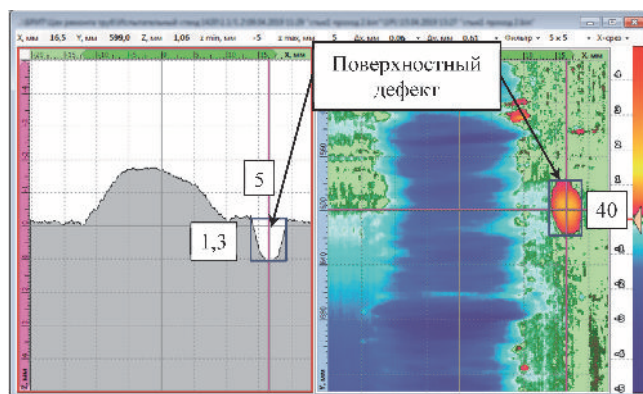
На рис. 11 и 12 представлены изображения, полученные в результате контроля кольцевого сварного соединения системой АУЗК «АВГУР-ТФ» совместно с использованием комплекта АВИК (рис. 11, а, 12, а). АУЗК выполнялся методом ФР (рис. 11, б, 12, б). На рис. 11, б, 12, б представлена проекция данных в плоскости XY (С-вид), рис. 11, а, 12, а – сечение данных в плоскости XZ (В-вид) в координатах $Y = 529,5$ мм, $Y = 599$ мм соответственно.

По ФР-изображению (см. рис. 11, б) в районе координаты вдоль СС $Y = 525$ мм выявлен поверхностный дефект. Данный дефект подтверждается данными АВИК (см. рис. 11, а) и по ним же идентифицирован как подрез глубиной 0,6 мм, шириной 3,9 мм и протяженностью 14 мм.

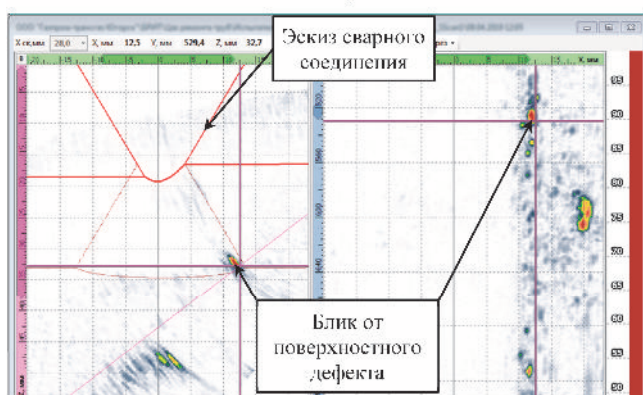
По ФР-изображению (рис. 12, б) в районе координаты вдоль СС $Y = 599$ мм выявлен поверхностный дефект. Данный дефект подтверждается данными АВИК (см. рис. 12, а) и идентифицируется по ним как потеря металла глубиной 1,3 мм, шириной 5 мм и протяженностью 40 мм. Дефект таких размеров недопустим.



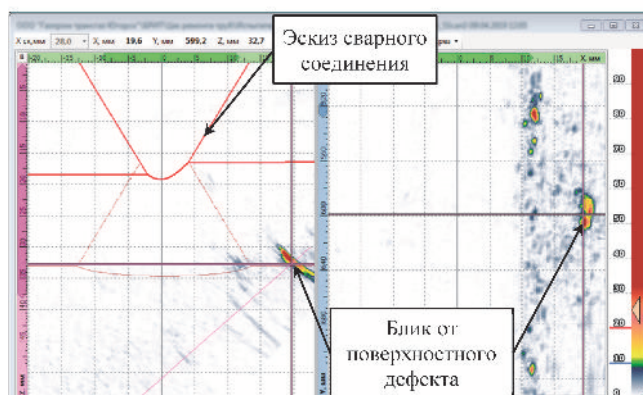
а)



а)



б)



б)

Рис. 11. Пример совместного анализа данных АВИК (а) и АУЗК методом ФР (б) кольцевого СС

Рис. 12. Пример совместного анализа данных АВИК (а) и АУЗК методом ФР (б) кольцевого СС

Выводы

Разработан комплект средств АВИК, отвечающий требованиям действующей нормативной документации ПАО «Газпром».

Впервые в системе АУЗК «АВГУР-ТФ» с комплектом АВИК реализована возможность неразрушающего контроля сварных соединений ультразвуковым методом и АВИК и совместный анализ данных, полученных обоими методами, что обеспечивается их хранением в единой базе данных и применением единой программы «АВГУР-Анализ».

Совместный анализ результатов контроля методами АУЗК и АВИК позволяет повысить объективность оценки качества СС в сравнении с использованием только одного метода.

Библиографический список

1. **Вопилкин А. Х., Ромашкин С. В., Тихонов Д. С. и др.** Система автоматизированного ультразвукового контроля «АВГУР-ТФ»: особенности и опыт применения // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 74 – 83.
2. **ООО «НПП «Призма»:** официальный сайт фирмы. URL: <http://prizasensors.ru/> (дата обращения: 15.01.2020).
3. **Программное обеспечение «АВГУР-Анализ».** URL: <http://www.echoplus.ru/prodykciya/104-programmnoe-obespechenie-avgur-analiz.html> (дата обращения: 23.01.2020).
4. **Свидетельство о государственной регистрации ПО «АВГУР-Анализ» № 2019610777.** URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2019610777&TypeFile=html (дата обращения: 23.01.2020).

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ДИАГНОСТИКЕ И УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ



В. Г. Бадалян,
гл. науч. сотрудник,
д-р техн. наук

Рассмотрены особенности приборов ультразвуковой дефектометрии. Проанализированы ее возможности для уточнения оценки риска за счет количественной оценки параметров дефектов на объектах атомной энергетики, в том числе приведены: погрешности измерений высоты и длины плоскостных несплошностей (натуральных и искусственных) с применением приборов ультразвуковой дефектометрии; примеры измерения профиля развивающейся трещины и ее развития на протяжении нескольких лет; результаты измерений распределения дефектов по высоте и длине в сварных соединениях $\varnothing 1200 \times 75$ мм оборудования АЭС; в качестве примера – экспериментальная кривая вероятности обнаружения (РОД-кривая) продольно ориентированных плоскостных несплошностей в композитном сварном соединении трубопровода Ду1100, полученная с применением системы с когерентной обработкой данных серии «АВГУР».

Необходимость риск-ориентированного подхода устанавливается рядом нормативных документов, посвященных безопасной эксплуатации объектов повышенной опасности и определяющих объемы и периодичность эксплуатационного неразрушающего контроля [1, 2]. В качестве одного из показателей промышленной безопасности используется величина риска аварии R , которая рассчитывается на основе статистики аварий и состоит из произведения вероятности аварии P (технического риска) и оценки экономических потерь при аварии S (социального риска) [3, 4]:

$$R = PS. \quad (1)$$

Экспертные оценки социального риска различаются на 2–3 порядка, а разброс оценок технического риска достигает до 5 – 7 раз [4].

Оценка технического риска аварии проводится на основе расчетов методами механики разрушения с использованием вероятностного подхода к возникновению неблагоприятных событий, информации о дефектности, нагрузках и состоянии материала [5].

Для оценки технического риска требуется определить:

- распределение дефектов по размерам a в объекте контроля и погрешности их измерений $\xi(a)$;
- вероятность разрушения объекта в зависимости от размеров дефекта $\varphi(a)$;
- распределение вероятности обнаружения дефектов по размерам (РОД) $P(a)$, которое существенно зависит от используемого метода фиксации дефектов;

- динамику изменения параметров дефектов в процессе эксплуатации.

Все эти параметры можно рассчитать, используя наиболее вероятные функциональные зависимости их от размера дефектов и постулировав вероятность обнаружения дефектов. При этом считается, что:

- имеется единый механизм деградации (усталость или межкристаллитное растрескивание под напряжением), которое приводит к появлению и развитию плоскостных дефектов;
- вероятность аварии и вероятность обнаружения дефектов являются функциями размеров трещины.

Тогда вероятность аварии можно записать как [6]

$$\tilde{P} = \int_0^1 \xi(a') \varphi(a') (1 - P(a')) da'. \quad (2)$$

Здесь для упрощения обычно рассматриваются функции только одного параметра – высоты трещины: a' – безразмерная величина, определяющая высоту дефекта, нормализованную к толщине объекта контроля (a' принимает значения в интервале $[0, 1]$); $P(a')$ – кривая РОД, полученная при контроле по выбранной методике; $\varphi(a')$ – вероятность разрушения объекта; $(1 - P(a'))$ определяет вероятность пропуска дефекта размера a' по результатам контроля.

Конечно, вероятность аварии может также зависеть и от других параметров, а вероятность ее обнаружения – от таких факторов, как высота, длина, наклон трещины, геометрия сварного шва и т.д.

Заметим, что общий риск определяется также суммой рисков, связанных с эксплуатацией объекта, такими как многократное изменение давления, гидравлический удар, коррозионное утонение стенок и т.д.

При выполнении численных расчетов по соотношению (2) для параметров $\xi(a')$ и $\varphi(a')$ приходится пользоваться недостаточной информацией о состоянии и механических свойствах анализируемого объекта, так как они в значительной степени определяются конкретными условиями эксплуатации объекта, что приводит к разбросу оценок риска.

В частности, функция $\varphi(a')$ выражает вероятность разрушения с учетом существования трещины размера a . Эта функция существенно зависит от свойств и дефектности материала, условий эксплуатации, максимальных допустимых размеров дефектов в соответствии с критериями, определяющими допустимый уровень вероятности. Этот параметр рассчитывается теоретически [12]. При этом рассматриваются модели полуэллиптических поверхностных трещин, подчиняющихся логнормальному закону распределения размеров.

Для получения более точных оценок необходимо использовать знания о текущем техническом состоянии объекта, которые можно получить при выполнении работ по техническому диагностированию, включая ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК) [3]. Особый интерес вызывают методы и средства УЗ-дефектометрии, которые позволяют количественно оценить результаты контроля [7].

В статье рассмотрены возможности применения методов и приборов УЗ-дефектометрии, которые могут быть весьма перспективны при оценке технического состояния с учетом фактора риска, за счет количественной оценки параметров дефектов. Ниже будут приведены результаты измерений на различных АЭС с использованием методов и аппаратуры УЗ-дефектометрии.

Основные особенности приборов УЗ-дефектометрии

В настоящее время наиболее широко применяются когерентные методы УЗК с использованием методов синтезированной апертуры (SAFT), фазированных антенных решеток (ФАР).

Эти приборы дают возможность не только обнаруживать дефекты, но и определять реальные параметры, не основываясь только на амплитуде дифрагированных и эхосигналов, а используя анализ акустических изображений с высоким разрешением. Такие изображения получают при когерентной обработке информации о рассеянном акустическом поле методом фокусированной синтезированной

апертуры (SAFT). В настоящее время наиболее популярная реализация этого метода в дефектоскопии осуществляется либо путем перемещения по поверхности контролируемого объекта акустических преобразователей, либо использованием ФАР.

Примером таких приборов могут служить:

- приборы автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) серии «АВГУР», в которых построение изображений несплошностей выполняется по алгоритму проекции в спектральном пространстве (ПСП) [8], разновидностью метода синтезированной фокусированной апертуры, реализуемой в частотной области и называемый FT-SAFT, – SAFT-дефектоскопы. Системы «АВГУР 4.2», «АВГУР 5.2» и «АВГУР Т» можно отнести к семейству SAFT-дефектоскопов;

- приборы АУЗК, в которых формирование изображений выполняется с применением фазированных антенных решеток, – ФАР-дефектоскопы.

Приборы АУЗК с когерентной обработкой данных имеют ряд характерных особенностей [9], которые оказывают влияние на технологию сбора данных, их оценку. В частности, приборы, использующие SAFT и приборы с ФАР:

- регистрируют акустические радиосигналы в дискретных точках приемной апертуры, которые формируют приемно-передающую антенную решетку (АР). При этом у ФАР-дефектоскопов приемно-передающая АР выполнена в виде многоэлементного акустического преобразователя, а в SAFT-дефектоскопах такая решетка формируется путем механического перемещения одноэлементного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) по поверхности контролируемого объекта;

- в результате обработки данных формируют фокусированное акустическое изображение несплошностей и геометрических отражателей, связанных с отражением и дифракцией акустических волн.

Так как результаты контроля являются следствием обработки данных, полученных реальной или синтезированной АР, то они имеют одинаковые особенности как с точки зрения характеристик акустического изображения, так и с точки зрения его анализа:

- высокое разрешение как в лучевом (определяется длиной используемых при контроле акустических импульсов), так и во фронтальном направлениях (определяются длиной АР). Обычно разрешение составляет величину порядка длины звуковой волны λ ;

- повышенное отношение сигнал/шум, которое связано с тем, что построение изображения осуществляется не по отдельным реализациям

УЗ-поля, а по их совокупности, с использованием различных типов акустических волн, множества схем регистрации данных, пространственной и временной фильтрации. Это свойство делает особенно привлекательным применение приборов при контроле аустенитных объектов [10];

- относительная нечувствительность к амплитуде эхосигнала из-за того, что около 70 % информации содержится в фазовой составляющей А-сканов [11].

Следствием описанных особенностей УЗ-изображений является стабильность основных информативных параметров изображения дефекта, которые определяют его размеры, локализацию:

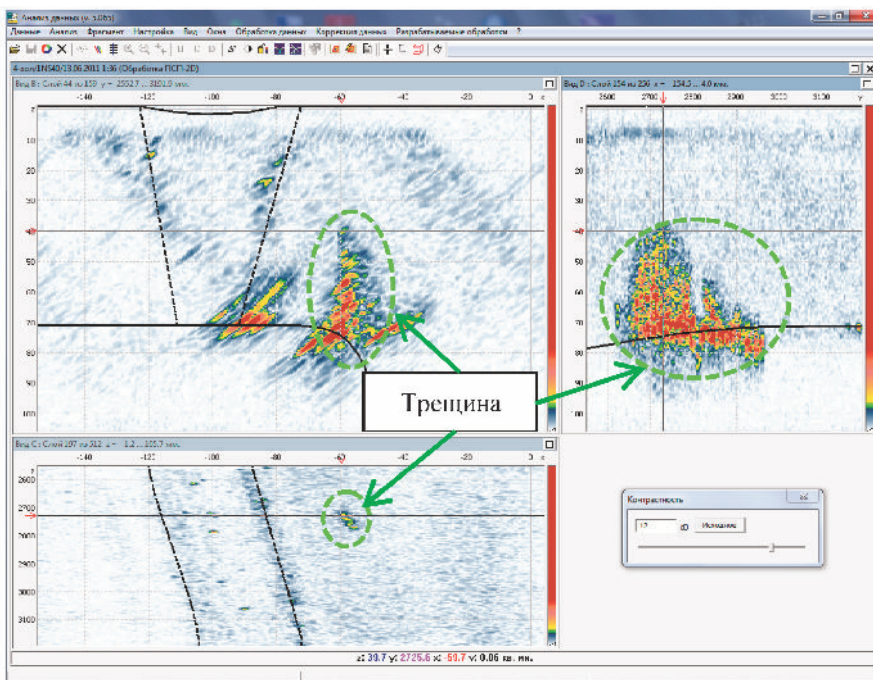
- они слабо зависят от амплитуды изображения;
- полученные изображения имеют высокое разрешение и адекватно отражают реальные параметры дефектов. На рис. 1 в качестве примера приведены изображения трещин, полученных с применением приборов УЗ-дефектометрии.

На рис. 1, а приведены изображения В, С и D-типа трещины, растущей от галтельного перехода (выделена эллипсами), полученные SAFT-дефектоскопом. По этим изображениям была определена их высота – 32 мм, ориентация, длина – 380 мм. Результаты последующего вскрытия подтвердили точность определения реальных параметров этих дефектов. На изображении С-типа хорошо видна трещина на фоне сигналов от корня и галтели, высоту трещины легко измерить по изображению В-типа. На основании полученных данных было составлено заключение контроля, содержащее данные о размере, местоположении и ориентации дефекта.

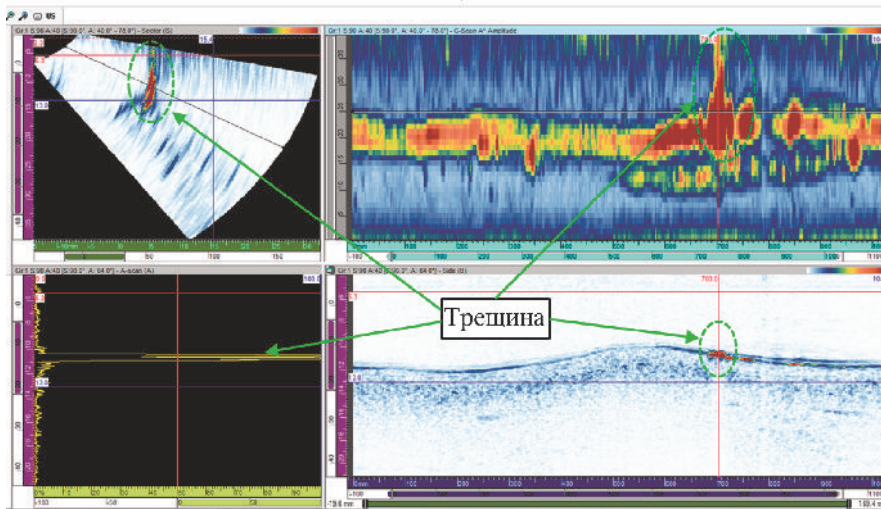
На рис. 1, б представлены изображения А-, В-, С- и S-типа трещины длиной 46 мм и высотой 7 мм, полученные с применением ФР-дефектоскопа.

Измерения параметров дефектов, выполненные в течение ряда лет на одном и том же объекте, показывают, что их акустические образы достаточно стабильны, очень индивидуальны и их легко различать.

Использование таких приборов дает возможность перейти от традиционной ультразвуковой дефектоскопии к ультразвуковой дефектометрии. Именно в этом случае проявляется значительная польза в их применении, хотя эти приборы значительно дороже и сложнее в использовании. При этом обеспечивается естественная связь между результатами дефектоскопии и прочностными расчетами, что приводит к увеличению надежности результатов прочностных расчетов реальных конструкций, содержащих дефекты [7].



а)



б)

Рис. 1. Изображения трещин, полученные с применением SAFT-дефектоскопа (а) и ФР-дефектоскопа (б)

Возможности ультразвуковой дефектометрии

Определение размеров дефектов

Измерение реальных размеров несплошностей, определение их типов (плоскостные, объемные) являются ключевыми процедурами для количественного анализа дефектности объекта, сведения о которых напрямую связаны с риск-ориентированным подходом к анализу безопасности эксплуатируемого объекта. Знание параметров дефектов, их число и развитие в процессе эксплуатации используется при расчетах прочности объекта. В частности, знание высоты несплошностей дает возможность оценить вероятность разрушения объекта. Однако необходимо принять во внимание погрешности измерений, которые обычно распределены по нормальному закону [12].

Некоторые результаты исследований, направленных на определение размеров плоскостных несплошностей и их погрешности в сварных соединениях (СС) на ряде объектов АЭС с использованием ФР-дефектоскопов и приборов с SAFT-обработкой серии «АВГУР», приведены в таблице. Проводилось сопоставление результатов измерения высоты и длины поверхностных несплошностей, локализованных на внутренней поверхности СС. В качестве несплошностей применялись естественные трещины в образцах, вырезанных из реальных СС, и искусственные плоскостные дефекты в виде пазов. Полученные результаты измерений сопоставлялись с результатами металлографических исследований (МГИ) и известными размерами искусственных дефектов. В таблице приведены погрешности определения геометрических размеров дефектов в СС аустенитных трубопроводов и в композитных СС оборудования АЭС. В композитных СС измерение размеров выполнялось со стороны перлита, так как обычно в этой области локализованы плоскостные дефекты.

Необходимо отметить, что для определения высоты несплошностей значение погрешности

в 95%-ном доверительном интервале составляет величину от 1,5λ для дефектов в аустенитном СС трубопровода Ø325×15 мм («АВГУР») до 3λ для дефектов в СС Ø1100×70 мм оборудования АЭС. Такая низкая погрешность определяется использованием приборов УЗ-дефектометрии. Погрешность измерения длины несплошности значительно больше, что связано с более низким разрешением изображения вдоль СС из-за отсутствия фокусировки в этом направлении в приборах с SAFT-обработкой («АВГУР») [13] и использованием в практике линейных антенных решеток в приборах ФР.

Анализ дефектности объекта контроля

Распределение несплошностей по высоте и длине

Для оценки вероятности разрушения необходимо определить максимально допустимые размеры дефектов. Для этого выявляют статистические законы распределения размеров дефектов и по найденным законам распределения рассчитывают вероятность разрушения контролируемого объекта [12]. Необходимо иметь в виду, что для выполнения более корректной оценки функция распределения дефектов по размерам $\xi(a)$ должна представлять реальное распределение размеров трещины для контролируемого объекта, действующего механизма деградации, условий эксплуатации. Вместе с тем имеется нехватка реальных данных об этом параметре, так как трещины встречаются, как правило, крайне редко. Поэтому при теоретических расчетах функция $\xi(a)$ обычно моделируется логнормальным распределением [12]

$$f(a) = \frac{1}{a\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(\ln-\mu)^2/2\sigma^2}, \quad (3)$$

где σ и μ – стандартное отклонение и средние значения нормального распределения.

Погрешности измерения размеров плоскостных дефектов в СС

| Объекты НК | | Материал | | Дефекты | | Погрешности измерений размеров, мм | | Прибор НК |
|------------------|-----------------|----------|----------------------------------|---------|-------------|------------------------------------|-------|---------------|
| СС трубопроводов | СС оборудования | Аустенит | Композит (НК со стороны перлита) | Пазы | Натуральный | Высота | Длина | |
| Ø325×15 мм | – | + | – | – | + | ±1,5 | ±10 | ФР «АВГУР» |
| | | | | | | ±1,0 | ±6 | |
| Ø630×12 мм | – | + | – | + | – | ±1,5 | ±4,5 | ФР |
| – | Ø1100×70 мм | – | + | – | + | ±2 | – | «АВГУР» ФР |
| | | | | + | – | ±2 | ±4,5 | |

При этом для расчетов применяются модели полуэллиптических поверхностных трещин. С появлением приборов УЗ-дефектометрии представилась возможность определять реальные распределения параметров дефектов. Ниже приведены результаты измерений распределения несплошностей по длине и высоте в СС Ø1200×75 мм оборудования АЭС. При контроле использовались приборы «АВГУР», для которых точность измерения высоты составляла 3 мм, длины – 10 мм. Всего были проанализированы размеры 468 несплошностей, из них 246 несплошностей в блоке А и 222 – в блоке В. Результаты измерений приведены на рис. 2, 3. При построении гистограмм принимались во внимание только те дефекты, размеры которых (высота и(или) длина) превышали разрешающую способность приборов контроля. На рис. 2 представлены результаты измерений плотности распределения несплошностей по высоте на блоке А (рис. 2, а) и блоке В (рис. 2, б) АЭС. На рис. 3 представлены результаты измерений плотности распределения несплошностей по длине на блоке А. Полученные гистограммы плотности распределения дефектов неплохо описываются двухпараметрическим распределением Вейбулла $f(a)$:

$$f(a) = (\alpha/\beta^\alpha) a^{\alpha-1} \exp(-a/\beta)^\alpha, \quad (4)$$

где a – размер несплошности; α и β – параметры распределения.

Для плотности распределения несплошностей получены следующие значения параметров распределения Вейбулла: по высоте $\alpha = 2,7$; $\beta = 6$ (рис. 2, а) и $\alpha = 3,4$; $\beta = 5$ (рис. 2, б). Соответствующие распределения Вэйбулла отображены сплошными линиями.

Результаты расчета плотности распределения измеренных несплошностей по высоте и длине в соответствии с логнормальным законом [12] приведены на рис. 2 пунктирными линиями. Сопоставление результатов расчетов и измерений показывают, что реальные и рекомендуемые распределения несплошностей по высоте не совпадают. Это может быть связано с возможным влиянием условий эксплуатации объектов и ограниченностью выборки данных.

Гистограмма плотности распределения несплошностей по длине для СС Ø1200×75 мм оборудования АЭС на блоке А приведена на рис. 3. Для плотности распределения несплошностей по длине параметры распределения Вейбулла имеют следующие значения: $\alpha = 1,9$; $\beta = 1,5$ (сплошная линия).

Сопоставление результатов расчетов и измерений показывают, что для распределения длины несплошностей результаты похожи.

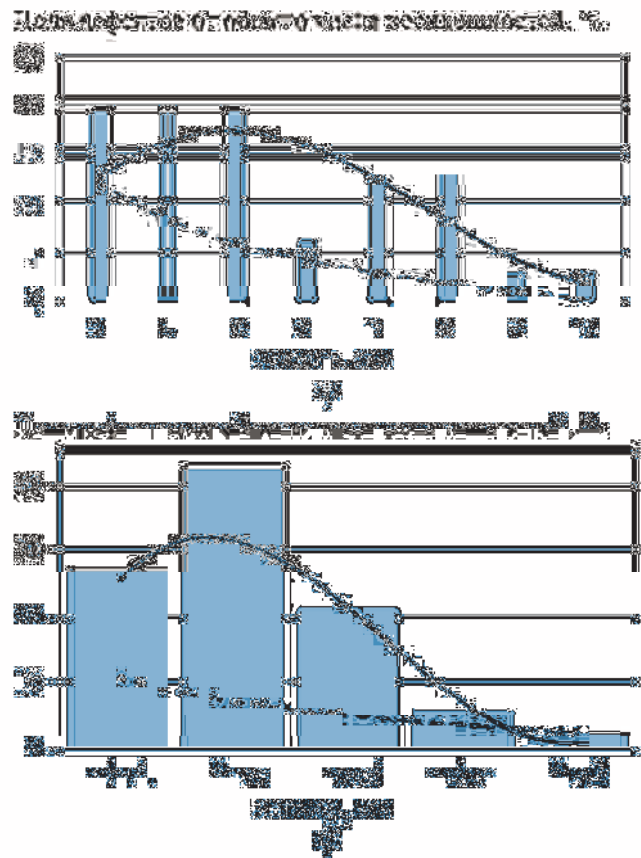


Рис. 2. Гистограммы плотности распределения высоты несплошностей на блоках А (а) и В (б) в СС Ø1200×75 мм оборудования АЭС:

синим цветом обозначены данные, полученные при УЗК; сплошная линия – распределение Вейбулла с $\alpha = 2,7$ и $\beta = 6$ (по высоте несплошностей) и $\alpha = 3,4$ и $\beta = 5$; пунктирная линия – расчеты распределения по логнормальному закону

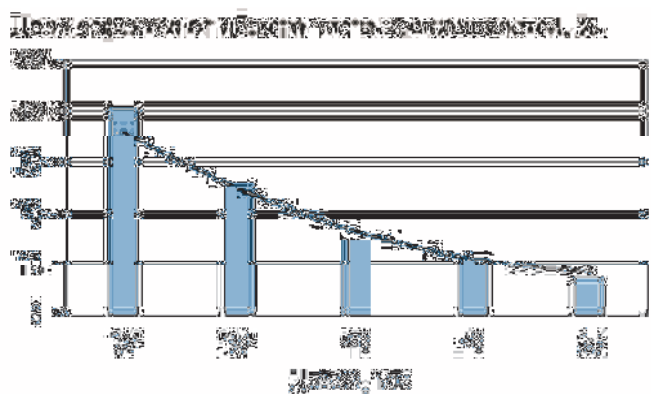


Рис. 3. Гистограммы плотности распределения длины для несплошностей в СС Ø1200×75 мм на блоке А оборудования АЭС:

синий цвет – данные, полученные при УЗК; сплошная линия – распределение Вейбулла $\alpha = 1,9$ и $\beta = 1,5$

Динамика развития несплошностей

Информативные параметры фокусированных изображений, получаемых с применением приборов УЗ-дефектометрии, высокое разрешение анализируемых акустических изображений позволяют анализировать изменение геометрических параметров выявленных несплошностей в течение длительного времени.

А качестве примера на рис. 4 приведены результаты мониторинга аустенитных СС трубопровода 325×15 мм, выполненного с применением SAFT-дефектоскопа «АВГУР». На рис. 4, а представлен профиль неразвивающейся трещины длиной 70 мм, высота которой оставалась постоянной (в пределах погрешности измерений) – около 5,5 мм в течение 5 лет. На рис. 4, б отражены многократные (с периодичностью 2 года) измерения профиля трещины в корне аустенитного СС. Дефект был обнаружен при первичном УЗК; при повторном контроле максимальная высота дефекта увеличилась на 2,5 мм при неизменной длине (в пределах погрешности измерений). Размеры дефекта (максимальная высота 4 мм, длина 45 мм) позволили оставить его еще на 2 года в соответствии с нормами [2]. При следующем контроле был констатирован существенный рост высоты дефекта – на 4 мм при неизменной длине (рис. 5). В результате этот дефект стал недопустимым, и шов был отремонтирован.

Приборы УЗ-дефектометрии имеют высокое разрешение и эффективны и при мониторинге объектов большой толщины. Подобная картина развития трещин в СС наблюдалась при контроле объектов толщиной 75 мм (СС Ø1200×75 мм). В частности, за несплошностями, представленными на гистограмме рис. 2, в течение трех лет проводился ежегодный контроль. За редким исключением параметры несплошностей не изменялись в пределах погрешности измерений (см. таблицу). Из общего числа несплошностей только в двух

случаях наблюдалось развитие дефектов (рис. 6). Дефект № 1 был обнаружен при первичном УЗ-контроле; при повторном контроле в следующем году высота дефекта увеличилась на 4 мм. Еще через год его высота возрасла еще на 2 мм, при этом длина оставалась неизменной. По одному из своих параметров (высоте) дефект стал недопустимым, и был проведен ремонт. Дефект № 2 в течение года не изменял своих геометрических параметров, а через год его высота увеличилась вдвое при такой же длине. Он был допустимым по нормам контроля, однако из-за активности развития требовал дальнейшего тщательного наблюдения.

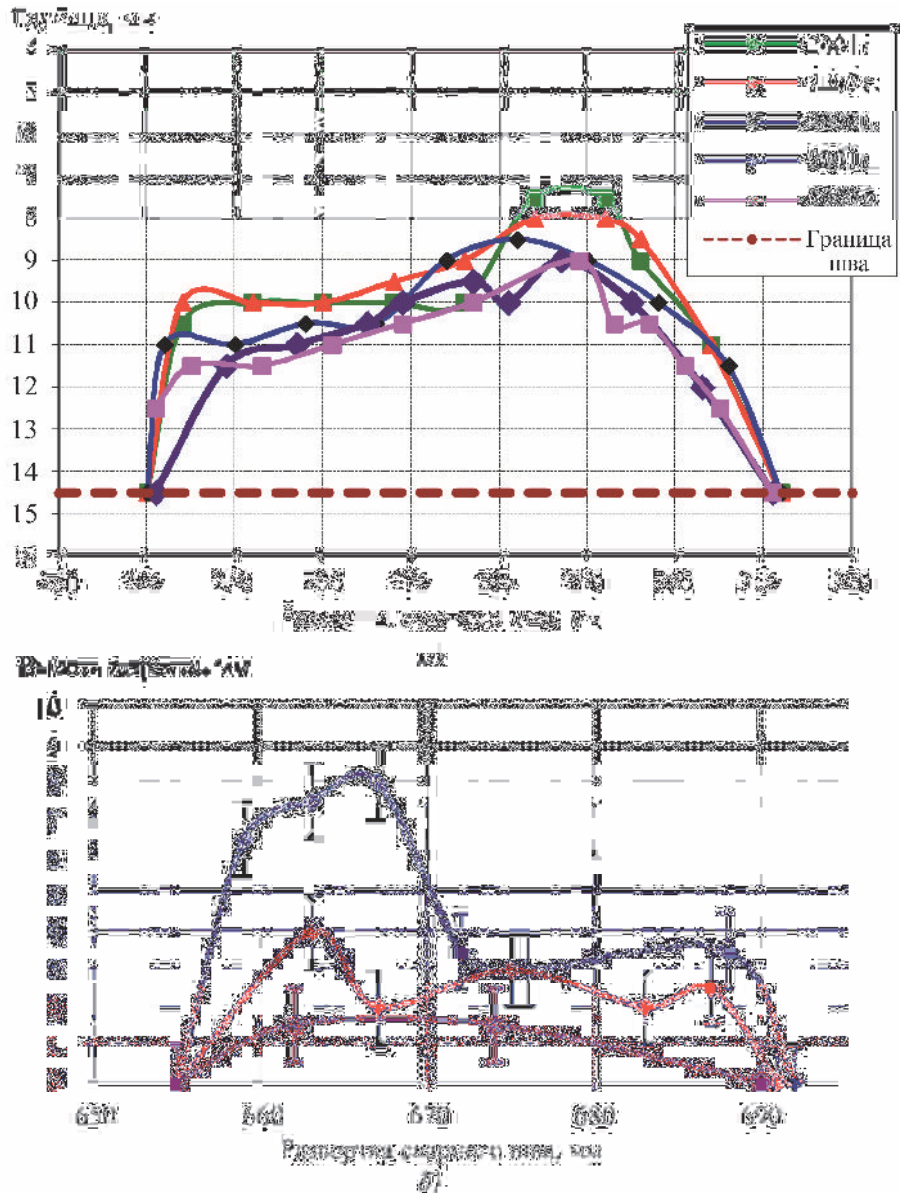


Рис. 4. Профиль трещины в аустенитном СС трубопровода Ø325×15 мм, полученный при УЗК SAFT-дефектоскопом «АВГУР»:
 а – неразвивающаяся трещина (наблюдение в течение 5 лет); б – развивающаяся трещина (наблюдение в течение 4 лет); фиолетовая кривая – первичный УЗК; красная – повторный УЗК 1; синяя – повторный УЗК 2

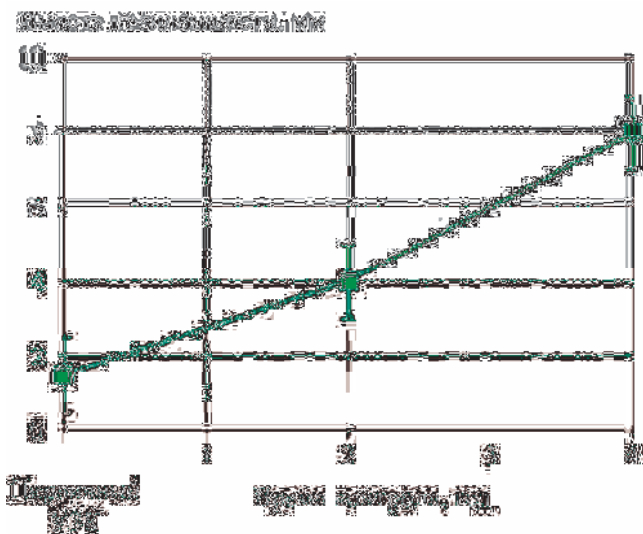


Рис. 5. Временная зависимость максимальной высоты трещины (см. рис. 4, б) в корне аустенитного СС трубопровода $\text{Ø}325 \times 15$ за период 2000 – 2004 годы

Возможность анализировать профили дефектов стечением времени, представляемые приборами УЗ-дефектометрии, позволяет получать более подробную информацию о развитии несплошностей, чем анализ только максимальных значений размеров дефектов [14]. Хотелось бы отметить, что обычно в расчетах специалисты по прочности используют два параметра несплошности – максимальные длину и высоту. Вместе с тем использование в прочностных расчетах профилей дефектов могло бы привести к более точной оценке влияния на работоспособность объекта контроля. Аналогичная ситуа-

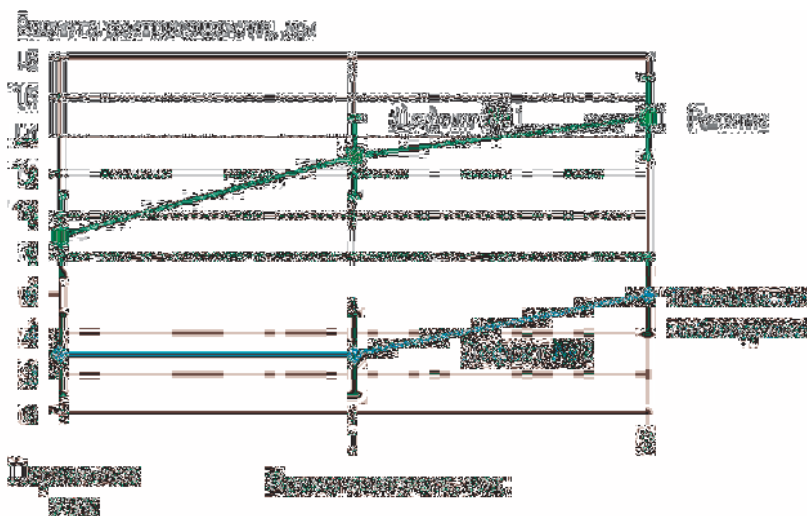


Рис. 6. Развивающиеся несплошности в СС $\text{Ø}1200 \times 75$ мм оборудования АЭС:

зеленая сплошная линия – несплошность № 1; синяя – несплошность № 2; пунктирная линия – максимально допустимый размер плоскостной несплошности [2]

ция встречается при анализе влияния коррозии на работоспособность трубопроводов в нефтяной отрасли. Учет профиля коррозии с применением программы RSTRENG (LAPA) [15] приводит к существенному снижению стоимости эксплуатации магистральных трубопроводов [16].

Зависимость вероятности обнаружения несплошностей от их размеров

Одним из важнейших параметров, который может повлиять на оценку риска аварии, прямо связанным с методами и средствами неразрушающего контроля, является зависимость вероятности обнаружения дефектов от размеров несплошностей – кривая $POD(a)$. Для выполнения этих исследований особенно полезно применение аппаратуры УЗ-дефектометрии, дающей возможность определять реальные параметры дефектов. На рис. 7 приведены кривые $POD(a)$, построенные по результатам АУЗК продольных трещин в композитном СС Ду1100 с толщиной изделия 40 мм по данным «АВГУР» при контроле со стороны перлита. После выполнения УЗК измерялась реальная высота (МГИ).

В работе [17] на примере анализа результатов УЗК аустенитных СС трубопроводов $\text{Ø}325 \times 15$ мм проиллюстрировано существенное влияние структуры СС, вида применяемой при УЗК-аппаратуры (SAFT-дефектоскопы серии «АВГУР», ручные дефектоскопы), квалификации контролеров для оценки результатов контроля на вид кривых выявления $POD(a)$.

Заметим, что получение статистически достоверных кривых $POD(a)$ только по результатам экспериментов – задача очень трудоемкая. Например, для обеспечения вероятности выявления дефекта определенного размера 0,9 в 95%-ном доверительном интервале необходимо получить не менее 29 независимых измерений. Например, для надежного получения кривых POD в программе Nordtest было использовано 500 трещин.

Другим способом построения кривой $POD(a)$, более быстрым и с меньшими затратами, является численное моделирование, например, с использованием программного комплекса CIVА [18]. Однако численное моделирование POD дает слишком оптимистичные оценки вероятности выявления дефектов, так как не всегда удается учесть все факторы,

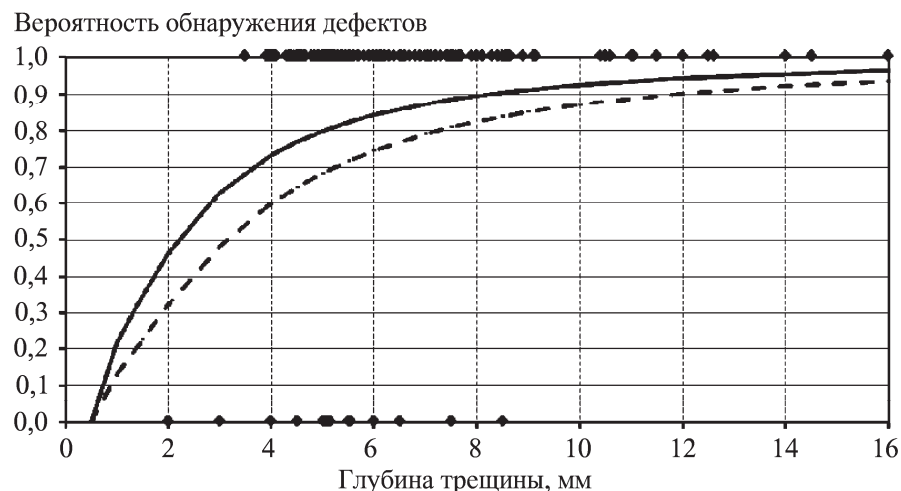


Рис. 7. Зависимость вероятности обнаружения продольно ориентированных плоскостных несплошностей в композитном СС трубопроводе Ду1100, полученная по данным «АВГУР» со стороны перлита: сплошная линия – POD-кривая; пунктирная линия – нижняя граница 95%-ного доверительного интервала; ♦ – результаты УЗ-измерений трещин в бинарном представлении (дефект обнаружен – 1; дефект не обнаружен – 0)

влияющие на оценку выявления несплошностей: геометрические параметры объекта контроля, параметры несплошностей (форму, ориентацию, локализацию), особенности распространения акустических волн, уровень и природу акустических шумов и т.д. Очень большое влияние оказывает человеческий фактор: возможные ошибки в интерпретации данных, связанные с квалификацией, физическим и психологическим состоянием контролеров [19]. Вместе с тем совместное применение ограниченного объема экспериментальных данных и численный расчет могут несколько облегчить задачу получения кривых $POD(a)$.

Выводы

1. Логика развития методов и средств УЗ-дефектоскопии и настоятельная необходимость использования современного риск-ориентированного подхода к проблеме безопасности объектов приводит к необходимости более широкого применения методов и аппаратуры УЗ-дефектометрии для уточнения оценки значений риска в конкретных условиях эксплуатации объекта.

2. Полученные с применением УЗ-дефектометрии данные дают возможность оценить характеристики дефектности объекта, связанные с его текущим состоянием, с учетом методов и средств выявления несплошностей, определения их размеров с учетом погрешности, а также динамику развития несплошностей, построить кривые выявляемости несплошностей в зависимости от размеров.

3. В настоящее время в атомной энергетике разработаны количественные нормы оценки результатов контроля, которые учитывают реальные размеры дефектов [2], локализацию их для ряда объектов оборудования АЭС. Предполагается дальнейшее увеличение числа объектов, что позволит расширить применение риск-анализа объектов повышенной опасности.

Библиографический список

1. **Федеральный закон** от 21.07.1997 N 116-ФЗ. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: ред. от 29.07.2018. М., 2018.
2. **Федеральные нормы** и правила в области использования атомной энергии (НП-084-15). Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций // Собрание законодательства Российской Федерации. 1997. № 49.
3. **Иванов В. И., Коновалов Н. Н., Котельников В. С. и др.** Вопросы оценки риска аварии с использованием технического диагностирования // Контроль. Диагностика. 2015. № 5. С. 12 – 20.
4. **Иванов В. И., Мусатов В. В., Сазонов А. А.** Об использовании неразрушающего контроля при оценке риска аварии // VI школа-семинар «Оценка и управление промышленными рисками в промышленной безопасности. Мониторинг рисков сложных и уникальных объектов»: сб. материалов. Омск: ООО «Омскбланкиздат», 2016. С. 185 – 204.
5. **Лепихин А. М., Махутов Н. А., Москвичев В. В., Черняев А. П.** Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2003. 174 с.

6. **Gandossi L., Simola K.** Sensitivity of risk reduction to probability of detection curves (POD) level and detail / DG JRC Institute for Energy. Luxembourg, 2007. 34 p.
7. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Вопилкин А. Х. и др.** Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / под ред. А. Х. Вопилкина. М.: Машиностроение, 2008. 368 с.
8. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г.** Алгоритм совместной обработки многочастотных и многоакурсных голограмм для восстановления изображения дефектов // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 25 – 33.
9. **Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х.** Опыт применения ультразвуковой экспертной системы с когерентной обработкой данных «Авгур» на российских АЭС // Контроль. Диагностика. 2000. № 9. С. 35 – 39.
10. **Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х., Гребенников В. В., Гребенников Д. В.** Сравнительный анализ способов повышения отношения сигнал/шум при ультразвуковом контроле аустенитных швов // Контроль. Диагностика. 2000. № 9. С. 29 – 35.
11. **Gallagher N. C.** Optimum quantization and relative information content of holographic magnitude and phase // Acoustical imaging and holography. 1979. V. 1. No. 2. P. 119 – 132.
12. **Анализ риска** и повышение безопасности водородных энергетических реакторов / под ред. Н. А. Махутова, М. М. Гаденина. М.: Наука, 2009. 499 с.
13. **Бадалян В. Г.** Погрешность измерения дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных // Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 12 – 23.
14. **Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х.** Оценка потенциальной опасности дефектов при ультразвуковом автоматизированном контроле объектов повышенной опасности // В мире неразрушающего контроля. 2010. № 4. С. 4 – 7.
15. **Fletcher R., Fenyvesi L.** Validity of the LAPA Method for Assessment of Defects Reported by In-Line Inspection Tools // Proc. International Pipeline Conference, Canada, 2004. P. 1195 – 1201.
16. **GE Oil&Gas:** официальный сайт компании. URL: https://www.geoilandgas.com/sites/geog/files/high-speed_integrity_evaluations_case_study.pdf (полн. обращение 18.05.2018)
17. **Бадалян В. Г.** Оценка достоверности результатов УЗК в аустенитных сварных соединениях (с применением когерентных систем) // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 4 – 9.
18. **CIVA:** официальный сайт. URL: <http://www.extende.com/civa-3> (полн. обращение 18.05.2018)
19. **Carvalho A. A., Rebello J. M. A., Silva R. R., Sagrilo L. V. S.** Reliability of the manual and automatic ultrasonic technique in the detection of pipe weld defects // Insight. 2006. V. 48. No. 11. P. 1 – 6.

ВЫЯВЛЕНИЕ И ДОСТОВЕРНОСТЬ КОНТРОЛЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И ДЕФЕКТОМЕТРИИ



В. Г. Бадаев,
гл. науч. сотрудник,
д-р техн. наук

Эффективность методов и средств ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) оценивается по вероятности выявления дефектов и достоверности результатов контроля. В работе исследуется поведение $PoD(a)$ – функции выявляемости дефектов, описывающей зависимость вероятности обнаружения дефектов от их высоты, и оценивается достоверность контроля, путем ROC-анализа данных контроля.

Анализ PoD -кривых, полученных по результатам УЗК приборами УЗ-дефектоскопии и УЗ-дефектометрии, демонстрирует существенно большую надежность применения методик и приборов дефектометрии. ROC-кривые, построенные по данным УЗ-дефектометрии дают возможность оценить достоверность контроля дефектов различной высоты. Анализ ROC-кривых дает дополнительную информацию для оптимизации методик УЗ-контроля.

Исследования выполнялись на массиве данных УЗК сварных соединений с реальными трещинами.

Анализ рисков эксплуатации объектов повышенной опасности состоит из оценки вероятности аварии и потенциальных потерь от нее. Анализ вероятности аварии включает ряд составляющих, в том числе обнаружение дефектов и количественную оценку их размеров [1]. В настоящее время появилось значительное количество приборов, основанных на когерентной обработке результатов ультразвукового контроля (УЗК) и построении акустического изображения дефекта с высоким разрешением – SAFT- и ФР-дефектоскопы [2 – 4]. Применение приборов УЗ-дефектометрии на практике имеет ряд особенностей, которые нашли свое отражение в соответствующих методиках контроля различных объектов [5]. Эти приборы позволяют по акустическим изображениям определить тип, высоту и длину дефектов с известной погрешностью, а также их положение в сварном шве (СС) [6, 7]. Использование получаемых результатов дает надежную основу для выполнения дальнейших прочностных расчетов [8].

Количественная оценка надежности аппаратуры неразрушающего контроля (НК) является важным фактором при риск-ориентированном подходе в диагностике. Для этого в НК обычно применяются кривые выявляемости дефектов (PoD -кривые) и ROC-анализ.

Кривая PoD (Probability of Detection) описывает распределение вероятности обнаружения дефектов по их размерам. Эта кривая отражает возможности

используемой методики и аппаратуры контроля на выбранной чувствительности и позволяет прогнозировать выявляемость дефектов различных размеров в объекте за счет известной функциональной зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров (например, высоты) [9].

Вместе с тем для оценки достоверности данных, полученных при контроле объекта с применением методик и средств УЗК, необходимо учитывать не только вероятность обнаруженных при контроле дефектов, но и вероятность их пропуска и получения ложных дефектов [10]. Для этих целей часто используются ROC-диаграммы и ROC-кривые (Receiver Operating Characteristic curve), которые отражают взаимную зависимость числа ложных и числа правильно найденных дефектов. Выполняемые для их построения действия называются ROC-анализом. ROC-анализ разработан и применяется в теории обработки сигналов и радиолокации для описания соотношения между событиями верного обнаружения цели и ложными срабатываниями. В НК ROC-анализ начал применяться для анализа достоверности контроля методик, аппаратуры и персонала как средство для быстрой оценки методик и приборов УЗК [11, 12].

Выявляемость дефектов (кривая PoD)

Наиболее полно выявляемость дефектов описывается функцией выявляемости $PoD(a)$, которая показывает зависимость вероятности обнаружения

дефекта от его размеров [13, 14]. Кривая PoD строится по бинарным данным, которые удобно использовать для описания выходных данных приборов УЗК. Для этих данных вероятность обнаружения или пропуска дефекта обозначаются как 1 или 0: если дефект обнаружен, то этот факт обозначается 1, если нет – 0.

Как показывает многолетний опыт, наиболее подходящим аналитическим описанием функции выявляемости PoD(a) для такого типа данных является лог-логистическое распределение, записываемое следующим образом [14]:

$$\text{PoD}(a) = \frac{e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{\ln a - m}{\sigma}\right)}}{1 + e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{\ln a - m}{\sigma}\right)}}, \quad (1)$$

где a – величина, характеризующая параметры дефекта: длину, высоту, эквивалентную площадь и т.д.; m – значение $\ln(a)$, при котором $\text{PoD} = 0,5$; σ – величина, обратная наклону прямой регрессии, построенной методом наименьших квадратов, определяющая степень крутизны кривой PoD.

Оценка выявляемости дефектов и построение кривой PoD по данным УЗК в значительной степени определяется особенностями акустических свойств объектов контроля.

Часто построение PoD(a) основывается на результатах моделирования [15, 16] или на результатах экспериментов с моделями искусственных или реалистичных дефектов [17]. Однако даже если удастся смоделировать основные существенные характеристики дефектов и условий выполнения УЗК, то влияние материала объекта контроля оценить весьма трудно, например для аустенитных или композитных СС. Как показывает практика, даже по протяженности у таких СС имеются значительные области, в которых акустическая ситуация меняется: существенно изменяется уровень структурного шума, скорость распространения акустических волн [18]. Все это приводит к тому, что кривая PoD может оказаться слишком оптимистичной. В связи с изложенным, представляется полезным сопоставить результаты моделирования с реальными данными.

Рассмотрим выявляемость реальных плоскостных дефектов в зависимости от их высоты на примере аустенитных СС трубопроводов.

База данных УЗК

Для дальнейшего анализа используем базу данных результатов УЗК в объектах с повышенным уровнем структурных шумов – аустенитных СС трубопроводов из нержавеющей стали диаметром

325 мм и толщиной 15 мм, которые получены при испытаниях различных УЗ-методик контроля в 2010 г. В этих исследованиях УЗК выполнялся на испытательных образцах, вырезанных из реальных трубопроводов и содержащих аустенитные СС с реальными эксплуатационными дефектами. Типичные дефекты в таких трубопроводах – трещины продольной ориентации (относительно оси СС), развивающиеся с внутренней поверхности СС. При этом трещина распространяется параллельно разделке кромки шва. Как правило, место зарождения дефекта расположено довольно близко от корня шва со стороны основного металла. Часто дефекты берут свое начало в 3 – 7 мм от корня шва и проходят в основной металл перпендикулярно внутренней поверхности СС. Характерное расположение продольных трещин и акустическая схема контроля с применением автоматизированного SAFT-дефектоскопа «АВГУР 5.2» [19] приведено на рис. 1.

С акустической точки зрения основная особенность аустенитных СС заключается в высоком уровне структурного шума, повышенном затухании и анизотропии распространения акустических волн через аустенит [20]. Расчеты показывают, что распространение акустической волны в таких средах через сечение аустенитного СС может значительно отличаться от прямолинейного (для продольных волн оно составляет до 10° , для сдвиговых – до 35°) [21]. Все это приводит к увеличению ошибок определения реальных параметров дефектов и снижает выявляемость самих дефектов.

После выполнения УЗК все СС были подвергнуты металлографическим исследованиям (МГИ), в которых были установлены координаты залегания дефектов, их максимальные длина и высота. Всего было проконтролировано 24 испытательных образца, содержащих 61 дефект длиной от 21 мм до 169 мм и высотой от 1,7 до 12,8 мм. Гистограмма распределения числа дефектов по высоте приведена на рис. 2.

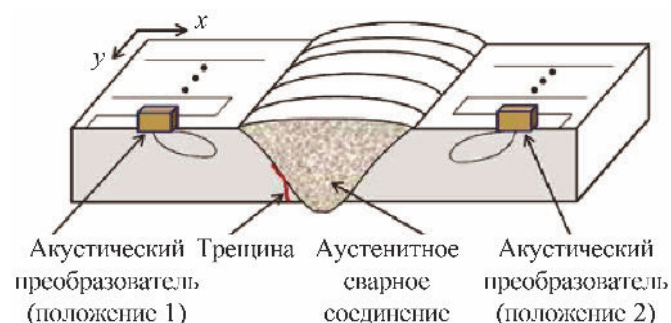


Рис. 1. Схема УЗК аустенитного СС с применением SAFT-дефектоскопа «АВГУР 5.2»

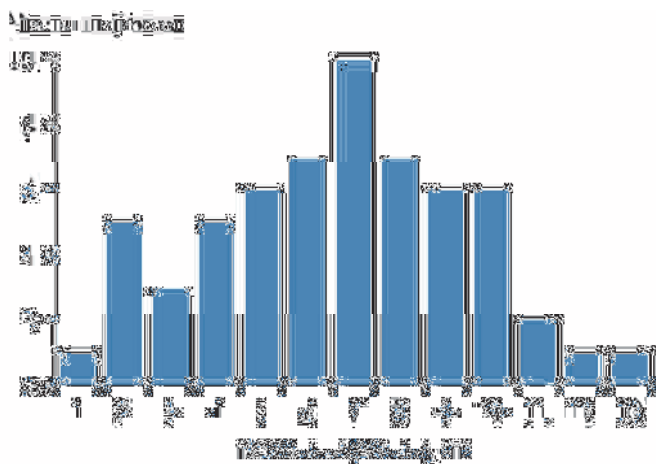


Рис. 2. Распределение числа дефектов по высоте

Необходимо отметить, что дефекты, данные о которых участвуют в построении кривой PoD, должны удовлетворять следующим рекомендациям.

- Желательно, чтобы размеры дефектов были равномерно распределены по логарифмической шкале, охватывающей ожидаемый диапазон увеличения функции выявляемости PoD(a).

- Дефекты, которые настолько велики, что они всегда обнаруживаются, или настолько малы, что их всегда пропускают, предоставляют только ограниченную информацию для построения функции PoD(a).

- Большинство дефектов должно располагаться в зоне увеличения PoD(a) (более 10 – 90 % общего числа дефектов).

- Опыт показывает, что для обеспечения разумной точности в построении функции PoD(a) целесообразно использовать массив из 40 – 60 дефектов.

УЗК выполняли семь операторов. При этом номенклатура СС для всех совпадала на 90 %. Использовались несколько разных методик ручного и автоматизированного контроля. В частности,

измерения выполнялись с применением двух методик УЗ-дефектометрии (ФР- и ПСП (FT-SAFT)-обработка), в которых анализ данных контроля выполнялся по акустическим фокусированным изображениям, и традиционного метода УЗ-дефектоскопии, анализ данных контроля в котором выполнялся по амплитуде УЗ-сигнала. В табл. 1 приведены основные характеристики этих методик контроля. Эта же база данных использовалась при анализе достоверности контроля [22].

Трещины в основном локализируются асимметрично относительно центра СС (см. рис. 1), что приводит к различиям в выявлении дефектов, связанным с влиянием аустенитной структуры СС. Поэтому далее отдельно рассматриваются выявляемость дефектов при контроле со стороны расположения дефекта (контроль «со стороны СС») и выявляемость дефектов при контроле с противоположной стороны СС (контроль «через СС»). Этим случаям на рис. 1 соответствуют положения ПЭП 1 и 2.

Выявляемость дефектов при УЗК со стороны СС

Контроль со стороны СС всегда предпочтителен, так как он позволяет уменьшить влияние аустенита на оценку размеров дефектов и с наибольшей вероятностью выявить дефект. Измерения выполнялись на СС, содержащих 61 реальную продольную трещину протяженностью более 16 мм и высотами от 1,7 до 11,1 мм. УЗК выполнялся в соответствии с методикой № 3 (см. табл. 1) аттестованным персоналом: тремя «командами» контролеров (А₁, А₂, А₃) и тремя независимыми контролерами (Р₁, Р₂, Р₃) по традиционной методике № 1. Это позволило значительно увеличить статистику измерений и надежнее оценить вероятность обнаружения дефектов различной высоты.

1. Основные характеристики методик контроля

| № | Методика контроля | Прибор контроля | Основной информационный параметр | Уровень фиксации | Минимальный обнаружимый дефект, мм | Число операторов | Общее число дефектов |
|---|--------------------|--------------------------|--|---|------------------------------------|------------------|----------------------|
| 1 | Ручная | УЗ-дефектоскоп | Амплитуда сигнала | Амплитуда сигнала от пропила $h = 2$ мм | 2 | 3 | 163 |
| 2 | Ручная | УЗ ФР-дефектоскоп | Фокусированное акустическое 2D-изображение | Амплитуда сигнала от пропила $h = 2$ мм и $L = 10$ мм | 2 | 1 | 61 |
| 3 | Автоматизированная | SAFT-дефектоскоп «АВГУР» | Фокусированное акустическое 3D-изображение | Дефект $h = 1,5$ мм и $L > 10$ мм | 1,5 | 3 | 127 |

Регистрация данных контроля автоматизированным прибором «АВГУР 5.2» выполнялась с обеих сторон СС в импульсном режиме с использованием ПЭП продольных волн (4 МГц) и сдвиговых волн (5 МГц). Диаграммы направленности ПЭП были специально расширены с тем, чтобы обеспечить возможность когерентной обработки данных, и составляли 15° для продольных волн и 20° для сдвиговых волн; угол ввода акустического пучка 70° . ПЭП сканировали по околошовной зоне СС, регистрируя рассеянное акустическое поле по поверхности объекта контроля ХУ (см. рис. 1). Оценка результатов контроля выполнялась независимо контролерами A_1, A_2, A_3 по анализу акустических изображений, полученных после SAFT-обработки данных в приборе «АВГУР». На рис. 3 приведена кривая суммарной выявляемости дефектов в зависимости от их высоты (синяя кривая).

Результаты PoD при контроле через СС

В ряде случаев контроль возможен только с одной стороны СС. При этом возможное взаимное расположение ПЭП и дефекта изображено на рис. 1 (положение 2). Здесь контроль выполняется через СС, и выявляемость дефектов падает из-за негативного влияния аустенита СС. Результаты такого контроля с использованием SAFT-дефектоскопа «АВГУР» представлены на рис. 3 (красная кривая). Данные через СС получены по результатам контроля пяти СС, содержащих длинные трещины. Эти трещины были вырезаны и подвергнуты МГИ. Здесь использована послойная регистрация и обработка данных, характерная для приборов «АВГУР», после которой строится трехмерное акустическое изображение [6]. Шаг при послойной обработке

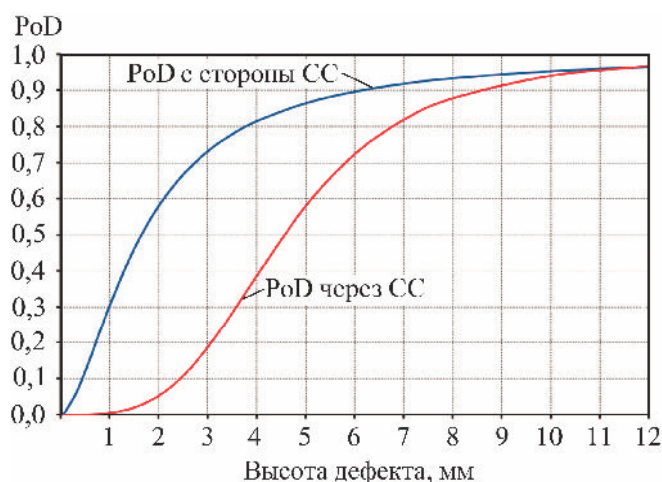


Рис. 3. Зависимость вероятности выявления дефекта от его высоты и результаты УЗК трещин со стороны СС (синяя кривая) и через СС (красная кривая)

выбирается так, чтобы обеспечить независимость измерений в каждом слое, соответствующем различным координатам по оси Y . По полученному акустическому изображению была измерена высота дефектов в каждом слое. В тех случаях, когда такое измерение было возможно, считалось, что дефект обнаружен; когда регистрировался только акустический шум, то дефект не наблюдался.

Кривая PoD при контроле через СС показывает, что вероятность обнаружения дефектов высотой до 30 % толщины СС составляет 0,2, тогда как при контроле со стороны шва — 0,74. Вместе с тем вероятность обнаружения дефектов быстро увеличивается с ростом высоты дефектов и составляет величину 0,8 для дефектов высотой 50 % толщины СС.

Сопоставление кривых выявляемости, полученных в УЗ-дефектоскопии и дефектометрии

Тот же массив данных на реальных аустенитных СС, на котором выполнялся контроль со стороны СС по методике № 3, был повторно проконтролирован по методике № 1 (см. табл. 1).

При этом регистрация данных контроля осуществлялась с применением хордовых схем контроля сдвиговыми волнами на частоте 1,8 МГц; блоки ПЭП перемещались вдоль СС. Оценка результатов контроля выполнялась независимо контролерами P_1, P_2, P_3 по амплитуде детектированного эхосигнала. Полученные кривые выявляемости представлены на рис. 4. Здесь приведены две кривые зависимости вероятности выявления дефектов от их высоты: кривая PoD, полученная при контроле с применением SAFT-дефектоскопа «АВГУР» (синяя линия), и кривая, полученная по методике № 1 (красная линия).

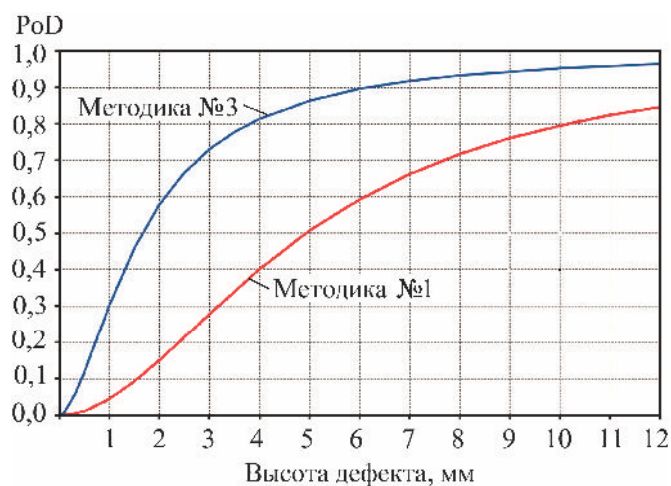


Рис. 4. Зависимости вероятности выявления дефекта от его высоты, полученные по методикам № 3 и 1

Сопоставление этих кривых показывает, что выявляемость дефектов при традиционном контроле ниже, чем при использовании УЗ-дефектометрии. Эта разница особенно существенна при контроле трещин малой и средней высоты.

Влияние человеческого фактора на выявляемость при УЗК

Неидеальность кривых выявляемости связана с несовершенством методик контроля, аппаратуры контроля, а также с влиянием человеческого фактора, который сказывается на процессе регистрации и оценке данных персоналом: невнимательность, утомляемость из-за продолжительности работы, разница в квалификации и опыте и т.д. Человеческий фактор по-разному сказывается на кривых выявляемости на рис. 4.

Этот результат можно было ожидать из-за различий в методиках контроля и аппаратуре, состоящих в том, что:

- методика контроля № 1 – ручная, а методика № 3 – автоматизированная;
- в методике № 1 используется меньше информации о дефекте, чем в методике № 3, как при приеме данных контроля, так и при их анализе.

С одной стороны, вполне ожидаема лучшая выявляемость дефектов при автоматизированном контроле по сравнению с выявляемостью дефектов при ручном контроле [23, 24]. С другой стороны, дополнительный анализ результатов оценки данных дает возможность проанализировать существенность влияния человеческого фактора на кривые выявляемости, построенными для отдельных контролеров. На рис. 5 приведены результаты вычисления кривых PoD по данным контроля по методике № 3, полученные контролерами A₁, A₂, A₃ на одном и том же массиве реальных объектов контроля. Результаты демонстрируют хорошее согласие выявляемости дефектов.

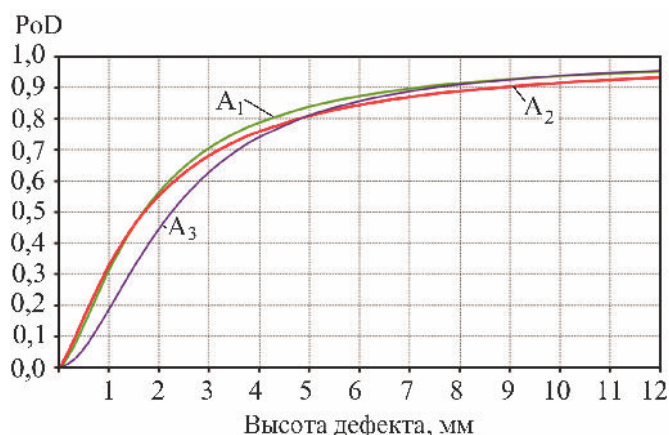


Рис. 5. Кривые вероятности выявления трещин при контроле по методике № 3, полученные контролерами A₁, A₂, A₃

Анализ рис. 6 показывает, что кривые выявляемости, полученные по методике № 1, хуже согласуются друг с другом по сравнению с результатами контроля по методике № 3 (см. рис. 5). В области дефектов малой высоты наблюдается синхронный пропуск дефектов всеми специалистами, что, вероятно, указывает на существенное влияние высокого уровня структурного шума. Вместе с тем в области высот дефектов 5 – 7 мм наблюдаются значительные различия в выявлении дефекта для различных контролеров. В области больших высот дефектов результаты анализа данных контроля для специалистов P₁, P₂, P₃ согласуются в пределах 76 %. И это позволяет считать, что они имеют близкую квалификацию, опыт и в одинаковой мере подвержены воздействию стандартных ошибок.

Нам представляется, что сильное различие в поведении кривых PoD для полученных по методикам № 3 и 1 в области средних высот дефектов можно объяснить более правильной интерпретацией данных контроля по сфокусированным акустическим изображениям по сравнению с интерпретацией данных по амплитуде детектированных эхосигналов.

Аналогичные расчеты были выполнены при использовании данных, полученных при контроле по методике № 1. На рис. 6 представлены результаты вычисления кривых PoD для различных контролеров P₁, P₂, P₃.

Причина в том, что анализ данных и принятие решения о наличии и параметрах выявленного дефекта в УЗ-дефектоскопии и УЗ-дефектометрии существенно различаются. Так как в УЗ-дефектоскопии основными информационными параметрами являются амплитуда сигнала и глубина его залегания, то решение об обнаружении дефекта принимается по его амплитуде сигнала [25].

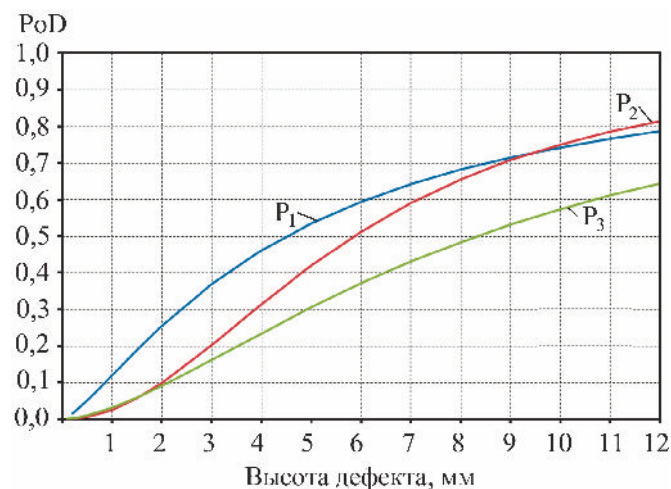


Рис. 6. Кривые вероятности выявления дефектов типа трещин при контроле по методике № 1, полученные контролерами P₁, P₂, P₃

В УЗ-дефектометрии информационным параметром выступают характеристики полученного фокусированного акустического изображения [2, 26]. При анализе акустического изображения сначала устанавливаются элементы изображения, принадлежащие дефекту. Затем определяются высота и другие параметры дефектов путем измерения расстояний между соответствующими его элементами и, в частности, от концов трещины, амплитуда изображений которых может быть мала из-за дифракции ультразвука на них [6].

Необходимо отметить, что отношение сигнал/шум при анализе фокусированных изображений более высокое. В частности, для аустенитных СС диаметром 325×15 мм отношение сигнал/шум в изображении повышается на 8 – 10 дБ [27]. Добавим, что особые проблемы при традиционном контроле связаны со сложностью различения сигналов от дефектов и от корня СС из-за низкого продольного разрешения. Продольное разрешение изображений, по которым оценивались результаты контроля в УЗ-дефектометрии, составляет величину около 2 мм, что позволяет достаточно просто отделить трехмерные изображения корня СС и структурных шумов от вершины трещины. Вместе с тем окончательная оценка результатов контроля с использованием УЗ-дефектометрии также оценивается операторами и также подвержена влиянию человеческого фактора. Поэтому для того чтобы обеспечить более высокий уровень надежности контроля, желательно иметь и автоматическую оценку данных. Алгоритмы, реализующие эту возможность, уже созданы и находятся в стадии отработки и испытаний [28, 29].

Анализ достоверности контроля (ROC-кривая)

Как уже упоминалось, для оценки достоверности данных, полученных при контроле объекта с применением методов и средств УЗК, необходимо учитывать не только вероятность обнаруженных при контроле дефектов, но и вероятность их пропуска и фиксации ложных дефектов. Ниже рассмотрим особенности применения ROC-анализа для приборов УЗ-дефектометрии и УЗ-дефектоскопии. Для этого используем ту же базу данных УЗК, которая использовалась при получении и анализе PoD-кривых.

ROC-анализ

При выполнении ROC-анализа рассматриваются ROC-диаграммы и ROC-кривые. Для этого все полученные данные НК представляются в виде матрицы данных [30] (табл. 2).

По данным табл. 2 определяют характеристики PoD и PoD_{лож}.

2. Матрица данных НК

| Истинное положение при НК | Результаты НК | |
|------------------------------|---------------|-------------|
| | найден дефект | дефекта нет |
| Массив данных «ДЕФЕКТЫ» | ДП | ПрД |
| Массив данных «НЕТ ДЕФЕКТОВ» | ЛД | ДН |

ДП – количество правильных решений «Дефект»;

ДН – количество правильных решений «Дефекта нет»;

ЛД – количество неправильных решений «Дефект» там, где его нет (обнаружение ложных дефектов);

ПрД – количество неправильных решений «Дефекта нет» там, где он есть (пропуск дефекта).

Вероятность выявления дефектов

$$PoD = \frac{ДП}{ДП + ПрД} = n/N, \quad (2)$$

где n – число выявленных дефектов; N – общее число дефектов, участвующих в НК.

Вероятность обнаружения ложных дефектов

$$PoD_{лож} = \frac{ЛД}{ДН + ЛД} = v/M, \quad (3)$$

где v – число ложных дефектов; M – общее число бездефектных мест.

ROC-диаграммы

Результат серии испытаний по выявлению дефектов в объектах с использованием какого-либо метода НК отображается одной точкой на диаграмме в координатах (PoD – по оси ординат, PoD_{лож} – по оси абсцисс) (рис. 7).

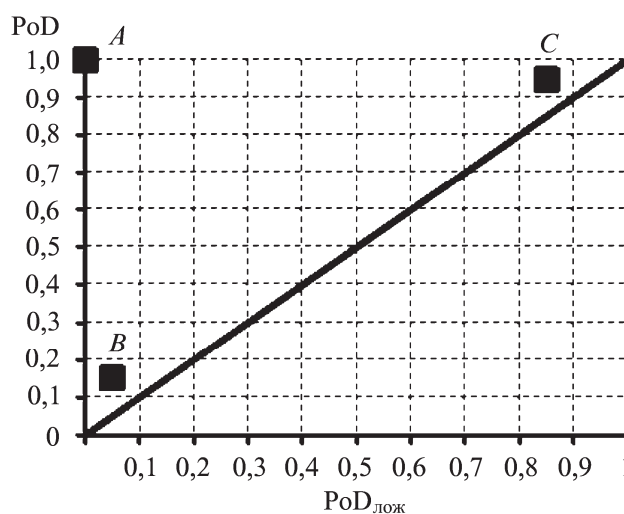


Рис. 7. Представление результатов контроля на ROC-диаграмме

Точка *A* на диаграмме, расположенная в точке с координатами (0, 1), соответствует идеальной методике и прибору контроля, так как определяет результат контроля без пропусков и ложного определения дефектов. Данные контроля, находящиеся в левом верхнем углу диаграммы, указывают на то, что методика контроля позволяет решать задачу выявления дефектов, и чем ближе к ней расположена точка, соответствующая PoD и $PoD_{лож}$, тем эффективнее выполняет свою задачу методика НК. Точка *B*, расположенная в левом нижнем углу, показывает, что методика контроля консервативна, поскольку при малом числе ложных дефектов вероятность их обнаружения тоже низкая. Верность обнаружения дефекта высока, но то, что в контролируемой области ряд дефектов отсутствует, может быть ошибочным из-за низкой вероятности их обнаружения. Точка *C*, находящаяся в правом верхнем углу, показывает, что использованная методика достаточно либеральна, так как при большой вероятности выявления дефектов также высока вероятность появления ложных дефектов. Решение о наличии дефектов при НК, скорее всего, правильно, но возможна значительная перебраковка.

Данные НК, расположенные на диагонали ROC-диаграммы, указывают, что рассматриваемая методика НК не выполняет своей основной задачи – выявления дефекта, потому что вероятности наличия дефекта и его отсутствия равны. По существу, на ROC-диаграммах отображается связь между выявленными и ложно обнаруженными дефектами. Учитывая, что на практике длины дефектов могут существенно различаться, при анализе данных целесообразно рассматривать дефекты как совокупность зон определенной длины (дефектных зон), а области, не содержащие дефекты, – как совокупность бездефектных зон.

Следует отметить, что полученные таким образом характеристики будут точечными оценками качественных характеристик и, в силу некоторой стохастичности анализируемых данных, определены с погрешностью. В частности, для вычисления 95%-ного доверительного интервала для вероятностей выявления истинных и ложных дефектных зон $P_{0,95}$, $P_{-0,95}$ для верхней и нижней границ, соответственно, используются формулы [31]:

$$P_{0,95} = (n' + 0,5g^2) + \frac{g\sqrt{n'(1-h') + 0,25g^2}}{N' + g^2}; \quad (4)$$

$$P_{-0,95} = (n' + 0,5g^2) - \frac{g\sqrt{n'(1-h') + 0,25g^2}}{N' + g^2}, \quad (5)$$

где $g = 1,96$ – для 95%-ного доверительного интервала; n' – число выявленных дефектных зон или ложно обнаруженных дефектных зон; N' – общее число дефектных или бездефектных зон; $h' = n'/N'$ –

вероятность выявления истинных дефектных или ложных дефектных зон. Эта формула верна при $n' \geq 4$ и $N' - n' \geq 4$.

ROC-кривые

Основой ROC-анализа является построение ROC-кривой, которая часто используется для представления результатов бинарной классификации («есть дефект» или «нет дефекта»). ROC-кривая показывает зависимость количества верно классифицированных дефектных зон от количества ложных дефектных зон в зависимости от параметра, определяющего то или иное решение о выявлении дефекта.

Возможность обнаружения ложных дефектных зон существенно зависит от электронных и акустических шумов в объектах контроля из-за влияния структуры материала, распространения различных типов акустических волн, сигналов от геометрических отражателей и т.д. В связи с этим обычно рассматриваются данные, представляющие собой два массива данных: дефекты (занимающие дефектные зоны) и шум (занимающий бездефектные зоны). Оба этих массива имеют нормальное распределение амплитуд сигнала и шума. У части бездефектных зон, содержащих шум, по результатам НК определяют наличие дефектов (ложные дефекты); другая часть дефектных зон при контроле не была обнаружена (пропуск дефектов).

Изменение значения информационного параметра контроля, по величине которого принимается решение об обнаружении дефекта, влияет на величину соответствующих областей. Например, для амплитуды УЗ-сигнала

$$A_{пор} \begin{cases} \leq A - \text{есть дефект;} \\ > A - \text{нет дефекта.} \end{cases} \quad (6)$$

Изменяя значения $A_{пор}$, получаем ROC-кривую, у которой по оси абсцисс откладываются значения $PoD_{лож}$, а по оси ординат – PoD (рис. 8).

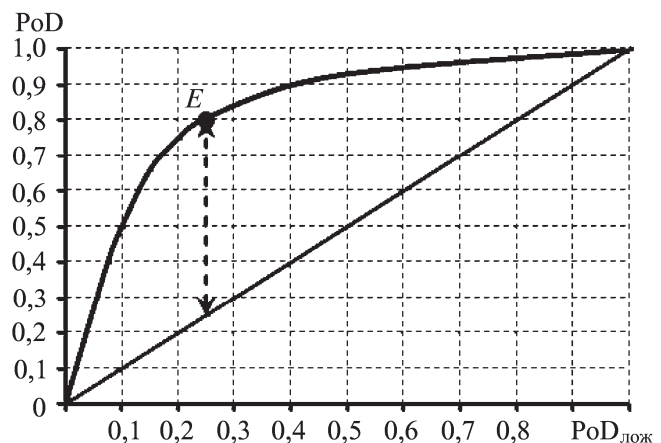


Рис. 8. ROC-кривая:

E – рабочая точка, определенная по значению индекса Юдена *J*

Каждый возможный выбор значений порога $A_{\text{пор}}$ соответствует точке в ROC-пространстве. Для максимального порога $A_{\text{пор}}^{\text{max}}$ получим $\text{PoD}_{\text{лож}} = 0$, $\text{PoD} = 0$; для минимального порога $A_{\text{пор}}^{\text{min}}$ – $\text{PoD}_{\text{лож}} = 1$ и $\text{PoD} = 1$.

Расположение оптимальной рабочей точки на ROC-кривой зависит от выбранного критерия оптимальности, т.е. от требований, предъявляемых к методике классификации данных: «дефект», «нет дефекта». В частности, часто оптимальной считается точка на ROC-кривой, которая имеет максимальное значение выявляемости дефектных зон PoD при минимальном значении ложных выявленных дефектных зон $\text{PoD}_{\text{лож}}$. При этом индекс Юдена J имеет максимум и соответствует максимальному отлнчию ординат от диагонали (см. рис. 8)

$$J = \text{PoD} - \text{PoD}_{\text{лож}} \quad (7)$$

Необходимо обратить внимание на то, что ROC-кривые нечувствительны к соотношению числа элементов массивов «дефекты», «нет дефектов» [30], т.е. при изменении соотношения размеров массивов данных ROC-кривые не изменятся. Это связано с тем, что для осей абсцисс и ординат ROC-кривой используются разные массивы матрицы данных (строки в табл. 1). Такое свойство ROC-кривых особенно важно при анализе результатов НК объектов с реальными дефектами, для которых в подавляющем числе случаев число дефектных зон много меньше, чем бездефектных.

Анализ результатов контроля методами УЗ-дефектоскопии и УЗ-дефектометрии

Рассмотрим особенности применения ROC-анализа для приборов УЗ-дефектометрии и УЗ-дефектоскопии. Для этого использовали базу данных УЗК, примененную при анализе выявляемости контроля.

Для выполнения ROC-анализа данные были предварительно подготовлены в соответствии с методологией, изложенной в работе [32].

1. Все СС были разделены на зоны длиной 21 мм, которые могут содержать дефект (дефектная зона) или не содержать дефекта (бездефектная зона)¹. Всего в одном СС содержится 49 зон.

2. Для каждого СС были установлены число дефектных и бездефектных зон и их границы.

3. Для каждой методики контроля и каждого контролера было определено число дефектных, бездефектных и ложно-дефектных зон.

Одним из несомненных достоинств ROC-анализа является возможность наглядного представления эффективности различных методов НК. Ниже представлены результаты УЗК, выполненного с применением методик контроля и приборов УЗ-дефектоскопии и дефектометрии (см. табл. 1) [33].

ROC-диаграммы

Результаты контроля для методик, приведенных в табл. 1, представлены в виде ROC-диаграммы на рис. 9. Видно, что методики № 2 и 3, у которых решение о существовании дефекта принимается на основе анализа фокусированных акустических изображений, более эффективны, чем методика № 1.

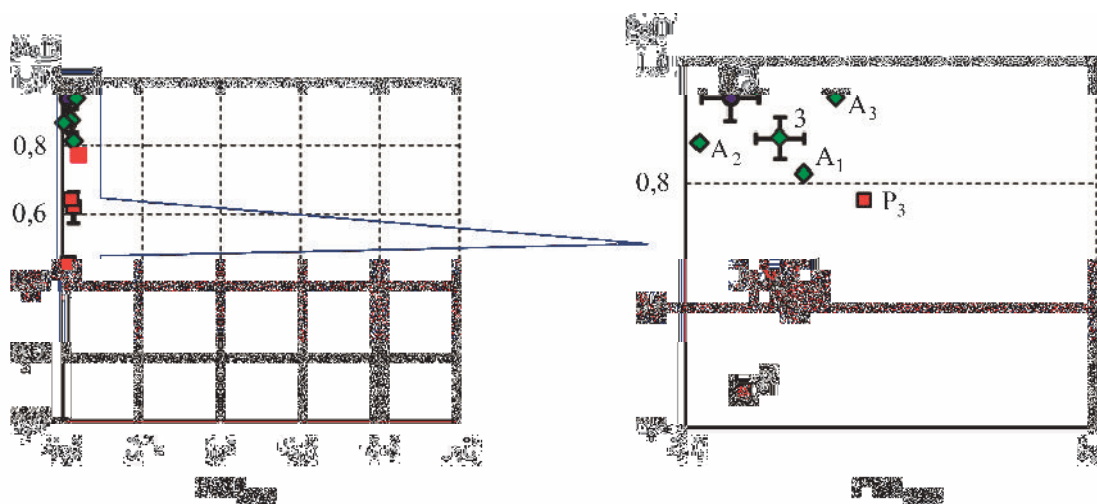


Рис. 9. ROC-диаграмма, полученная по данным методик контроля № 1 (красная заливка), 2 (черная заливка), 3 (зеленая заливка):

для каждой методики приведены результаты УЗК, полученные всеми операторами с учетом погрешностей в 95%-ном доверительном интервале. Точки P_1 , P_2 , P_3 и A_1 , A_2 , A_3 получены отдельными операторами по результатам УЗК по методикам № 1 и 3 соответственно; точка 2 получена оператором по методике № 2

¹ Длина зоны была выбрана из соображений минимальной длины зарегистрированных дефектов.

Для всех этих методик приведены результаты расчетов погрешностей в 95 %-ном доверительном интервале по формулам (4) и (5). Если считать, что рабочая область эффективного контроля определяется как $PoD \geq 0,8$ и $PoD_{лож} \leq 0,2$ [34], то можно заключить, что в рабочую область попадают только две методики – № 2 и 3. Здесь же приведены результаты расчетов для различных операторов по методикам № 1 и 3. Данные измерений, полученные операторами P_1, P_2, P_3 в соответствии с методикой № 1, существенно отличаются как по вероятности выявления дефектов, так и по уровню перебраковки (J изменяется от 0,45 до 0,73). Для НК, выполненной по методике № 3 операторами A_1, A_2, A_3 , результаты измерений имеют значительно меньший разброс значений PoD и $PoD_{лож}$ (значения J изменяются от 0,79 до 0,90).

Обращает на себя внимание то, что выбор чувствительности приборов в методике № 1 и значения уровня фиксации $A_{пор}$ не являются оптимальными, так как значение вероятности выявления дефектов равно 0,63 при очень низкой (менее 0,03) вероятности обнаружения ложных дефектов $PoD_{лож}$. Вместе с тем наилучшее значение PoD , полученное оператором P_3 , равно 0,79, показывает, что при большей чувствительности или менее жестком выборе уровня фиксации методика № 1 легко попала бы в рабочую зону.

Необходимо подчеркнуть, что анализировались данные, полученные с применением действующих в атомной энергетике методик контроля. Поэтому степень появления ложных дефектов мала из-за высоких требований к достоверности контроля.

Использование ROC-анализа для оптимизации методики контроля

Определение ROC-кривых по фокусированным изображениям (УЗ-дефектометрия)

Дополнительную информацию об эффективности методики контроля можно получить, анализируя ROC-кривые, принадлежащие соответствующим методикам. Поскольку методики № 2 и 3 (см. табл. 1) представляют собой методики и приборы УЗ-дефектометрии, вместе с обнаружением дефекта они позволяют определить его геометрические размеры [35], в частности высоту дефекта. Поэтому можно построить ROC-кривую в зависимости от высоты выявленного дефекта. Фактически классификация дефектов по высоте возможна, когда удается выявить в акустическом изображении элементы, относящиеся к верхнему и нижнему краям дефекта. При этом надо иметь в виду, что сигнал от верхнего края дефекта часто является

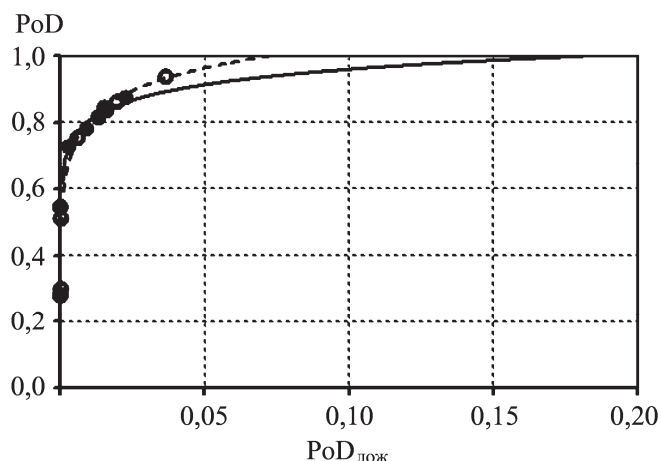


Рис. 10. ROC-кривые, полученные по данным УЗК методикой № 3 (SAFT-дефектоскоп «АВГУР 5.2»):

сплошная кривая – общая для всех операторов; пунктирная кривая получена оператором A_3 ; экспериментальные точки приведены для пороговых значений высоты дефектов: менее 2 мм, больше или равно 2; 4; 6; 8 и 10 мм. Сплошная и пунктирная кривые получены МНК

результатом дифракции, имеет незначительную амплитуду, сопоставимую с уровнем шума, и определение высоты дефекта может существенно зависеть от уровня шума в СС.

На рис. 10 приведены ROC-кривые измерений высоты дефектов с применением SAFT-дефектоскопа «АВГУР 5.2». Сплошная кривая – общая для всех операторов, пунктирная – построена по данным оператора A_3 . Обе кривые получены методом наименьших квадратов (МНК). Индекс J , характеризующий рабочую точку методики для всего массива данных, полученного «АВГУР», равен 0,85. Максимальное значение индекса J , полученное по данным оператора A_3 , равно 0,9 (см. рис. 10). Видно, что есть возможность еще улучшить эффективность используемой методики УЗ-дефектометрии за счет дополнительного повышения отношения сигнал/шум [36], в частности путем применения дополнительной обработки УЗ-сигналов и изображений, а также повышения чувствительности аппаратуры. Заметим, однако, что приведенная ROC-кривая не позволяет уточнить, какова вероятность выявления дефектов определенной высоты для данной методики контроля. Для этого целесообразно дополнить данные графиком вероятности выявления дефектов в зависимости от значений их высоты.

На рис. 11 представлена зависимость вероятности обнаружения дефектов PoD^i от их высоты h_i , построенная по данным, полученным всеми операторами. Здесь $PoD^i = \frac{n_i}{N_i}$; n_i, N_i – число выявленных дефектов и общее число дефектов высотой h_i

соответственно. Здесь же приведены значения вероятности обнаружения ложных дефектов

$$PoD_{лож}^i = \frac{v_i}{M_i}; v_i M_i - \text{число ложно определенных}$$

дефектных зон и число правильно определенных бездефектных зон соответственно при уровнях отсечки данных h_i . Анализ рис. 11 показывает, что все дефекты высотой выше 8 мм обнаруживаются безошибочно. Для дефектов высотой более 6 мм вероятность обнаружения дефектов превышает 0,95, но незначительно (до 0,01) возрастает вероятность ошибки за счет ложно обнаруженных дефектов; при дальнейшем увеличении чувствительности контроля такая вероятность ошибки возрастает также незначительно – до 0,02. Анализ данных отдельных операторов дает возможность оценить их квалификацию при оценке результатов контроля. При этом высокая кучность результатов контроля, выполненного по методике № 3 (см. рис. 9), демонстрирует практически одинаковую квалификацию операторов.

Определение ROC-кривых по амплитуде сигнала (УЗ-дефектоскопия)

Для анализа данных, полученных с применением УЗ-дефектоскопа, для которых информационным параметром является амплитуда сигнала, наиболее естественно построение ROC-кривой путем изменения уровня пороговой амплитуды сигнала от дефектов. На рис. 12 представлены ROC-кривые, полученные МНК для методики № 1. Кривые построены по данным контроля, полученным при изменении пороговой амплитуды сигнала от уровня фиксации A_{ϕ} до значений $A_{\phi} + 8$ дБ с шагом 1 дБ. По существу, в этом случае мы ступенчато уменьшаем чувствительность методики контроля от значений уровня фиксации максимум на 8 дБ. Рабочая точка для всего массива данных, полученных при таком контроле, характеризуется индексом $J = 0,6$. При анализе данных контроля различными операторами получено максимальное значение индекса $J = 0,73$ (оператор Р₃). Из рис. 12 видно, что рабочая точка для методики контроля далеко не оптимальна – максимальное значение показателя перебраковки $PoD_{лож}$ не превышает значения 0,03. Даже незначительное уменьшение порогового уровня A_{ϕ} , приводящее к увеличению вероятности появления ложных дефектов (до 0,1), может повлечь существенное увеличение вероятности обнаружения дефектов – до 0,86.

Построение графика, аналогичного приведенному на рис. 11, не представляется возможным, так как не существует однозначной связи между высотой дефекта и амплитудой сигнала от него.



Рис. 11. Зависимость вероятности обнаружения и вероятности ложного обнаружения дефектов от значений высоты пороговой отсечки при анализе данных «дефект», «нет дефекта» для методики № 3. Погрешности определяют 95%-ный односторонний доверительный интервал

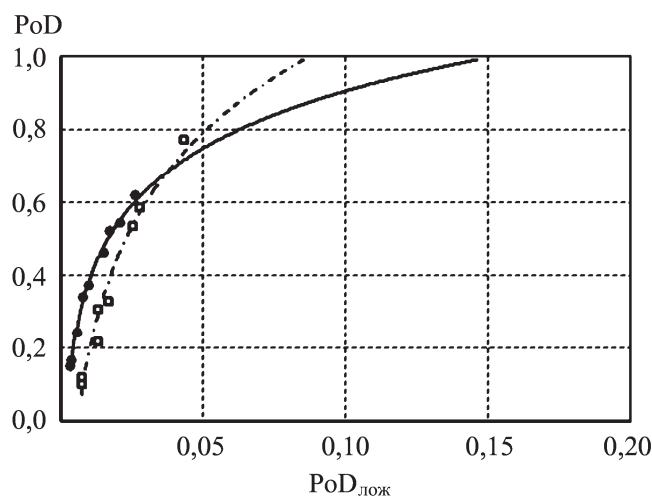


Рис. 12. ROC-кривые, полученные по данным УЗК методикой № 1 с использованием эходефектоскопа: сплошная кривая – общая для всех операторов; пунктирная линия – получена оператором Р₃. Экспериментальные точки приведены для значений отсечки амплитуды сигналов: A_{ϕ} , $A_{\phi} + \eta$ дБ, где $\eta = 1, 2, \dots, 8$. Кривые получены МНК

На рис. 13 представлены результаты УЗК, полученные по методике № 1, которые демонстрируют зависимость числа выявленных дефектов от их размеров при различном уровне отсечки. Заметим, что при самом малочувствительном (уровень отсечки $A_{\phi} + 10$ дБ) режиме регистрации данных обнаружены дефекты высотой от 2 до 3 и от 6 до 7 мм; при отсечке $A_{\phi} + 4$ дБ обнаруживаются около 85 % номенклатуры дефектов высотой от 2 до 13 мм. Все это подтверждает тезис о слабой корреляции высоты дефектов от амплитуды сигнала.

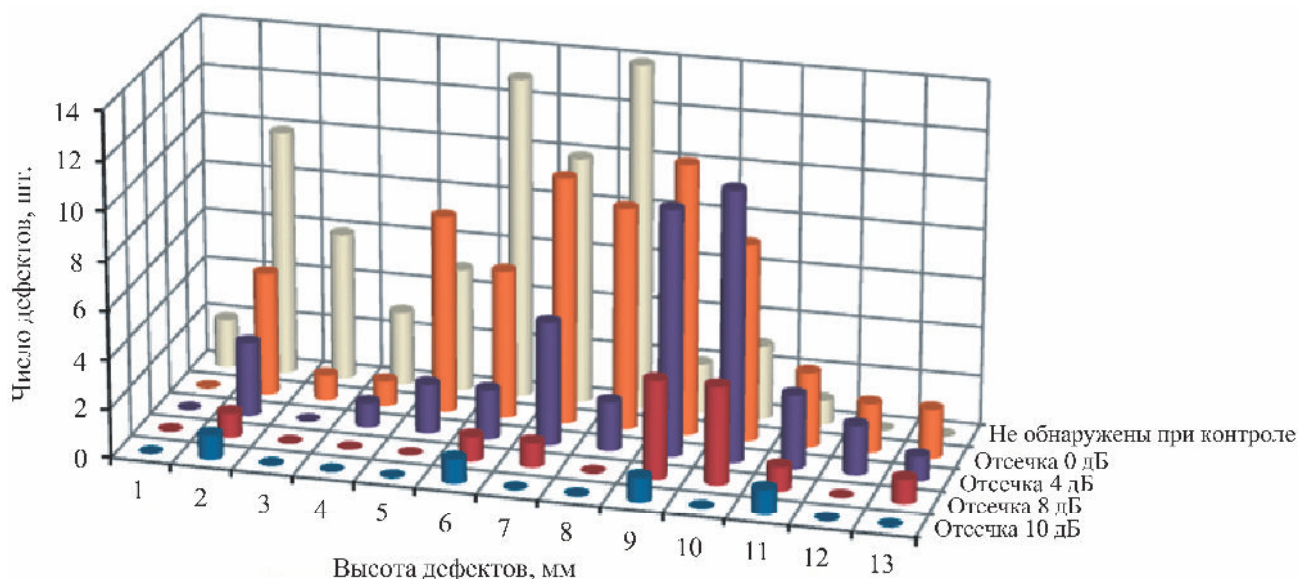


Рис. 13. Дефекты, обнаруженные при различных уровнях отсечки по методике № 1

Выводы

1. Получены кривые выявляемости (PoD-кривые) и выполнен ROC-анализ для реальных трещин различной высоты в аустенитных СС при использовании автоматизированного контроля с когерентной обработкой данных (УЗ-дефектометрия) и при использовании ручного традиционного контроля (УЗ-дефектоскопия).

2. Продемонстрирована существенность влияния структуры объекта контроля на кривые выявляемости дефектов.

- Анализ кривой PoD, построенной по данным контроля со стороны СС, показал вероятность обнаружения дефектов выше 0,7 для трещин высотой более 3 мм.

- Вероятность обнаружения дефектов при контроле через СС для дефектов высотой до 3 мм составляет величину менее 0,3, вместе с тем дефекты большей высоты успешно обнаруживаются.

Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе результатов одностороннего контроля СС.

3. Сопоставление результатов контроля демонстрирует преимущество использования УЗ-дефектометрии при обнаружении дефектов. Значительная часть этого преимущества обусловлена тем, что оценка контроля выполняется по данным, представленным в виде трехмерных фокусированных изображений с высоким продольным и поперечным разрешением.

4. Анализ кривых выявляемости и ROC-анализ данных, полученных для отдельных контролеров, дает возможность быстро и в наглядной форме проанализировать эффективность различных методов и средств контроля, оценить достоверность контроля,

оптимизировать методику контроля и оценить работу персонала.

5. ROC-кривые, построенные при изменении параметра, жестко не связанного с параметрами дефектов, определяющими их опасность для объекта контроля, являются ограниченно полезными. В частности, для плоскостных дефектов одним из наиболее важных, определяющих опасность для целостности объекта контроля, параметров является высота. ROC-кривые, построенные по данным УЗ-дефектометрии, дают возможность проанализировать изменения вероятности появления ложных дефектов с изменением вероятности обнаружения дефектов большей высоты. Вместе с тем оценить достоверность контроля в зависимости от высоты дефекта не удастся, так как основной изменяемый параметр, определяющий классификацию данных – пороговый уровень отсечки – не зависит однозначно от высоты дефекта.

6. ROC-анализ результатов УЗК, полученных методами и средствами УЗ-дефектометрии, показал, что дефекты высотой более 8 мм обнаруживаются с вероятностью более 95 % при отсутствии ложных дефектов. С уменьшением высоты дефектов от 6 до 2 мм вероятность их обнаружения незначительно падает при одновременном незначительном росте вероятности ложных обнаружений дефектов (от 0,013 до 0,023).

7. ROC-анализ результатов УЗК, полученных с применением аппаратуры и методик контроля УЗ-дефектоскопии, показал, что выбор рабочей точки для методики контроля неоптимален, и незначительное увеличение чувствительности аппаратуры или снижение амплитуды сигнала фиксации могло бы значительно улучшить выявляемость и достоверность контроля.

Библиографический список

1. **Иванов В. И., Коновалов Н. Н., Котельников В. С. и др.** Вопросы оценки риска аварии с использованием технического диагностирования // *Контроль. Диагностика*. 2015. № 3. С. 12 – 20.
2. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Вопилкин А. Х. и др.** Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / под. ред. А. Х. Вопилкина. М.: Машиностроение, 2008. 368 с.
3. **Самокрутов А. А., Соколов Н. Ю., Шевалдыкин В. Г.** Автоматизированный контроль сварных соединений с применением ультразвуковых антенных решеток // *Контроль. Диагностика*. 2014. № 3. С. 100 – 104.
4. **Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications / Olympus NDT**. 2007. URL: <http://www.olympus-ims.com/en/books/> (дата обращения: 14.06.2016)
5. **Бадалян В. Г., Базулин А. Е., Вопилкин А. Х., Тихонов Д. С.** Особенности разработки методик автоматизированного контроля в ультразвуковой дефектометрии // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 3. С. 26 – 37.
6. **Бадалян В. Г.** Оценка результатов контроля по акустическим изображениям // *Дефектоскопия*. 2007. № 4. С. 39 – 58.
7. **Бадалян В. Г.** Погрешность измерения дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных // *Дефектоскопия*. 2003. № 3. С. 12 – 23.
8. **Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х.** Мониторинг сварных соединений трубопроводов с использованием систем автоматизированного УЗК с когерентной обработкой данных // *В мире неразрушающего контроля*. 2004. № 4. С. 22 – 27.
9. **Бадалян В. Г.** Оценка достоверности результатов УЗК в аустенитных сварных соединениях (с применением когерентных систем) // *Контроль. Диагностика*. 2016. № 12. С. 4 – 9.
10. **Волченко В. Н.** Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. М.: Металлургия, 1979, 88 с.
11. **Nockemann C., Heidt H. and Thomsen N.** Reliability in NDT: ROC study of radio graphic weld inspections // *NDT&E International*. 1991. V. 24. No. 5. P. 235 – 245.
12. **Visser W.** POD/POS curves for non-destructive examination. HSE Offshore Technology Report 2000/18, 2002.
13. **Berens A. P.** Probability of detection (PoD) analysis for the advanced retirement for cause (RFC) /engine structural integrity program (ENSIP) nondestructive evaluation (NDE) system development volume 1 – PoD analysis. Final report 2000, p. 88. AFRL-ML-WP-TR-2001-4010.
14. **Georgiou G. A.** Probability of Detection (PoD) curves. Derivation, applications and limitations // *Research report*. 2006. No. 454. P. 27.
15. **Круглов Б. А.** Функции выявляемости трещин при эксплуатационном ультразвуковом контроле корпусов реакторов ВВЭР-1000 системой СК187 // *Вопросы материаловедения*. 2002. № 4. С.107 – 118.
16. **Jenson E., Iakovleva F. C.** Evaluation of POD Curves Based on Simulation Results // *7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components*, 2009.
17. **Spies M., Rieder H.** Enhancement of the POD of Flaws in the Bulk of Highly Attenuating Structural Materials by Using SAFT Processed Ultrasonic Inspection Data // *4th European-American Workshop on Reliability of NDE*, 2009.
18. **Алешин Н. П., Вадковский Н. Н., Волкова Н. Н.** Ультразвуковой контроль аустенитных сварных швов: анализ способов и рекомендации по повышению надежности // *Дефектоскопия*. 1988. № 2. С. 43 – 59.
19. **Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х.** Опыт применения ультразвуковой системы с когерентной обработкой данных «АВГУР» на российских АЭС // *Контроль. Диагностика*. 2000. № 9. С. 35 – 39.
20. **Алешин Н. П., Вадковский Н. Н., Волкова Н. Н.** Ультразвуковой контроль аустенитных сварных швов: анализ способов и рекомендации по повышению надежности // *Дефектоскопия*. 1988. № 2. С. 43 – 59.
21. **Ogilvy I. A.** Ultrasonic beam profiles and beam propagation in austenitic weld using a theoretical ray tracing model // *Ultrasonics*. 1986. No. 11. P. 337 – 347.
22. **Бадалян В. Г.** Анализ достоверности контроля в УЗ-дефектометрии // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 3. С. 4 – 13.
23. **Carvalho A. A., Rebello J. M. A., Silva R. R., Sagrilo L. V. S.** Reliability of the manual and automatic ultrasonic technique in the detection of pipe weld defects // *Insight*. 2006. V. 48. No. 11. P. 1 – 6.
24. **Lilley J.** The Integration of Plant Condition Assessment with Risk Management Programmes // *9th European Conference on Non Destructive Testing*, 2006.
25. **Щербинский В. Г.** Технология ультразвукового контроля сварных соединений. М.: Тиссо, 2003. 313 с.
26. **Jacques F., Moreau F., Ginzler E.** Ultrasonic backscatter sizing using phased array – developments in tip diffraction flaw sizing // *Insight. Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2003. V. 45. No. 11. P. 724 – 728.
27. **Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х., Гребенников В. В., Гребенников Д. В.** Сравнительный анализ способов повышения отношения сигнал/шум при ультразвуковом контроле аустенитных швов // *Контроль. Диагностика*. 2000. № 9. С. 29 – 35.
28. **Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х., Доленко С. А., Орлов Ю. В., Персианцев И. Г.** Алгоритмы обработки данных для автоматизации работы ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных // *Дефектоскопия*. 2004. № 12. С. 3 – 15.
29. **Базулин Е. Г.** Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // *Дефектоскопия*. 2014. № 3. С. 12 – 22.
30. **Fawcett T.** ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers. Kluwer Acad. Publ., 2004. 38 p.
31. **Ван дер Верден.** Математическая статистика. М.: ИЛ, 1960. 436 с.
32. **Fucsov F., Muller C., Scharmach M.** Measuring of the reliability of NDE // *The 8 Int. Conf. of the Slovenian Society for NDT «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering»*, Slovenia, 2005. P. 173 – 180.
33. **Методика** автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК с применением системы «АВГУР 5.2» / АО «Концерн Росэнергоатом». М., 2006.
34. **Иванов В. И., Коновалов Н. Н., Котельников В. С. и др.** Вопросы оценки риска аварии с использованием технического диагностирования // *Контроль. Диагностика*. 2015. № 3. С. 12 – 20.
35. **Бадалян В. Г.** Возможности ультразвуковой дефектометрии и риск-ориентированный подход в диагностике // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 1. С. 22 – 31.
36. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Кокколев С. А. и др.** Система автоматизированного контроля «АВГУР-АРТ» – от искусства новых возможностей к практической диагностике. // *Ультразвуковая дефектометрия*. 25 лет: юбилейный сборник трудов ООО НПЦ «ЭХО+» / под ред. А. Х. Вопилкина. М. – СПб.: СВЕН, 2015. С. 76 – 85.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И АТТЕСТАЦИИ МЕТОДИК УЗК



А. Е. Базулин,
гл. конструктор, канд. техн.
наук



Е. Г. Базулин,
зам. ген. директора
по науч. вопросам,
нач. системного отдела,
д-р техн. наук



Д. С. Тихонов,
зам. ген. директора,
канд. техн. наук

Применение численных методов моделирования процесса ультразвукового контроля нацелено на повышение эффективности разработки и испытаний методик, которые достигаются за счет расширения доказательной базы, снижения стоимости испытаний при уменьшении объема дорогостоящих экспериментальных исследований и возможности получения количественных оценок достоверности контроля. Использование математического моделирования позволяет учесть и проанализировать влияние на результаты контроля всего многообразия допустимых и возможных отклонений параметров контроля и параметров самого объекта контроля от номинальных значений, что невозможно достичь одними натурными испытаниями и даже длительной опытной эксплуатацией.

Математическое моделирование применяют для расширения возможностей аттестационных испытаний и для подтверждения возможностей аттестуемых методик ультразвукового контроля (УЗК). Особенно актуально применение моделирования для аттестации методик УЗК с возможностью дефектометрии, так как для этих методик требуется существенно больше подтверждающих материалов, хотя бы только из-за большего количества определяемых параметров несплошностей.

В этой статье излагается методика проведения комплексных аттестационных испытаний методик ультразвукового контроля с использованием

Приведена разработанная методика проведения комплексных аттестационных испытаний методик ультразвукового контроля с использованием средств математического моделирования. Определены основные задачи моделирования, для которых его применение наиболее эффективно, среди них задачи, связанные прежде всего с аттестацией методик контроля с дефектометрией: задача оценки погрешности измерения размеров и положения дефектов; задача оценки разрешающей способности, а также другие, в том числе задача определения достоверности контроля. Представлены методы получения кривых зависимости вероятности обнаружения от размеров дефектов по данным, полученным при моделировании. Приведены примеры моделирования при разработке и аттестации методик автоматизированного УЗК. Рассматривается идея сравнительных испытаний методик ультразвукового контроля одного объекта в целях их сопоставления и проверки соответствия общим для сравниваемых методик техническим требованиям.

средств математического моделирования. Определены основные задачи моделирования, для которых применение моделирования наиболее эффективно, среди них задачи, связанные, прежде всего, с аттестацией методик УЗК с дефектометрией: задача оценки погрешности измерения размеров и положения дефектов; задача оценки разрешающей способности, а также другие, в том числе самая сложная задача – вероятностной оценки достоверности ультразвукового контроля. Приведены основные методы получения кривых зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров на основе данных, полученных при моделировании.

Приведена методология сравнительных испытаний различных методик УЗК одного объекта контроля, нацеленная на получение количественной оценки преимущества одной методики перед другой. Приведен пример использования моделирования для оценки возможности выявления дефектов при наличии других отражателей.

Программные средства моделирования

Применяемая для моделирования математическая модель должна быть основана на физических принципах, адекватных области ее применения, таких как решение волнового уравнения в упругой среде. Возможно использование приближенных моделей, например приближения Кирхгофа или геометрической теории дифракции, методов конечных разностей, конечных элементов, граничных элементов и т.д. Область применения модели, использующей определенный алгоритм, должна соответствовать установленной области ее применения. Например, при использовании скалярной

модели распространения упругих волн необходимо учитывать ограничения учета преобразования различных типов волн, законов распространения акустических волн в анизотропной среде, выполнение определенных требований к форме дефектов (границы дефектов должны быть гладкими) и т.д. Ограничения применяемой модели должны быть установлены. Приведенные ниже примеры моделирования выполнялись в программе CIV4 [1].

Требования к моделированию параметров контроля

Для выполнения моделирования определяется набор существенных параметров контроля, влияние которых должно быть оценено в процессе моделирования. На выходные параметры методик УЗК влияют параметры контроля, которые делятся на две группы [2] – входные параметры и параметры системы УЗК. Выбранные для моделирования программные средства должны обеспечивать учет влияния и выполнение анализа результатов этого влияния на работоспособность методики контроля следующих параметров контроля из данных групп параметров.

Группу входных параметров составляют параметры, определяющие основные задачи УЗК, описывающие объект и область контроля, условия проведения контроля, а также параметры выявляемых несплошностей. К группе входных параметров относятся:

- акустические свойства объекта контроля (скорость звука, затухание УЗ-волн, структура металла в области контроля);
- геометрия и особенности конструкции объекта контроля (точное задание конструкции, условий доступа преобразователей, валики усиления сварных соединений, наличие наплавки из другого материала);
- параметры несплошностей (их тип и размеры) и их местоположение в заданной области контроля.

Группа параметров системы УЗК включает методические и аппаратные параметры системы контроля. К аппаратным параметрам относятся параметры аппаратуры, предназначенной для использования при применении данной методики контроля. Для моделирования используются методические параметры в соответствии с испытываемой методикой контроля. К группе параметров системы УЗК относятся:

- параметры аппаратуры;
- типы используемых акустических волн (продольные, сдвиговые, поверхностные, головные и т.д. или их комбинации);
- рабочая частота, длительность и форма излученного импульса;
- углы ввода УЗ-волн и другие параметры диаграммы направленности преобразователей;

- размеры и тип акустического преобразователя и т.п.;
- используемые при контроле акустические схемы.

Технические требования на выполнение моделирования

Для выполнения математического моделирования необходимо определить задачи, которые должны быть решены при моделировании, а также набор существенных параметров, влияющих на результаты контроля.

В первую очередь моделирование должно использоваться для подтверждения выполнения требований технического задания, которые недостаточно подтверждаются экспериментальными исследованиями и результатами, которые могут быть получены на испытательных образцах в процессе приемочных испытаний. При этом экспериментальные данные необходимо использовать при моделировании как начальные в целях их экстраполяции на более широкий круг возможных условий контроля. Таким образом, моделирование должно обеспечивать:

- преодоление ограничения количества испытательных образцов и дефектов путем получения данных, которые позволяют оценить способность методики УЗК;
 - пополнение и обобщение результатов практических испытаний;
 - подтверждение правильности выбора основных параметров методики УЗК.
- С учетом этого можно определить основные задачи моделирования:
- выявление дефектов в заданной области контроля;
 - моделирование наихудшей дефектной ситуации;
 - выявление предполагаемых дефектов, подтверждение выбранного уровня чувствительности, интерполяция поведения методики при пробеле между экспериментальными данными;
 - влияние анизотропии и неоднородности материала объекта контроля;
 - оценка достоверности контроля;
 - оценка работоспособности методики в заданной области изменения параметров контроля;
 - оценка погрешности измерения размеров и положения дефектов;
 - оценка разрешающей способности.

С учетом возможностей используемого программного средства могут быть установлены и другие задачи моделирования. Для установленных задач моделирования необходимо определить основ-

ные характеристики моделирования: расчетные параметры, требования к отчетным материалам и критерии оценки полученных результатов.

Необходимо указать набор существенных параметров методики УЗК, которые следует использовать при моделировании и определить диапазон их изменения.

Оценка достоверности УЗК с помощью моделирования

Оценка достоверности основана на анализе кривых зависимости вероятности обнаружения дефектов PoD от его размеров a [3 – 5]. PoD для дефекта фиксированного размера оценивается по ряду реализаций контроля дефекта размером a_i :

$$PoD(a_i) = n_d / n, \quad (1)$$

где n_d – число дефектов размера a_i , обнаруженных при контроле; n – общее число дефектов размером a_i в образце.

Решение об обнаружении или пропуске дефектов при расчете значений $PoD(a_i)$ принимается в соответствии с критериями, установленными в испытываемой методике. По набору значений $PoD(a_i)$ из нескольких интервалов значений величин a_i может быть построена кривая $PoD(a)$ в соответствии с рекомендациями, приведенными ниже. Для выбора значений величин a_i и количества интервалов для получения корректных оценок рекомендуется придерживаться следующих правил.

При построении кривой $PoD(a)$ необходимо, чтобы большинство измерений сигналов от дефектов соответствовало переходной области размеров дефектов, в которой существует определенная вероятность пропуска дефекта и в которой кривая $PoD(a)$ меняется быстрее всего. По рекомендациям работы [6] от 10 до 90 % данных должно располагаться в этой области. Это связано с тем, что очень маленькие или очень большие дефекты не дают существенного вклада в построение кривой PoD .

Чаще всего в качестве критерия достоверности методики контроля для дефектов заданных размеров устанавливается значение PoD равным 0,9 в 95%-ном доверительном интервале. Для проверки данного критерия в соответствии с рекомендациями работы [7] требуется получить результаты УЗК не менее чем от 29 дефектов заданного размера, расположенных в определенной части области контроля. Для построения кривой $PoD(a)$ минимально необходимо выбрать четыре – шесть интервалов значений размеров дефекта a , расположенных в одной из частей области контроля.

В зависимости от типа выходных данных (дискретных или непрерывных, см. ниже), по которым фиксируются дефекты, необходимое число дефектов, участвующих в построении кривых $PoD(a)$, различается.

Так, для *дискретных данных* для достижения 95%-ного доверительного интервала во всех интервалах значений размеров дефекта a требуется не менее 29 отдельных реализаций контроля дефектов в каждом интервале. При моделировании под отдельным контролем понимается расчет выходных параметров от одного дефекта при различных значениях выбранных входных параметров, влияющих на возможности выявления. Например, для случая, когда в качестве входного параметра выбрана ориентация плоскостного дефекта, выполняется N расчетов для одного дефекта при N различных ориентациях. Для различных интервалов значений размеров дефекта a могут быть также установлены и неодинаковые доверительные интервалы.

Для *непрерывных данных* диапазон размеров дефектов не столь важен, и требуется не менее 30 отдельных контролей во всем диапазоне размеров [4]. Доверительный интервал определяется при расчете кривой $PoD(a)$, для построения которой необходимо:

- создать модель объекта контроля и модель дефекта заданного типа, размеров, локализации в объекте контроля;

- для дефекта фиксированного размера a_i изменять в заданном диапазоне заданные влияющие параметры (например, угол наклона дефекта, угол ввода УЗ-пучка, шаг сканирования преобразователя, стабильность акустического контакта и т.д.);

- пользуясь установленными критериями браковки, определить по формуле (1) точечные значения для всего набора изменяемых влияющих параметров;

- изменить значение a и определить очередное значение $PoD(a_{i+1})$ аналогичным образом.

Повторить расчет величины PoD для всего установленного интервала значений размера a ;

- построить кривую $PoD(a)$ и построить нижний односторонний уровень доверительной вероятности для этой кривой.

Характеристики моделирования:

- **расчетные параметры:** параметры объекта контроля, набор влияющих параметров (области контроля, ориентация дефекта и т.д.), диапазон и шаг их изменения, тип дефекта, изменяемый размер a_i и интервалы его изменения;

- **отчетные материалы:** кривые $PoD(a)$ или значения PoD для выбранных размеров дефектов (например, минимально и максимально возможных);

- **критерии:** соответствие требованиям вероятности выявления дефектов данных размеров.

Методы получения кривых зависимости вероятности обнаружения дефектов от размеров дефектов

Для построения кривых вероятности обнаружения дефектов $PoD(a)$ можно использовать два типа выходных данных УЗК. Первый тип выходных данных – это бинарное решение по данным контроля о наличии или отсутствии дефекта в данной области – «есть/нет» (дискретная случайная величина). Обнаружение – это соответствие результатов контроля фактическому наличию дефекта. Второй тип выходных данных – это непрерывная случайная величина, например, амплитуда эхосигнала в заданной области контроля. Для этого типа данных обнаружением считается факт соответствия значения выбранной случайной величины установленному критерию. Для амплитуды эхосигнала это может быть факт превышения заданного уровня фиксации несплошностей. Для каждого из этих типов данных используются различные вероятностные модели для построения кривых $PoD(a)$.

Кривая PoD для дискретных данных типа «да/нет»

Как показывает многолетний опыт, наиболее подходящим аналитическим описанием кривой для такого типа данных является лог-логистическое распределение, записываемое следующим образом:

$$PoD(a) = \frac{e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - m}{\sigma} \right)}}{1 + e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - m}{\sigma} \right)}}, \quad (2)$$

где m и σ – среднее и стандартное отклонения. Из этого уравнения выводится линейная зависимость натурального логарифма коэффициента разногласия $odds = \frac{PoD(a)}{1 - PoD(a)}$ от натурального логарифма размера дефекта a :

$$\ln(odds) = \alpha + \beta \ln(a), \quad (3)$$

где $m = -\frac{\alpha}{\beta}$; $\sigma = \frac{\pi}{\beta\sqrt{3}}$.

Получив по результатам моделирования несколько значений вероятности $PoD(a_i)$, методом максимального правдоподобия определяются параметры α и β прямой (1), по которым восстанавливается кривая (3). На рис. 1 приведен пример построенной таким образом кривой зависимости вероятности выявления дефекта от его длины и данные «да/нет» из [5].

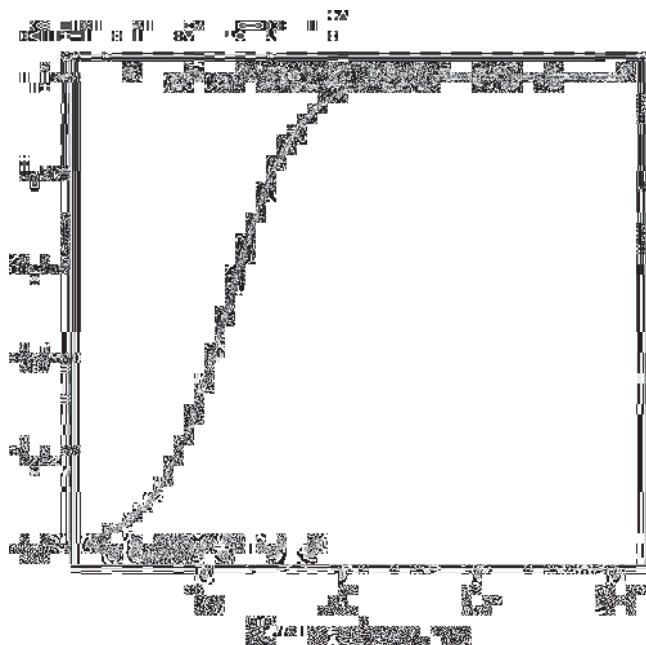


Рис. 1. Зависимость вероятности выявления дефекта от его длины и данные «да/нет»

Кривая PoD для непрерывных данных

Для непрерывных данных кривая $PoD(a)$ определяется как вероятность того, что $\ln(\tilde{a}) > \ln(\tilde{a}_{th})$, где \tilde{a}_{th} – уровень отсечки, установленный для фиксации дефекта размера a . Чаще всего в методиках УЗК уровень отсечки \tilde{a}_{th} устанавливается одинаковым для всех видов и размеров дефектов.

Исходя из обоснованного предположения о наличии линейной связи между натуральными логарифмами реального размера дефекта a и получаемым от него откликом \tilde{a} запишем

$$\ln(\tilde{a}) = \alpha_1 + \beta_1(\ln(a) + \gamma), \quad (4)$$

где γ – величина отклонений от прямой линии с параметрами α_1 и β_1 , имеющая примерно нормальное распределение с нулевым средним значением и стандартным отклонением σ .

Для описания кривой $PoD(a)$ для такого типа данных используется суммарное (кумулятивные) логнормальное распределение [8, 9]

$$PoD(a) = F\left[\frac{\ln(a) - \mu}{\sigma}\right], \quad (5)$$

где $\mu = \frac{\ln(\tilde{a}_{th} - \alpha_1)}{\beta_1}$ и $\sigma = \frac{\sigma_\gamma}{\beta_1}$ – среднее и стандартное отклонения соответственно, а $F[T] = \frac{1}{2\pi} \times$

$\int_{-\infty}^T e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ – стандартная нормальная функция.

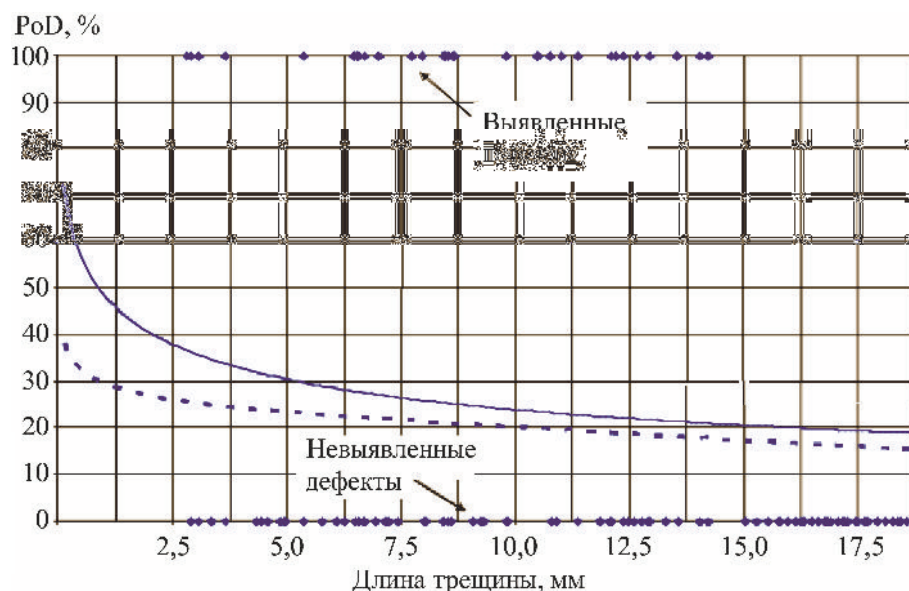


Рис. 2. Пример, когда модель данных «да/нет» неприменима для построения выбранной функции $PoD(a)$

Получив по результатам моделирования несколько значений вероятности $PoD(a_i)$, методом максимального правдоподобия определяются параметры α_1 и β_1 прямой (3), затем вычисляется случайная величина γ и стандартное отклонение σ_γ , после чего вычисляется кривая (5). Доверительный интервал для данной кривой определяется известными методами с использованием параметров μ и σ [5].

Границы применимости PoD -кривых

Использование приведенных аналитических зависимостей кривых $PoD(a_i)$ невозможно, когда полученные фактические значения данных не соответствуют предложенным типам функций (логлогистической или кумулятивной логнормальной). Необходимо выяснить причину этого расхождения. Примером несоответствия могут быть случаи, когда значения $PoD(a)$ уменьшаются с увеличением

размеров дефекта, что может означать соответствующую ограниченность методики. На рис. 2 показан пример такой кривой из работы [5].

Пример расчета PoD -кривых с применением моделирования

Один из примеров применения моделирования в программе CIV4 для построения PoD -кривых при контроле сварных соединений трубопроводов Ду300 приведен в работе [10]. В силу ограниченности набора экспериментальных данных по выявлению поперечно ориентированных дефектов по раздельной схеме были объединены экспериментально полученные данные и результаты моделирования, принимающие во внимание изменяющуюся высоту модели дефекта, угол наклона дефекта к поверхности трубы, азимутальный угол дефекта относительно оси сварного соединения. Схема контроля и сводная кривая выявляемости приведены на рис. 3.

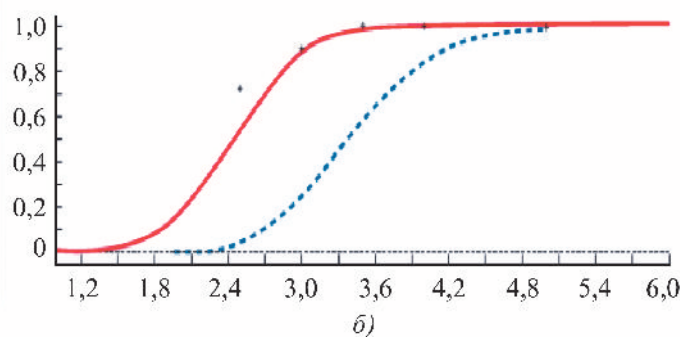
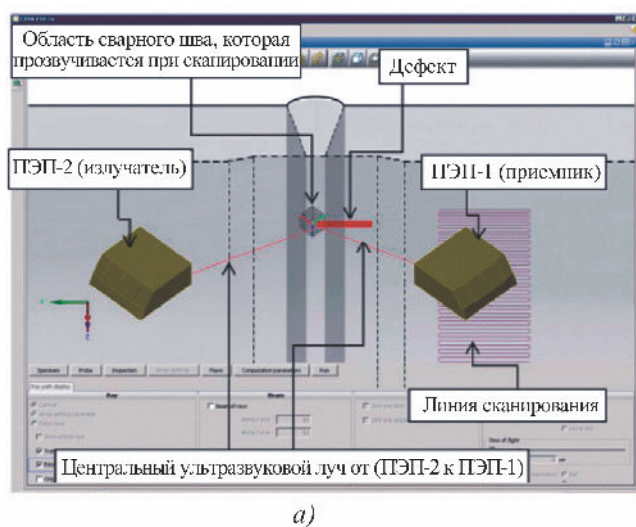


Рис. 3. Схема контроля на выявление поперечных дефектов (а) и рассчитанная кривая PoD (красным цветом) и 95%-ный уровень вероятности выявления дефектов (синим цветом) в зависимости от высоты дефекта (б)

Полученные результаты были использованы при аттестации методики ультразвукового контроля аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду300.

Применение моделирования при разработке методики АУЗК СС роторов для АЭС

Объект контроля и оригинальная методика его контроля приведены в работе [11]. Одной из целей выполнения моделирования УЗК этого объекта было подтверждение выявляемости дефектов по всей глубине сварного соединения и определение геометрических размеров изображения малых эталонных отражателей, чтобы выяснить потенциальные возможности установления размеров дефектов. Результатом моделирования являлся набор эхосигналов, который импортировался в базу данных системы АУЗК контроля «АВГУР-АРТ» и обрабатывался методом ЦФА-Х.

Были промоделированы антенные решетки с призмами, имеющими параметры, соответствующие тем, что применяются в методике – прореженная антенная решетка IM-5M16E1.8P, призма X-32x2-17-R-IPL82. Параметры образца: плотность 7,8 г/см³, скорость продольных волн 5900 м/с; скорость поперечных волн 3230 м/с, затухание не учитывалось. Параметры антенной решетки: 16 элементов шириной 5 мм или 12 мм в зависимости от типа, ширина элемента 0,8 мм, зазор между элементами 1 мм. Параметры призмы: стрела 63 мм, путь в призме 9,38 мм, угол 17°, материал – рексолит, скорость продольных волн 2360 м/с; скорость поперечных волн 1160 м/с.

В объем модельного образца было введено 147 плоскодонных отражателей диаметром 1,13 мм, расположенных на регулярной сетке на глубинах от 5 до 320 мм. Плоскодонные отверстия находились по центру области сканирования, оси

отверстий направлены на точку выхода луча при положении призмы в центре области сканирования. Двухкоординатное сканирование выполнялось с шагом 2 мм в продольном и поперечном направлении. В каждом из направлений было сделано 20 шагов, т.е. область сканирования составила 40×40 мм, положений антенной решетки на образце было 400. На изображениях были выявлены все отражатели диаметром 1,13 мм в диапазоне углов 0 – 55°. Максимальные размеры изображения выявляемого отражателя диаметром 1,13 мм по уровню –6 дБ составили (рис. 4):

- для антенных решеток с шириной элементов 5 мм: в диапазоне глубин 10 – 80 мм: ширина 3,6 мм, длина 6 мм, высота 2,4 мм; в диапазоне 80 – 250 мм: ширина 6,3 мм, длина 8 мм, высота 3,0 мм;
- для антенных решеток с шириной элементов 12 мм: в диапазоне глубин 10 – 80 мм: ширина 3,0 мм, длина 5 мм, высота 2,4 мм; в диапазоне 80 – 250 мм: ширина 5,4 мм, длина 6 мм, высота 3,0 мм.

Полученные данные дают качественную оценку минимального размера изображения дефекта по результатам АУЗК с применением технологии ЦФА при двухкоординатном сканировании и показывают размеры точечных отражателей в зависимости от их глубины и положения.

Моделирование при аттестации методики АУЗК СС труб Ду300 реакторов РБМК-1000

При разработке методики [11] использовались сведения о зафиксированных значениях отклонений конструкции сварных соединений (СС) от требований конструкторской документации. В табл. 1 содержатся значения отклонений и выводы о влиянии этих отклонений на результаты контроля.

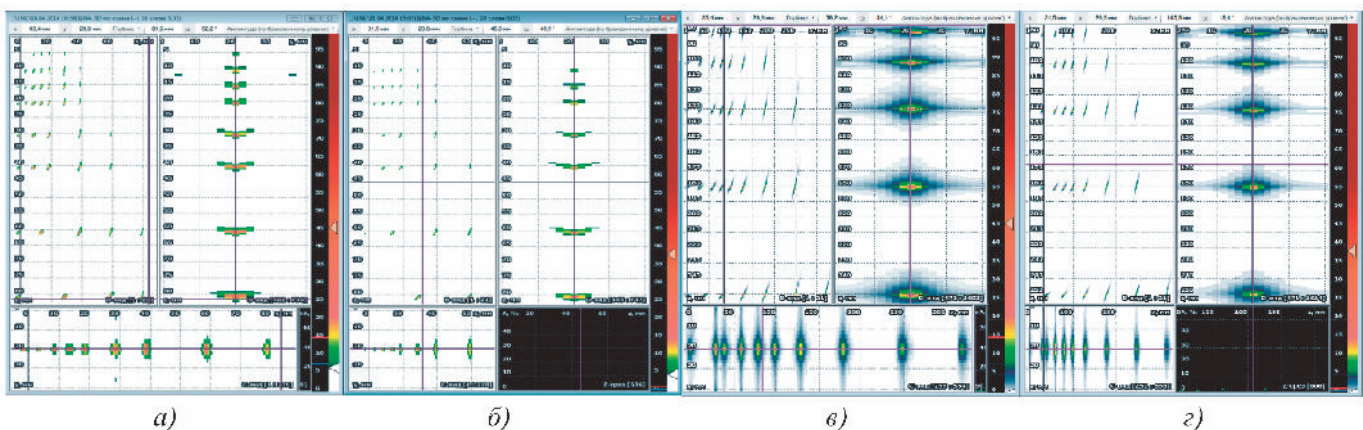


Рис. 4. Результаты выявления эталонных дефектов антенной решеткой шириной 5 мм (а, в) и 12 мм (б, г): а, б – глубины 0 – 80 мм; в, г – глубины 80 – 250 мм; слои на всех видах сложены, применена отсечка 5 % от максимальной амплитуды

1. Особенности конструкции объекта и их влияние на результаты контроля

| Элемент конструкции СС или вид несплошностей | Требования нормативной документации | Фактические максимальные зафиксированные значения | Выводы |
|--|-------------------------------------|---|---|
| Угол конусной проточки, ° | Не более 12 | До 50 | В сравнении с эталонным отражателем амплитуда проточки с углом около 50° может дать сопоставимое значение. Сварное соединение может быть забраковано по амплитудному признаку, но при анализе изображений можно установить причину возникновения отраженного сигнала и высоту конусной проточки |
| Смещение кромок, мм | Не более 1,0 | До 3,1 | В методике указаны признаки, позволяющие идентифицировать смещение кромок. В случае превышения отражающей способности смещения кромок браковочного уровня сварное соединение будет признано дефектным |
| Включения, мм | Не более 2,0 | 1,5 | В случае превышения амплитудного и размерного критериев сварное соединение будет признано дефектным |
| Поры, мм | | 0,7 | |
| Шлак, мм | | 2,25 | |
| Непровар корня сварного шва, мм | Не допускается | до 3,0 | |
| Несплавления, мм | | Длиной до 226, шириной до 2,0 | |
| Вогнутость корня сварного шва, мм | Не более 1,6 | До 3,0 | Если отражающая способность и размер вогнутости корня шва будут превышать критерии оценки качества (1,6 мм и более по высоте), то сварное соединение будет признано дефектным |
| Выпуклость корня сварного шва, мм | Не более 2,5 | До 4,0 | Если отражающая способность и размер выпуклости корня шва будут превышать критерии оценки качества, то сварное соединение будет признано дефектным |
| Ширина валика усиления сварного шва, мм | Не более 30 | До 40 | Методика допускает такую ширину валика усиления сварного шва |

Задача такова: оценить степень влияния отклонений формы объекта контроля от требований конструкторской документации (конусная проточка сварного шва, выпуклость и вогнутость корня) на результаты УЗК. Объект контроля: кольцевые сварные соединения Ду300 с толщиной стенки объекта контроля 15 мм, шириной валика усиления 20 мм, материал – аустенитная сталь (изотропная). Основные параметры методики контроля: в эхорежиме применяется антенная решетка с 16 элементами, эффективной частотой 5 МГц, расстоянием между центрами элементов (шаг решетки) 0,6 мм и призма, предназначенная для возбуждения сдвиговой волны под углом 60°. Закон фокусировки – верти-

кальный, фокусное расстояние 35 мм от передней грани призмы, диапазон углов ввода от 45 до 85°. При расчетах учитывались только сдвиговые волны и отражение от донной поверхности.

При выполнении моделирования выполнялось сравнение отражательной способности конструктивного отражателя и эталонного отражателя – прямоугольного паза длиной 10 мм и высотой 2 мм. Рассмотрим один из примеров. Вогнутость корня сварного шва в соответствии с требованиями задач может превышать номинальное значение 1,6 мм и достигать 3 мм. Было выполнено моделирование объекта контроля с вогнутостью корня шва 1,6 и 3 мм. Результаты моделирования приведены на рис. 5 и 6

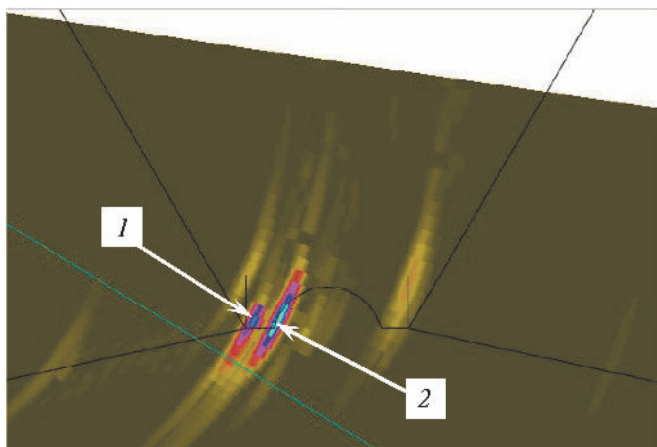


Рис. 5. Результаты расчетов для вогнутости корня шва 1,6 мм:
амплитуда в точке 1 – 42 дБ; амплитуда в точке 2 – 43 дБ

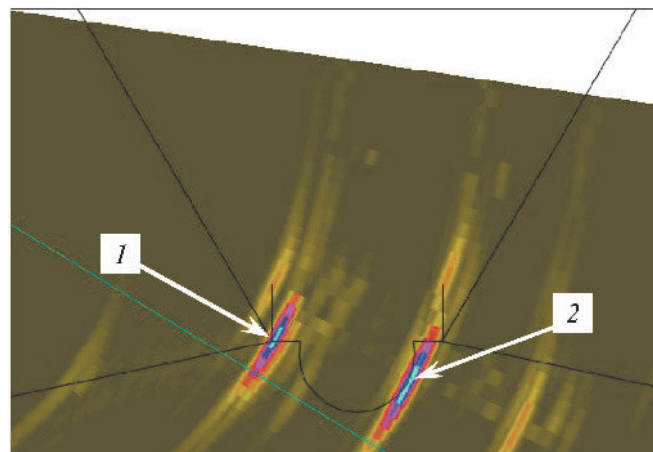


Рис. 7. Результаты расчетов для выпуклости корня 2,5 мм:
амплитуда в точке 1 – 40 дБ; амплитуда в точке 2 – 40 дБ

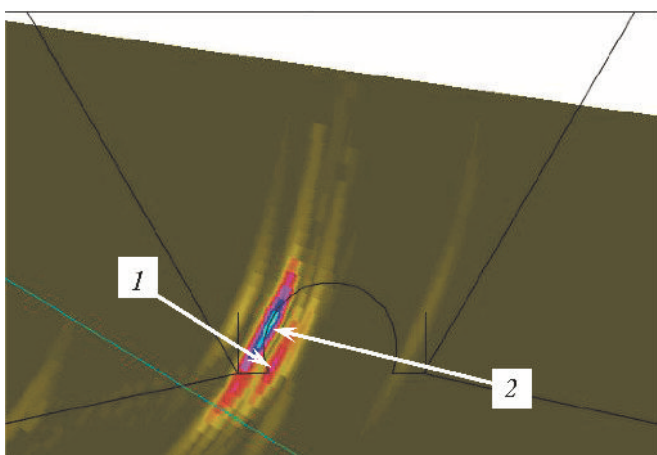


Рис. 6. Результаты расчетов для вогнутости корня шва 3,0 мм:
амплитуда в точке 1 – 40 дБ; амплитуда в точке 2 – 44 дБ

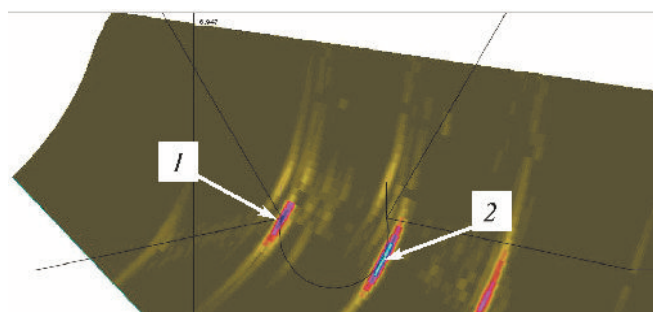


Рис. 8. Результаты расчетов для выпуклости корня 4 мм:
амплитуда в точке 1 – 39 дБ; амплитуда в точке 2 – 53 дБ

Выводы:

– вогнутость корня сварного шва 1,6 мм имеет отражающую способность, сопоставимую с эталонным отражателем, и будет зафиксирована как недопустимый отражатель;

– вогнутость корня сварного шва 3,0 мм превышает отражающую способность эталонного отражателя и будет зафиксирована как недопустимый отражатель;

– эталонный отражатель, находящийся со стороны сварного соединения, противоположной стороне, с которой вводится ультразвук, не может быть выявлен при указанных значениях вогнутости корня шва.

Выпуклость корня сварного шва в соответствии с требованиями задачи может превышать номинальное значение 2,5 до 4 мм.

Было выполнено моделирование объекта контроля с выпуклостью корня шва 2,5 и 4 мм. Результаты моделирования приведены на рис. 7 и 8.

Выводы:

– выпуклость корня сварного шва высотой 2,5 мм имеет отражающую способность, сопоставимую с эталонным отражателем, и будет зафиксирована как недопустимый отражатель;

– выпуклость корня сварного шва высотой 4 мм превышает отражающую способность эталонного отражателя и будет зафиксирована как недопустимый отражатель;

– тип отражателя как соответствующий выпуклости корня шва может быть идентифицирован по измеренной координате относительно донной поверхности;

– эталонный отражатель, находящийся со стороны сварного соединения, противоположной стороне, с которой вводится ультразвук, может быть не выявлен при указанных значениях выпуклости корня шва.

Применение моделирования при разработке методики АУЗК СС приварки к патрубку Ду1200 парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000

Для оценки основных возможностей этой методики [11] выполнено математическое моделирование процесса контроля с применением ФАР-дефектоскопа. При создании модели объекта контроля указано использование перлитной стали со скоростями распространения поперечных и продольных волн 3220 и 5920 м/с соответственно. Геометрия объекта задана в соответствии с данными документации. В модели поверхность патрубка, доступная для ввода ультразвука, составляет приблизительно 120 мм, что является наименьшим из значений, встречающихся на практике. В модели была учтена неровность в области вершины сварного шва в виде прогиба высотой 1,5 мм.

В первую очередь проводилось моделирование для уточнения областей контроля при заданных параметрах сканирования. В качестве отражателей

использованы модели отверстия бокового сверления диаметром 2 мм (шаг по глубине между отражателями 7 мм). Отражатели размещены равномерно во всей требуемой зоне контроля. В околошовной зоне со стороны парогенератора отражатели размещены на расстоянии большем, чем 20 мм от кромки разделки сварного шва (примерно 29 мм), что является определенным консервативным запасом. Полученные результаты позволили уточнить параметры сканирования. Примеры полученных изображений приведены на рис. 9.

Далее моделировались ситуации выявления плоскостной несплошности самого малого размера на фоне конструктивных отражателей, а также на фоне отражений, связанных с наличием коррозионных язв на поверхности кармана для различных схем прозвучивания.

На рис. 10 показано расположение и результаты контроля антенной решеткой 5L32-A11 с шагом между элементами 0,6 мм при моделировании в CIVIL. Длина призмы составляет 42 мм.

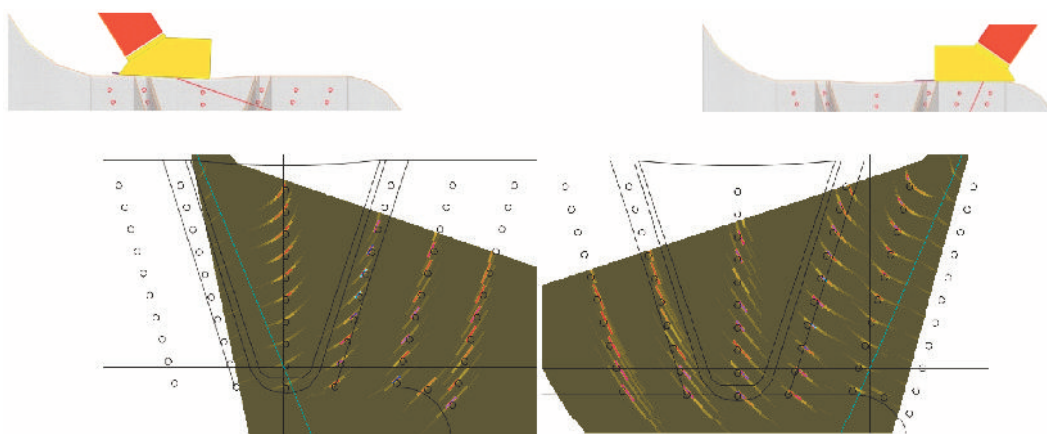


Рис. 9. Результаты моделирования зон контроля

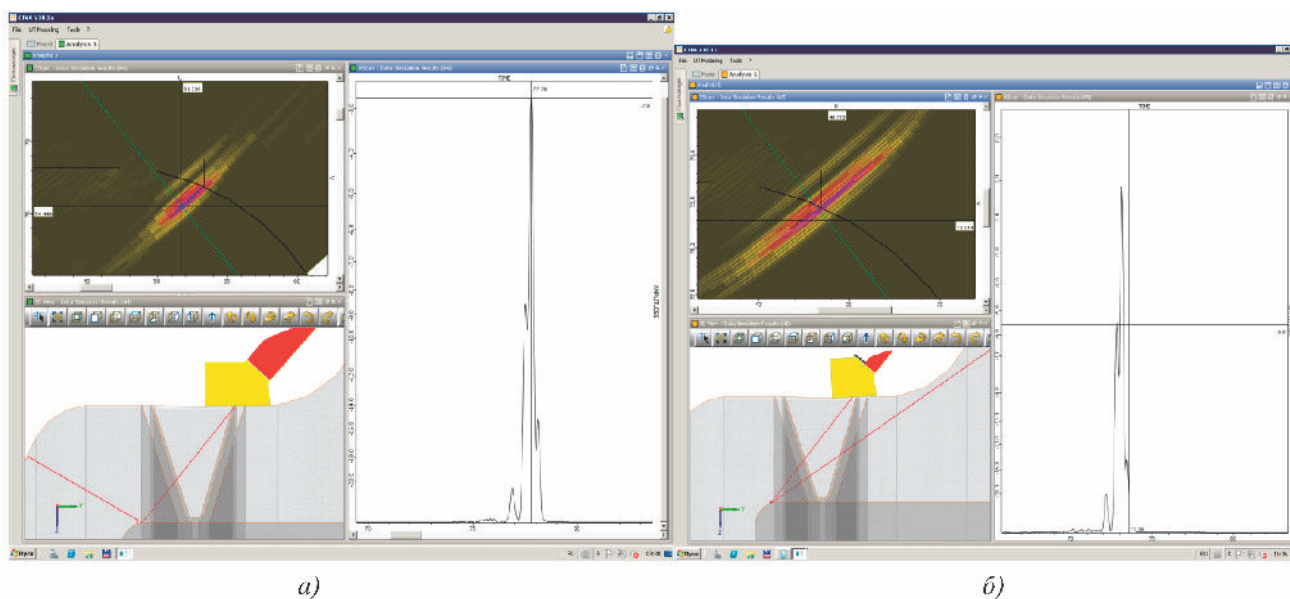


Рис. 10. Результат выявления паза высотой 2 мм в галтели, контроль антенной решеткой 5 МГц, 32 элемента (а) и 16 элементов (б)

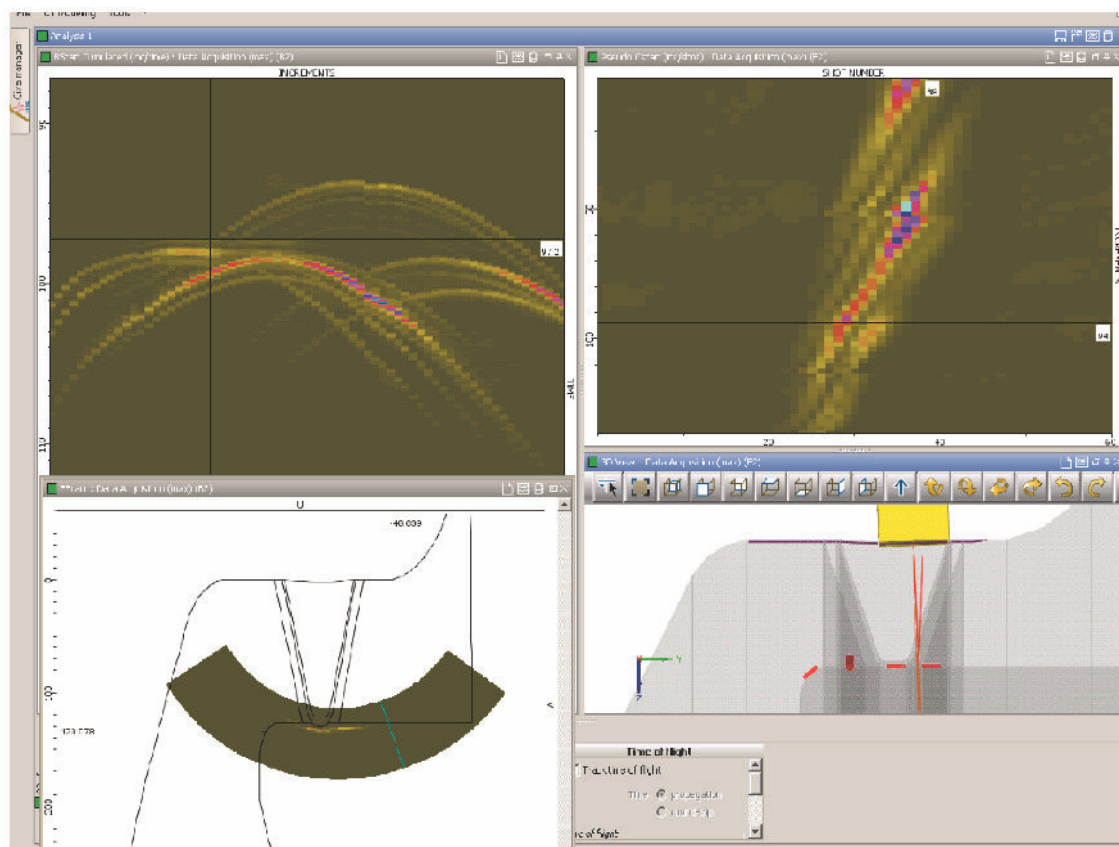


Рис. 11. Схемы для выявления поперечных несплошностей (справа внизу) и поперечные несплошности. Остальные изображения – В-, С- и S-сканы изображения поперечно ориентированных несплошностей

Таким образом, есть место для нескольких проходов одной антенной решетки. Моделирование проводилось для несплошностей, расположенных в области галтельного перехода кармана, разных типов антенных решеток, призм при различном их положении относительно шва. Выполнялась оценка полученных значений амплитуд сигналов и разрешающей способности изображения.

Для моделирования выявления поперечных и диагональных дефектов расчет модели осуществлялся в 3D-режиме, так как в качестве отражателей использовались модели плоскодонных отражателей. В качестве отражателей (рис. 11) использована модель плоскодонного отражателя диаметром 2,11 мм, а также три прямоугольных поперечных паза, расположенных на внутренней поверхности, длиной 10 мм и высотой 2 мм. На В-сканах можно видеть зависимость амплитуды сигналов от пазов от положения антенной решетки поперек оси шва. Для паза, расположенного в галтели, различаются сигналы от верхней и нижней кромок. По изображению S-скана возможно определение протяженности поперечных несплошностей с применением отсечки –6 дБ относительно максимальной амплитуды эхосигналов от несплошности и оценка высоты несплошности.

Некоторые *выводы* по результатам моделирования влияния коррозионных язв на результаты контроля:

- при увеличении высоты коррозионной язвы с 2 до 6 мм максимум амплитуды эхосигнала от нее изменяется незначительно;
- максимум амплитуды от трещины увеличивается для невысокой язвы и падает с ростом высоты язвы на 10 – 15 дБ;
- в случае если трещина растет из язвы, высота несплошности будет определена как общая высота язвы и трещины.

Обсудим для данной задачи одну из моделей сложной дефектной ситуации – возможность выявления дефектов на фоне коррозионной язвы. Для этого рассмотрим характеристики разработанной методики контроля с применением антенных решеток [11]. Характерным дефектом для этого объекта является сочетание плоскостного дефекта типа трещины и коррозионной язвы. Их взаимное положение и размеры существенно влияют на относительную амплитуду эхосигналов от язвы и несплошности, в ряде случаев затрудняя возможность выявления плоскостной несплошности и оценку ее параметров.

Для моделирования был выбран фрагмент кольцевого сварного соединения с галтельным переходом, на котором была смоделирована коррозионная язва в виде фрагмента сферы высотой 2 или 6 мм. Модели вертикальных трещин высотой 5 мм были расположены на разных расстояниях от модели язвы, а также в ее центре. При моделировании использовался акустический преобразователь с 32-элементной антенной решеткой на призме. Выполнялась вертикальная фокусировка на расстоянии 50 мм относительно передней грани призмы на центральной частоте 5 МГц.

Все значения эхосигналов нормировались относительно максимума амплитуды от плоскодонного отражателя с эквивалентной площадью $3,5 \text{ мм}^2$, расположенного на глубине залегания основания трещины (66 и 70 мм в зависимости от высоты модели язвы). Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 12 и 13.

Количественные измерения амплитуды дифракционного эхосигнала (от верхнего конца трещины) и эхосигнала от нижнего конца, представляющего собой угловой отражатель «дно – трещина», приведены в табл. 2 и 3. В табл. 2 представлены результаты измерений амплитуды эхосигналов от верхнего и нижнего концов трещин высотой

2, 5 и 7 мм, расположенных на вершинах моделей коррозионных язв высотой 2 и 6 мм и при отсутствии коррозии. В табл. 3 даны результаты измерений амплитуды эхосигналов от верхнего и нижнего концов трещин 5 мм, расположенной перед моделью язвы высотой 6 мм и после нее. Здесь же приведены данные табл. 2, относящиеся к трещине, локализованной на модели язвы. Все результаты измерений эхосигналов нормированы к максимальной амплитуде сигнала от плоскодонного отверстия с эквивалентной площадью $3,5 \text{ мм}^2$, определяющего уровень фиксации несплошности.

Анализ полученных результатов показывает, что:

- амплитуда дифракционных сигналов от верхнего конца трещины не зависит от высоты трещины и на 13 дБ меньше амплитуды максимума эхосигнала от плоскодонного отверстия, соответствующего уровню фиксации неоднородности;
- амплитуда сигналов от нижнего конца трещины, расположенной на вершине модели язвы диаметром 2 мм, выше, чем в других случаях за счет затенения донной поверхностью корня трещины;
- амплитуда эхосигналов от моделей язв слабо зависит от их размеров.

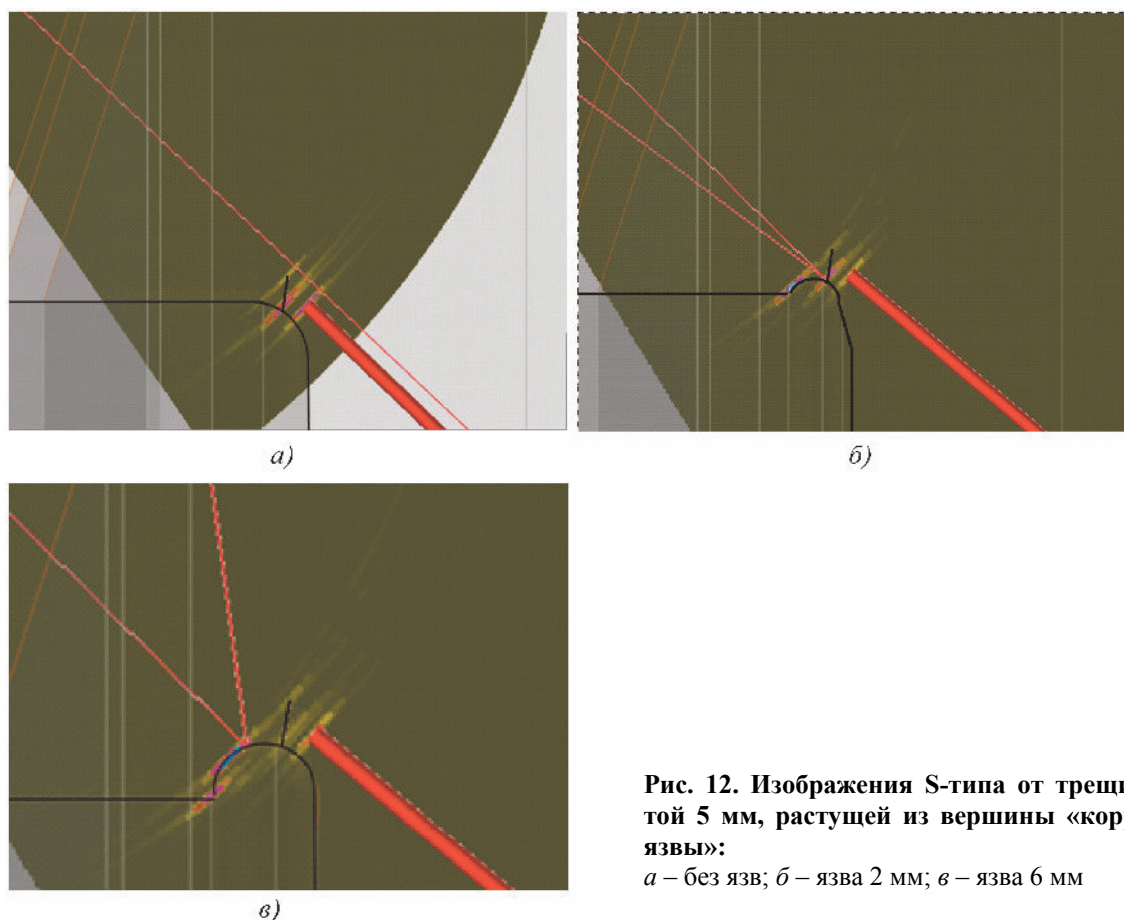


Рис. 12. Изображения S-типа от трещины высотой 5 мм, растущей из вершины «коррозионной язвы»:

a – без язвы; *б* – язва 2 мм; *в* – язва 6 мм

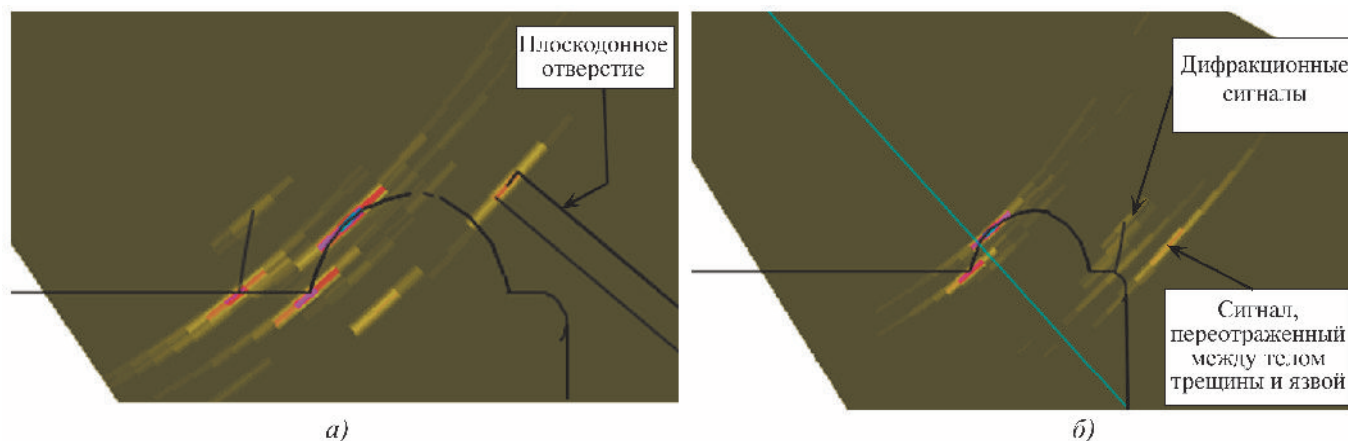


Рис. 13. Изображения S-типа для трещины высотой 5 мм, растущей до (а) и после (б) от коррозионной язвы высотой 6 мм (изображение для б получено при отсутствии в расчетной модели плоскодонного отверстия)

2. Амплитуда эхосигналов от трещин, растущих из модели язвы

| Параметр | | Амплитуда эхосигнала, дБ | | | | |
|--------------------|---|--------------------------|------|------|------|------|
| | | Высота модели язвы, мм | | | | |
| | | 0 | 2 | 6 | | |
| Высота трещины, мм | 2 | $A_{\text{язвы}}$ | – | 12,8 | 11 | |
| | | $A_{\text{трещ}}$ | Верх | –13 | –13 | –13 |
| | | | Низ | –1,1 | 9,5 | –1,8 |
| | 5 | $A_{\text{язвы}}$ | – | 12,8 | 11 | |
| | | $A_{\text{трещ}}$ | Верх | –13 | –13 | –13 |
| | | | Низ | –2,2 | 9,0 | –3 |
| | 7 | $A_{\text{язвы}}$ | – | 12,8 | 11,4 | |
| | | $A_{\text{трещ}}$ | Верх | –13 | –12 | –13 |
| | | | Низ | –1,5 | 10,2 | –3 |

$A_{\text{язвы}}$ – амплитуда эхосигнала от язвы, $A_{\text{трещ}}$ – амплитуда эхосигнала от верхней (Верх) и нижней (Низ) кромок трещины

3. Амплитуда эхосигналов от трещины высотой 5 мм в зависимости от ее положения относительно модели язвы высотой 6 мм

| Параметр | | Амплитуда эхосигнала, дБ | | |
|-------------------|------|--------------------------|-----------------|------------------|
| | | Трещина перед язвой | Трещина на язве | Трещина за язвой |
| $A_{\text{язвы}}$ | | 11 | 11 | 11 |
| $A_{\text{трещ}}$ | Верх | –13 | –13 | –14 |
| | Низ | 4 | –3 | – |

Наблюдаемый малый уровень эхосигналов от верхнего конца трещины не позволяет зарегистрировать несплошности при заданном уровне фиксации. Это приводит к тому, что становится практически невозможным определение типа дефекта (объемного или плоскостного), его высоты.

Заметим также, что если при анализе данных ориентироваться только на эхосигналы от «коррозионной язвы» и от корня трещины, то обнаружение несплошности сильно затрудняется, так как амплитуда эхосигнала от язв больше (почти на 4 дБ – для язвы высотой 2 мм и более чем на 12 дБ – для язвы высотой 6 мм) независимо от положения трещины. Поэтому важным разделом в методике контроля является определение адекватной технологии оценки параметров и типа трещин.

Применение моделирования при разработке методики АУЗК СС приварки патрубков трубопровода к корпусу главной запорной задвижки АЭС с ВВЭР-440

Контроль сварных соединений в главных запорных задвижках первого контура реакторной установки ВВЭР-440 (ГЗЗ) представляет собой крайне сложную задачу из-за высокого уровня структурного шума и необходимости использования импульсов продольной волны, однократно отраженных от наклонного дна патрубка. Так как для контроля объектов из материалов с высоким уровнем структурных шумов используют продольные волны, то на изображениях отражателей будут присутствовать ложные блики, сформированные импульсами на поперечных волнах. Причем амплитуда ложных бликов может быть соизмерима

с амплитудой бликов, полученных на продольных волнах. По этой причине анализ таких изображений крайне затруднен. Методы численного моделирования позволяют уменьшить время разработки методики за счет уменьшения количества образцов и, самое главное, за счет точного понимания природы измеренных эхосигналов.

Применение антенных решеток, регистрирующих эхосигналы в режиме двойного сканирования, и восстановление изображения методом ЦФА позволяют уменьшить амплитуду ложных бликов. Этот эффект тем заметнее, чем больше расстояние между первым и последним элементами антенной решетки [12]. Сканирование вдоль оси x позволяет сделать шаг между элементами антенной решетки δx много больше, чем длина волны, не увеличивая уровень ложных бликов, сформированных из-за высокого уровня «боковых лепестков» антенной решетки. Антенные решетки с шагом $\delta x \gg \lambda$, где λ – длина волны на частоте f , будут называться **прореженными** антенными решетками (ПРАР) [13].

Контроль одноэлементным преобразователем

На рис. 14 показаны контуры объекта контроля, одноэлементный преобразователь в начальной точке сканирования, четыре плоских отражателя высотой 5 мм, пронумерованных от 1 до 4, расположенных по углам сварного соединения, и вариант трассировки лучей.

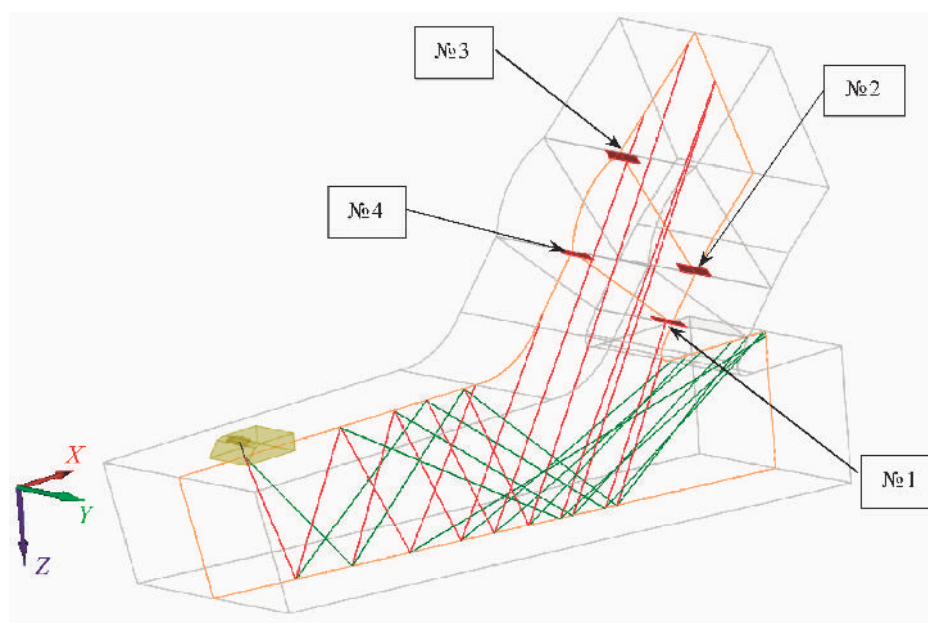


Рис. 14. Схема проведения численного эксперимента:

зеленый цвет – луч, по которому распространяется продольная волна; красный – поперечная волна

На рис. 15, *а* показано изображение, полученное методом M-SAFT по акустической схеме **LrbLdLrbL**, а на рис. 15, *б* – по схеме **LrbLdLrbS**. Пиктограмма акустической схемы изображена в левом верхнем углу каждой панели. На обоих изображениях хорошо видны блики отражателей № 2 и 4. На каждом изображении имеется множество ложных бликов значимой амплитуды, которые сформированы эхосигналами, распространяющимися по акустическим схемам, отличным от схемы, используемой при восстановлении. Например, за бликом от отражателя № 4 на рис. 15, *а* следует блик № 4', сформированный по эхосигналам, пришедшим по схеме **LrbLdLrbS**, а еще дальше вдоль луча, отраженного от дна, следует блик № 4'', сформированный импульсами, распространяющимися по схеме **SrbLdLrbS**. Наличие этих бликов может существенно осложнить анализ изображений и привести к ошибке определения типа и количества отражателей. Ложные блики вне пределов объекта контроля не принимаются во внимание.

На рис. 16 показано изображение, полученное как медиана парциальных изображений по списку. Объединенное изображение (рис. 16), полученное как медиана парциальных изображений, содержит фактически один ложный блик небольшой амплитуды.

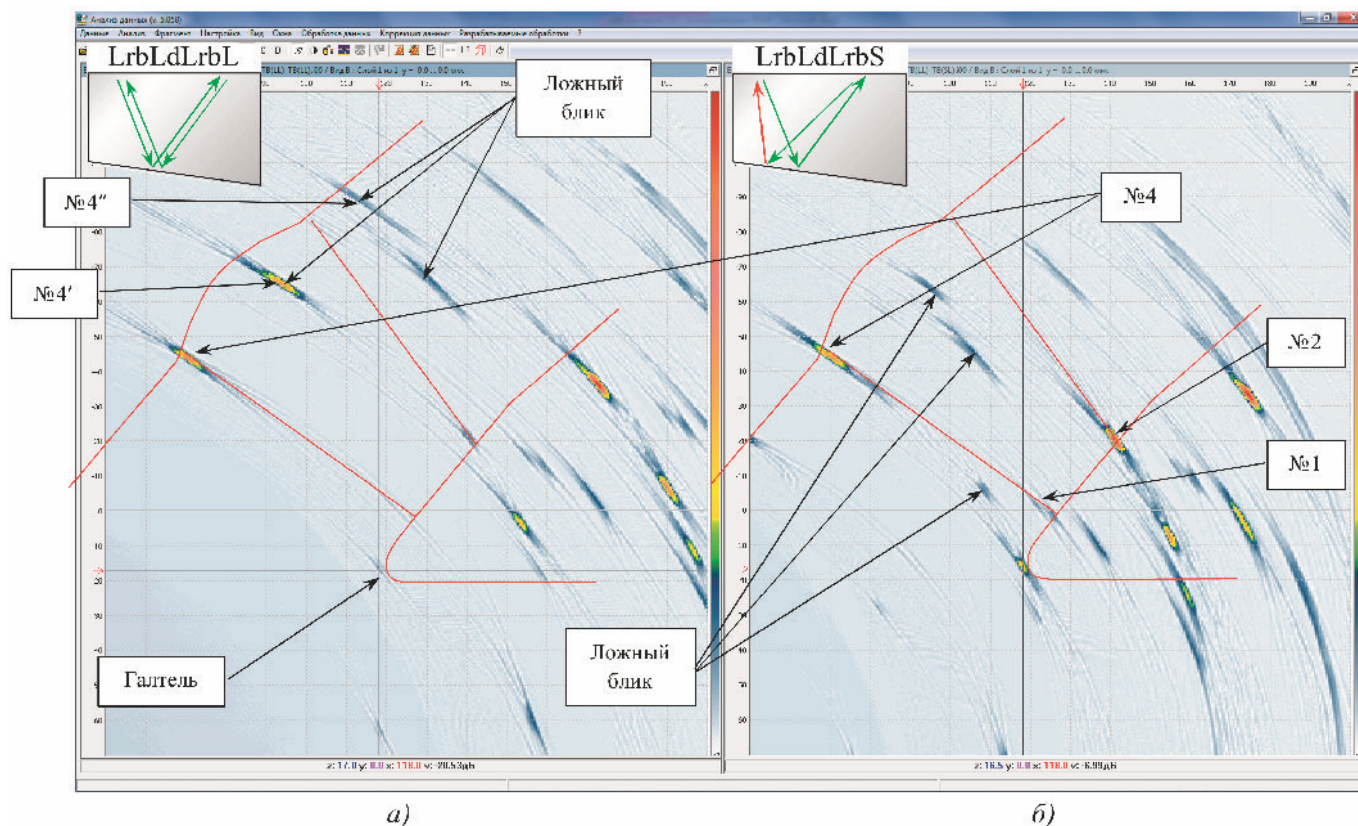


Рис. 15. Парциальные изображения отражателей:
 а – полученные по акустической схеме **LrbLdLrbL**; б – по схеме **LrbLdLrbS**

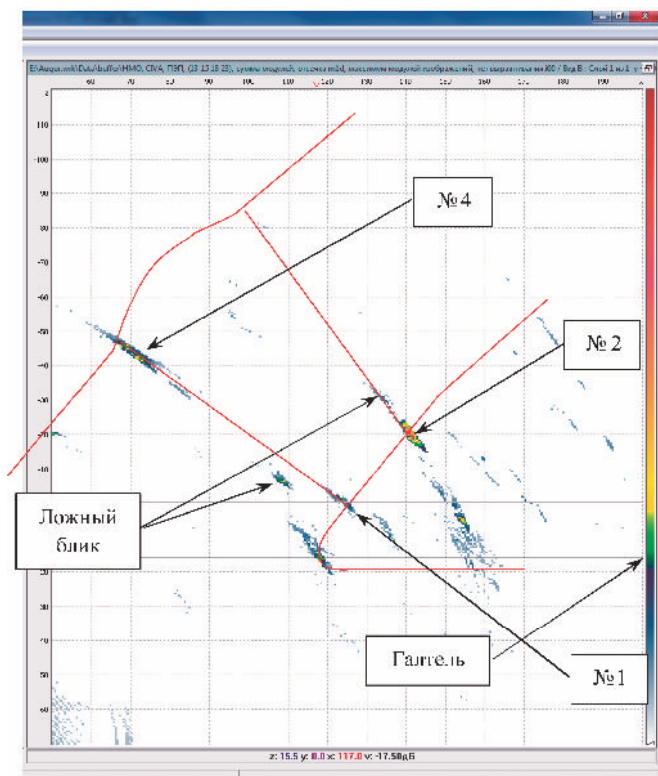


Рис. 16. Объединенное как медиана изображение отражателей

Контроль ПРАП с шагом 7 мм

Второй численный эксперимент проводился в предположении использования ПРАП. На рис. 17, а показано изображение по акустической схеме **LrbLdLrbL**, а на рис. 17, б – по схеме **LrbLdLrbS**. В сравнении с изображением на рис. 15, полученном одноэлементным преобразователем, на изображении, полученном с помощью ПРАП, некоторые ложные блики исчезли практически полностью.

На рис. 18 получено изображение как медиана парциальных изображений по списку L_{as} . Объединенное изображение, полученное как медиана парциальных изображений, фактически не содержит ложных бликов, но и бликов от отражателя № 4 на этом изображении нет.

Таким образом, по результатам моделирования контроля этого СС можно утверждать, что применение ПРАП для регистрации экосигналов и восстановление изображения методом ЦФА-ХУ позволили более чем на 12 дБ повысить отношение сигнал/шум в сравнении с изображением, полученным одноэлементным преобразователем.

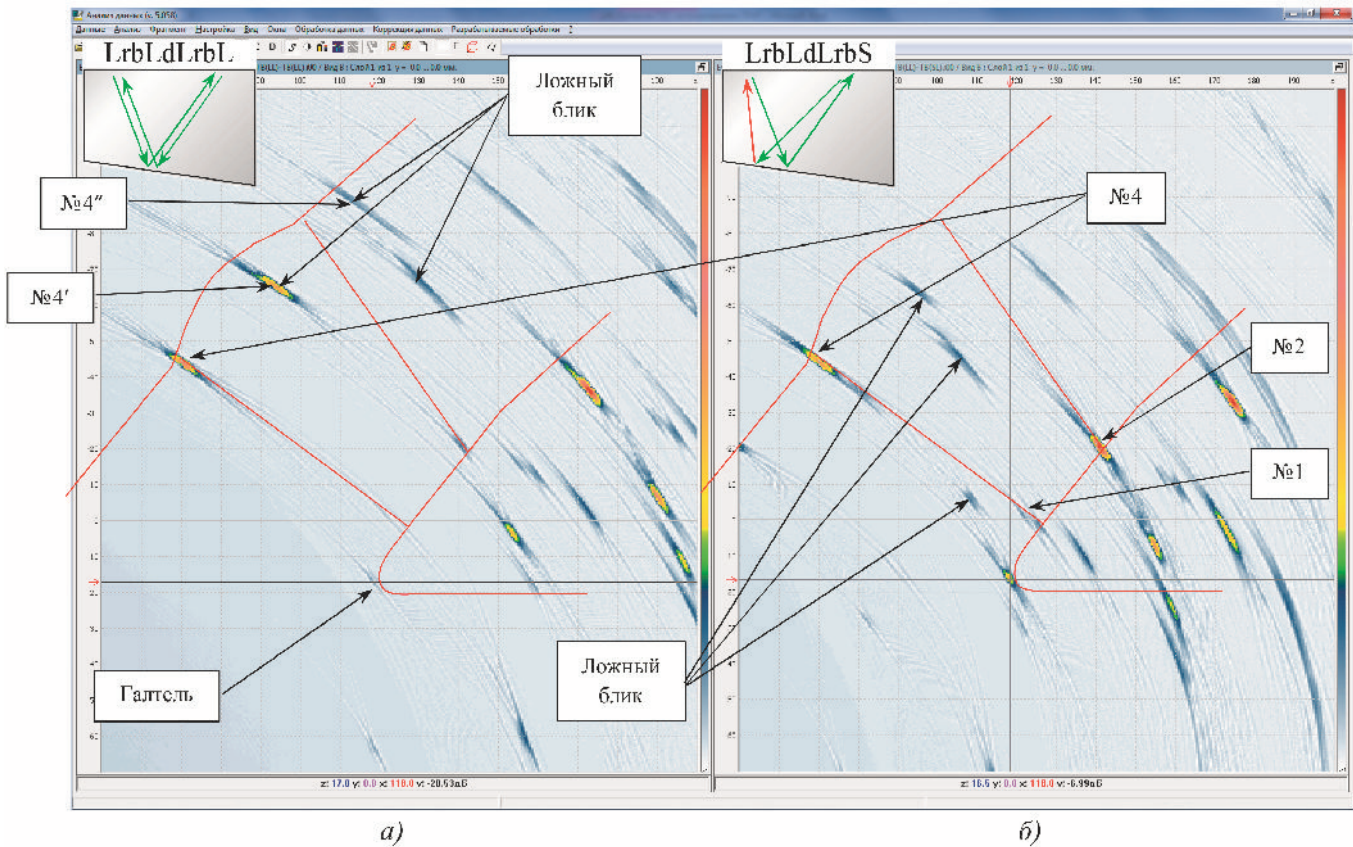


Рис. 17. Парциальные изображения отражателей:
 а – полученные по акустической схеме **LrbLdLrbL**; б – по схеме **LrbLdLrbS**

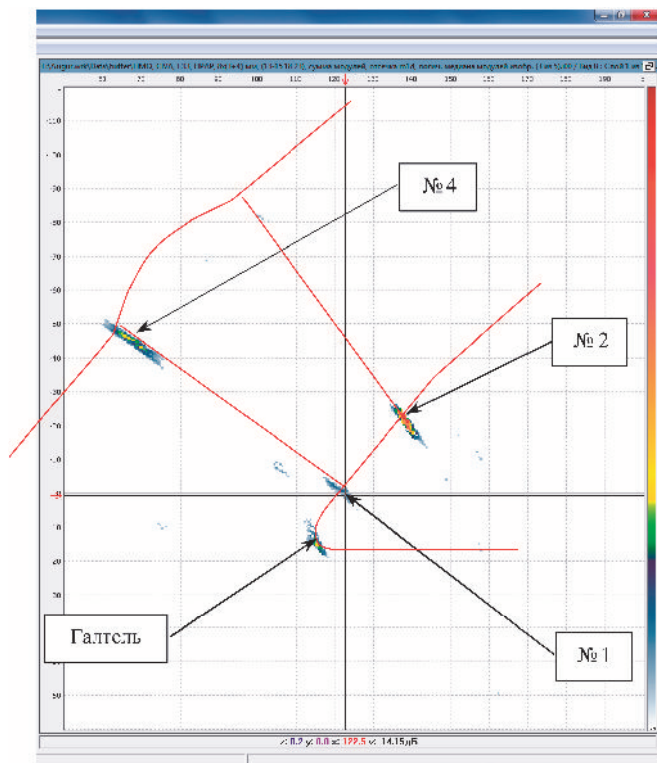


Рис. 18. Объединенное как медиана изображение отражателей

Сопоставление методик УЗК с помощью моделирования

Для сравнения разных методик УЗК необходимо выбрать сопоставляемые выходные параметры методик, а также значения расчетных параметров для моделирования выходных параметров каждой методики. Входные параметры контроля устанавливаются одинаковыми для всех сравниваемых методик, а параметры системы УЗК должны соответствовать методикам УЗК.

Основой сопоставления является анализ соответствующих выходных параметров сравниваемых методик. В качестве примера в табл. 4 приведен перечень сравниваемых параметров. Рекомендуется использовать балльную систему подведения итогов. Так как влияние разных выходных параметров на методику контроля различно, то рекомендуется внести также весовые коэффициенты для каждого из выходных параметров (значения коэффициента находятся в пределах от 0 до 1), определяющие значимость каждого выходного параметра. Значения весовых коэффициентов и тип балльной системы устанавливаются экспертным способом.

4. Пример анализа выходных параметров при сравнении методик УЗК

| № | Выходные параметры | Рекомендации к сопоставлению | Качество полученного значения параметра, оценка в баллах | Весовые коэффициенты (в диапазоне 0 – 1) |
|---|---|---|--|--|
| 1 | Разрешающая способность (лучевая, фронтальная) или погрешность измерения размеров дефекта | Чем меньше разрешающая способность, тем лучше. Чем меньше погрешность измерения, тем лучше | A_1 | K_1 |
| 2 | Амплитуда ложных сигналов (трансформация типа волны, реверберационные сигналы, геометрические отражатели) | Определяется максимум отношения амплитуда сигнала/амплитуда ложного сигнала | A_2 | K_2 |
| 3 | Пространственно-временное положение сигналов | Полезный эхосигнал различается на фоне ложного сигнала (по критерию Рэля) | A_3 | K_3 |
| 4 | Отношение сигнал/шум или предельная чувствительность | Уровень сигнала в области залегания дефекта | A_4 | K_4 |
| 5 | Область контроля | Определяется процентным отношением области с достоверным выявлением дефектов ко всей области контроля | A_5 | K_5 |

В табл. 4 приведен пример выбора выходных параметров для сравнения методик. Оценка пригодности анализируемых методик определяется по значениям величин $\sum_i A_i K_i$, рассчитанным для каждой из методик.

Такую сумму можно определить для каждой из анализируемых методик УЗК. Сопоставление величин этих сумм позволяет получать количественные критерии качества различных методик для выполнения определенной задачи контроля.

Выводы

Приведенные примеры применения методики комплексных аттестационных испытаний УЗК с использованием средств математического моделирования доказывают эффективность такого подхода для проверки практически любых методик УЗК.

Библиографический список

1. **EXTENDE**: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.extende.com> (дата обращения: 28.04.2018).
2. **ENIQ** recommended practice 1: Influential/essential parameters. Issue 2. Report ENIQ report № 24. EUR 21751 EN / European Commission Directorate General Joint Research Centre Institute for Energy Petten, The Netherlands, 2005.
3. **Nordtest report**. NT Techn Report 394. Guidelines for Reliability Determination Description, 1998. ISSN: 0283-7234. Distributed by: NORTEST, P.O. Box 116, ESPOO, Finland, 1998-04.
4. **Georgiou G. A.** Probability of Detection (PoD) curves. Derivation, applications and limitations. HSE, Research report № 454, 2006.

5. **ENIQ № 41**. EUR 24429 EN. Probability of Detection Curves: Statistical Best-Practices, 2010.
6. **Schaefer L.** Probability of Detection (POD) Basics // 4th European-American Workshop on Reliability of NDE. Berlin, 2009.
7. **РД ЭО 0488–2003**. Методические рекомендации по оценке достоверности средств и методик неразрушающего контроля / АО «Концерн «Росэнергоатом». М., 2003.
8. **Berens A.P., Hovey P.W.** Evaluation of NDE reliability characterization // AFWAL-TR-814160. V. 1 / Air Force Wright-Aeronautical Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base, December 1981.
9. **Nondestructive** Evaluation System Reliability Assessment. MIL-HDBK-1823, AMSC N/A –AREA NDTI, 1999.
10. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Базулин А. Е. и др.** Разработка и аттестация методик АУЗК с использованием программного комплекса CIVA // Ультразвуковая дефектометрия. 25 лет: юбилейн. сб. тр. ООО НПЦ «ЭХО+» / под ред. А. Х. Вopilкина. М. – СПб.: СВЕН, 2015. С. 92 – 100.
11. **Тихонов Д.С.** Визуализация данных и автоматизация ультразвукового контроля для измерения несплошностей в сварных соединениях АЭС // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 25 – 41.
12. **Базулин Е. Г., Вopilкин А. Х., Тихонов Д. С.** Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум // Контроль. Диагностика. 2015. № 9. С. 10 – 27.
13. **Базулин Е. Г., Кокорев С. А.** Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прорезанных антенных решеток // Дефектоскопия. 2013. № 5. С. 45 – 58.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ АУСТЕНИТНЫХ И РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ



Д. С. Тихонов,
зам. ген. директора,
канд. техн. наук



П. Ф. Самарин,
ведущ. науч. сотрудник,
канд. физ.-мат. наук

Рассмотрены основные параметры, определяющие величину отношения сигнал/шум при использовании корреляционных когерентных методов восстановления изображений. Определены методы, позволяющие повысить отношение сигнал/шум и тем самым улучшить главный показатель автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) аустенитных и разнородных сварных соединений. Приведены результаты разработок методик контроля аустенитных и разнородных сварных соединений в НПЦ «ЭХО+» на примерах трех методик: АУЗК аустенитных и разнородных сварных соединений толщиной от 5 до 20 мм и диаметрами более 108 мм трубопроводов на АЭС, АУЗК аустенитных сварных соединений приварки патрубков трубопроводов Ду500 к корпусам главных запорных задвижек реакторов ВВЭР-440 с применением системы «АВГУР 5.2» и АУЗК аустенитных и разнородных СС трубопроводов аварийного подвода питательной воды к парогенератору энергоблоков с реакторной установкой ВВЭР-440 с использованием ФР.

С 1993 года в ООО «НПЦ «ЭХО+» ведутся разработки методов и средств автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) аустенитных и разнородных сварных соединений (СС). За это время выработан и освоен набор действенных методов контроля, обеспечивающий проведение контроля на уровне качества, предъявляемом к однородным перлитным сварным соединениям. В основе этих методов когерентные способы формирования изображений дефектов, обеспечивающие подавление структурных шумов, высокую разрешающую способность, подавление других артефактов, возникающих при контроле аустенитных и разнородных сварных швов.

В статье рассматриваются возможности повышения качества контроля аустенитных и разнородных СС (АРСС), их применение при разработке в НПЦ «ЭХО+» методик АУЗК сварных соединений и использование автоматизированного ультразвукового контроля аустенитных и разнородных сварных соединений при контроле трубопроводов АЭС.

Основные методы повышения качества контроля аустенитных и разнородных СС

Корреляционные когерентные методы восстановления изображений позволяют за счет математической фокусировки эхосигналов повысить отношение сигнал/шум, т.е. улучшить главный показатель контроля аустенитных и разнородных сварных соединений. Очевидно, что в случае белого шума

эффект его подавления будет максимальным [1]. Если когерентно сложить множество парциальных изображений, полученных для разных положений антенной решетки или антенной матрицы методами Multi-SAFT и Multi-ЦФА, то эффект накопления будет еще более заметен.

Основные параметры, которые определяют величину отношения сигнал/шум изображения отражателя это: коэффициент затухания δ контролируемого материала, амплитуда A , длительность τ и частота f зондирующего импульса, площадь элементов антенной решетки и способ формирования изображения отражателей. Коэффициент затухания $\delta = \delta_d + \delta_s$ определяется поглощением, когда механическая энергия переходит в тепловую энергию δ_d , и рассеиванием на кристаллических зернах материала объекта контроля, когда диссипации энергии не происходит, но возникает эффект рассеивания δ_s . Коэффициент затухания δ сильно зависит от типа волны и от частоты зондирующего сигнала. Для металлов обычно полагают $\delta_d \sim f$, а для пластмасс – $\delta_d \sim f^2$. Для материалов со средним размером зерна $\langle D \rangle \ll \lambda$ справедливо соотношение $\delta_s \sim \langle D \rangle^3 f^4$ (рэлеевское рассеивание) [2]. Для таких мелкозернистых материалов можно считать, что $\delta \approx \delta_d$. Для повышения отношения сигнал/шум в таких материалах традиционно применяются следующие способы:

– увеличение длины зондирующей УЗ-волны за счет использования более быстрых продольных волн, снижения частоты зондирующего импульса f , что приводит к уменьшению амплитуды эхоимпульса, полученного от отражателей малых размеров и ухудшению разрешающей способности;

– увеличение амплитуды A зондирующего импульса, величина которой ограничена напряжением пробоя пьезокерамики;

– увеличение размеров антенной решетки, что в сочетании с аппаратной или программной фокусировкой позволяет увеличить чувствительность и, кроме того, повысить фронтальную разрешающую способность;

– разнесение путей излучения и приема, использование TRL-схем и т.п.;

– использование антенных матриц.

Для восстановления изображения отражателей в материалах с высоким уровнем структурного шума была также разработана технология применения сканирующих прореженных антенных решеток (ПрАР) [3]. Ее применение в модельных экспериментах позволило сделать следующие выводы:

– технология ПрАР в 2D-варианте, и тем более в 3D-варианте, показала лучший результат при сравнении с технологией SAFT с одноэлементными преобразователями; на изображениях, полученных по технологии ПрАР, отношение сигнал/шум для бликов от пазов в аустенитном шве на 12 дБ больше;

– 3D-обработка дополнительно увеличивает отношение сигнал/шум как минимум на 3 дБ, а разрешающая способность вдоль оси сварного соединения стремится к размерам пьезопластины антенной решетки в этом направлении.

Для повышения отношения сигнал/шум предложено использовать метод расщепления спектра и его экстраполяции при построении его AR-модели (англ. autoregressive model). Такой подход при обработке эхосигналов, полученных в численных и модельных экспериментах, подтвердили работоспособность предложенного способа обработки. Обработка эхосигналов с эффективной частотой не 2,5 МГц, а 5,0 МГц дала большее повышение отношения сигнал/шум из-за того, что поддиапазоны размером более 1,0 МГц можно сделать практически не перекрывающимися [4].

Все эти методы повышения качества контроля АРСС используются в методиках, разработанных НПЦ «ЭХО+». Это позволяет проводить контроль

многих типов АРСС на уровне качества, соответствующего контролю мелкозернистых углеродистых сталей и их СС. Рассмотрим некоторые из них.

АУЗК аустенитных и разнородных сварных соединений толщиной от 5 до 20 мм и диаметрами более 108 мм трубопроводов на АЭС с использованием фазированных антенных решеток

Контроль по данной методике основан на применении современных дефектоскопов с фазированными ультразвуковыми решетками (ФР), таких как «АВГУР-АРТ», OMNISCAN, HARFANG и др., отвечающих техническим требованиям [5]. Для экспериментального подтверждения возможности применения методики и технических средств контроля для эксплуатационного контроля оборудования и трубопроводов АЭС были выполнены работы по их опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ). На изготовленном испытательном образце с внесенными искусственными дефектами в сварном шве был проведен АУЗК и радиографический контроль (РГК), выполнены металлографические исследования (МГИ). По планам ОПЭ были выполнены РГК и АУЗК аустенитных и разнородных сварных соединений, были отобраны более 40 аустенитных и разнородных СС с диаметрами от 108 до 1220 мм и толщинами от 6 до 20 мм на АЭС.

Методика обеспечивает выявление, определение условных размеров и местоположения в СС продольных несплошностей, возникающих при монтаже и ремонте (непровары, несплавления, поры, шлаковые включения, трещины и другие технологические несплошности), а также в период его эксплуатации (трещины, в том числе трещины МКРПН (межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением) в аустенитных сварных соединениях). Область расположения несплошностей (область контроля), подлежащих выявлению, включает в себя наплавленный металл сварного шва (включая корень шва, линию сплавления) и околошовную зону шириной, равной толщине стенки трубопровода. Прозвучивание проводится на прямом и отраженном лучах от донной и наружной поверхностей СС (рис. 1)

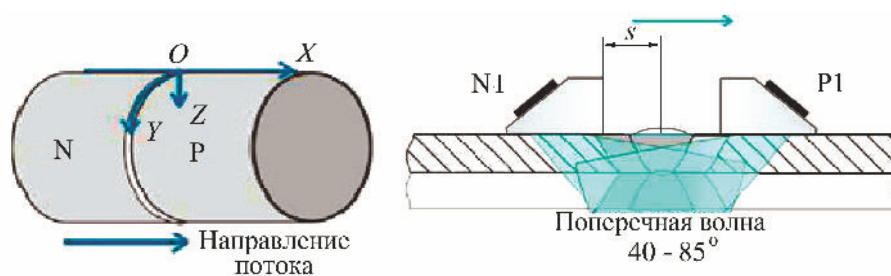


Рис. 1. Схема сканирования и система координат объекта при АУЗК

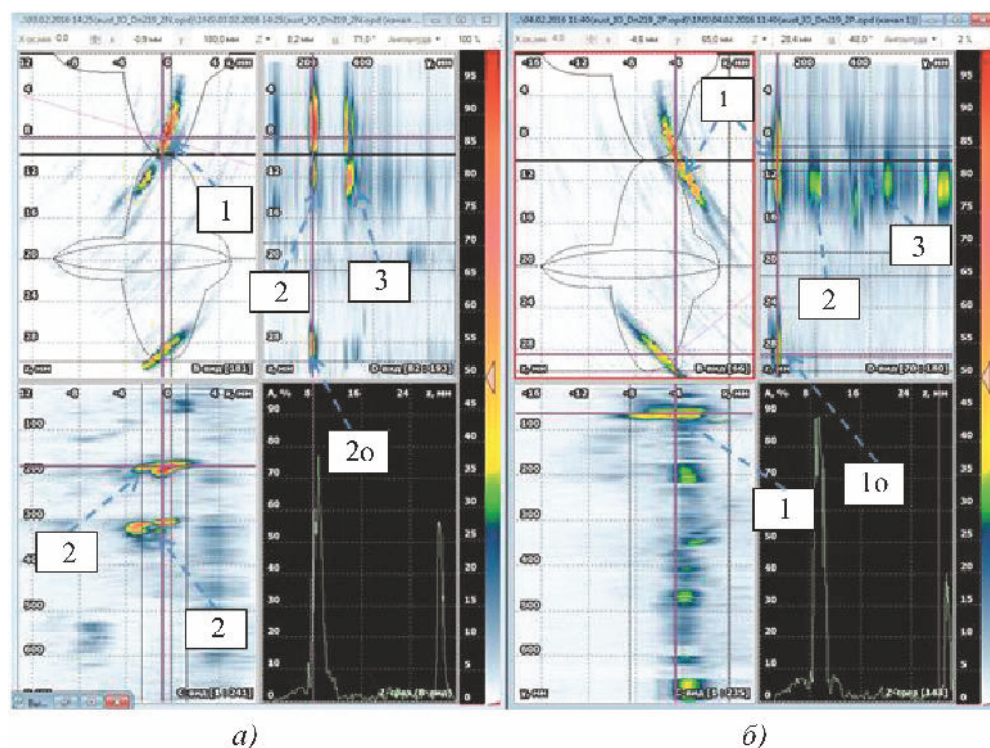


Рис. 2. В-, С-, D-изображения дефектов с N-стороны (а) и P-стороны (б) сварного соединения образца

Методика обеспечивает выявление и фиксацию несплошностей с отражающей способностью на 6 дБ ниже амплитуды сигнала от опорного отражателя, которым является боковое цилиндрическое отверстие диаметром 2 мм для толщин от 5 до 10 мм и диаметром 3 мм для толщин более 10 до 20 мм.

Ниже приведены результаты выполнения АУЗК аустенитного испытательного образца толщиной 11 мм и диаметром 219 мм с внесенными тремя дефектами в области сварного шва. На образце был выполнен контроль РГК и затем металлографические исследования. Для контроля использовались дефектоскоп «АВГУР-АРТ» со сканером СКУ-ТД.219-426.М.ДП.1 и 16-элементная антенная решетка Imasonic 5 МГц.

На рис. 2 приведены изображения В-, С-, D-видов, на которых пунктиром нанесен эскиз объекта (маска) с реальным профилем сварного шва. Номерами на изображении обозначены выявленные дефекты 1, 2, 3. Номерами 1а и 2а обозначены изображения дефектов 1 и 2 при отражении сигналов от донной и наружной поверхностей трубопровода. Выявляются все дефекты с амплитудой браковочного уровня и большой протяженностью.

Контроль образца был проведен с использованием дефектоскопа «АВГУР-АРТ» в режиме ЦФА (цифровая фокусировка апертуры), полученные

изображения продемонстрировали наилучший результат при контроле испытательного образца (рис. 3). По результатам выполнения АУЗК аустенитного испытательного образца ИО-Дн219-11-Ауст были выявлены три дефекта: дефект 1, условная протяженность 52 мм, условная высота 5 мм; дефект 2, условная протяженность 50 мм, условная высота 3 мм; дефект 3, условная протяженность 68 мм, условная высота 4 мм. На рис. 4 представлены фотографии выявленных методом РГК дефектов в образце ИО-Дн219-11-Ауст.

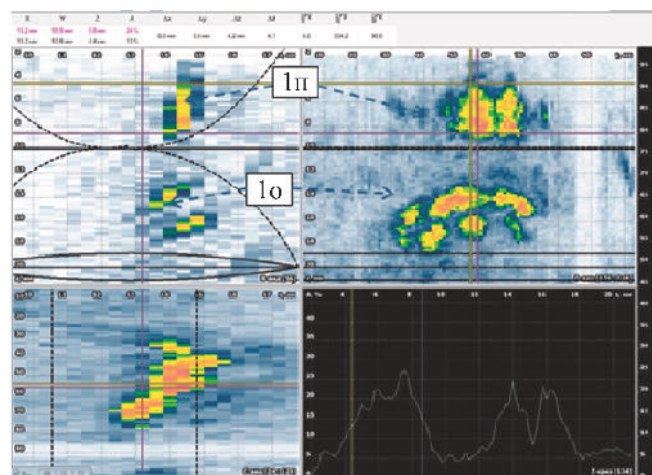


Рис. 3. В-, С-, D-виды изображения дефекта 1 при контроле ЦФА-методом с использованием «АВГУР-АРТ»

Ниже проводится сопоставление результатов контроля испытательного образца ИО-Дн219-11-Ауст следующими методами контроля: АУЗК, РГК и МГИ. Расстояния дефектов определялись по наружной поверхности относительно нанесенной начальной метки на образце.

Дефект 1

В табл. 1 приведены значения параметров дефекта 1, определенных тремя методами: РГК, АУЗК и МГИ.

Измерение протяженности по МГИ (64 мм) и РГК (68 мм) близки, по АУЗК (52 мм) существенно меньше. Это объясняется в первую очередь тем, что и МГИ и РГК регистрируют несплошности с существенно меньшими поперечными размерами. По МГИ края дефекта 1 имеют следующие поперечные размеры: $0,5 \times 0,2$ мм и $0,15 \times 0,1$ мм (две небольшие несплошности) на 23 мм и $1,4 \times 1$ мм на 83 мм.

По изображениям АУЗК определена максимальная высота дефекта 1: 5 мм, что достаточно хорошо согласуется с МГИ. Низ дефекта 1 (Z_n) по АУЗК находится на донной поверхности, а по данным МГИ, несплошность находится почти на 1 мм выше донной поверхности. Эта ошибка определяется погрешностью ультразвукового контроля, разрешение которого составляет $\pm 1,5$ мм.

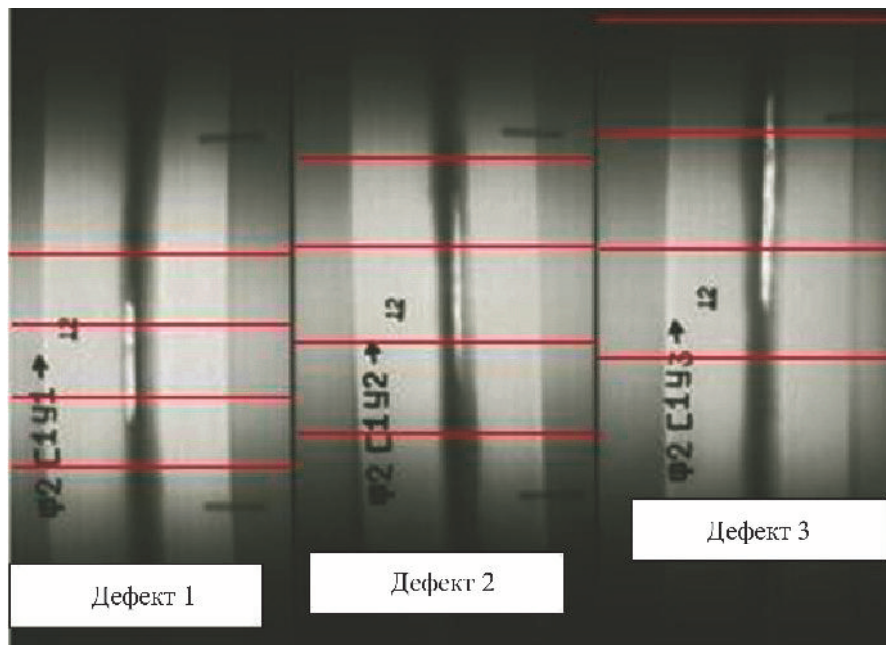


Рис. 4. Рентгенограммы испытательного образца ИО-Дн219-11-Ауст в области выявления дефектов

Дефект 2

В табл. 2 приведены значения параметров дефекта 2, определенных тремя методами: РГК, АУЗК и МГИ.

Дефект 3

В табл. 3 приведены значения параметров дефекта 3, определенные тремя методами: РГК, АУЗК и МГИ.

При сопоставлении результатов контроля РГК, АУЗК с МГИ достигнуто хорошее согласие параметров выявленных дефектов, полученных тремя различными методами.

1. Параметры дефекта 1

| № | Метод контроля | Размеры несплошностей, мм | | Схема контроля | Оценка качества |
|---|----------------|---------------------------|--------|----------------|-----------------|
| | | Протяженность | Высота | | |
| 1 | РГК | 68 | – | – | Неуд |
| 2 | АУЗК | 52 | 5 | P1 | Неуд |
| 3 | МГИ | 64 | 6,2 | – | – |

2. Параметры дефекта 2

| № | Метод контроля | Размеры несплошностей, мм | | Схема контроля | Оценка качества |
|---|----------------|---------------------------|--------|----------------|-----------------|
| | | Протяженность | Высота | | |
| 1 | РГК | 76 | – | – | Неуд |
| 2 | АУЗК | 50 | 3 | N1 | Неуд |
| 3 | МГИ | 62 | 3,1 | – | – |

3. Параметры дефекта 3

| № | Метод контроля | Размеры несплошностей, мм | | Схема контроля | Оценка качества |
|---|----------------|---------------------------|--------|----------------|-----------------|
| | | Протяженность | Высота | | |
| 1 | РГК | 84 | – | – | Неуд |
| 2 | АУЗК | 68 | 4 | N1 | Неуд |
| 3 | МГИ | 77 | 4,9 | – | – |

Отличия в значениях длины дефектов (протяженности по МГИ и РГК близки, по АУЗК, как правило, меньше) объясняются тем, что контрольный уровень при АУЗК определяется большей по размерам контрольной несплошностью (отверстие бокового сверления диаметром 3 мм). Автоматизированный ультразвуковой контроль с использованием технологии ФР имеет большие преимущества по отношению к РГК:

- более точное определение координат несплошностей относительно осей координат СС (в частности, определение положения несплошностей по высоте);
- определение высоты несплошностей;
- эффективное выявление представляющих наибольшую опасность плоскостных несплошностей.

В рамках работ по программе опытно-промышленной эксплуатации методики выполнялись РГК и АУЗК аустенитных и разнородных СС на АЭС. По результатам АУЗК и РГК при выявлении недопустимых несплошностей по действующим нормам контроля должен быть выполнен ремонт сварных соединений с выявленными дефектами.

В состав технических средств РГК контроля входили дефектоскоп «Гаммарид 192/120» с источником ионизирующего излучения иридий-192 или рентгеновский аппарат Egresco 42 MF3.1, эталоны чувствительности, имитаторы вогнутости и выпуклости корня сварного шва.

Перед контролем подготавливался участок, включающий металл шва и примыкающие к нему участки основного металла в обе стороны от шва (околошовная зона). Обеспечивались требования к качеству контролируемой поверхности СС, устранялись перед РГК все обнаруженные при внешнем осмотре наружные дефекты и неровности. Выполнялась разметка сварного соединения на участки и далее проводился контроль.

По программе опытно-промышленной эксплуатации методики был выполнен АУЗК тех же сварных соединений, на которых проводился РГК, оценка качества СС по результатам контроля проводилась по нормам НП-084-15 [6]. Несплошности с амплитудой на браковочном уровне и выше

не обнаружены, по результатам АУЗК выявлены непротяженные несплошности на контрольном уровне чувствительности и ниже.

На рис. 5, 6 представлены типичные изображения АУЗК СС № 1 и 2 с выявленными несплошностями (показаны участки с выявленными несплошностями). На изображения нанесен пунктирными и сплошными линиями профиль СС с учетом многократного отражения от наружной и внутренней поверхностей. Пунктирными линиями обозначена разделка сварного шва, сплошными линиями – донная, наружная поверхности СС и валик усиления.

В сварном шве № 1 выявлены пять несплошностей с амплитудами сигналов на контрольном уровне и выше контрольного уровня, но ниже браковочного уровня, кроме этого в СС № 1 также выявлены семь несплошностей с амплитудой ниже контрольного уровня.

В табл. 4 приведены результаты АУЗК СС № 1 (недопустимые несплошности не обнаружены).

На рис. 6 показаны изображения, полученные в результате АУЗК СС Ду1200 № 2. На изображениях видны характерные сигналы отражения от дна. По этим сигналам выполнялась коррекция маски. Несплошность 1 расположена в корне шва сварного соединения, несплошность 2 находится в валике усиления СС. Несплошности 1 и 2 выявляются на прямом и отраженном лучах. Несплошность 3, расположенная вблизи наружной поверхности в валике усиления, выявляется на отраженном от донной поверхности луче. Несплошность 4 расположена в корне шва, несплошность выявляется при двукратном отражении – от внутренней и наружной поверхностей СС.

Аналогичный анализ данных выполнялся для несплошностей, выявленных в других СС.

Полученные результаты ультразвукового и радиографического контроля СС определяются методическими особенностями контроля, а также нормами оценки качества, применяемыми при выявлении и регистрации несплошностей. При использовании РГК эффективно выявляются объемные несплошности поры, шлаковые включения. С помощью ультразвукового метода контроля наилучшим образом выявляются плоскостные несплошности.

4. Результаты АУЗК СС № 1

| № | Амплитуда относительного контрольного уровня, дБ | Размеры и местоположение несплошностей, мм | | | | | Схема контроля | Оценка качества |
|---|--|--|-----|------------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | | $Y_n : Y_m : Y_k^*$ | X | $Z_n : Z_b^{**}$ | Условная протяженность | Условная высота | | |
| 1 | 3 | 337 : 339 : 343 | 5 | 11:10 | 6 | 1 | P1 | Уд |
| 2 | 4 | 377 : 380 : 387 | 4 | 10:8 | 10 | 2 | P1 | Уд |
| 3 | 2 | 742 : 745 : 748 | -10 | 6:5 | 6 | 1 | N1 | Уд |
| 4 | 1 | 2092 : 2098 : 2102 | -4 | 11:10 | 10 | 1 | N2 | Уд |
| 5 | 0 | 2182 : 1533 : 2190 | 0 | 11:10 | 8 | 1 | N2 | Уд |

* Y_n – координата начала несплошности вдоль СС; Y_m – координата максимальной амплитуды несплошности вдоль СС; Y_k – координата конца несплошности вдоль СС.

** Z_n – координата нижней точки несплошности; Z_b – координата верхней точки несплошности.

Уд – удовлетворительная оценка.

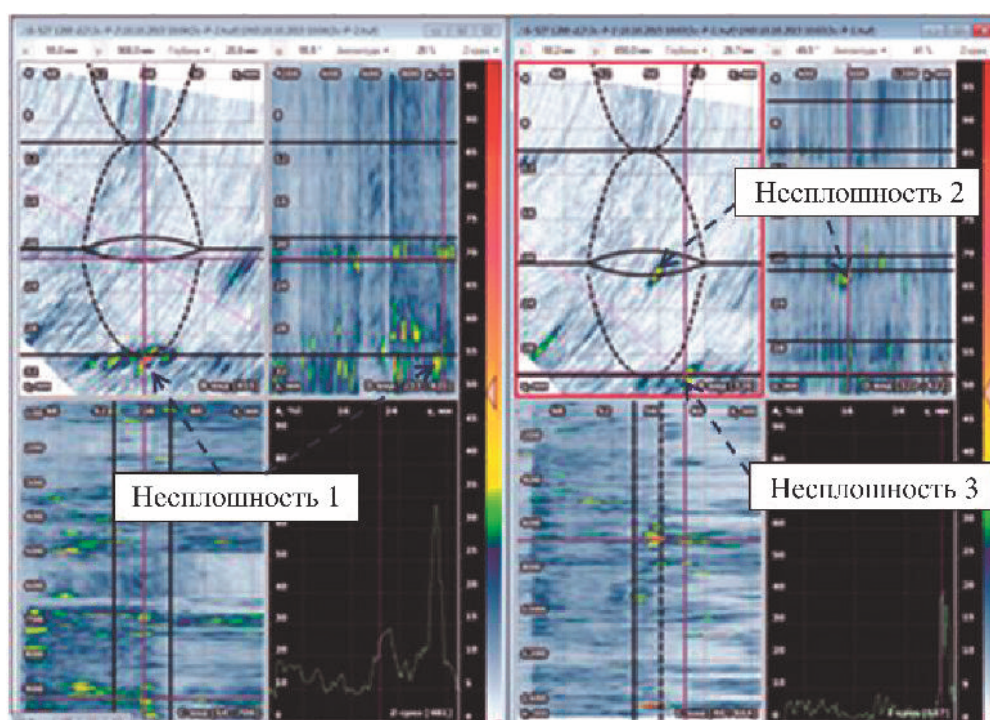


Рис. 5. Изображения СС Ду1220 № 1

В проконтролированных СС РГК и АУЗК не выявлены недопустимые несплошности. При сопоставлении выявленных несплошностей по методикам РГК и АУЗК по анализу результатов контроля наблюдается качественное согласие полученных результатов по выявлению несплошностей (табл. 5).

Наибольшее количество несплошностей выявлено в СС № 1, $\varnothing 1220 \times 12$:

- 12 пор, 4 шлаковых включения выявлены методом РГК;
- 5 несплошностей на контрольном уровне и 7 несплошностей с амплитудой ниже контрольного уровня.

Некоторым из выявленных несплошностей одним методом соответствуют несплошности, обнаруженные другим методом, но есть несплошности, которые найдены только РГК или АУЗК, что связано с отличиями во взаимодействии рентгеновского излучения и ультразвуковых волн с несплошностями. РГК-методом хорошо выявляются поры, шлаковые включения, которые ультразвуком могут обнаруживаться только на повышенном уровне чувствительности.

На рис. 6, б приведены изображения непротяженных несплошностей, соответствующие порам.

5. Сопоставление несплошностей методами РГК и АУЗК

| № шва, тип СС | Результаты по РГК | Результаты по АУЗК |
|---------------|--|--|
| 1, Ø1220×12 | П 0,5; 7 П 0,6; 4 П 0,8; 2 Ш 1,5×3,0; 2 Ш 1,2×2,5 | 2×16, 1×12, 1×10 (2 шт.), 1×8 (на контрольном уровне); 1×14 (2 шт.), 1×12 (4 шт.), 1×10, 1×8 (ниже контрольного уровня) |
| 2, Ø1220×12 | 2 П 0,8; Ш 0,5×2,5; Ш 1,5×2,0 | 1×12 (на контрольном уровне), 1×16, 1×10 (ниже контрольного уровня) |
| 3, Ø325×12 | Ш 0,8×3,0 | 1×10 (ниже контрольного уровня) |
| 4, Ø273×11 | Вгк 0,4 | 2×27 (ниже контрольного уровня) |
| 5, Ø325×12 | Вгк ≤ 1,6 | 1×10 (ниже контрольного уровня) |
| 6, Ø108×7 | П 0,8; П 0,6; 2 Вгк ≤ 1,2 | 2×8, 1×10 (на контрольном уровне) |
| 7, Ø108×7 | П 0,8; Ш 1,0×4,5 | 1×14 (на контрольном уровне) |
| 8, Ø108×7 | – | 2×14, 1×10 (на контрольном уровне) |

П – пора; Ш – шлаковое включение; Вгк – вогнутость корня шва

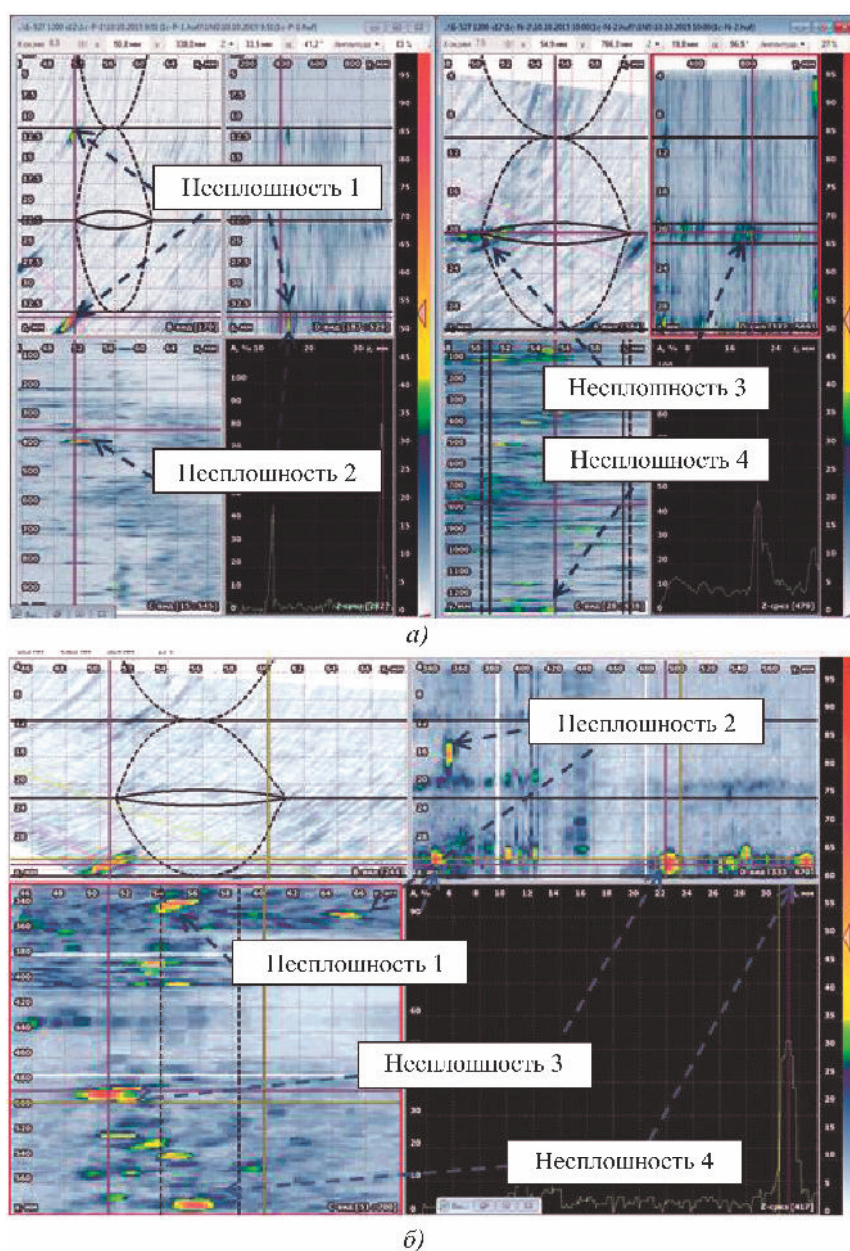


Рис. 6. Изображения СС Ду1220 № 2 по результатам АУЗК (а), непротяженные несплошности, выявленные АУЗК СС № 2, N-сторона контроля (б)

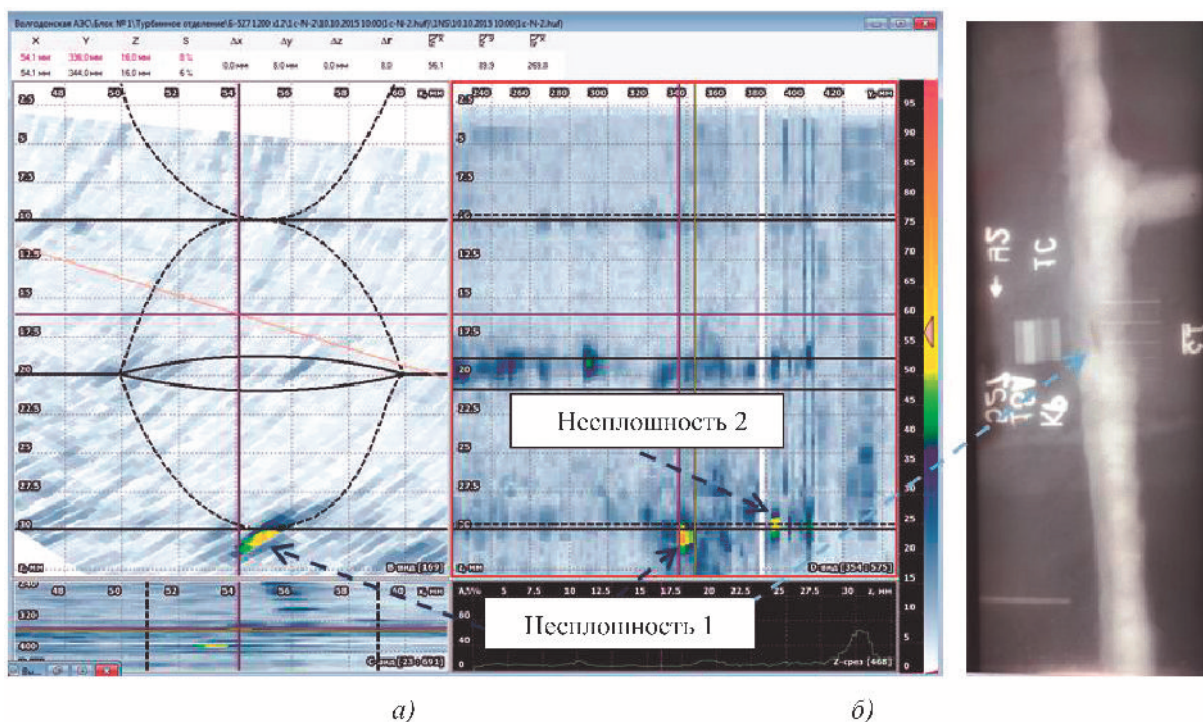


Рис. 7. Непротяженные несплошности, выявленные на контрольном уровне АУЗК СС № 1 (а), и результаты РГК СС шов № 1 (б)

Два других сигнала УЗК на рис. 6 (несплошности 3 и 4) не являются, по-видимому, порами, так как в этой области радиография показывает отсутствие дефектов. Эти непротяженные отражатели расположены в корне СС, имеют амплитуду на контрольном уровне чувствительности. Несплошности в СС № 1 (см. рис. 7), выявленные на контрольном уровне, соответствуют порам или шлаковым включениям, обнаруженным РГК, эти несплошности зафиксированы на контрольном уровне с условными протяженностями 12 и 10 мм. На рис. 7 приведено фото с пленки радиографического контроля СС № 1.

Для несплошностей, выявленных РГК определено соответствие АУЗК-сигналам, которые, как правило, имеют амплитуду ниже контрольного уровня и небольшую протяженность, т.е. являются допустимыми по нормам НП-084-15. Кроме того, по результатам РГК фиксируются несплошности во всем объеме сварного шва, включая валик усиления. При АУЗК несплошности, находящиеся в валике усиления не фиксируются, что также приводит к различиям в зарегистрированных данных РГК и АУЗК.

По результатам анализа при сопоставлении данных ультразвукового и рентгенографического контроля было подтверждено качественное согласие полученных результатов по выявлению несплошностей в СС. Наблюдаемые отличия при выявлении несплошностей определяются методическими особенностями РГК и АУЗК.

Методика на основании приемочных испытаний и результатов опытно-промышленной эксплуатации была одобрена в Ростехнадзоре, внедрена и широко используется при контроле сварных соединений трубопроводов на многих российских АЭС.

АУЗК аустенитных сварных соединений приварки патрубков трубопроводов Ду500 к корпусам главных запорных задвижек реакторов ВВЭР-440 с применением системы «АВГУР 5.2»

Трудности контроля этого объекта связаны с большими расстояниями прохождения ультразвуковых волн в аустенитной стали (160 мм до сварного шва) и с использованием отраженных от наклонного дна продольных и поперечных волн. В методике МА.АЭ-П2С/9-К-06 [7], разработанной в НПЦ «ЭХО+» в 2006 году, при проведении контроля используются продольные, поперечные и головные волны с углами ввода 20, 30, 45, 55, 75°. На рис. 8 приведен эскиз главной запорной задвижки и схема прозвучивания. Контроль по методике выполняется для выявления и определения местоположения внутренних несплошностей в СС типа трещин, непроваров, несплавлений, включений и других дефектов металла. Выявление несплошностей осуществляется во всем объеме наплавленного металла сварного соединения (включая его корень), линию сплавления с основным металлом, а также

примыкающие к нему участки основного металла со стороны патрубка. Контроль по методике проводится в поисковом и измерительном режимах. Контролируются все участки основного и наплавленного металла СС, где контрольный уровень чувствительности превосходит уровень шума на 6 дБ и более.

По полученным данным в поисковом и измерительном режимах контроля с использованием когерентных методов вычислительной многочастотной акустической голографии восстанавливаются изображения несплошностей. По результатам контроля в измерительном режиме уточняются условные размеры несплошностей.

Комплект ПЭП включает преобразователи, основные параметры которых приведены в табл. 6.

Перед проведением контроля для каждого ПЭП, используемого при АУЗК, определяются основные параметры ПЭП в составе системы на контрольном образце СО-2 или СО-3. Полученные параметры ПЭП необходимы для последующей автоматической настройки временной регулировки чувствительности.

На рис. 9 приведены результаты контроля СС ГЗЗ на АЭС: А-сканы и восстановленные изображения конструктивного отражателя 1 и несплошности в сварном шве 2. На изображении красными линиями нанесен профиль сварного соединения с положением сварного шва в соответствии с координатами при сканировании. Наблюдается конструктивный отражатель 1 и несплошность в наплавленном металле.

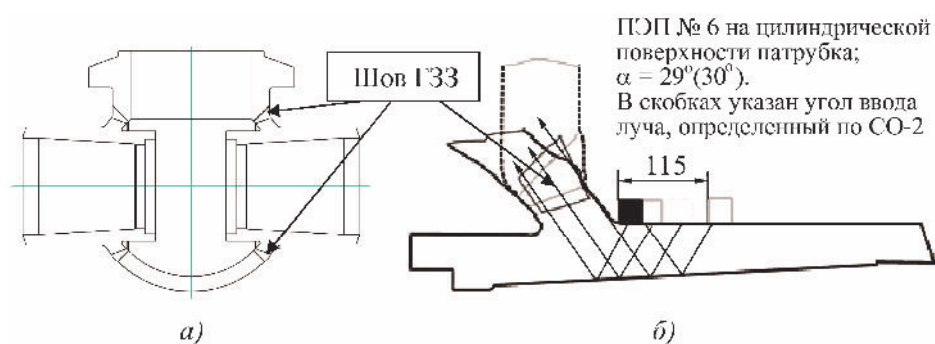


Рис. 8. Эскиз главной запорной задвижки (а) и схема прозвучивания для угла ввода 30° в шве ГЗЗ (б)

6. Основные параметры ПЭП

| № | ПЭП | Центральная частота, МГц | Полоса частот (на уровне 20 дБ) МГц | Тип волны | Угол ввода, ° (по СО-2) | Глубина прозвучивания по лучу в области сварного шва, мм | Стрела, мм |
|---|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------|--|------------|
| 1 | 2L1.8R45 раздельно-совмещенный | 1,8 ± 0,18 | 1,7 ± 0,3 | L | 45 ± 3 | 60 | 15 ± 3 |
| 2 | 2L1.8R55 раздельно-совмещенный | 1,8 ± 0,18 | 1,7 ± 0,3 | L | 55 ± 3 | 40 | 15 ± 3 |
| 3 | 2L1.8R75 раздельно-совмещенный | 1,8 ± 0,18 | 1,7 ± 0,3 | L | 75 ± 3 | 20 | 15 ± 3 |
| 4 | 2Н1.8R раздельно-совмещенный | 1,8 ± 0,18 | 1,7 ± 0,3 | Головная | >75 | 10 | 15 ± 3 |
| 5 | L1.8D45 совмещенный | 1,8 ± 0,18 | 1,7 ± 0,3 | L | 45 ± 3 | – | 15 ± 3 |
| 6 | L1.8D20 совмещенный | 1,8 ± 0,18 | 1,7 ± 0,3 | L | 20 ± 3 | – | 15 ± 3 |
| 7 | L1.8D30 совмещенный | 1,8 ± 0,18 | 1,7 ± 0,3 | L | 30 ± 3 | – | 15 ± 3 |
| 8 | S1.8D45 совмещенный | 1,8 ± 0,12 | 1,7 ± 0,3 | S | 45 ± 3 | – | 15 ± 3 |

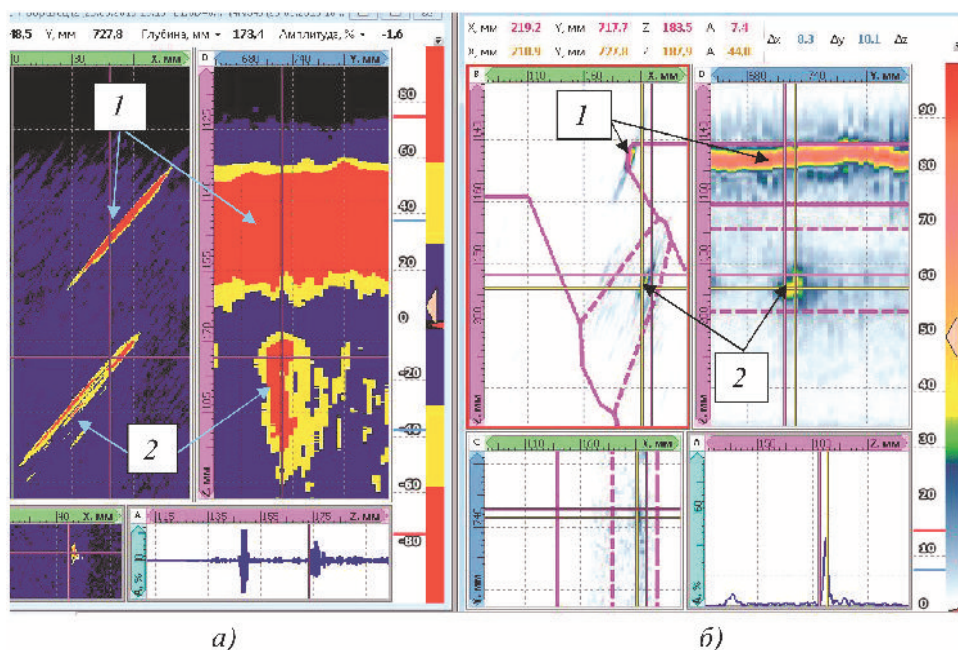


Рис. 9. А-сканы (а) и изображения отражателей в реальном сварном соединении (б)

По договору сопровождения были проведены дополнительные испытания этой методики: на одном из действующих блоков реакторной установки ВВЭР-440 в 2009 году был выполнен контроль 24 швов СС ГЗЗ. Измерительным АУЗК установлено, что основные несплошности расположены в корне шва. При сопоставлении данных АУЗК с результатами РГК СС установлено их хорошее согласие, что являлось необходимым условием внедрения этой методики на АЭС.

Детальный анализ изображений с учетом трансформаций волн в СС ГЗЗ приведен в статье [8].

Ультразвуковой эксплуатационной контроль сварных соединений ГЗЗ на АЭС должен выполняться по доработанной в 2018 г. методике в соответствии нормами НП-084-15, по которым для определения браковочного и контрольного уровней чувствительности используются специально разработанные настроечные образцы с отражателями в виде боковых цилиндрических отверстий диаметром 5 мм на различных глубинах сварного шва. Изменения в этой методике утверждены в концерне «Росэнергоатом».

В настоящее время методика МА.АЭ-П2С/9-К-06 продолжает активно использоваться при эксплуатационном контроле на АЭС с РУ ВВЭР-440.

АУЗК аустенитных и разнородных сварных соединений трубопроводов аварийного подвода питательной воды к парогенератору энергоблоков с реакторной установкой ВВЭР-440 с использованием технологии фазированных решеток

Объектами контроля являются три типа кольцевых композитных СС с № 21, 44, 31, выполненные из перлитной стали 22К и аустенитной стали 08Х18Н10Т [9]. Размеры СС приведены в табл. 7. Контроль осуществляется с применением дефектоскопа «АВГУР-АРТ» методом ЦФА. При выполнении контроля выявляются несплошности с определением эквивалентной отражающей способности, условных размеров и местоположения в СС, возникающих в период его эксплуатации, а также при монтаже и ремонте (непровары, несплавления, поры, трещины и другие технологические несплошности), имеющие продольную и поперечную ориентацию относительно оси СС.

7. Параметры сварных соединений

| Сварные соединения | Диаметр, мм | Толщина СС, мм |
|---|-------------|----------------|
| Композитные сварные соединения приварки переходника к патрубку подвода теплоносителя (№ 21) | 380 | 30 |
| Композитные сварные соединения приварки переходника к патрубку сброса теплоносителя (№ 44) | 128 | 15 |
| Композитные сварные соединения приварки переходника к патрубку впрыска теплоносителя (№ 31) | 175 | 15 |

Методика обеспечивает выявление несплошностей, расположенных во всем объеме наплавленного металла СС, а также в примыкающих к нему участках основного металла по обе стороны от шва:

- фиксируются несплошности с отражающей способностью, равной или более контрольного уровня в соответствии с НП-084-15;

- определяются геометрические параметры несплошностей в системе координат объекта контроля (положения и протяженности).

В методике даются характеристики ФР, которые используются при контроле, основные параметры применяемых ФР приведены в табл. 8.

Перед проведением УЗК для каждой ФР выполняется процедура калибровки, при которой определяется равномерность чувствительности пьезоэлементов и исправность каждого из каналов. Для настройки чувствительности и определения контрольного уровня по методике применяются настроечные образцы. Контрольный уровень чувствительности устанавливается в соответствии с требованиями НП-084-15:

- для СС № 21 (НО 21) по опорному отражателю в виде бокового цилиндрического отверстия диаметром 4 мм (восемь отверстий);

- для СС № 44 (НО 44) и № 31 (НО 31) по опорному отражателю в виде бокового цилиндрического отверстия диаметром 3 мм (пять отверстий).

8. Основные параметры ФР

| ФР | Центральная частота, МГц | Количество пьезоэлементов | Шаг между элементами, мм |
|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| ИМ-2.25-16elts | $2,25 \pm 0,255$ | 16 | 1,2 |

На рис. 10 приведены схемы прозвучивания для всех типов СС.

Для контроля применяется специализированное сканирующее устройство, которое устанавливается на все три контролируемых объекта при перестройке параметров сканера и использовании одного из двух треков, входящих в комплект сканирующих устройств. Длина каретки для механического перемещения АР поперек оси СС позволяет выполнять контроль без перестановок сканирующего устройства. На рис. 11 приведены сканеры, используемые при контроле этих СС.

Для подтверждения работоспособности методики на реальных объектах АЭС были изготовлены испытательные образцы, в том числе испытательный образец СС № 31 с внесенными несплошностями ИО 31 (рис. 12).

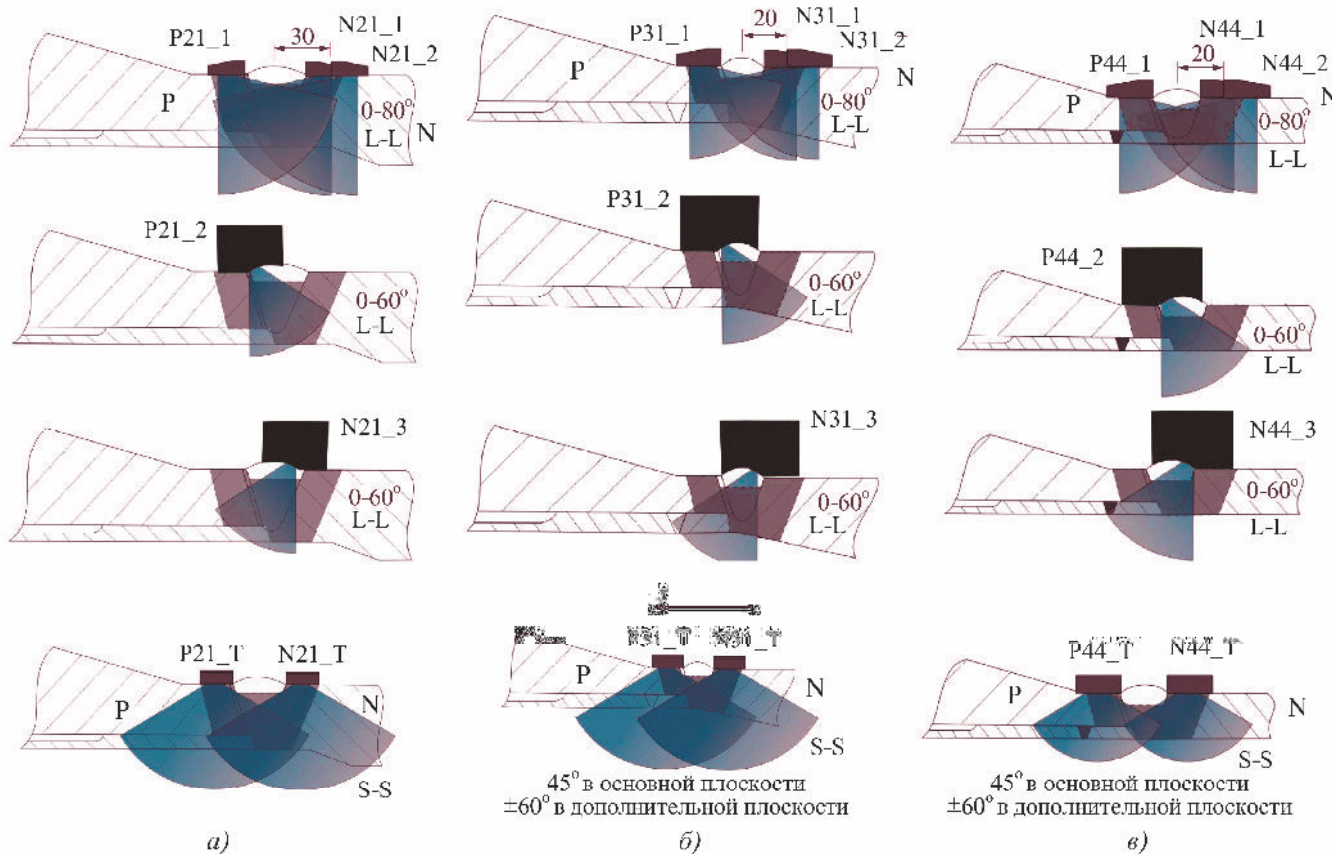


Рис. 10. Схемы прозвучивания СС № 21 (а), 31 (б), 44 (в)

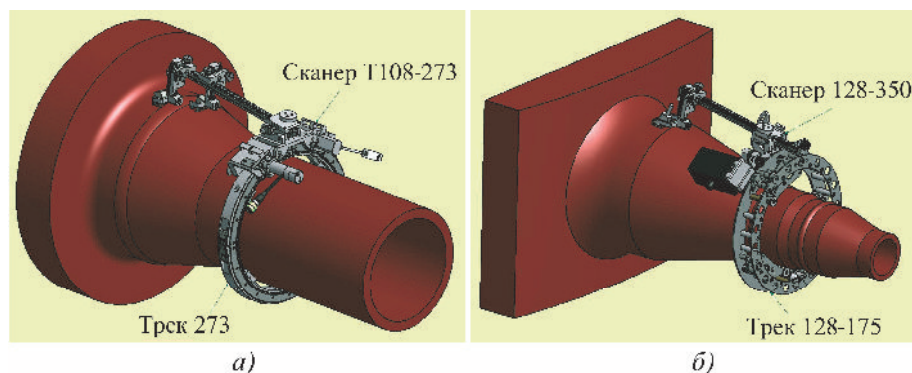


Рис. 11. Сканеры, используемые для контроля СС:

a – сканер T108-273 с треком на патрубке сосуда; *б* – сканер T128-380 (с удлиненной веткой каретки X) на переходнике к патрубку впрыска теплоносителя

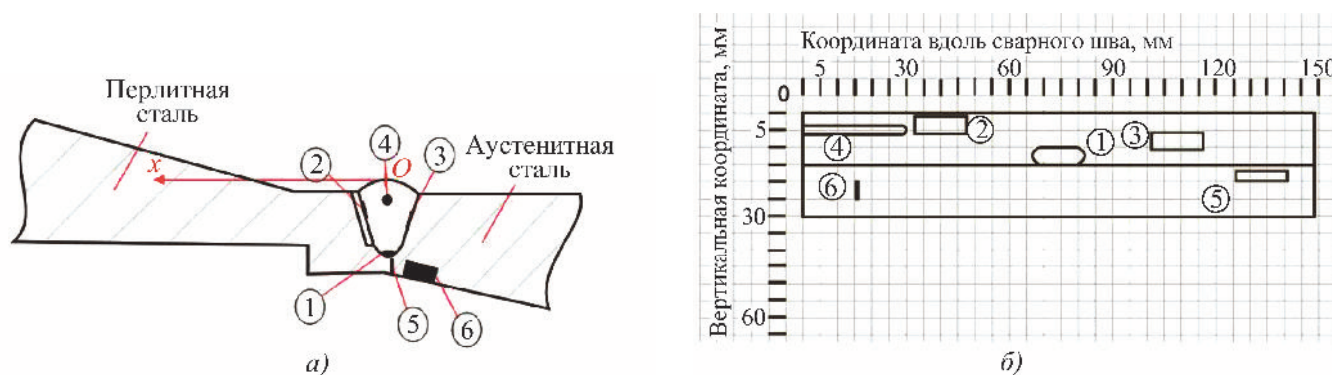


Рис. 12. Эскиз (*a*) и дефектограммы (*б*) одного из испытательных образцов СС № 31 – ИО 31

На рис. 13 – 15 показаны результаты АУЗК испытательного образца ИО 31. Измерения на образцах выполнялись дефектоскопом «АВГУР-АРТ», ФР ИМ-2.25-16 № В101, применялись продольные волны. Номера отражателей (1 – 6) соответствуют эскизу образца ИО 31 на рис. 12, *a* и отмечены на рис. 13 – 15.

Эксперименты с ИО 31 подтвердили возможность выявления всех внесенных дефектов. Аналогичные эксперименты были выполнены и для СС № 21 и 44, подтвердив возможность выявления дефектов во всей области контроля на заданном уровне чувствительности.

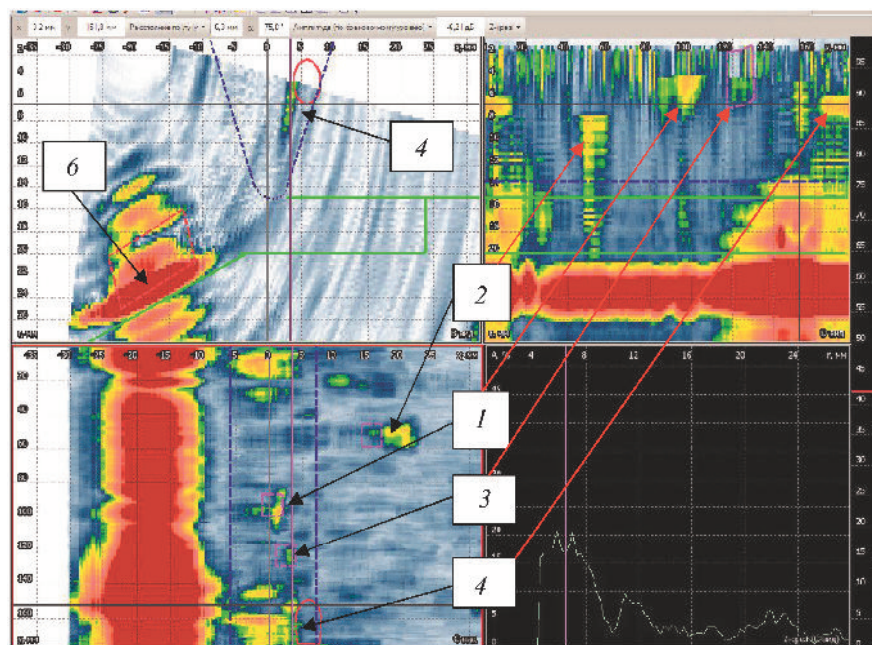


Рис. 13. Изображения по результатам измерений с ИО 31, сечение в области паза *б* и отверстия *4*. Несплошности выявляются с амплитудами меньше амплитуд отверстий бокового сверления, исключая паз *б*

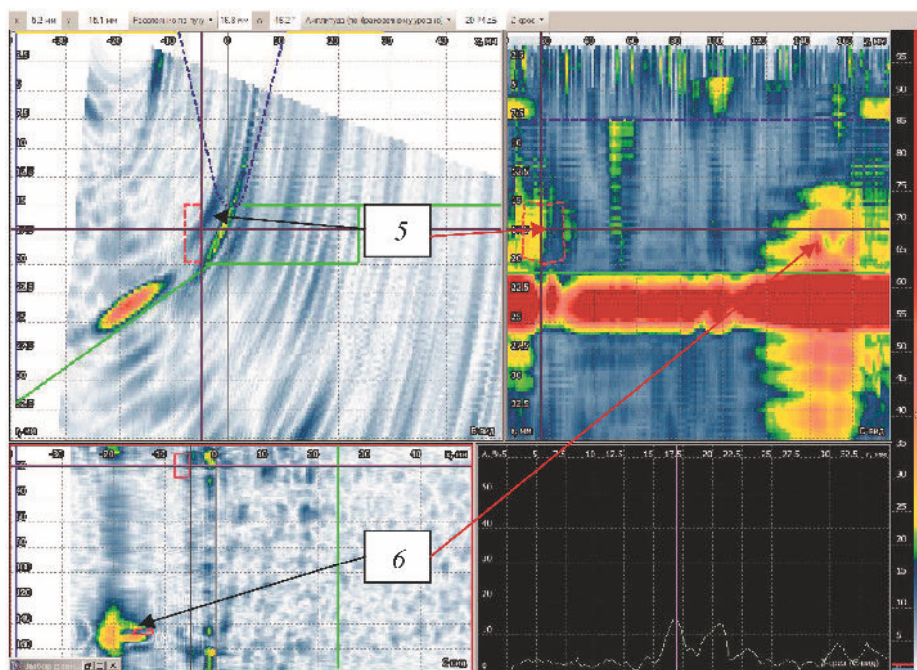


Рис. 14. Изображения при контроле ИО 31, сечение в области паза 5

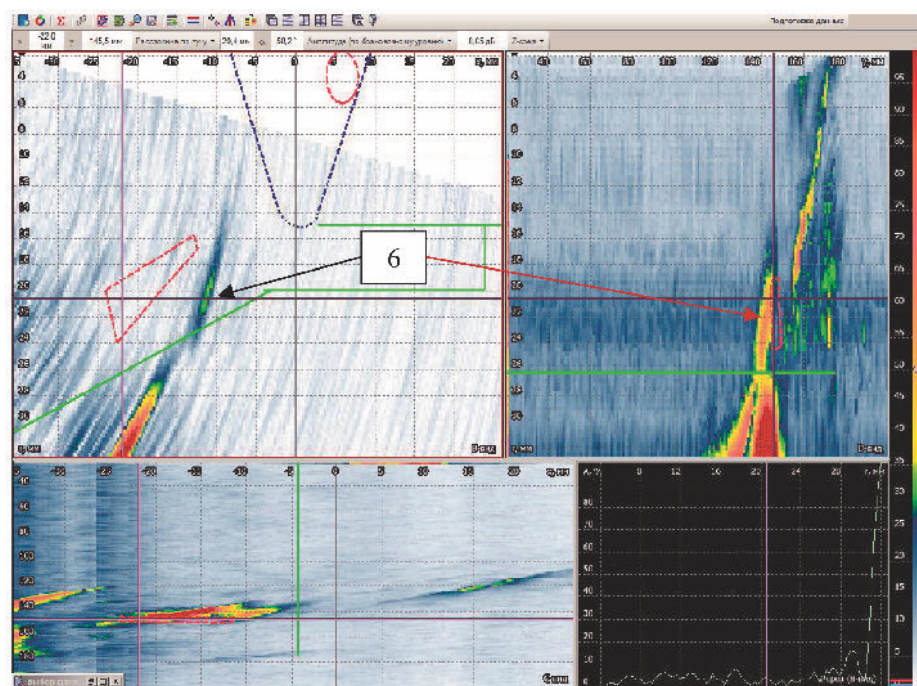


Рис. 15. Изображения в измерениях с ИО 31 на поперечные дефекты, выявляется поперечный дефект 6

Методика АУЗК аустенитных и разнородных сварных соединений трубопроводов аварийного подвода питательной воды к парогенератору энергоблоков с РУ ВВЭР-440 внедрена на российских АЭС с РУ ВВЭР-440 и эффективно применяется при эксплуатационном ультразвуковом контроле действующих блоков российских АЭС.

Выводы

В статье рассмотрены методы повышения качества контроля аустенитных и разнородных СС и их применение при разработке методик АУЗК сварных соединений трубопроводов АЭС.

Разработанная методика АУЗК ФР аустенитных и разнородных сварных соединений с толщинами

стенки от 5 до 20 мм и диаметрами более 108 мм трубопроводов на АЭС (МТ 1.2.1.15.001.0990–2014) успешно прошла приемочные испытания и опытно-промышленную эксплуатацию (ОПЭ) на действующей российской АЭС.

При ОПЭ методики МТ 1.2.1.15.001.0990–2014 был выполнен ультразвуковой контроль специально изготовленного испытательного образца, сопоставление результатов АУЗК, РГК, металлографии этого образца продемонстрировало хорошее согласие. В рамках работ по ОПЭ этой методики были проведены работы по УЗ-контролю сварных соединений на действующей АЭС, были выполнены сопоставления ультразвукового и радиографического контроля, показавшие хорошее соответствие результатов. В настоящее время методика МТ 1.2.1.15.001.0990-2014 активно применяется на всех российских АЭС.

В статье приведены основные параметры методики АУЗК аустенитных сварных соединений приварки патрубков трубопроводов Ду500 к корпусам главных запорных задвижек реакторов ВВЭР-440 с применением системы «АВГУР 5.2» (МА.АЭ-П2С/9-ПК-06, 2006 г.), которая в 2018 году была доработана в соответствии с действующими нормами НП-084-15 и утверждена в концерне «Росэнергоатом».

Продемонстрированы основные особенности методики АУЗК аустенитных и разнородных СС трубопроводов аварийного подвода питательной воды к парогенератору энергоблоков с реакторной установкой ВВЭР-440 с использованием ФР (МТ 2.1.1.15.001.0215–2014). Приведены конструктивные особенности сканеров, используемых при АУЗК СС № 21, СС № 31 и СС № 44. При разработке методики было выполнено математическое моделирование контроля СС № 21, СС № 31 и СС № 44. Приведены конструкция испытательного образца и изображения отражателей при проведении испытаний методики МТ 2.1.1.15.001.0215–2014 на примере СС № 31.

Библиографический список

1. **Пространственно-временная** обработка сигналов / И. Я. Кремер, А. И. Кремер, В. М. Петров и др.; под ред. И. Я. Кремера. М.: Радио и связь, 1984. 223 с.
2. **Ермолов И. Н.** Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
3. **Базулин Е. Г., Кокколев С. А.** Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решёток // Дефектоскопия. 2013. № 5. С. 45 – 58.
4. **Базулин Е. Г.** Получение изображения рассеивателей с продольным сверхразрешением по многочастотным цифровым акустическим голограммам при построении AR-модели спектров эхосигналов // Акуст. журн. 1993. Т. 34. № 2. С. 213 – 222.
5. **МТ 1.2.1.15.001.0990–2014.** Автоматизированный ультразвуковой контроль фазированными решетками разнородных и аустенитных кольцевых сварных соединений трубопроводов с толщинами стенки от 5 до 20 мм и диаметрами более 108 мм энергоблоков АЭС: методика. М., 2014.
6. **Федеральные нормы** и правила в области использования атомной энергии. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций: НП-084-15. М., 2015.
7. **Методика** автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений приварки патрубков трубопроводов первого контура Ду500 к корпусам запорных задвижек реактора ВВЭР-440 с применением системы «АВГУР 5.2» МА.АЭ-П2С/9-ПК-06. 2006 г., с изменением № 1 2018 г. / АО «Концерн «Росэнергоатом». М., 2018.
8. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Тихонов Д. С.** Математическое Моделирование при разработке и аттестации методик УЗК // Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 137 – 152.
9. **МТ 2.1.1.15.001.0215-2014.** Автоматизированный ультразвуковой контроль разнородных сварных соединений приварки переходника к патрубку подвода теплоносителя (№ 21), приварки переходника к патрубку сброса теплоносителя (№ 44), приварки переходника к патрубку впрыска теплоносителя (№ 31) компенсаторов объема ВВЭР-440 В-213 с применением технологии фазированных решеток: методика, с изменением № 1 2018 г. / АО «Концерн «Росэнергоатом». М., 2018.

ФР-ДЕФЕКТОСКОП: ПОЧЕМУ 32 КАНАЛА ЛУЧШЕ, ЧЕМ 16



А. Е. Базулин,
гл. конструктор, канд. техн.
наук



Е. Г. Базулин,
зам. ген. директора
по науч. вопросам,
нач. системного отдела,
д-р техн. наук



А. Х. Вopilкин
д-р техн. наук, проф.,
ген. директор



Д. С. Тихонов,
зам. ген. директора,
канд. техн. наук

Для визуализации внутреннего объема объектов контроля (ОК), как правило, используются две технологии: технология фазированных антенных решеток (ФАР) [1], которая на сегодняшний день является наиболее распространенной, и технология цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [2]. В настоящее время на рынке представлено множество дефектоскопов как для ручного контроля, так и для автоматизированного с разным количеством каналов – от 16 до 1024 и, естественно с разными ценами: от 10 000 до 1 000 000 USD. Наибольшей популярностью для УЗК пользуются дефектоскопы с числом независимых каналов 16, 32 или 64, которые позволяют проводить физическую фокусировку ультразвукового поля антенной решетки с таким же числом каналов. Как правило, современные дефектоскопы с помощью коммутатора увеличивают число контактов до 128, что позволяет подключить четыре 32-элементных антенных решетки при числе независимых каналов дефектоскопа большем или равном 32. Естественно, возникает вопрос: какой дефектоскоп лучше приобрести, не войдя, с од-

Проанализированы преимущества применения 32-канальных дефектоскопов по сравнению с 16-канальными. В численных экспериментах продемонстрировано, что фронтальная разрешающая способность изображения выше при использовании 32 элементов. На больших толщинах лучше работать 32-элементной решеткой, так как ближняя зона больше. Использование антенных матриц эффективнее для 32 каналов (8 на 4), так как можно повысить фронтальное разрешение вдоль оси шва. Наличие у дефектоскопа 32 каналов позволяет использовать две 16-элементных антенных решетки слева и справа от шва для получения объединенного изображения по N-, P- и NP-каналам. Большой захват у 32-элементной решетки дает возможность быстрее проводить сплошную толщинометрию по сравнению с использованием антенной решетки из 16 элементов.

ной стороны, в излишние расходы и, с другой стороны, не потеряв качество изображения отражателей?

Кратким ответом на вопрос: почему 32 канала лучше 16, служат следующие утверждения:

- фронтальная разрешающая способность изображения выше при использовании 32 элементов вместо 16;
- ближняя зона у 32-элементной решетки больше, поэтому для контроля объекта большой толщины лучше использовать дефектоскоп с 32 и более независимыми каналами;
- изображения по акустической схеме, когда используется прямой луч и однократно отраженный, для 32-элементной решетки лучше;
- если апертуру 16-элементной решетки сделать такой же, что и у 32-элементной решетки за счет увеличения зазора, то уровень «боковых лепестков» будет неприемлемо высок;
- дефектоскоп с 32 независимыми каналами позволяет использовать антенную матрицу из 8×4 элементов, что позволит повысить качество изображения отражателей;
- 32 канала позволяют использовать две антенных решетки из 16 элементов, размещаемых слева и справа от шва для получения объединенного изображения по N-, P- и NP-каналам, на котором полностью будет восстановлено изображение границы отражателя;
- больший захват у 32-элементной решетки позволяет быстрее проводить сплошную толщинометрию.

Рассмотрим более подробно приведенные утверждения на примере изображений эхосигналов, восстановленных методом ЦФА по эхосигналам, рассчитанным в программе CIVA [3].

Расчеты, если это не оговорено специально, проводились для антенных решеток из 16 или 32 элементов с шириной элемента 0,9 мм и зазором между элементами 0,1 мм. Центральная частота излучаемых сигналов была равна 5 МГц.

Фронтальная разрешающая способность изображения выше при использовании 32 элементов вместо 16

Это утверждение, конечно же, справедливо для случая, если размеры элемента антенной решетки и зазор между элементами совпадают.

На рис. 1 показано ЦФА-изображение двух отверстий бокового сверления диаметром 1 мм восстановленное по экосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б) расположенных на глубине примерно 14 мм в образце толщиной 20 мм. Контуры отверстия и дна образца показаны на рисунках линиями черного цвета. Расстояние между центрами отверстий бокового сверления составляет около 2 мм, и их удалось разрешить только при использовании 32-элементной решетки. Отметим, что блик, сформированный импульсом обегания-соскальзывания на изображении, полученном антенной решеткой из 32 элементов, примерно на 6 дБ меньше, чем для 16-элементной антенной решетки.

Так как ближняя зона у 32-элементной решетки для стали на поперечной волне составляет около 140 мм, а для 16 – около 20 мм, то, конечно же, работа на глубинах больше 30...40 мм требуют использования 32-элементной решетки. На рис. 2 показано ЦФА-изображение двух отверстий бо-

вого сверления диаметром 1 мм, восстановленное по экосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б), расположенных на глубине примерно 54 мм в образце толщиной 60 мм. Контуры отверстия и дна образца показаны на рисунках линиями черного цвета. Расстояние между центрами отверстий бокового сверления было равно около 3,6 мм, и их удалось разрешить только при использовании 32-элементной решетки. Отметим, что на рис. 2, а ложный блик, сформированный по акустической схеме (излучение на прямом луче, а прием на однократно отраженном), имеет амплитуду больше на 6 дБ по сравнению с рис. 2, б.

Недостаточная фронтальная разрешающая способность может привести к тому, что блики от конструктивных отражателей могут замаскировать блики вершины придонной трещины в области трапециевидальной проточки. На рис. 3, а показано ЦФА-изображение модели трещины высотой 4 мм, расположенной в области проточки высотой 2 мм в образце толщиной 20 мм, восстановленное по экосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б). Контуры трещины и дна образца показаны на рисунках линиями черного цвета. На рис. 3, а блик от вершины трещины теряется на фоне блика проточки, и только при использовании 32-элементной решетки данный блик легко обнаруживается (рис. 3, б). Отметим, что на ЦФА-изображении на рис. 3, а очень хорошо восстановилось изображение наклонной области проточки.

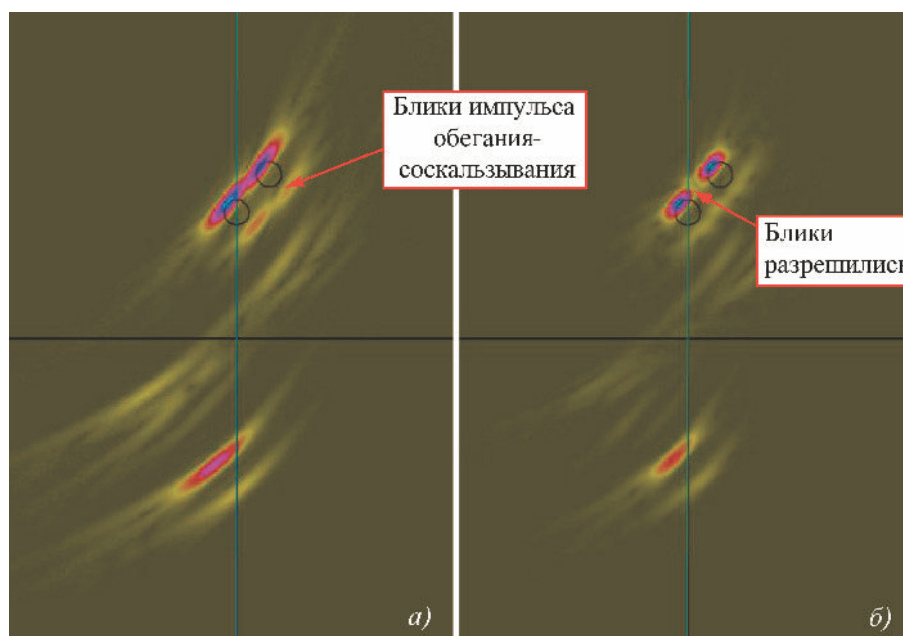


Рис. 1. ЦФА-изображение двух отверстий бокового сверления диаметром 1 мм на глубине примерно 14 мм, восстановленное по экосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б)

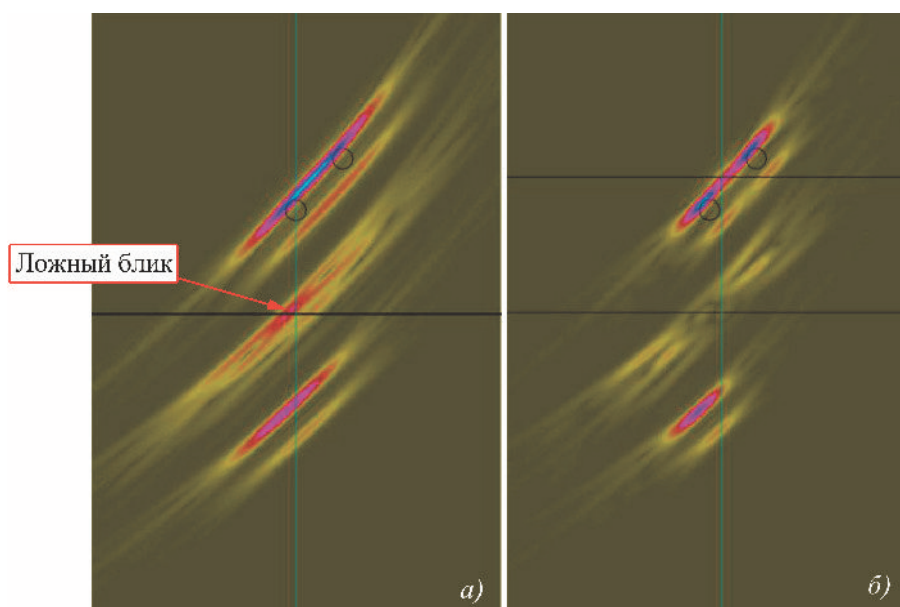


Рис. 2. ЦФА-изображение двух отверстий бокового сверления диаметром 1 мм на глубине 54 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 (б) элементов

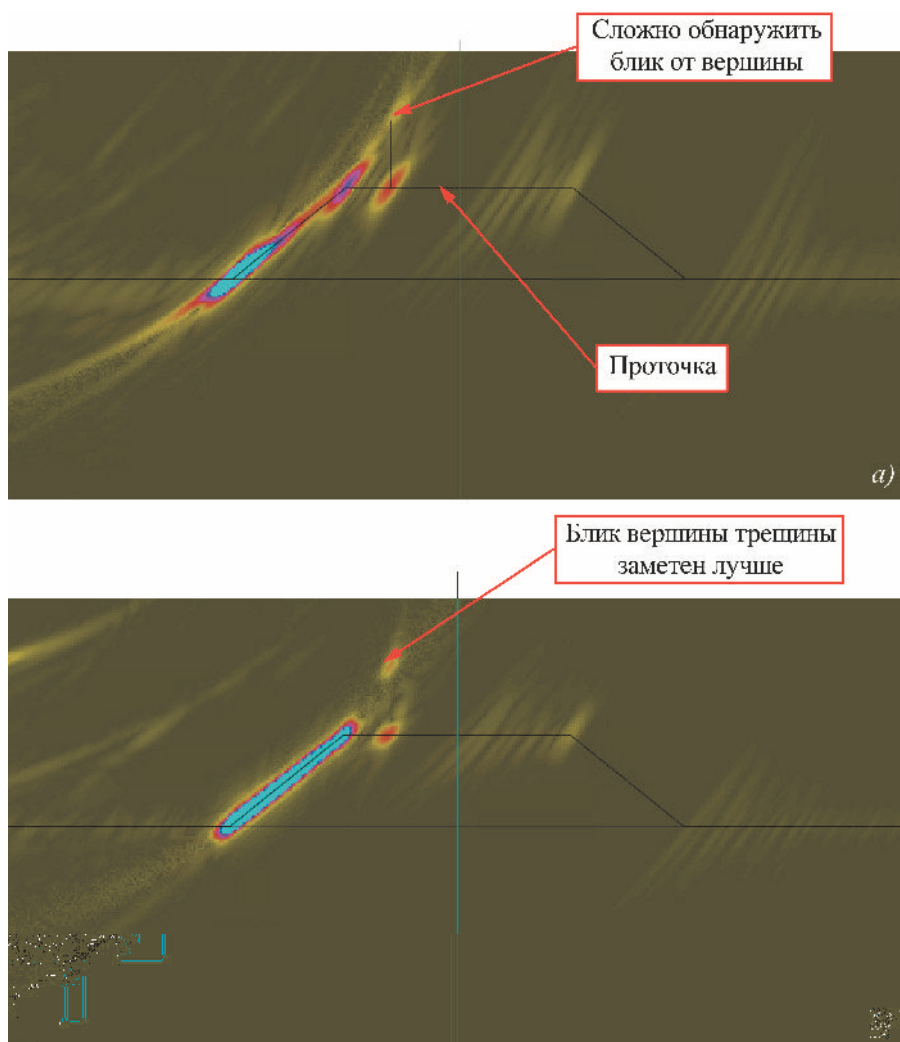


Рис. 3. ЦФА-изображение модели трещины высотой 4 мм, расположенной в области проточки высотой 2 мм в образце толщиной 20 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б)

Что будет, если апертуру 16-элементной решетки сделать такой же, что и у 32-элементной решетки, за счет увеличения зазора?

Так как разрешающая способность изображения, сформированного антенной решеткой, определяется ее размером, то можно, увеличив зазор между элементами 16-элементной антенной решетки, сделать такую же апертуру, как и у 32-элементной. Если зазор у 16-элементной решетки увеличить с 0,1 до 1,1 мм, то ее апертура будет примерно такой же, что и у 32-элементной. На рис. 4 показан результат восстановления изображения двух отверстий бокового сверления. По сравнению с изображением на рис. 1, б в полученном изображении уровень «боковых лепестков» увеличился более чем на 12 дБ, но фронтальное разрешение обоих изображений одинаковое. Это связано с тем, что шаг между центрами элементов антенной решетки с 1 мм увеличился до 2 мм.

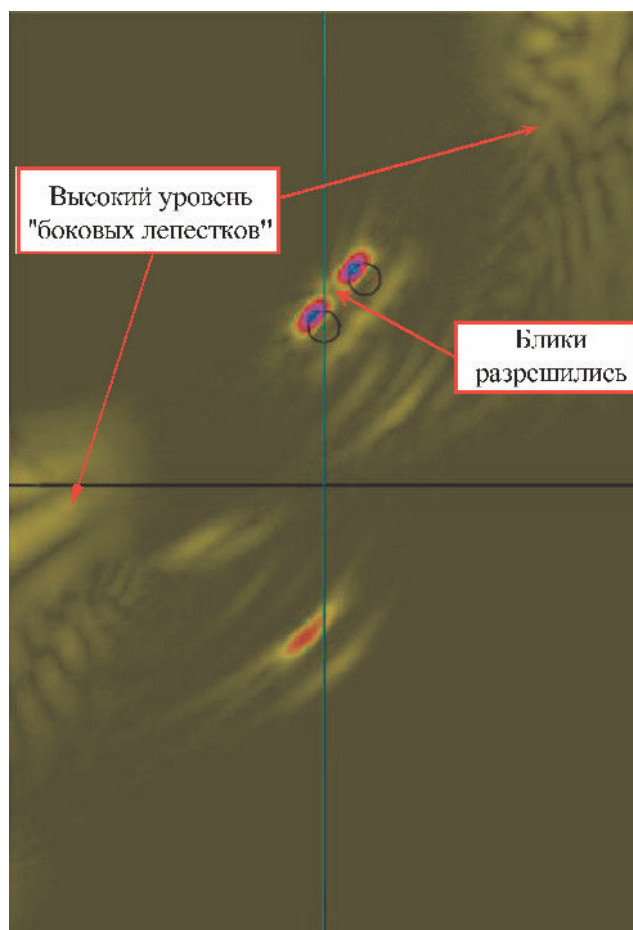


Рис. 4. ЦФА-изображение двух отверстий бокового сверления диаметром 1 мм на глубине примерно 14 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 с зазором между краями элементов 1,1 мм

Изображения по акустической схеме с одним отражением от дна

В практике ультразвукового контроля блик вершины придонной трещины может затеряться в шуме. Подобная ситуация показана на рис. 3, а – блик вершины придонной трещины маскируется расплывшимся бликом выточки. По изображению на рис. 3, а можно сделать вывод о том, что обнаружен корень придонной трещины, но оценить ее высоту, в отличие от изображения на рис. 3, б, достаточно сложно.

Уточнить высоту трещины можно по изображению, восстановленному по акустической схеме с одним отражением от дна, когда отражатель освещается на прямом луче, а прием эхосигналов осуществляется с однократным отражением от дна. Схематическое распространение лучей показано на рис. 5 вверху справа. На этом же рисунке показано изображение трещины высотой 5 мм в объекте контроля толщиной 20 мм, полученное антенной решеткой из 16 (а) и 32 элементов (б). Если оценивать высоту придонной трещины по уровню желтого цвета, что составляет уровень примерно –6 дБ от максимальной амплитуды блика, то с помощью 32-элементной антенной решетки ее высоту можно оценить как 6 мм (ошибка 20 %), для 16-элементной оценка будет 8 мм (ошибка около 60 %).

Восстановление изображений по N-, P- и NP-каналам

Наличие 32 независимых каналов позволяет использовать две 16-элементные антенные решетки слева и справа от шва для получения объединенного изображения по N-, P- и NP-каналам. Такое объединенное изображение позволяет получить информацию о типе отражателя, так как восстанавливается вся граница отражателя.

В статье [4] продемонстрирована возможность получения объединенного изображения по изображениям по N-, P- и NP-каналам, на котором можно восстановить границы отражателя. Измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования проводились 64-канальным ЦФА-дефектоскопом «АВГУР-АРТ», разработанным и изготавливаемым в Научно-производственном центре «ЭХО+» [5]. Для регистрации использовались две 32-элементные антенные решетки с эффективной частотой 5 МГц, размерами элементов 0,9 мм и зазором между ними 0,1 мм. Антенные решетки были установлены на призмы из рексолита с углом наклона 35°.

Акустический канал – это настройка аппаратуры, описывающая порядок работы в режиме двойного сканирования одной или двух антенных решеток, значение коэффициента усиления приемника, параметры зондирующего импульса, временную апертуру регистрации эхосигналов и пр.

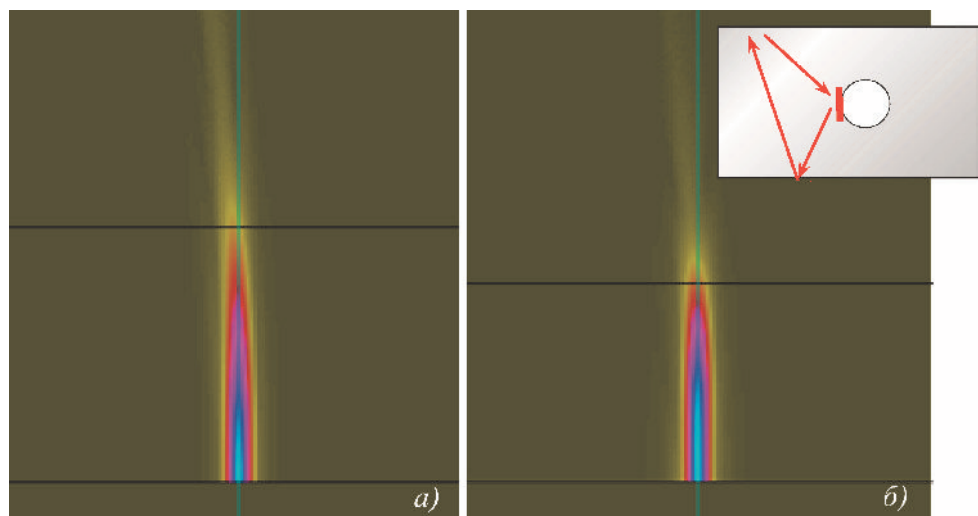


Рис. 5. ЦФА-изображение трещины высотой 5 мм в объекте контроля толщиной 20 мм полученное антенной решеткой из 16 (а) и 32 элементов (б) по акустической схеме с одним отражением от дна объекта контроля

Отверстие диаметром 2 мм на глубине 6 мм в образце толщиной 18 мм

Образец толщиной 18 мм с отверстием бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 6 мм предназначен для имитации объемного дефекта, расположенного у поверхности. На рис. 6, а показано одно изображение, восстановленное на прямом луче на поперечной волне по эхосигналам N-канала. Сделать вывод о форме отражателя крайне сложно, так как удалось восстановить, хоть и с высоким фронтальным разрешением, только часть

границы отверстия бокового сверления. Наличие блика, сформированного волной обегания, очень сложно достоверно связать с бликом границы отражателя, и поэтому этот признак трудно применить на практике. Объединенное изображение, полученное по каналам с N-, P- и NP-сторон по акустическим схемам на поперечной волне на прямом и однократно отраженном от дна лучах, позволяет восстановить полностью границу отверстия бокового сверления, по которому с помощью маркеров можно определить его диаметр (рис. 6, б).

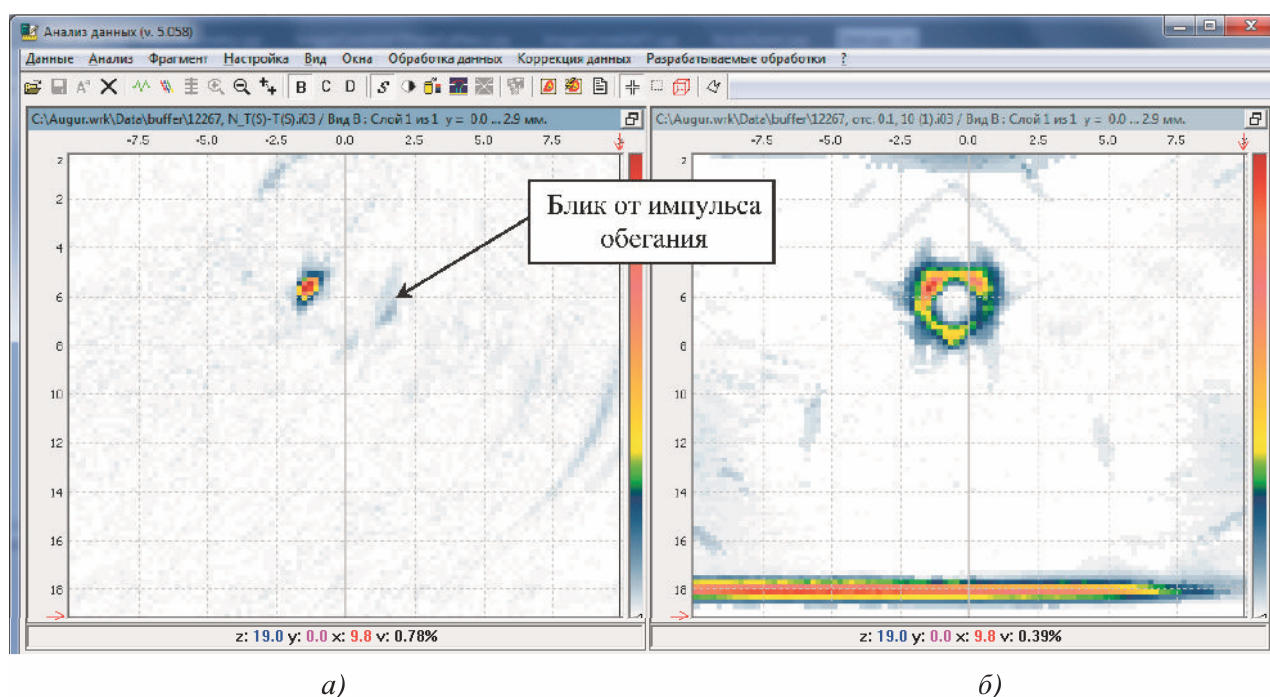


Рис. 6. Изображение границы отверстия диаметром 2 мм, полученное по эхосигналам N-канала (а) и по эхосигналам N-, P- и NP-каналов (б)

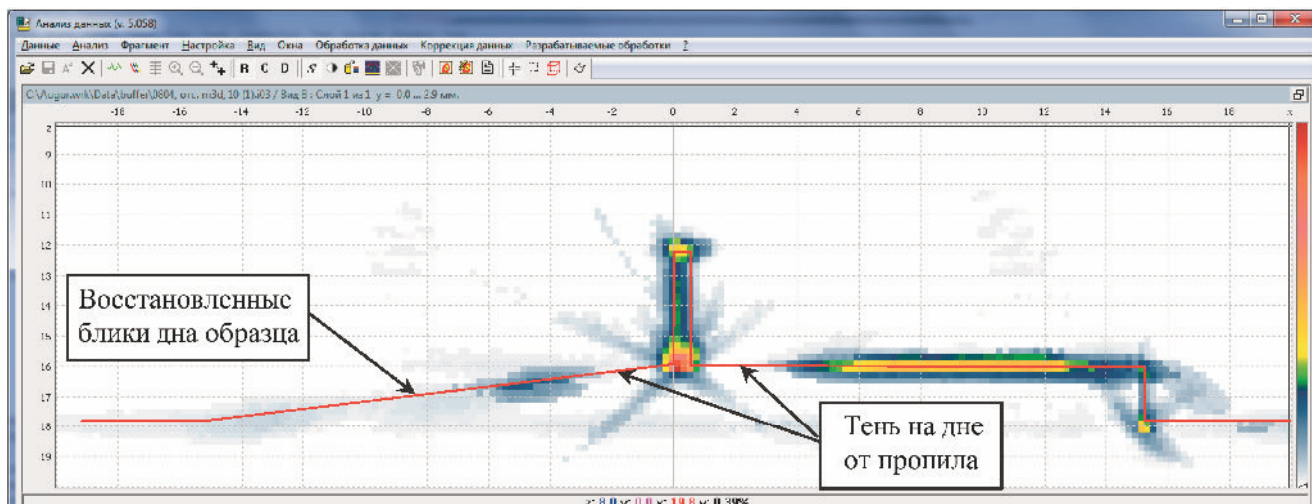


Рис. 7. Изображение дна и границы паза высотой 4 мм, полученное по эхосигналам N-, P- и NP-каналов

Придонный паз высотой 4 мм в образце толщиной 18 мм с неровным дном

Образец с пропилом шириной 0,5 мм и высотой 4 мм в образце толщиной 18 мм с неровным дном предназначался для имитации придонной трещины. На рис. 7 показано объединенное изображение, полученное по каналам с N-, P- и NP-сторон по акустическим схемам на поперечной волне на прямом и однократно отраженном от дна лучах. Контуры образца показаны линиями красного цвета. По данному изображению можно получить изображение дна и восстановить практически полностью границу пропила. В качестве дополнительного признака наличия трещины, растущей от дна объекта контроля, может служить тень от пропила на дне образца.

Большая скорость проведения сплошной толщинометрии для 32-элементной антенной решетки

При сплошной толщинометрии по поверхности объекта контроля сканирует антенная решетка, которая, используя фокусировку, позволяет получить высококачественное изображение дна объекта контроля. Очевидно, что больший захват у 32-элементной антенной решетки позволяет в 2 раза быстрее проводить сплошную толщинометрию, чем в случае использования 16-элементной решетки.

Выводы

Таким образом, можно подвести итоги сравнения ЦФА-изображений, восстановленных по эхо-

сигналам, полученным с использованием антенных решеток из 16 и 32 элементов.

- Для случая двух боковых отверстий из-за лучшего фронтального разрешения эффект применения 32-элементной решетки очевиден (см. рис. 1 и 4).

- Относительная погрешность определения высоты придонной трещины высотой 4 мм на глубине 20 мм при использовании 32-элементной антенной решетки равна примерно 20 %, а при использовании 16-элементной – 60 %.

- Работа с двумя 16-элементными решетками на 32-канальном дефектоскопе позволяет восстановить границу отражателя и сделать обоснованный вывод о типе обнаруженного отражателя.

Библиографический список

1. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <http://www.olympus-ims.com/en/books/>
2. **Воронков В. А., Воронков И. В., Козлов В. Н. и др.** О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64 – 70.
3. **EXTENDE**: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 15.01.2020).
4. **Базулин Е. Г.** Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12 – 22.
5. **«ЭХО+»**: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 15.01.2020).

УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЭХОСИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ CDMA



В. К. Авагян,
инженер третьей
категории



Е. Г. Базулин,
зам. ген. директора
по науч. вопросам,
нач. системного отдела,
д-р техн. наук

Недостатком использования метода цифровой фокусировки антенны (ЦФА) для получения изображения отражателей является большой объем эхосигналов и недостаточно высокая скорость их регистрации. Для ее повышения предлагается одновременно всеми элементами антенной решетки (АР) излучать зондирующие импульсы, сформированные по наборам кодовых последовательностей, используемых в технологии Code Division Multiple Access (CDMA). Измеренные эхосигналы можно декодировать с помощью согласованной фильтрации (СФ) и восстановить изображение отражателей методом комбинированного SAFT (C-SAFT) или же методом максимальной энтропии (МЭ) восстановить изображение без декодирования эхосигналов. Предложенный метод был успешно испытан для получения изображений отражателей в образцах из дюралюминия, стали 20 и стали 40.

В настоящее время в практике ультразвукового контроля (УЗК) широко применяются дефектоскопы, использующие антенные решетки (АР). Для визуализации внутреннего объема объектов контроля (ОК), как правило, применяются две технологии: технология фазированных антенных решеток (ФАР) [1], которая на сегодняшний день является наиболее распространенной, и технология цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [2]. В статье [3], посвященной сравнению возможностей ФАР и ЦФА-дефектоскопов, сделан вывод, что ЦФА-технология более перспективна с алгоритмической точки зрения, но обладает таким недостатком, как большой объем регистрируемых эхосигналов, число которых пропорционально квадрату числа элементов АР. Передача эхосигналов от блока измерения в управляющий компьютер требует много времени, что приводит к снижению скорости регистрации. Данное обстоятельство может оказаться критичным для проведения контроля на ряде объектов, и поэтому задача увеличения скорости регистрации эхосигналов в режиме ЦФА является актуальной.

Еще одна область ультразвукового контроля, где скорость регистрации эхосигналов очень важна, – это медицинская диагностика, так как для получения качественного изображения движущихся внутренних органов требуется предельно уменьшить время регистрации эхосигналов. В медицине для визуализации используются АР, состоящие более чем из сотни элементов. Для получения ФАР-изображения в виде S-скана нужно сфокусировать луч для двухсот и более углов, на что может пона-

добиться время, соизмеримое с характерным временем смещений внутренних органов. В результате получить их качественное изображение не удастся. Регистрация эхосигналов в режиме двойного сканирования позволит сократить время получения ФАР-изображения в несколько раз, но и этого может оказаться недостаточно для качественной визуализации движущихся объектов [4]. Это еще раз подтверждает актуальность решаемой задачи.

Постановка задачи

Методы регистрации эхосигналов и восстановления изображения

Рассмотрим принцип работы ЦФА-дефектоскопа. На первом этапе эхосигналы измеряются при излучении и приеме всеми комбинациями пар элементов антенной решетки [5]. В статье [6] такой режим регистрации эхосигналов называется режимом двойного сканирования, а в статье [7] – режимом Full Matrix Capture (FMC).

Порядок регистрации эхосигналов определяется коммутационной матрицей C размерами $N_e \times N_e$, где N_e – число элементов АР. Если все элементы коммутационной матрицы C равны единице, то за N_e излучений зондирующего импульса каждым элементом будет измерено $N_e \times N_e$ эхосигналов. Для наглядности рассмотрим АР, состоящую из $N_e = 4$ элементов, каждому элементу присвоим свой цвет, совпадающий с цветом эхосигналов при излучении и приеме (рис. 1, слева).

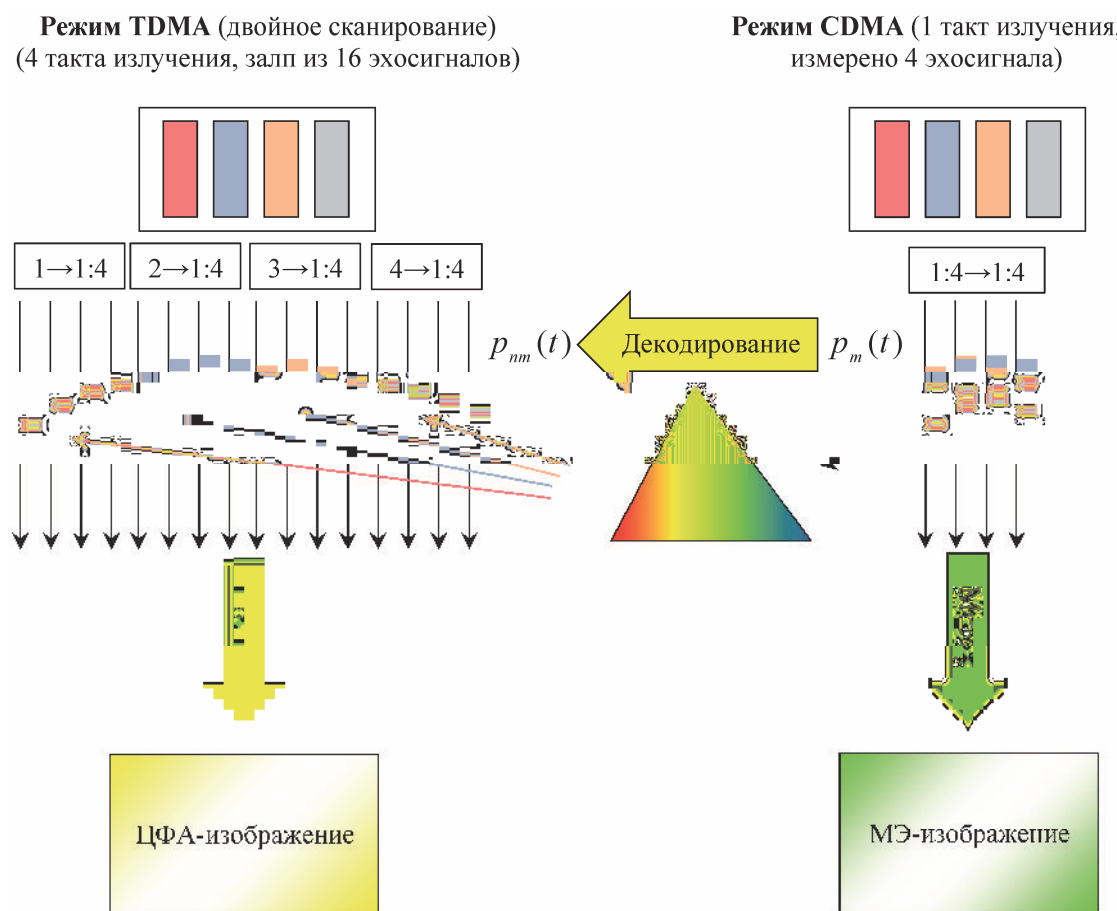


Рис. 1. Схематическое представление регистрации в режиме двойного сканирования и CDMA:
МЭ-изображение – изображение, полученное методом максимальной энтропии (МЭ)

Сначала первый элемент АР излучает зондирующий сигнал, а отраженные эхосигналы регистрируются всеми элементами (прямоугольники красного цвета). Далее излучение производит второй, а прием вновь осуществляется всеми элементами АР (прямоугольники синего цвета), и так до тех пор, пока все элементы не осуществят свои выстрелы. С точки зрения теории многоканальной связи регистрация в режиме двойного сканирования подобна ситуации, когда абоненты по очереди посылают сообщения, которые принимаются всеми абонентами. Последовательный характер излучения зондирующего импульса позволяет ответить на вопрос, от какого источника было получено сообщение. Такой режим связи называется множественный доступ с разделением каналов по времени (англ. – Time Division Multiple Access – TDMA). Регистрация эхосигналов АР, работающей в режиме двойного сканирования, при ее механическом перемеще-

нии называют режимом тройного сканирования [6]. Когерентное объединение парциальных изображений со всех положений АР при ее перемещении позволяет повысить фронтальную разрешающую способность объединенного изображения, а также снизить уровень аппаратного или теплового шума.

На втором этапе работы в режиме ЦФА по измеренным эхосигналам восстанавливается изображение отражателей методом Combined Synthetic Aperture Focusing Technique (C-SAFT) [5, 8], который можно модифицировать для учета многолучевого распространения ультразвука в ОК с неровными границами и при наличии областей с разными акустическими свойствами [9]. В зарубежной литературе алгоритм C-SAFT называется Total Focusing Method (TFM) [7]. Изображения, полученные в режиме двойного сканирования, называются ЦФА-изображениями, а в режиме тройного сканирования – ЦФА-Х-изображениями.

Методы ускорения регистрации эхосигналов

Прореживание коммутационной матрицы

Простейшим способом уменьшения объема регистрируемых эхосигналов является прореживание коммутационной матрицы C . Заполнив единицами только нижний или верхний треугольник матрицы C , можно примерно вдвое уменьшить объем измеренных эхосигналов, но добиться повышения скорости регистрации не удастся. Такая матрица называется Half Matrix Capture (HMC), она используется в приборе A1550 IntroVisor компании ООО «АКС» [10]. Также матрицу коммутации C можно проредить случайным образом более чем в 2 раза, но такой подход приведет к повышению уровня шума в восстановленном ЦФА-изображении, можно, наконец, воспользоваться специальной методикой прореживания C , которая описана в патенте [11].

На рис. 2, *а* приведено ЦФА-изображение точечного отражателя, полученное при использовании полной коммутационной матрицы, а на рис. 2, *б* – при прореживании коммутационной матрицы по случайному закону [11] на 70%. При увеличении числа прореженных элементов матрицы C повышается общий уровень шума и заметно искажается форма блика.

Излучение набора плоских волн

Для повышения скорости регистрации эхосигналов в медицинской диагностике [12] применяют метод излучения набора плоских волн (Plane Wave Image – PWI). Излучение 15 – 20 плоских волн под разными углами позволяет получать изображения с высоким отношением сигнал/шум и высокой фронтальной разрешающей способностью, как у ЦФА-изображений. Применение такого метода для АР, состоящих из 32 элементов, позволяет повысить скорость регистрации в 2 – 3 раза. Особенно эффективно применение метода PWI для АР, состоящих из 64 и более элементов.

Применение технологии CDMA

Для уменьшения времени регистрации эхосигналов АР, работающей в режиме двойного сканирования, можно излучать одновременно всеми элементами АР сложные фазоманипулированные сигналы, сформированные на основе наборов специальных кодовых последовательностей, разработанных для технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов связи (англ. – Code Division Multiple Access – CDMA). В идеальном случае ЦФА-изображение отражателей можно получить по эхосигналам, измеренным за один такт, а не за N_e , как в режиме двойного сканирования.

В технологии CDMA используются кодовые последовательности Касами (Kasami) [13], Голда (Gold) [14], де Брейна (de Bruijn) [15], Задова-Чу (Zadoff-Chu) [16], которые характеризуются длиной сигнала или количеством чипов N_c . Элемент кодовой последовательности называется чипом. На основе данных кодовых наборов генерируются фазоманипулированные зондирующие сигналы $s_n(t)$ для возбуждения элементов АР. Для эффективного декодирования корреляционная функция $R_{nm}(\tau)$ набора сигналов $s_n(t)$, предназначенных для возбуждения элементов антенной решетки, должна обладать следующим свойством:

$$R_{nm}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_n(t) s_m(t + \tau) dt = \delta_{nm} \delta(\tau),$$

$$n, m = 1, 2, \dots, N_e, \quad (1)$$

где δ_{nm} – символ Кронекера. Набор сигналов, обладающий свойством (1), называется ортогональным для любого τ .

На рис. 3, *а* в растровом виде показаны корреляционные функции набора из 16 ортогональных кодовых последовательностей к своей восьмой последовательности $s_8(t)$.

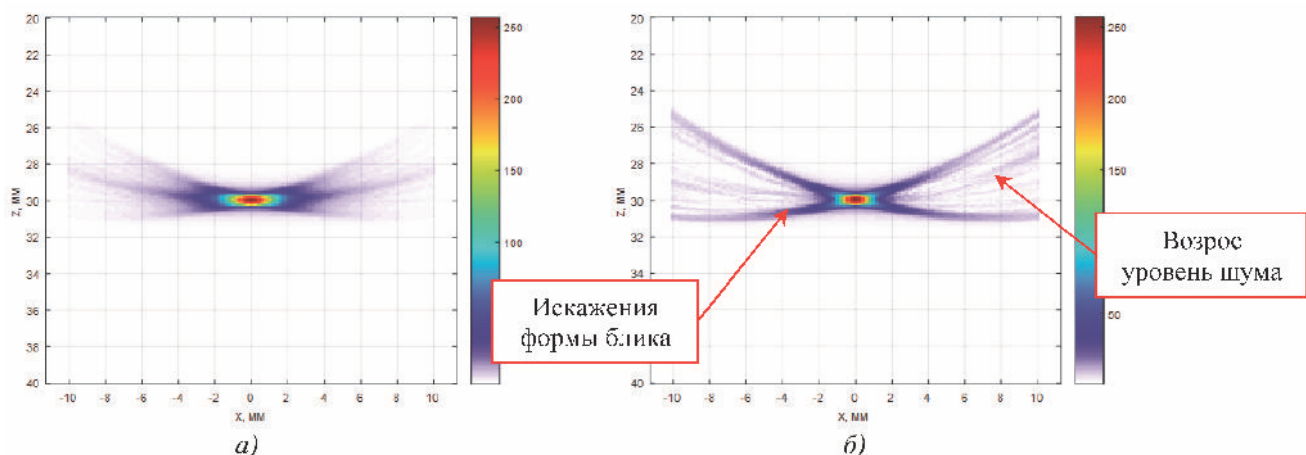


Рис. 2. ЦФА-изображение точечного отражателя, полученное при использовании полной коммутационной матрицы (*а*) и при случайном прореживании 30 % коммутационной матрицы (*б*)

Пунктирной линией желтого цвета показана функция взаимной корреляции (ФВК) кодовой последовательности под номером восемь с кодовой последовательностью под номером четыре, которая для ортогональных сигналов равна нулю. Сплошной линией представлена функция автокорреляции (ФАК) восьмой кодовой последовательности, которая в идеальном случае имеет дельтаподобную форму. На практике сигналов, обладающих такими свойствами, не существует. Используемые в технологии CDMA наборы кодовых последовательностей, которые в той или иной степени приближаются к идеальному набору со свойством (1), называются псевдоортогональными. На рис. 3, а представлена корреляционная характеристика набора, состоящего из 16 сигналов кодовых последовательностей Касами, длиной $N_e = 63$ чипа. На ФАК наблюдаются «боковые лепестки», уровень которых приблизительно равен примерно -10 дБ, а на ФВК присутствуют межканальные помехи уровня -12 дБ, которые возникают из-за сигналов соседних каналов.

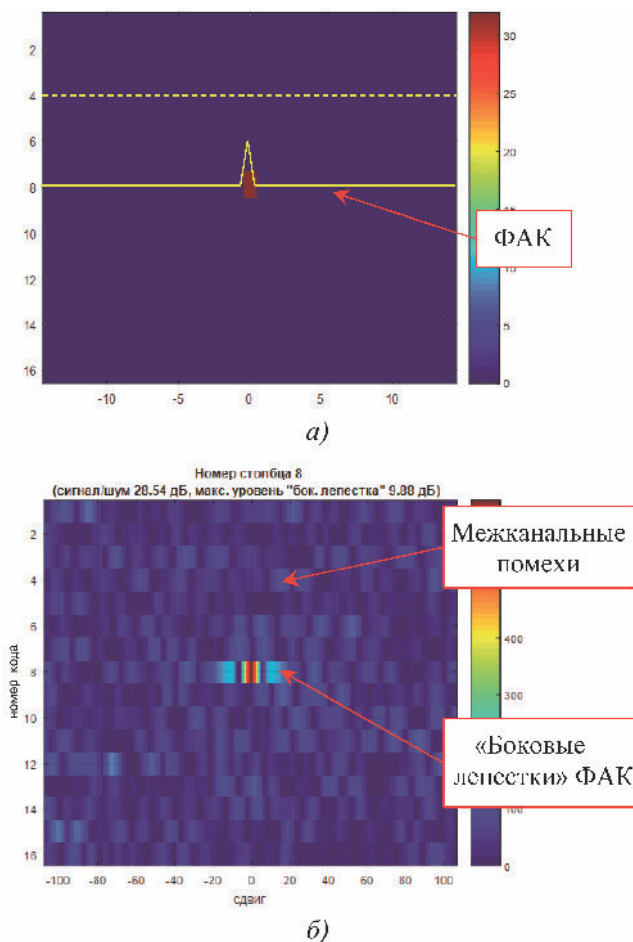


Рис. 3. Корреляционная характеристика сигналов кодового набора, обладающего свойством ортогональности (а) и кодового набора Касами длиной 63 чипа (б)

Принцип работы дефектоскопа в режиме CDMA поясняется на рис. 1, справа. Излучение и регистрация эхосигналов выполняются за один такт. При этом каждый элемент АР излучает свой уникальный сложный сигнал, сформированный с помощью псевдоортогональной кодовой последовательности. Чем больше число элементов АР, тем больше выигрыш в скорости регистрации и объеме данных в сравнении с режимом двойного сканирования, однако при этом выше уровень межканальных помех.

Восстановление изображений отражателей по эхосигналам, измеренным в режиме CDMA

Восстановить изображение отражателей по зарегистрированной сумме сложных сигналов $p_m(t)$ можно двумя способами. Первый способ (см. рис. 1, желтая стрелка) заключается в декодировании суммы сложных сигналов $p_m(t)$ методом согласованной фильтрации (СФ) или максимальной энтропии (МЭ). Это позволяет из зарегистрированной суммы эхосигналов $p_m(t)$ выделить сообщение $p_{nm}(t)$, т.е. получить оценку эхосигналов, как если бы регистрация проводилась в режиме двойного сканирования и восстановить ЦФА-изображение отражателей.

Второй способ (рис. 1, стрелка зеленого цвета) заключается в восстановлении изображения отражателей с применением нелинейного метода МЭ без операции декодирования суммы сложных сигналов $p_m(t)$.

Декодирование эхосигналов и восстановление изображений методом ЦФА

Согласованная фильтрация

Одним из методов декодирования $p_m(t)$ является его сжатие с кодовым сигналом $s_n(t)$ методом СФ [17]. Такой алгоритм сжатия обладает высоким быстродействием и позволяет получать изображения с частотой более 10 Гц, но он не обеспечивает низкий уровень межканальных помех, и эффект сверхразрешения не достигается.

Метод максимальной энтропии (МЭ)

Более сложный метод декодирования простых или сложных сигналов основан на использовании метода МЭ [18]. Алгоритм успешно восстанавливает изображения, обладающие высоким отношением сигнал/шум по сильно зашумленному и неполному набору эхосигналов. За счет нелинейности алгоритма можно получать изображения со сверхразрешением в результате появления в спектре

изображения компонент, не обусловленных лишь исходной неполной информацией. В работе [19] продемонстрировано расширение спектра более чем в 5 раз в сравнении с возможностями линейных методов фильтрации. Недостатком метода является долгое время постобработки эхосигналов.

Метод независимых компонент (МНК)

Метод разделения суммы сигналов на аддитивные подкомпоненты заключается в анализе независимых компонент. Метод МНК применяется при предположении, что подкомпоненты являются негауссовыми сигналами и что они статистически независимы друг от друга. Метод представляет собой специальный случай слепого разделения сигнала. Типичный пример приложения – «задача о шумной вечеринке», когда участнику шумной вечеринки нужно выделить голос собеседника, несмотря на громкую музыку и шум людей в помещении. Так как метод МНК позволяет выделить для каждого принимающего абонента только одно «сообщение» из суммы статистически независимых «сообщений», то он не подходит для декорреляции эхосигнала $p_m(t)$, поскольку число «сообщений» одинаковой формы, но с разной амплитудой и задержками при регистрации эхосигналов будет определяться количеством отражателей, число которых, как правило, будет больше единицы.

Методы уменьшения уровня «боковых лепестков» и межканального шума

Уровень «боковых лепестков» ФАК и уровень межканального шума при излучении эхосигналов в режиме CDMA и при линейном декодировании можно оценить как $1/\sqrt{N_c}$ [17]. При восстановлении ЦФА-изображения «боковые лепестки» ФАК приводят к возникновению ложных бликов, искажающих форму блика точечного отражателя. Уровень «боковых лепестков» и уровень межканальных помех на ЦФА-изображении будем оценивать как отношение амплитуды главного максимума к амплитуде второго максимума изображения SNR_{12} . Отношение сигнал/шум изображения,

оцениваемое как отношение амплитуды главного максимума к среднему значению изображения, обозначим SNR_{σ} .

В табл. 1 перечислены методы уменьшения уровня «боковых лепестков», выигрыш при их использовании и недостатки. Увеличивая длину кодовой последовательности N_c , можно добиться желаемого уровня «боковых лепестков», но выбор длины ограничен толщиной ОК из-за «мертвой зоны» АР на призме.

Если регистрировать эхосигналы в режиме TDMA, излучая каждым элементом АР свой уникальный сигнал кодовой последовательности, то уровень «боковых лепестков» в восстановленном ЦФА-изображении можно оценить как $\sqrt{N_e N_c}$. Связано это с тем, что «боковые лепестки» функции корреляции эхосигналов кодовых последовательностей при формировании изображения складываются некогерентно.

Уровень межканальных помех при корреляционной обработке можно оценить по формуле

$$k \sqrt{\frac{N_e - 1}{N_c}} = L_n, \quad (2)$$

где k – коэффициент, значения которого для разных типов последовательностей приведены в работе [17].

В табл. 2 перечислены некоторые методы уменьшения уровня межканальных помех, выигрыш при их использовании и недостатки. Если разбить АР на N_{sub} подрешеток, для того чтобы в единый момент времени излучение и прием осуществлялись меньшим числом элементов АР, то согласно формуле (2) это приведет к уменьшению уровня межканальных помех примерно на $1/\sqrt{N_c N_{\text{sub}}}$. К сожалению, такой подход приведет к снижению скорости регистрации эхосигналов в N_{sub} раз.

Для уменьшения уровня межканальных помех можно воспользоваться сплит-сигналами [20]. Как было сказано выше, выбор длины кодовой последовательности N_c ограничен толщиной ОК.

1. Методы уменьшения уровня «боковых лепестков» ФАК

| № | Параметр | Уровень «боковых лепестков» | Недостатки предложенных методов |
|----|-----------------------------------|-----------------------------|---|
| 1. | Одна кодовая последовательность | $1/\sqrt{N_c}$ | Выбор N_c ограничен толщиной ОК контроля из-за «мертвой зоны» |
| 2. | N_e кодовых последовательностей | $\sqrt{N_e N_c}$ | Для режима TDMA |

2. Методы уменьшения уровня межканальных помех изображения

| Метод | Уровень межканальных помех | Недостатки предложенных методов |
|---|-------------------------------|---|
| Разбиение AP на N_{sub} подрешеток | $1/\sqrt{N_c N_{\text{sub}}}$ | Понижение скорости регистрации эхосигналов в $N_{\text{sub}} \times N_{\text{sub}}$ |
| Применение сплит-сигналов | $\sqrt{N_c N_{\text{split}}}$ | Понижение скорости регистрации эхосигналов в N_{split} |
| ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ | $\sqrt{N_c N_w}$ | Необходимость иметь N_w кодовых наборов |

Например, вместо использования наборов кодовых последовательностей длиной $N_c = 63$, можно 4 раза излучить сигналы длиной $N_c = 15$. Данный метод позволяет снизить уровень межканальных помех в $\sqrt{N_c N_{\text{split}}}$ раз, где N_{split} – число сигналов в сплит-сигнале. Скорости регистрации эхосигналов при использовании сплит-сигналов снижается в N_{split} раз.

Если же в режиме тройного сканирования использовать в каждом положении AP свой набор уникальных кодовых последовательностей, то при когерентном объединении парциальных ЦФА-изображений всех положений AP, можно снизить уровень межканальных помех в $\sqrt{N_c N_w}$ раз, где N_w – количество положений AP, но для этого необходимо иметь N_w наборов уникальных кодовых последовательностей, который обладает свойством псевдоортогональности. Объединять ЦФА-изображения можно разными способами, в результате когерентного сложения парциальных ЦФА-изображений. Для объединения парциальных ЦФА-изображений попиксельного поиска медианы по медиане с отсечкой каждого ЦФА-изображения по уровню, равному матожиданию парциального ЦФА-изображения.

Подводя итоги, можно сказать, что для получения изображения с уровнем межканального шума менее –20 дБ необходимо, чтобы через каждый элемент AP проходило более 100 чипов. Для этого можно воспользоваться разными комбинациями предложенных методов, приведенных выше. Следует отметить, что для качественного декодирования сообщений в технологии CDMA, используемой в сотовой связи, излучаются сигналы длиной в 32 000 чипов, в то время как в нашем случае имеются ограничения в выборе длины сигнала (от 15 до 255 чипов).

Метод МЭ без декодирования сигналов

Восстановить изображение отражателей в ОК можно, воспользовавшись методом МЭ без декодирования эхосигналов. В работах [21, 22] предложено использовать такой подход (см. рис. 1, зеленая

стрелка) для восстановления изображения отражателей по эхосигналам, измеренным в режиме двойного или тройного сканирования с использованием прореженной коммутационной матрицы С. Нелинейность метода МЭ позволяет дополнительно уменьшить объем измеренных эхосигналов. Используя около 10 % эхосигналов полного набора, удастся восстанавливать изображения отражателей с высокой разрешающей способностью и низким уровнем шума. Если в качестве исходных данных использовать не прореженные эхосигналы $p_{nm}(t)$, а суммарные эхосигналы $p_m(t)$, то метод МЭ позволит получить изображения отражателей с продольным и фронтальным сверхразрешением и низким уровнем шума, обусловленным грубым шагом между элементами антенной решетки.

Модельные эксперименты

Для регистрации эхосигналов в режиме двойного и тройного сканирования использовался дефектоскоп «АВГУР-АРТ», разработанный и изготовленный в Научно-производственном центре «ЭХО+» [23]. Регистрация эхосигналов проводилась в режиме TDMA, а режим CDMA эмулировался сложением эхосигналов всех выстрелов. В качестве зондирующих импульсов использовались:

- простой сигнал длиной в один период;
- набор фазоманипулированных сигналов согласно кодовой последовательности Касами длиной 15 чипов (далее Касами-15). Несущая частота чипа изменялась в диапазоне от 2 до 5 МГц, как в технологии FH-CDMA [24];
- четыре набора фазоманипулированных сигналов согласно кодовой последовательности Касами длиной 15 чипов, используемые как сплит-сигнал (далее Касами-15×4). Несущая частота чипа изменялась в диапазоне от 2 до 5 МГц;
- набор фазоманипулированных сигналов согласно кодовой последовательности Касами длиной 63 чипов (далее Касами-63). Несущая частота каждого чипа равна 5 МГц.

Если время регистрации и объем эхосигналов удастся сократить как минимум в 8 раз и получить

ЦФА-изображения с $SNR_{12} > 20$ дБ, то поставленную задачу будем считать решенной. На рис. 7 и 16 области подходящих решений отмечены полупрозрачными прямоугольниками зеленого цвета.

Выбор кодовых комбинаций

Оптимальные зондирующие сигналы были выбраны следующим образом. Для последовательностей Касами-15 и Касами-63 генерировались $N_w = 100$ кодовых наборов $\{s_{n,w}(t)\}_{n=1}^{N_e}\}_{w=1}^{N_w}$, в каждом из которых было по $N_e = 32$ зондирующих сигнала. Затем рассчитывались эхосигналы $p_{n,m}(t; s_n(t))$ от точечного отражателя в предположении, что излучение и прием происходят точечными элементами АР. Из 100 кодовых наборов, отбирались 20, ЦФА-изображения которых имели наивысший уровень SNR_{12} .

Регистрация в режиме тройного сканирования

Образец «тест перерасеивания»

В дюралюминиевом образце толщиной 90 мм было сделано двенадцать боковых отверстий (БЦО) диаметром 0,5 мм. Эхосигналы регистрировались АР (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, зазор 0,1 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму. На рис. 4 приведено схематическое изображение образца и АР на призме. Измерения эхосигналов проводились в режиме тройного сканирования в $N_w = 20$ положениях с шагом 4 мм. Для каждого положения использовался свой набор кодовых сигналов (см. раздел

«Методы уменьшения уровня «боковых лепестков» и межканального шума»). АР на призме синего цвета схематически показана в начальном положении, а серого – в конечном. Стрелкой желтого цвета показана примерная величина апертуры и направление сканирования. Квадратом красного цвета выделена область восстановления ЦФА-изображения (ОВИ).

ЦФА-изображения восстанавливались по эхосигналам в предположении, что изучение и прием происходит на поперечной волне. На рис. 5, а приведено ЦФА-Х-изображение, полученное при излучении простого сигнала в режиме TDMA. Блики границ БЦО различимы, но на изображении присутствуют ложные блики, связанные с эффектом перерасеивания импульсов между БЦО и эффектом возникновения рэлеевской волны обегания-соскальзывания, которые не позволяют уверенно решить даже задачу определения количества отражателей. При регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования межканальные помехи отсутствуют. ЦФА-Х-изображение на рис. 5, а будем считать эталонным. Время и объем эхосигналов при регистрации их в режиме тройного сканирования будем полагать равными 100 %. При оценке времени регистрации не учитывается время, необходимое для работы системы сканирования. На рис. 7, а представлены значения времени регистрации эхосигналов (ромбовидные маркеры) и объема регистрируемых эхосигналов (квадратные маркеры) для всех типов излучаемых сигналов. Значения уровней межканальных помех приведены на рис. 7, б, в и г. Красным цветом показаны маркеры, значения которых не удовлетворяют условию решения задачи, зеленым – те, которые удовлетворяют.

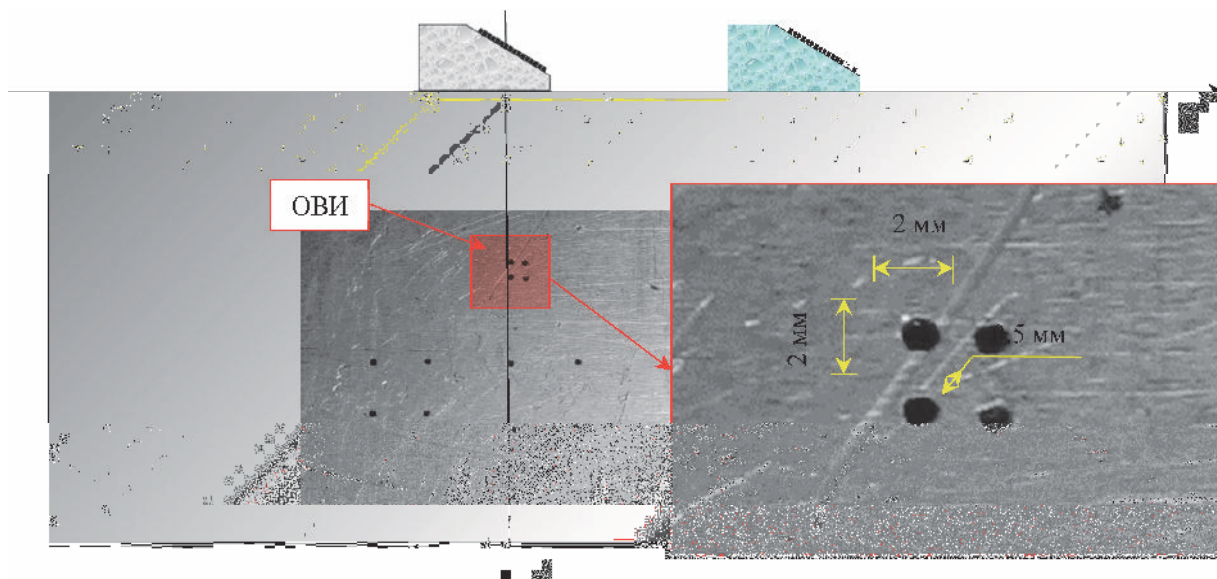


Рис. 4. Схематическое изображение образца «тест перерасеивания» и области сканирования

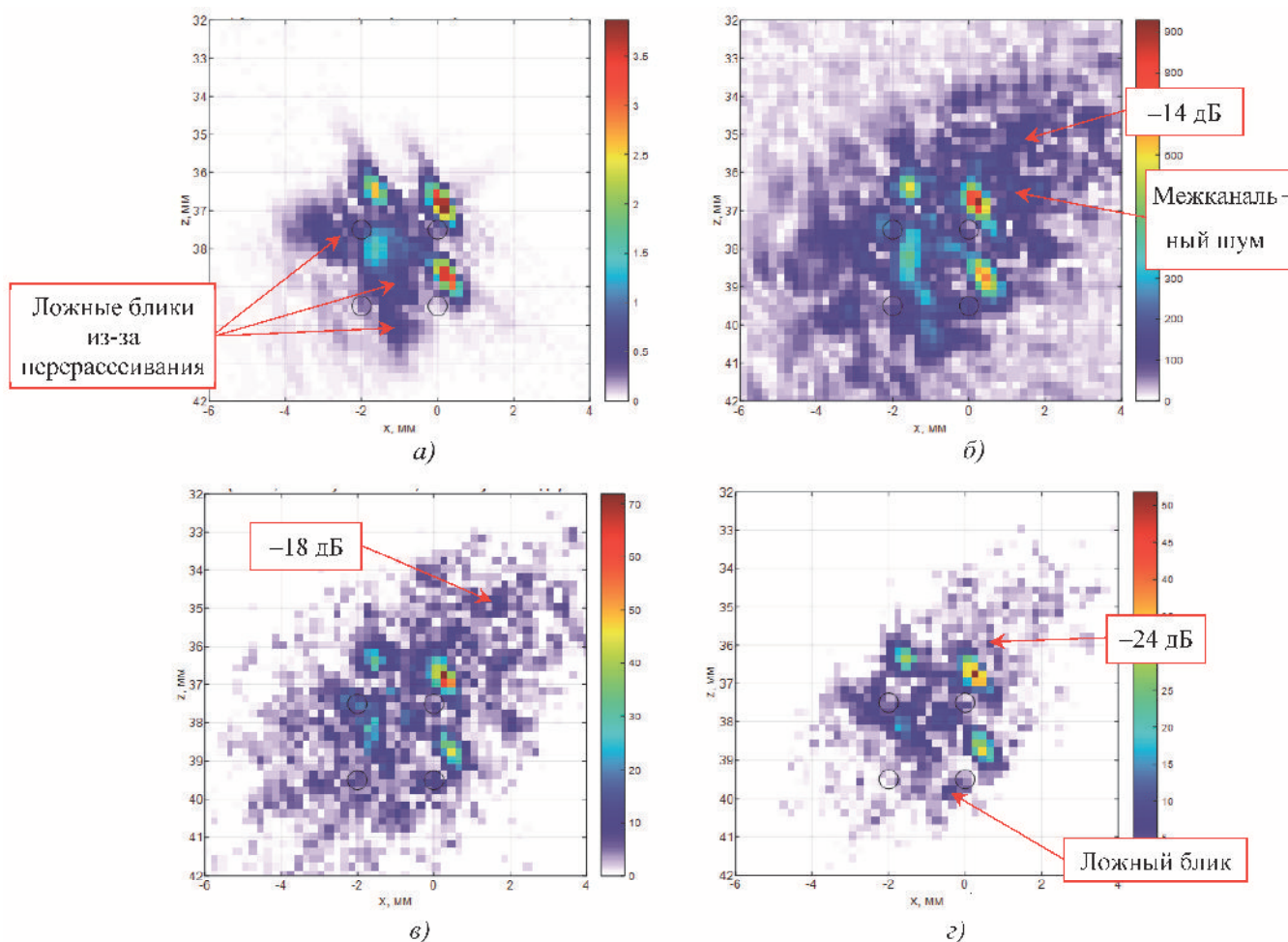


Рис. 5. ЦФА-Х-изображение при излучении:

a – простого сигнала, режим TDMA; *б* – Касами-15, режим CDMA, СФ, сумма 20; *в* – Касами-15, режим CDMA, СФ, медиана 20; *г* – Касами-15×4, режим CDMA, СФ, медиана 80

На рис. 5, *б* показано ЦФА-Х-изображение, полученное при сложении двадцати парциальных ЦФА-изображений при использовании кодового набора Касами-15 в режиме CDMA. Декодирование суммы сложных сигналов проводилось методом СФ. Для получения данного изображения потребовалось всего 3 % времени и 3 % объема эхосигналов по сравнению с режимом тройного сканирования. К сожалению, значение $SNR_{12} = 14$ дБ не позволяет считать восстановленное изображение высококачественным. Если те же парциальные ЦФА-изображения объединить как медиану с отсечкой каждого ЦФА-изображения по уровню его матожидания (см. рис. 5, *в*), то SNR_{12} удастся повысить на 4 дБ, однако и в этом случае изображение нельзя считать высококачественным.

При излучении сплит-сигналов Касами-15×4 в режиме CDMA и объединении восьмидесяти ЦФА-изображений как медианы с отсечкой каж-

дого ЦФА-изображения по уровню его матожидания можно получить ЦФА-Х-изображение (см. рис. 5, *г*), удовлетворяющее условию высококачественного изображения ($SNR_{12} = 24$ дБ). Время регистрации составит 12 % от требуемого для режима тройного сканирования (см. рис. 5, *а*), а объем эхосигналов уменьшится до 12 %.

Несмотря на то что поставленную задачу удалось решить, на рис. 6 показано изображение, полученное методом МЭ без декодирования эхосигналов (см. раздел «Метод МЭ без декодирования сигналов») для четырех положений АР. Уровень бликов межканального шума уменьшился примерно до -35 дБ, а амплитуда многих бликов, сформированных при перерассеивании импульсов на БЦО и трансформации типа волны, уменьшилась на 10 дБ. Однако на МЭ-изображении присутствует ложный блик большой амплитуды, сформированный перерассеянными на БЦО импульсами. Этот же ложный блик есть и на изображении рис. 5, и его наличие на

обеих изображениях связано с тем, что метод ЦФА и метод МЭ не учитывают такой эффект, как перерасеивание импульсов между отражателями. При сравнении с режимом тройного сканирования для регистрации 0,2 % эхосигналов было затрачено всего 0,5 % времени. Отметим, что разрешающая способность МЭ-изображения возросла примерно в 2 раза по сравнению с изображением на рис. 5, з.

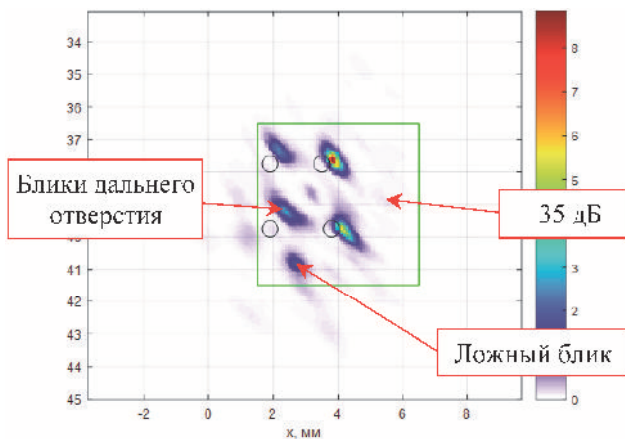


Рис. 6. МЭ-изображение, Касами-15, четыре положения АР

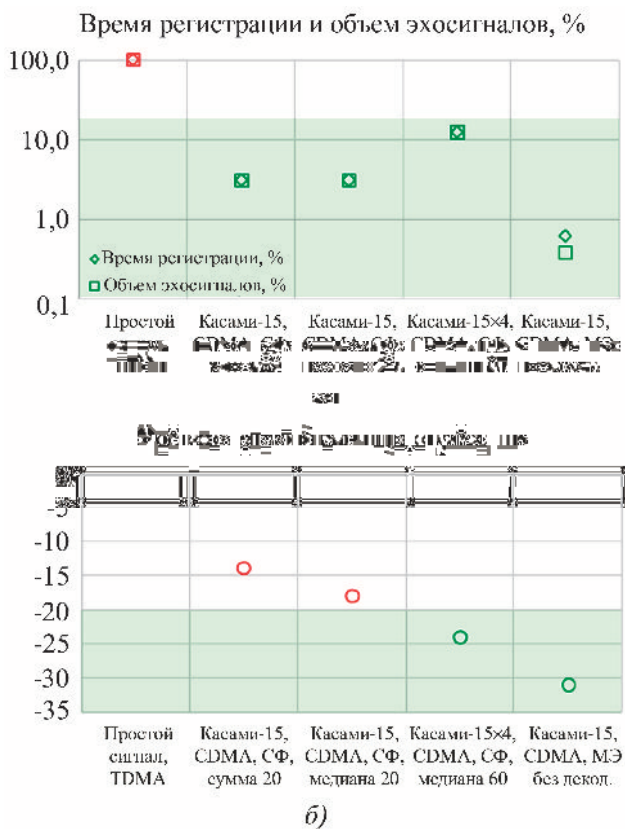


Рис. 7. Графики времени регистрации эхосигналов (ромбы) и объема эхосигналов (квадраты) (а) и уровня межканальных помех в зависимости от типа сигналов и обработки (б)

Перлитный образец с одиннадцатью БЦО

В образце толщиной 90 мм, изготовленном из стали 20, было просверлено одиннадцать сквозных БЦО диаметром 2 мм, расположенных равномерно на глубине от 5 до 85 мм. Эхосигналы регистрировались АР (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента 0,75×10 мм, зазор 0,25 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму. На рис. 8 приведено схематическое изображение образца и АР на призме. Измерения эхосигналов проводились в режиме тройного сканирования в $N_w = 20$ положениях с шагом 3,74 мм. АР на призме синего цвета схематически показана в начальном положении, а серого – в конечном. Стрелкой желтого цвета показана примерная величина апертуры и направление сканирования. Квадратом красного цвета выделена часть ОВИ.

ЦФА-изображения восстанавливались по эхосигналам в предположении, что изучение и прием происходят на поперечной волне. На рис. 9, а приведено ЦФА-Х-изображение, полученное при излучении простого сигнала в режиме TDMA. На изображение нанесена маска образца. Различимы блики границ десяти БЦО и блик угла образца на прямом луче. Время, требуемое для регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования и их объем, для дальнейшего сравнения будем полагать равным 100 %. На рис. 9, б показано ЦФА-Х-изображение при сложении двадцати парциальных ЦФА-изображений, восстановленных при использовании кодового набора Касами-15 в режиме CDMA. Декодирование суммы сложных сигналов проводилось методом СФ. Для получения данного изображения требуется всего 3 % времени и объема эхосигналов по сравнению с режимом тройного сканирования (рис. 9, а).

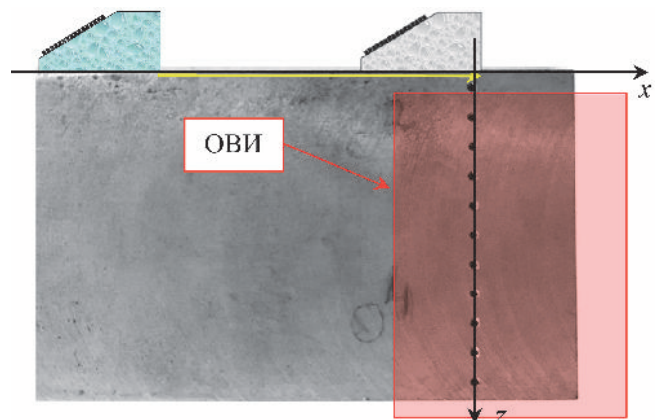


Рис. 8. Фотография образца толщиной 90 мм и схематическое изображение области сканирования

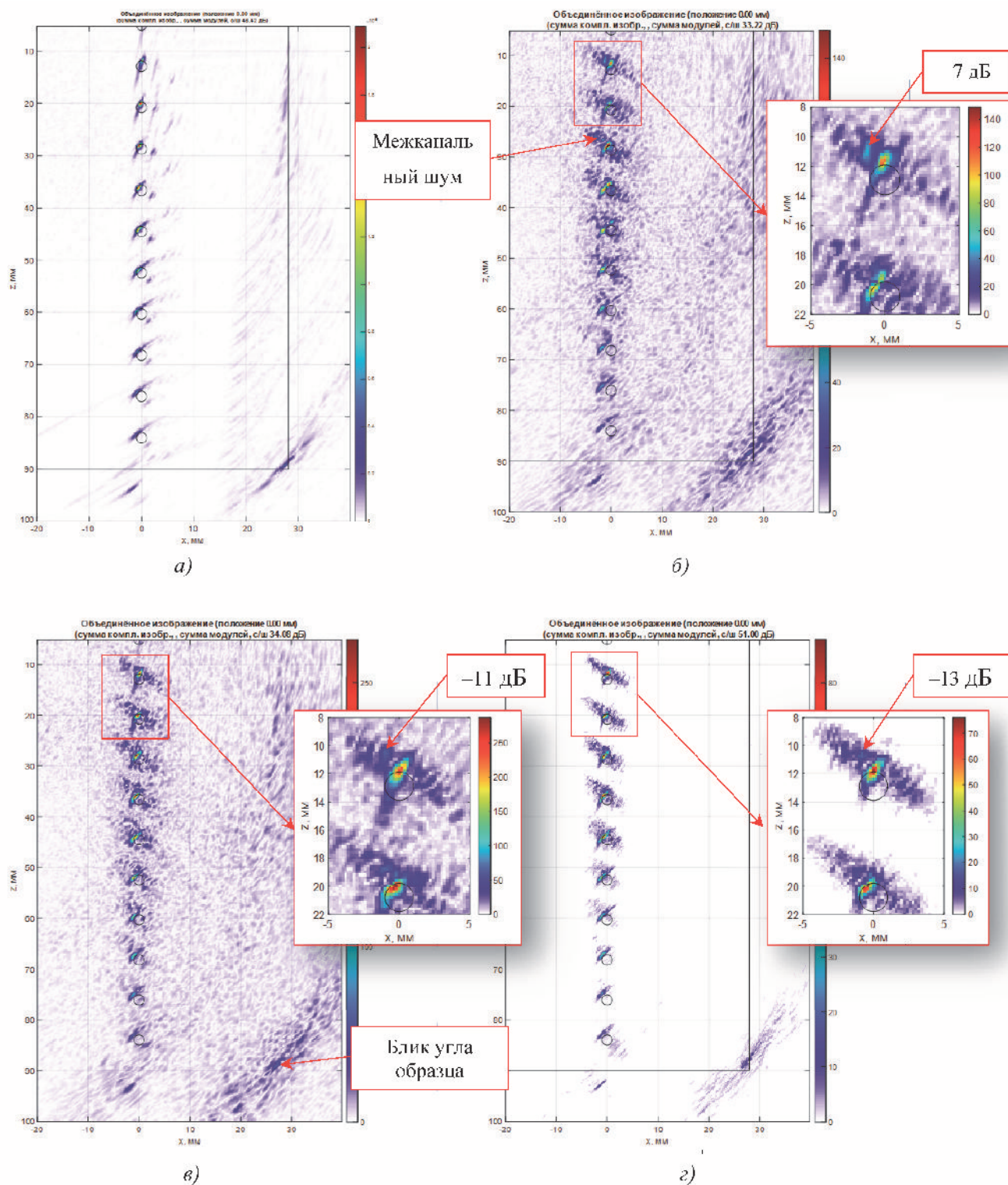


Рис. 9. ЦФА-Х-изображения:

a – простой сигнал, режим TDMA; *б* – Касами-15, режим CDMA, СФ, сумма 20; *в* – Касами-15×4, режим CDMA, СФ, сумма 80; *г* – Касами-15×4, режим CDMA, СФ, медиана 80

Однако значение $SNR_{12} = 7$ дБ (рис. 9, б) не позволяет считать восстановленное изображение высококачественным. Высокий уровень межканальных помех связан с наличием ложного блика большой амплитуды второго отверстия сверху, что

в свою очередь связано с тем, что самые верхние отражатели «освещаются» не с двадцати положений, а примерно с пяти, что приводит к высокому уровню межканального шума. На рис. 12, *a* представлены значения времени регистрации эхосигна-

лов (ромбовидные маркеры) и объема регистрируемых эхосигналов (квадратные маркеры) для всех типов излучаемых сигналов. Красным цветом показаны маркеры, значения которых не удовлетворяют условию решения задачи, зеленым – те, которые удовлетворяют.

На рис. 9, в показано ЦФА-Х-изображение, полученное при использовании сплит-сигналов Касами-15×4 в режиме CDMA при когерентном суммировании восьмидесяти парциальных ЦФА-изображений. Для регистрации эхосигналов потребовалось 12 % времени и объема эхосигналов, необходимых для режима тройного сканирования. Однако значение $SNR_{12} = 11$ дБ снова не удовлетворяет критерию высококачественного изображения. Если же восемьдесят парциальных ЦФА-изображений объединить как медиана с отсечкой каждого ЦФА-изображения по уровню его матожидания, то SNR_{12} удастся повысить незначительно до 13 дБ, что, к сожалению, снова не позволяет считать изображение высококачественным.

На рис. 10, а показано корреляционное изображение отражателей, а на рис. 10, б – изображение, полученное методом МЭ без декодирования эхосигналов (см. раздел «Метод МЭ без декодирования сигналов») для двух положений АР – 17-е и 20-е положения. Так как метод МЭ для работы требует значительного объема памяти, то изображение восстанавливалось на значительно меньшей ОВИ. Уровень межканального шума значительно уменьшился: с –6 дБ примерно до –35 дБ. По сравнению с режимом тройного сканирования для регистрации 0,3 % эхосигналов было затрачено всего 0,3 % времени. Это очень существенный выигрыш в скорости регистрации эхосигналов и их объеме, но не следует забывать, что для восстановления МЭ-изображения требуется около 10 мин на современном персональном компьютере.

На рис. 11 для детального рассмотрения показаны увеличенные фрагменты изображений, представленных на рис. 10. Отметим, что разрешающая способность МЭ-изображения возросла примерно в 2 раза по сравнению с изображением на рис. 10, б.

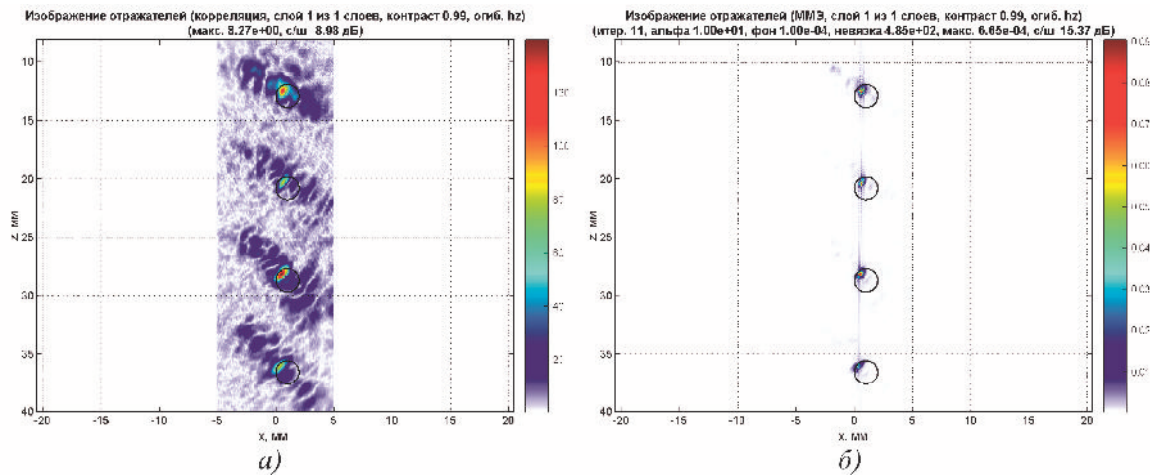


Рис. 10. Корреляционное изображение и МЭ-изображение для набора Касами-15 и положений АР 17 и 20

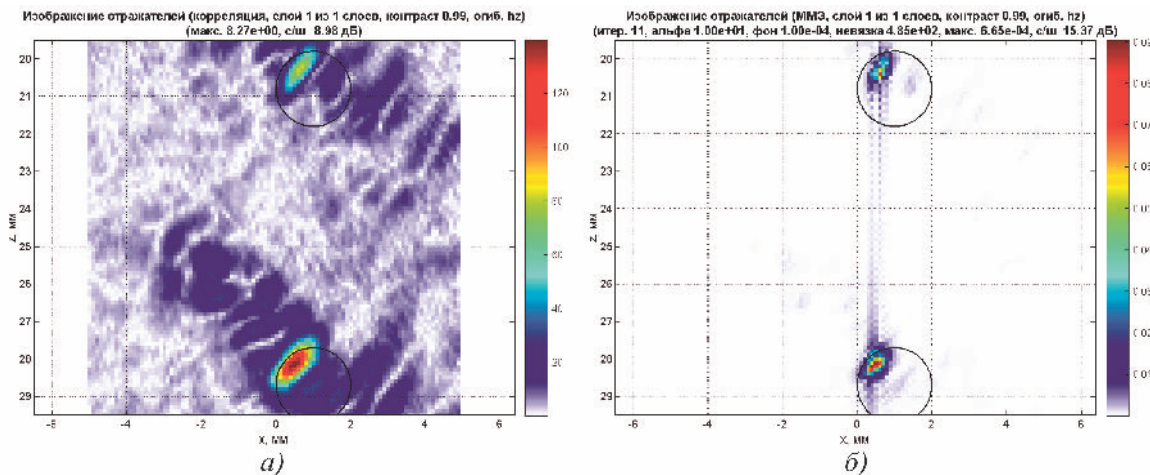


Рис. 11. Увеличенные фрагменты изображений, представленных на рис. 10

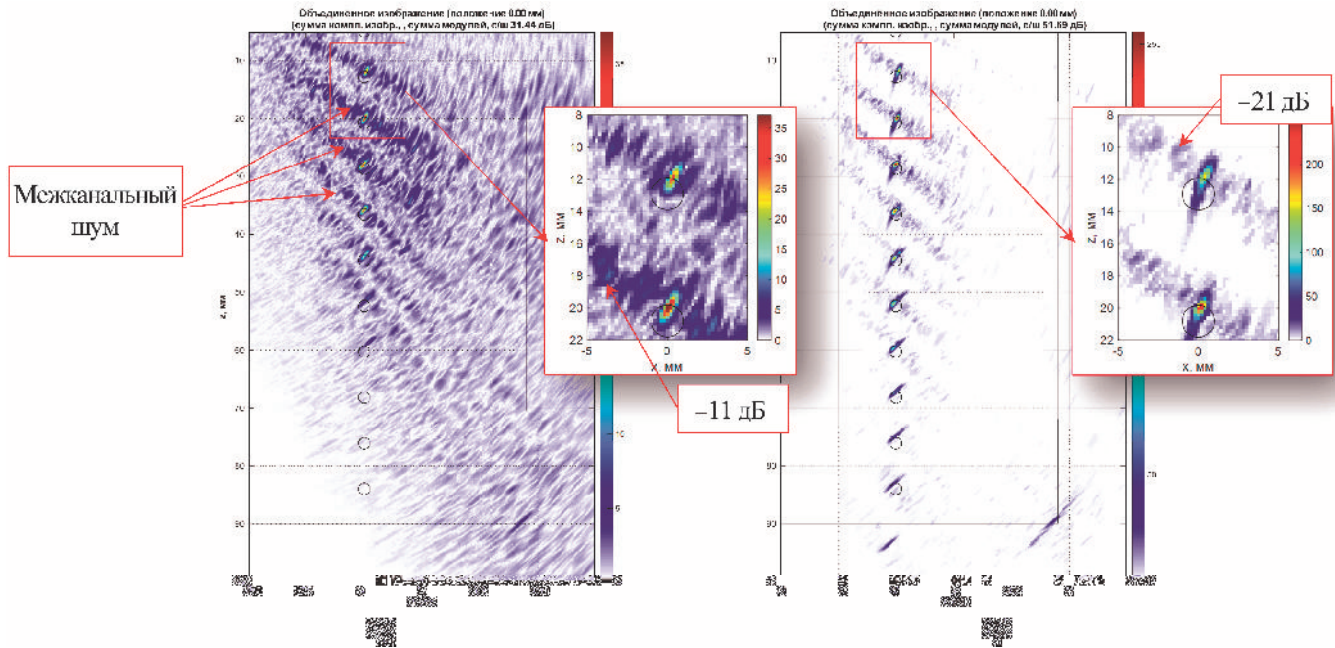


Рис. 12. Изображения, полученные при использовании кодов Касами-63, режим CDMA, СФ:
 а – 17 положение; б – сумма 20

На рис. 12, а показано ЦФА-изображение границ БЦО, восстановленное по эхосигналам положения 17 антенной решетки, измеренных в режиме CDMA и при декодировании их согласованной фильтрацией. Уровень межканального шума недопустимо высок и равен -11 дБ. На рис. 12, б представлено ЦФА-Х-изображение по всем двадцати положениям при излучении эхосигналов в режиме CDMA, декодировании их согласованной фильтрацией и когерентным сложением парциальных ЦФА-изображений, каждое из которых было подвергнуто операции отсечки по уровню медиана плюс три дисперсии. Максимальной уровень межканальной помехи равен -21 дБ, что позволяет считать полученное изображение высококачественным в отличие от изображений на рис. 9, в и г. Время регистрации и объем измеренных эхосигналов в режиме CDMA составляет около 3 % от аналогичных параметров для режима тройного сканирования.

Значения времени регистрации, объема эхосигналов и уровня межканальных помех для всех

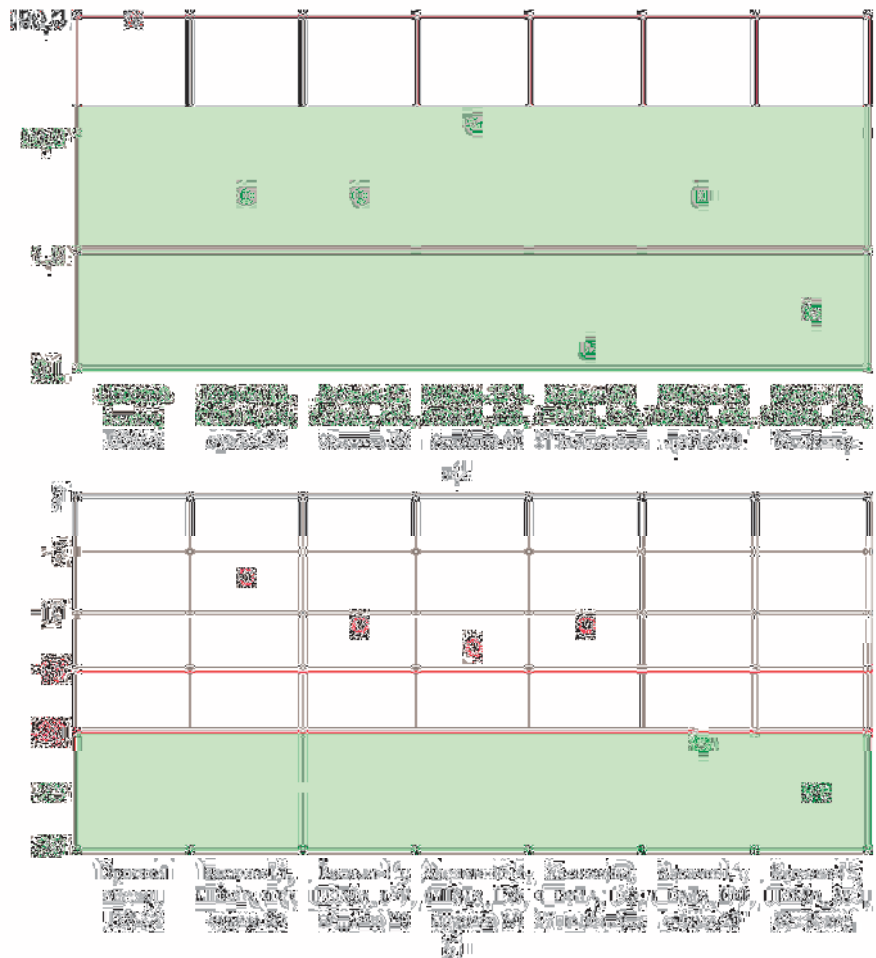


Рис. 13. Графики времени регистрации эхосигналов (ромбы) и объема эхосигналов (квадраты) (а) и уровня межканальных помех в зависимости от типа сигналов и обработки (б)

упомянутых способов восстановления изображения приведены на рис. 13. Красным цветом показаны маркеры, значения которых не удовлетворяют условию решения задачи, зеленым – те, которые удовлетворяют.

Никельсодержащий образец с одиннадцатью БЦО

В образце толщиной 210 мм, изготовленного из стали 40 с примесью никеля, наличие которого приводит к высокому уровню структурного шума, было просверлено четырнадцать сквозных БЦО диаметром 4 мм, расположенных на глубинах от 10 до 200 мм. Эхосигналы регистрировались АР (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, зазор 0,1 мм), установленной на плексигласовую 20-градусную призму. На рис. 14 приведено схематическое изображение образца и АР на призме. Измерения эхосигналов проводились в режиме тройного сканирования в положениях с шагом 5 мм. АР на призме синего цвета схематически показана в начальном положении, а серого – в конечном. Стрелкой желтого цвета показана примерная величина апертуры и направление сканирования. Красным цветом выделена часть ОВИ.

ЦФА-изображения восстанавливались по эхосигналам в предположении, что изучение и прием происходят на поперечной волне. На рис. 15, а приведено ЦФА-Х-изображение, полученное при излучении простого сигнала в режиме TDMA. На изображении нанесена маска образца. Различимы блики границ БЦО на прямом и однократном отражениях

импульсов от дна и блик угла образца. На изображении присутствует структурной шум достаточно высокого уровня, а межканальные помехи отсутствуют.

Время, требуемое для регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования, и их объем для дальнейшего сравнения будем полагать равным 100 %. На рис. 15, б показано ЦФА-Х-изображение при сложении шестидесяти парциальных ЦФА-изображений, восстановленных при использовании кодового набора Касами-15 в режиме CDMA.

Декодирование суммы сложных сигналов проводилось методом СФ. Для получения данного изображения требуется всего 3 % времени и объема эхосигналов по сравнению с режимом тройного сканирования (рис. 16, а). Однако значение $SNR_{12} = 11$ дБ (рис. 16, б) не позволяет считать восстановленное изображение высококачественным.

На рис. 15, в показано ЦФА-Х-изображение, полученное при использовании сплит-сигналов Касами-15 \times 4 в режиме CDMA при когерентном суммировании парциальных ЦФА-изображений. Для регистрации эхосигналов потребовалось 12 % времени и объема эхосигналов для режима тройного сканирования. Однако значение $SNR_{12} = 15$ дБ снова не удовлетворяет критерию высококачественного изображения. Если же 120 парциальных ЦФА-изображений объединить как медианы с отсечной каждого ЦФА-изображения по уровню его матожидания, то удастся получить $SNR_{12} = 21$ дБ, которое удовлетворяет условию высококачественного изображения.

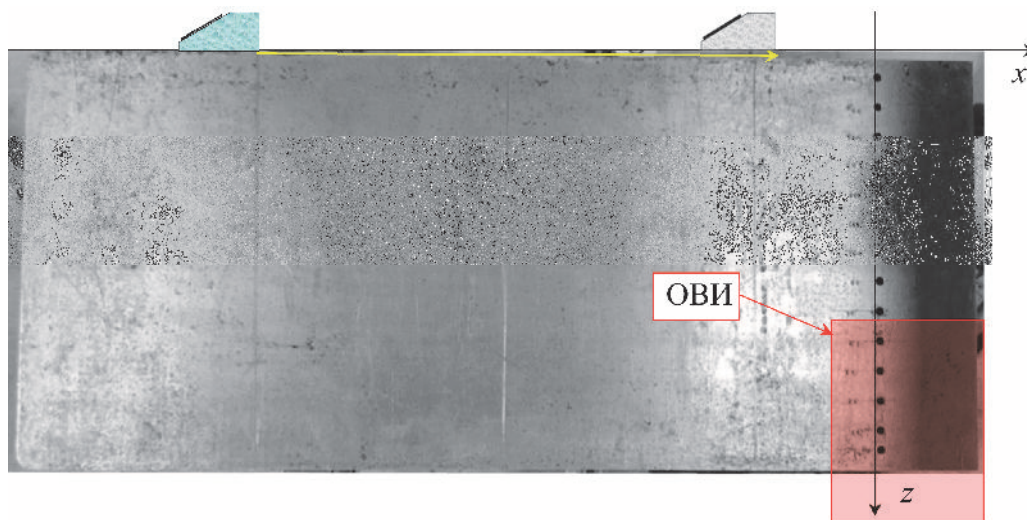


Рис. 14. Фотография образца толщиной 210 мм и схематическое изображение области сканирования

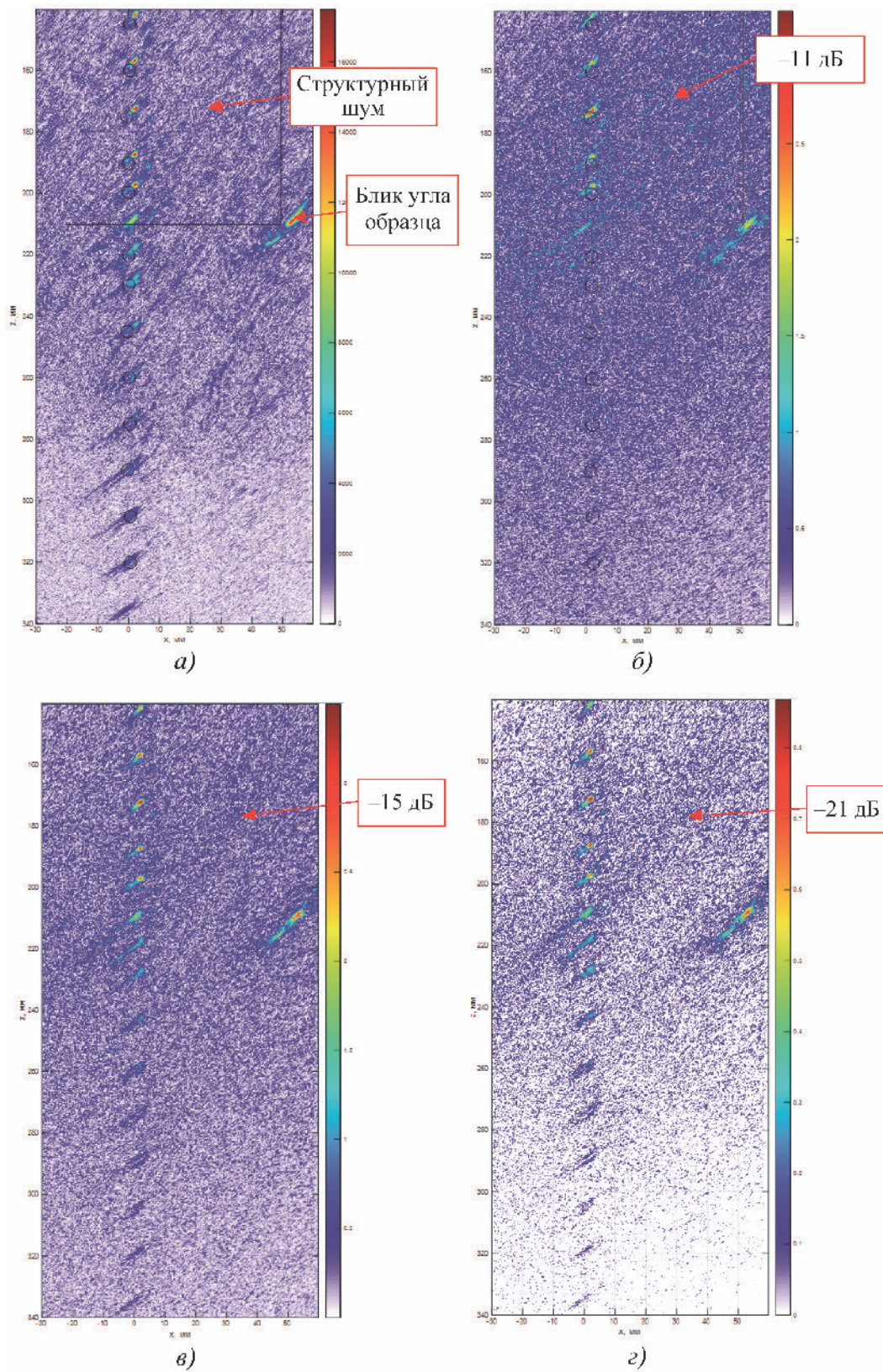


Рис. 15. ЦФА-Х-изображение:

a – простой сигнал, режим TDMA; *б* – Касами-15, режим CDMA, СФ, сумма 20; *в* – Касами-15×4, режим CDMA, СФ, сумма 80; *з* – Касами-15×4, режим CDMA, СФ, медиана 80

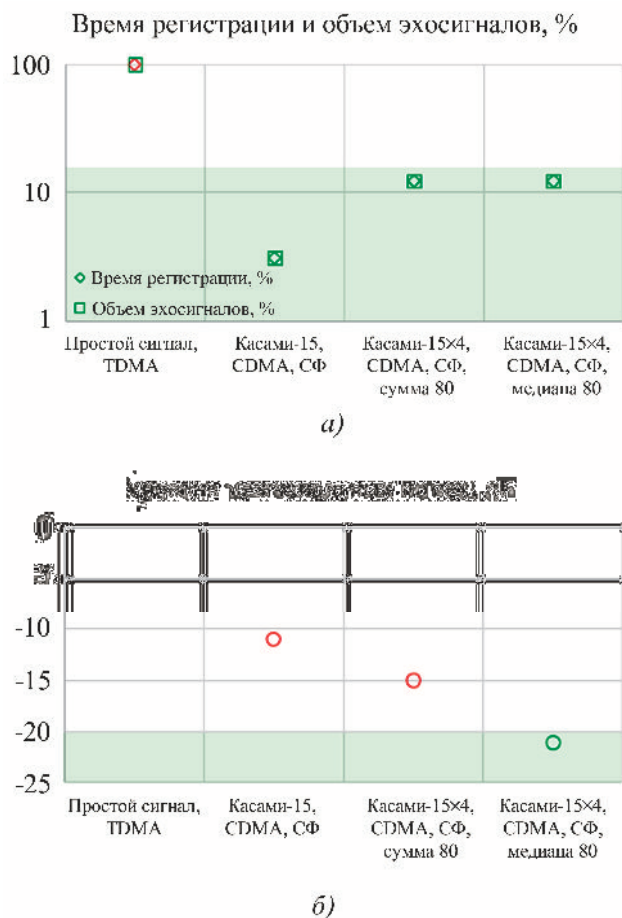


Рис. 16. Графики времени регистрации эхосигналов (ромбы) и объема эхосигналов (квадраты) (а) и уровня межканальных помех в зависимости от типа сигналов и обработки (б)

Выводы

По результатам представленных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В трех модельных экспериментах показано, что применение технологии CDMA может привести к повышению скорости регистрации эхосигналов практически на порядок.

2. Применение технологии CDMA позволяет получать высококачественные изображения ($SNR_{12} > 20$ дБ) за счет объединения изображений как медианы и применения сплит-сигналов, т.е. для уменьшения межканальных помех и уровня «боковых лепестков» надо пропускать через каждый элемент АР более 100 чипов (см. раздел «Методы уменьшения «боковых лепестков» и межканального шума»).

3. Высококачественные изображения удалось получить при излучении сплит-сигналов и объединении изображения как медианы, для чего потребо-

валось только 12,5 % эхосигналов, при этом скорость регистрации удалось повысить в 8 раз.

4. Перспективным методом восстановления изображения отражателей является метод максимальной энтропии без декодирования, позволяющий уменьшить объем используемых эхосигналов (более чем в 100 раз!) и при этом получать высококачественные изображения.

Библиографический список

1. **Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications.** Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <http://www.olympos-ims.com/en/books/>
2. **Воронков В. А., Воронков И. В., Козлов В. Н. и др.** О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64 – 70.
3. **Базулин Е. Г.** Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51 – 75.
4. **César G.-F., Jiménez A., Arguedas M. et al.** A Novel Encoded Excitation Scheme in a Phased Array for The Improving Data Acquisition Rate // Sensors. 2014. V. 14. No. 1. P. 549 – 563.
5. **Ковалев А. В., Козлов В. Н., Самокрутов А. А. и др.** Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29 – 41.
6. **Базулин Е. Г.** О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 741 – 745.
7. **Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P.** Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models // NDT in Canada 2009. National Conference, Aug 25 – 27, 2009.
8. **Bolotina I., Dennis M., Mohr F. et al.** 3D Ultrasonic Imaging by Cone Scans and Acoustic Antennas // 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16 – 20 April 2012. Durban. South Africa, 2012.
9. **Базулин Е. Г.** Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учетом анизотропии материала объекта контроля // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 42 – 52.
10. «АКС»: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.acsys.ru/production/detail/a1550-introvisor/> (дата обращения: 15.12.2019)
11. **Пат. RU 2 649 028 С1. МПК G01N 29/44.** Приемопередающее устройство / А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, А. В. Бутов и др.; заявл. 29.12.2016; опубл. 12.03.2018 // Бюл. 2018. № 8.
12. **Jeune L.** Imagerie ultrasonore par emission d'ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion: Pour l'obtention du grade de Docteur de l'université Paris-Diderot. Paris, 2016. 119 p.

13. **Kasami T.** Weight Distribution Formula for Some Class of Cyclic Codes: Tech. Report No. R-285. Univ. of Illinois, 1966.
14. **Gold R.** Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing // IEEE Transactions on Information Theory. 1967. V. 13. No. 4. P. 619 – 621. doi: 10.1109/TIT.1967.1054048
15. **de Bruijn N. G.** A combinatorial problem // Koninklijke Nederlandse Akademie v. Wetenschappen. 1946. V. 49. P. 758 – 764.
16. **Chu D. C.** Polyphase codes with good periodic correlation properties // IEEE Trans. Inform. Theory. 1972. P. 531 – 532. DOI:10.1109/TIT.1972.1054840.
17. **Варакин Л. Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.
18. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г.** Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 6. С. 772 – 783.
19. **Smith P. F., Player M. A.** Deconvolution of bipolar ultrasonic signals using a modified maximum entropy method // J. Phys. D Appl. Phys. 1991. V. 24. P. 1714 – 1721.
20. **Качанов В. К., Карташев В. Г., Соколов И. В., Шалимов Е. В.** Методы обработки сигналов в ультразвуковой дефектоскопии: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Электроника и микроэлектроника», «Радиотехника». М.: ИД МЭИ, 2010. 220 с.
21. **Базулин Е. Г.** О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 235 – 254.
22. **Базулин Е. Г.** Восстановление изображения отражателей по ультразвуковым эхосигналам методом максимальной энтропии // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 33 – 60.
23. «ЭХО+»: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 15.12.2019).
24. **Hsiao-Hwa Chen.** The Next Generation CDMA Technologies. Hoboken: John Wiley, 2007. 476 p. ISBN: 978-0-470-02294-8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ КОНСТАНТ В ОДНОРОДНОМ АНИЗОТРОПНОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ ДВУМЯ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ



Е. Г. Базулин,
зам. ген. директора
по науч. вопросам,
нач. системного отдела,
д-р техн. наук



М.С. Садыков,
инженер третьей
категории

Предложен метод определения упругих констант в однородном анизотропном (случай кубической симметрии) сварном соединении, основанный на сравнении рассчитанных и измеренных эхосигналов, при многократном отражении от границ объекта контроля. Эхосигналы регистрируются двумя антенными решетками, работающими в режиме двойного или тройного сканирования. Приведены результаты численных и модельных экспериментов по определению трех упругих констант в сварном соединении. С помощью разработанного метода в модельном эксперименте удалось измерить три упругих коэффициента модели сварного соединения с относительной погрешностью менее 1,5%. Предложенный метод может быть использован для нахождения начального приближения в нелинейной обратной задаче томографической диагностики сварных соединений в волновом приближении.

Распознавание типа обнаруженного отражателя является целью неразрушающего контроля для определения потенциальной опасности объекта контроля (ОК). Данную задачу решает ультразвуковая дефектметрия посредством восстановления высококачественного изображения отражателей, по которому определяют тип несплошностей и их размеры. Высококачественное изображение отражателей можно восстановить с помощью метода цифровой фокусировки антенной решеткой (ЦФА) [1], который позволяет учитывать такие эффекты, как многократное отражение от неровных границ ОК, трансформация типа волны при преломлении и отражении ультразвукового пучка. Важную роль в восстановлении высококачественного изображения с учетом отражения от границ ОК играют толщина и скорость продольной или поперечной волны. Для восстановления высококачественного ЦФА-изображения необходимо знать акустические и геометрические параметры сварного соединения для корректного расчета лучевых трубок.

В практике ультразвукового контроля (УЗК) часто встречаются ОК со сварным соединением, акустические свойства которого отличаются от акустических свойств ОК. Примером служат трубопроводы с разнородными сварными соединениями, ультразвуковой контроль которых часто проводится на продольных волнах. На практике точные зна-

чения упругих свойств сварного соединения для получения высококачественного изображения неизвестны. На рис. 1 показан пример восстановления ЦФА-изображения дна и отражателей в виде отверстий бокового сверления в сварном соединении по эхосигналам, рассчитанным в программе CIVA [2] с учетом отражения от границ и трансформации типа волны. Основным металлом в ОК является сталь со скоростью продольной волны 5,93 мм/мкс, а акустические свойства сварного соединения соответствуют акустическим свойствам аустенитной стали (скорость продольной волны 5,7 мм/мкс). ЦФА-изображения восстанавливались с учетом эффекта изменения типа волны при отражении [3].

На рис. 1, а представлено изображение дна и цилиндрического отверстия в предположении, что ОК однородный и изотропный и его акустические свойства совпадают с акустическими свойствами основного металла. Изображение дна и цилиндрического отверстия не совпадает с его реальным положением – отличие составляет до 3 мм. Во втором случае при восстановлении ЦФА-изображения учитывались неоднородные свойства ОК (рис. 1, б). В этом случае блики дна и границ цилиндрических отверстий совпадают с их реальным положением. Таким образом, для получения высококачественного изображения отражателей необходимо знать акустические свойства сварного соединения.

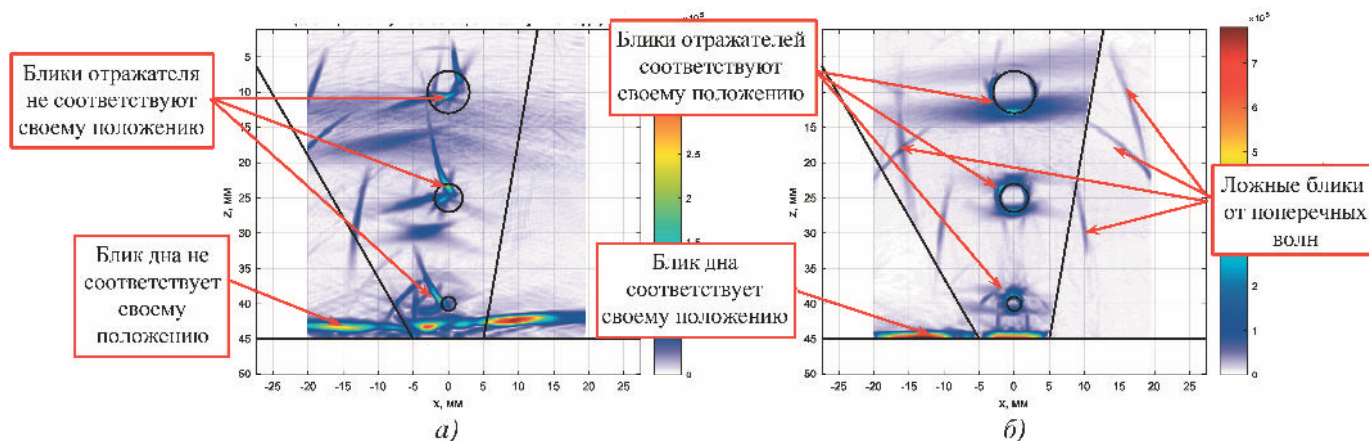


Рис. 1. Пример восстановления изображения дна и цилиндрических трех сквозных отверстий ОК с моделью сварного соединения

Решению задачи определения упругих свойств посвящены работы [4 – 6]. В статье [4] для определения океанических неоднородностей как рефракционного, так и кинетического типов предложено использовать неортогональный и избыточный базис с элементами в виде множества пересекающихся полос. Для применения данного метода необходимо сканировать ОК со всех сторон, что не всегда возможно при ультразвуковом контроле (УЗК). В статье [5] предложен метод восстановления изображения неоднородного ОК в виде распределения скорости на основе разработки алгоритмов решения задачи как коэффициентной обратной задачи для волнового уравнения. Для его эффективного применения необходимо сканировать излучателем и приемником со всех сторон неоднородности, а для обработки в 3D-варианте зарегистрированных эхосигналов необходим суперкомпьютер. В статье [6] решается задача определения скорости продольной ультразвуковой волны в сварном однородном изотропном соединении, основанная на принципе сравнения измеренных и рассчитанных эхосигналов, с помощью двух антенных решеток (АР). На практике сварные соединения являются анизотропными, поэтому для восстановления высококачественных изображений отражателей необходимо знать такие параметры сварного соединения, как плотность, коэффициенты упругости и направление кристаллических осей.

В настоящей статье предлагается метод восстановления трех коэффициентов упругости для анизотропного сварного соединения (случай кубической симметрии), являющийся развитием метода, изложенного в работе [6]. Эффективность предложенного метода объясняется простотой геометрии сварного соединения, небольшим числом неизвестных параметров конечно-параметрической модели исследуемого ОК, что приводит к относительно

небольшим объемам вычислений. Восстановленные коэффициенты упругости могут быть использованы в дальнейшем в качестве начального приближения в нелинейной томографической обратной задаче диагностики сварного соединения с использованием более точного волнового приближения [5 – 7].

Принцип работы метода

Расчет эхосигналов

На рис. 2 схематически показано распространение эхосигналов в неоднородном ОК толщины h при излучении одним элементом АР. Скорость продольной, поперечной волн и плотность в призме обозначим как $\{c_{w,l}, c_{w,s}, \rho_w\}$, угол ввода луча из одной среды в другую α_i , где i – номер границы раздела сред (первая граница между пьезоэлементом АР и призмой), скорости звука и плотность основного металла ОК обозначим как $\{c_l, c_s, \rho\}$. Коэффициенты упругости и угол поворота кристаллической оси в сварном соединении для 2D-варианта обозначим $\{C_{11}, C_{12}, C_{66}, \theta\}$.

Первый пьезоэлемент АР с N-стороны излучает импульс, а все пьезоэлементы АР с P-стороны регистрируют эхосигналы, множество которых будем называть первым «выстрелом». После этого излучает второй пьезоэлемент, а все пьезоэлементы АР с P-стороны регистрируют эхосигналы, и так далее. Такой режим регистрации эхосигналов с применением АР называется двойным сканированием по NP-каналу. Расстояние между передними гранями призм (база) обозначим B . Измеренные в режиме двойного сканирования эхосигналы с помощью двух АР $p(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_r, t)$ сравниваются с эхосигналами $\hat{p}(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$, рассчитанные при вариации упругих коэффициентов сварного соединения ОК

$\mathbf{v} = \{C_{11}, C_{12}, C_{66}\}$. Решением является то значение \mathbf{v} , при котором достигается наименьшее отличие между $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ и $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$, т.е. задача сводится к поиску минимума целевой функции $D(\mathbf{v})$, характеризующей степень близости измеренных и рассчитанных эхосигналов

$$\mathbf{v} = \arg \min_{\mathbf{v}=\{C_{11}, C_{12}, C_{66}\}} D(p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t), \hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})). \quad (1)$$

Если две АР перемещаются вдоль координаты x (рис. 2) и эхосигналы измеряются в режиме двойного сканирования в каждой точке апертуры, то такой режим регистрации эхосигналов будем называть режимом тройного сканирования.

Для расчета акустического поля в случае высокочастотного приближения можно использовать геометрическую акустику. В геометрической акустике звуковое поле представляется в виде множества лучевых трубок [6, 7], в которых импульс распространяется вдоль каждой лучевой трубки независимо от остальных. Метод позволяет определить амплитуду и фазу импульса, распространяющегося вдоль лучевой трубки. Такой способ расчета акустических полей эффективен, если длина волны значительно меньше изменений геометрии дна и поверхности ОК.

На рис. 2 схематически показана ультразвуковая трубка продольной волны (отмечена зеленым цветом). Продольная волна при отражении может породить поперечную волну (отмечена красным цветом). В дальнейшем соответствие типа волны и цвета будет сохранено. Для обозначения путей распространения лучей от излучателя до приемника введем понятие акустической схемы. Под акустической схемой будем подразумевать описание лучевой трубки при отражении импульса от границ ОК с учетом трансформации типа волны.

Для описания акустических схем будем пользоваться следующими обозначениями: тип волны после события будем обозначать буквами L (продольная) и T (поперечная). Последовательная запись типов волны и событий будет определять акустическую схему. Например, схема LL описывает ситуацию, когда излучается и регистрируется при отражении от дна импульс продольной волны. Запись TL означает, что на дно ОК падает импульс поперечной волны, но отражается импульс продольной волны. Схема LLLL описывает ситуацию, когда анализируются лучи продольной волны, трижды отраженные от границ ОК. Для численных расчетов амплитуды и фазы импульса необходимо знать коэффициенты отражения и прохождения на границе анизотропных сред. Задача на отражение-преломление плоских волн на плоской границе двух однородных анизотропных сред подробно рассматривается в работе [8].

О выборе целевой функции

Сильное влияние на эффективность метода оказывает вид целевой функции, по которой определяется степень близости измеренных $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ и рассчитанных $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ эхосигналов. На рис. 3 зеленым цветом схематически показана идеальная целевая функция, которую можно получить для модели, точно описывающей распространение звука по многим акустическим схемам, и для больших размеров АР. Красным цветом показан вид целевой функции в присутствии операторного шума и при расчете поля по одной акустической схеме. Под операторным шумом понимается шум, возникающий из-за несоответствия рассчитанных эхосигналов в соответствии с выбранной теорией и экспериментально измеренных эхосигналов. Для идеальной целевой функции при поиске ее минимума из любой исходной точки (красные окружности на рис. 3) процедура минимизации приведет решение в точку глобального минимума (синяя окружность).

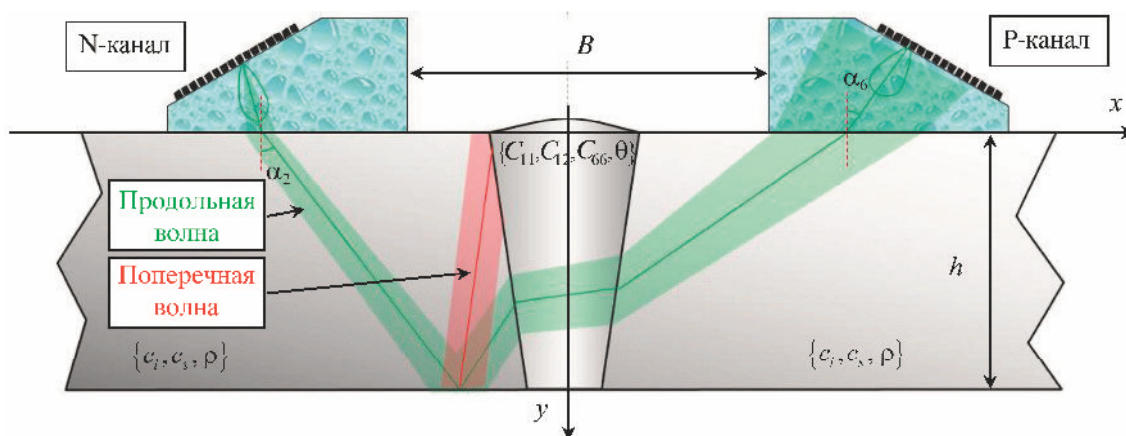


Рис. 2. Схематическое представление лучевых трубок

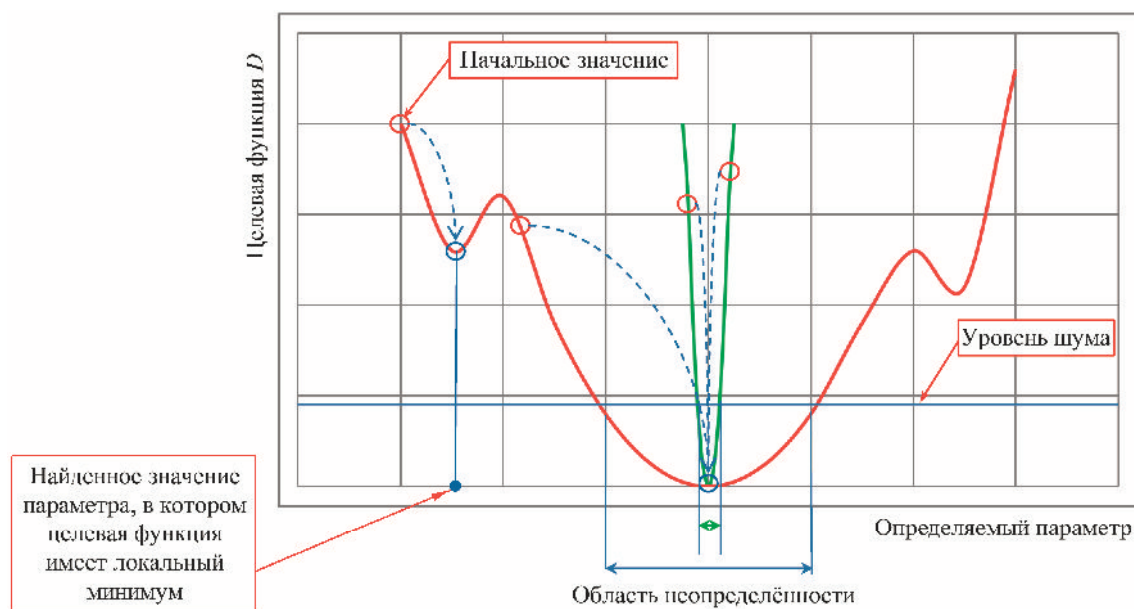


Рис. 3. Схематические виды идеальной и реальной целевых функций

При наличии операторного и измерительного шумов появляются локальные минимумы целевой функции, в которых может «застрять» решение задачи. Поэтому для целевой функции с несколькими минимумами нужно решать задачу минимизации для нескольких исходных точек $\{\mathbf{v}_0\}$.

Наличие шума при измерении эхосигналов создает область неопределенности, которая для разных целевых функций показана на рис. 3 двусторонней стрелкой синего и зеленого цвета. В его пределах невозможно уточнить решение, так как целевая функция изменяется случайным образом. Чем быстрее растет целевая функция при удалении от минимума, тем меньше размер зоны неопределенности.

Для оценки близости двух функций можно использовать целевую функцию $D_m\{\mathbf{v}; a, a_E\}$ следующего вида:

$$D_m\{\mathbf{v}; a, a_E\} = a \|\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v}) - p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)\| + a_E \|E(\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})) - E(p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t))\|, \quad (2)$$

где E – оператор расчета огибающей сигнала; $\|\cdot\|$ – обозначает Евклидову норму вектора. Первый член целевой функции имеет вес a и определяет разницу между радиосигналами, а второй имеет вес a_E и описывает разницу между огибающими радиосигналов.

В качестве целевой функции $D_c(\mathbf{v})$ можно использовать функцию обратной корреляции

$$D_c(\mathbf{v}) = \frac{1}{\left| \iint p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t) \hat{p}^*(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v}) dt d\mathbf{r}_t d\mathbf{r}_r \right|}, \quad (3)$$

где значок * означает операцию комплексного сопряжения. На вид целевой функции влияют такие параметры, как: форма излучающего сигнала $s(t)$, операторный шум, размеры излучающей и приемной АР, частота дискретизации сигнала и количество акустических схем, используемых при оценке эхосигналов.

Точность расчета упругих коэффициентов в сварном соединении ОК зависит от точности расчета оценки эхосигналов: чем точнее удастся рассчитать эхосигналы $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$, тем круче стенки у целевой функции и тем точнее находится минимум целевой функции.

Выбор решения

Найти глобальный минимум целевой функции можно двумя способами – это ее явный расчет на заданной сетке или поиск ее минимума с помощью алгоритмов минимизации.

Прямой расчет целевой функции

Аргумент доставляющей минимум целевой функции можно найти при ее непосредственном расчете на заданной сетке. Тщательная сетка и увеличение числа искомых переменных делают этот подход очень затратным с вычислительной точки зрения. Поэтому можно рассчитать целевую функцию на грубой сетке, подобрать нужный порядок аппроксимирующего полинома и рассчитать значения целевой функции на более точной сетке. Решением будет являться значение аргумента, доставляющее минимум функции, аппроксимирующей целевую функцию. Данный метод эффективно при-

меняется при определении одного параметра сварного соединения, например скорости продольной волны $v = \{c_{v,l}\}$. Прямой расчет целевой функции неплохо себя проявил себя и при поиске минимума функции двух переменных.

Минимизация целевой функции

Для поиска глобального минимума целевой функции при наличии локальных минимумов можно применять различные алгоритмы минимизации. Так как определить градиент целевой функции $D_m\{\mathbf{v}; a, a_E\}$ или $D_c(\mathbf{v})$, скорее всего, невозможно, то для поиска ее минимума используются методы нулевого порядка, например симплексный метод Нелдера–Мида [9]. Задача решается для множества исходных точек. Из всех полученных решений отсекаются решения, «застывшие» в локальных минимумах, и после усреднения отобранных решений определяются упругие коэффициенты. Данный метод целесообразно применять при количестве определяемых параметров больше трех, например упругих коэффициентов сварного соединения $\mathbf{v} = \{C_{11}, C_{12}, C_{66}\}$.

О влияющих параметрах

В статье [6] проведен анализ ошибки задания параметров измерений по результатам работы алгоритма (1) для определения скорости продольной волны в сварном соединении. Показано, что основными влияющими параметрами являются толщина h и база B . Ошибка задания толщины ОК порядка 0,5 мм и базы порядка 1 мм, снижает точность расчета определяемого параметра на недопустимо

большую величину в 2 – 3 %. Введение толщины ОК и базы в список v в качестве еще двух дополнительных параметров, по которым проводится оптимизация, должно способствовать повышению точности определения упругих свойств по экспериментальным эхосигналам. Однако, увеличение числа параметров целевой функции приведет к росту времени поиска решения (1).

Численные эксперименты

Для тестирования предлагаемого алгоритма определения упругих коэффициентов сварного соединения использовались эхосигналы, рассчитанные в программе CIVA в 2D-варианте. Расчетная модель показана на рис. 4. Зеленым цветом показаны лучи продольной волны, красным – поперечные. Основной металл имел свойства стали, а свойства сварного соединения (выделены желтым цветом) соответствовали акустическим свойствам дюралюминия. Эхосигналы регистрировались двумя АР (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента 0,9×10 мм, зазор 0,1 мм), установленными на плексигласовые 20-градусные призмы. Расстояние между передними гранями призм (база) было равно 70 мм.

На рис. 5 приведены эхосигналы и их огибающие (пунктирные линии), рассчитанные программой CIVA (графики красного цвета) и программой трассировки (графики черного цвета) для семнадцатого выстрела, для разных акустических схем, которые показаны справа от графиков. Ошибки расчета амплитуды и формы эхосигнала программой трассировки связаны, во-первых, с тем, что излучающий эталонный сигнал не полностью совпадает с излучающим сигналом в CIVA.

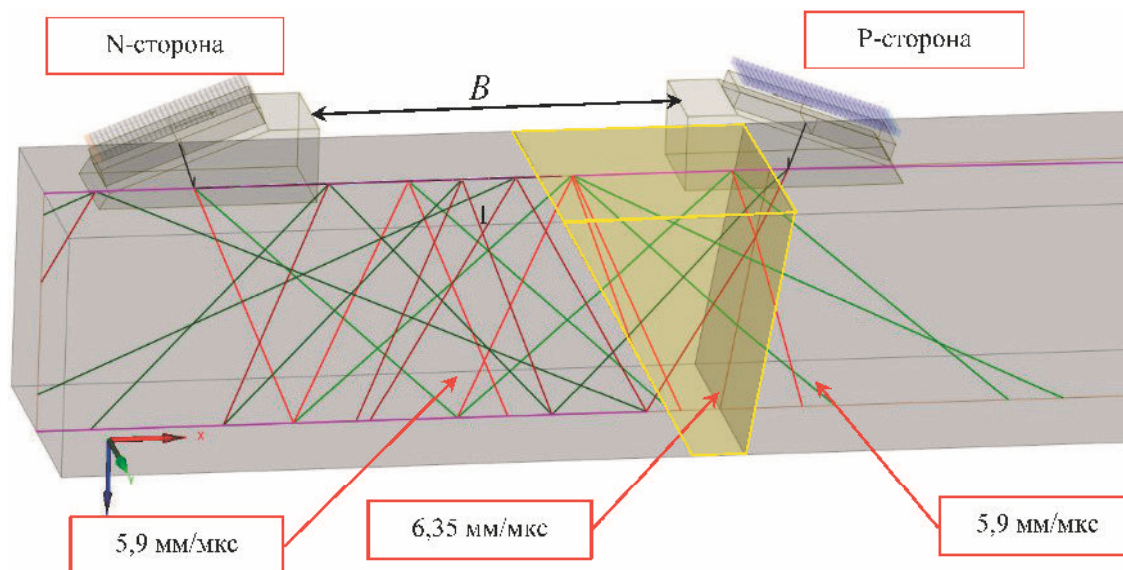


Рис. 4. Модель ОК со сварным соединением, созданная в программе CIVA

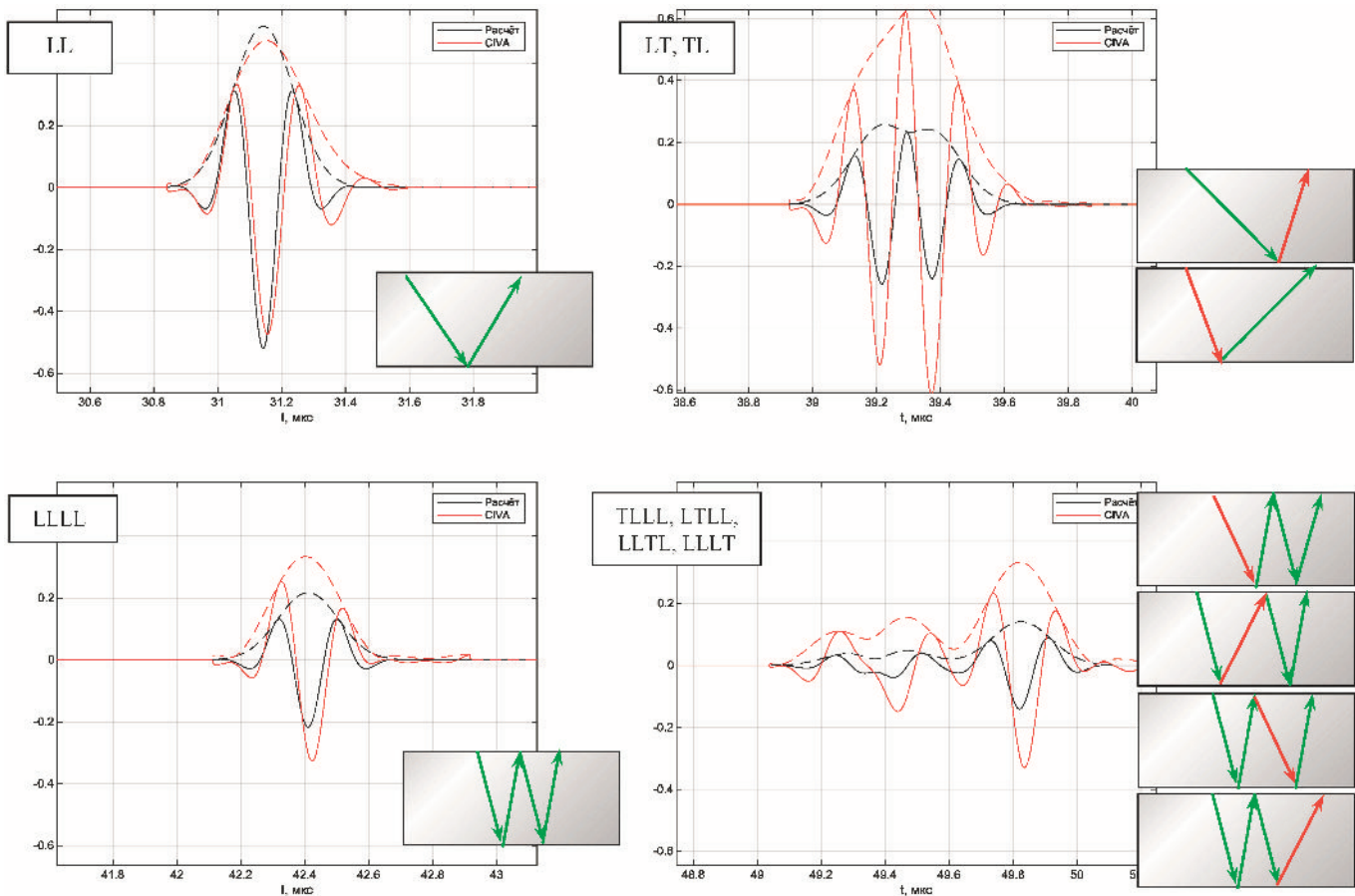


Рис. 5. Сравнение эхосигналов, рассчитанных программой трассировки и программой CIVA: пунктирными линиями показаны графики огибающих эхосигналов

Во-вторых, для повышения скорости расчета $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ в программе трассировки элементы АР были представлены как точечные излучатели-приемники с гауссоподобной диаграммой направленности. Такой расчет не позволяет учитывать эффект изменения формы эхосигнала при удалении от акустической оси элемента АР. В программе CIVA интегрирование происходит по всей поверхности пьезоэлементов.

Для случая кубической симметрии изотропный материал может быть представлен как анизотропный, у которого все коэффициенты упругости равны нулю, за исключением трех:

$$\{C_{11} = \lambda + 2\mu, C_{12} = \lambda, C_{66} = \mu\},$$

где λ, μ – коэффициенты Ламе.

В этом случае скорости продольной $c_{l,1}, c_{l,2}$ и поперечной c_s волн можно рассчитать по формулам:

$$c_{l,1} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}}; \quad c_{l,2} = \sqrt{\frac{C_{12} + 2C_{66}}{\rho}}; \quad c_s = \sqrt{\frac{C_{66}}{\rho}}, \quad (4)$$

где ρ – плотность материала.

Для изотропного материала продольные скорости звука $c_{l,1}$ и $c_{l,2}$ одинаковы. Такое допущение было сделано из особенностей модельного эксперимента (см. раздел «Описание стенда»). Для скоростей продольной и поперечной волн соответственно 6,35 и 3,10 мм/мкс и плотности 0,0027 г/мм³ упругие коэффициенты равны {109,0; 57,2; 26,0} ГПа.

В соответствии с формулой (4) при изменении упругих коэффициентов $\{C_{12}, C_{66}\}$ на 2,0 % скорость продольной волны $c_{l,2}$ меняется на 0,25 % (табл. 1). Изменение скорости продольной волны по диагонали в табл. 1 практически отсутствует. Это придаст целевой функции ярко выраженный овражистый вид, который затрудняет поиск ее минимума. Поэтому если рассчитывать эхосигналы $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ с учетом акустических схем LL и LLLL, то алгоритм (1) не позволит вычислить упругие константы с приемлемой точностью. В случае кубической симметрии скорость поперечной волны определяется по формуле (4) только коэффициентом C_{66} . При изменении коэффициента C_{66} на 2,0 % скорость поперечной волны c_s меняется уже на 1,0 %.

1. Относительное изменение скорости, %, продольной ультразвуковой волны в зависимости от упругих коэффициентов C_{12} и C_{66}

| Упругий коэффициент C_{12} , ГПа | Упругий коэффициент C_{66} , ГПа | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 25,00 | 25,52 | 26,04 | 26,56 | 27,08 |
| 57,79 | -0,25 | -0,18 | -0,12 | -0,05 | 0,01 |
| 57,51 | -0,19 | -0,12 | -0,06 | 0,01 | 0,07 |
| 57,22 | -0,13 | -0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,13 |
| 56,93 | -0,07 | -0,01 | 0,06 | 0,13 | 0,19 |
| 56,65 | -0,01 | 0,05 | 0,12 | 0,18 | 0,25 |

Эти рассуждения позволяют предположить, что точность определения скорости продольной волны c_l и коэффициентов $\{C_{11}, C_{12}\}$ для изотропного материала будет в несколько раз хуже, чем точность определения скорости поперечной волны c_s и коэффициента упругости C_{66} .

Для максимального уменьшения овражистого вида целевой функции эхосигналы $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ рассчитывались для многих акустических схем с учетом трансформации типа волны с однократным и трехкратным отражением от границ ОК, что увеличивает «чувствительность» работы алгоритма. Для ускорения вычислений эхосигналы $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ рассчитывались для 17-го выстрела, т.е. использовалось только около 3 % эхосигналов, рассчитанных в режиме двойного сканирования. В табл. 2 приведены результаты работы алгоритма (1) определения упругих коэффициентов сварного изотропного соединения, представленного как анизотропное, при расчете целевой функции $D_m(\mathbf{v}; 1; 0,25)$ и $D_c(\mathbf{v})$. Для расчета эхосигналов использовались акустические схемы LL, LT, TL,

ТТ. Применение целевой функции $D_m(\mathbf{v}; 1; 0,25)$ позволило получить наихудшую относительную погрешность около 0,3 % для оценки упругого коэффициента C_{11} . Использование целевой функции $D_c(\mathbf{v})$ приводит к оценке упругого коэффициента C_{12} с относительной погрешностью 0,77 %. Коэффициент анизотропии, определяемый как $C_{11} - C_{12} - 2C_{66}$, для изотропного материала равен 0, и, как видно из табл. 2, после определения упругих коэффициентов он оказался много меньше C_{66} . Приведенные рассуждения о том, что для изотропного материала коэффициенты $\{C_{11}, C_{12}\}$ будут определяться с большей ошибкой, подтвердились.

Таким образом, при обработке эхосигналов, рассчитанных в численном эксперименте, предложенный метод определения коэффициентов упругости показал свою работоспособность.

Модельные эксперименты

Описание стенда

Модельные эксперименты проводились на стенде [6], состоящем из двух стальных блоков, имитирующих основной металл ОК, и двух сменных блоков, имитирующих сварное соединение с акустическими свойствами дюралюминия и аустенитной стали марки 12X18Н10Т (рис. 6). Акустический контакт между сменными блоками и блоками стенда обеспечивался с помощью глицерина. Все части стенда для повышения качества контакта прижимались друг к другу с помощью поджимных винтов. Для всех сменных блоков были проведены измерения скорости продольной волны обычным толщиномером с относительной погрешностью 0,5 % (скорость продольной волны в аустенитном блоке 5,7 мм/мкс, в дюралюминиевом – 6,38 мм/мкс).

2. Результаты определения упругих коэффициентов изотропного сварного соединения, представленного как анизотропное

| Целевая функция $D_m(\mathbf{v}; 1; 0,25)$ | | | | Целевая функция $D_c(\mathbf{v})$ | | | |
|--|--|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------|--------------------------------------|
| Упругие коэффициенты | Полученное значение упругого коэффициента, ГПа | Коэффициент анизотропии, ГПа | Относительная погрешность расчета, % | Упругие коэффициенты | Полученное значение упругого коэффициента, ГПа | Коэффициент анизотропии, ГПа | Относительная погрешность расчета, % |
| C_{11} | 108,9 | -3,74 | -0,32 | C_{11} | 110,0 | -0,786 | 0,34 |
| C_{12} | 57,2 | | 0,03 | C_{12} | 57,6 | | 0,77 |
| C_{66} | 26,0 | | 0,02 | C_{66} | 26,0 | | 0,02 |

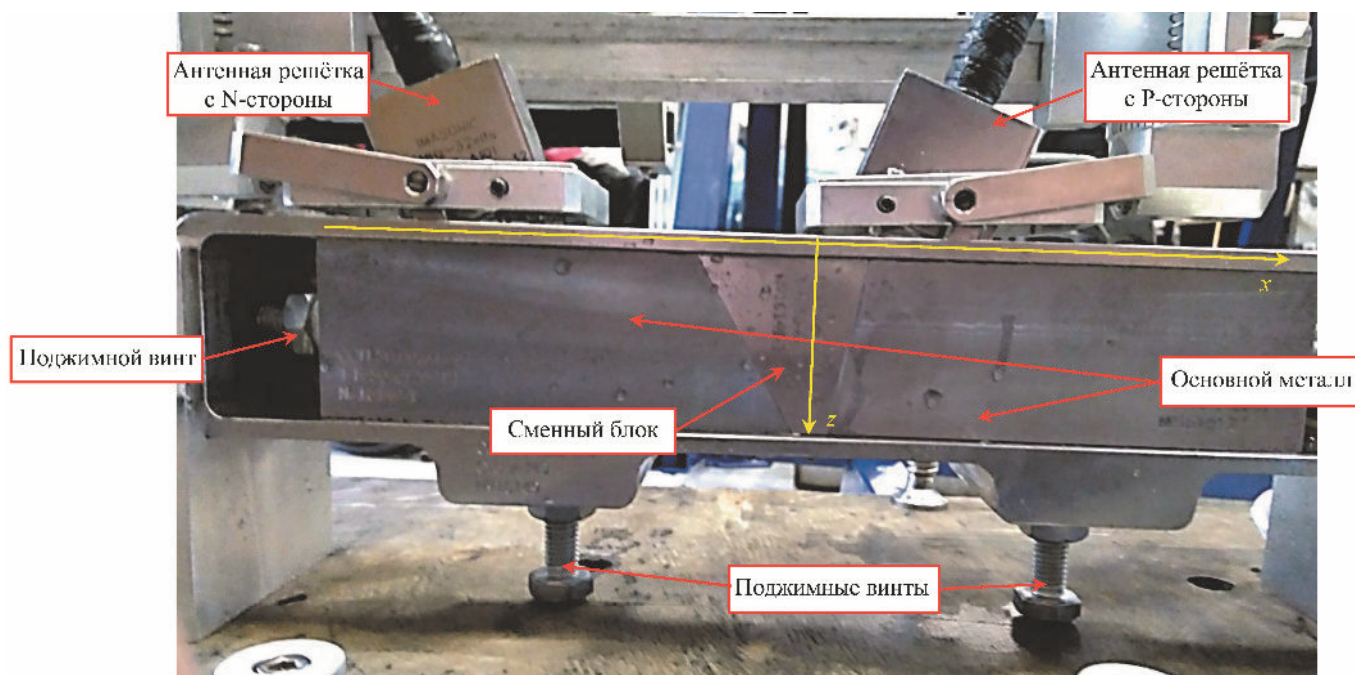


Рис. 6. Стенд со сменным блоком из аустенитной стали, имитирующий сварное соединение

Установка состояла из сканирующего устройства, установленного на трек, которое управлялось с помощью системы «АВГУР-АРТ», разработанной и изготовленной в Научно-производственном центре «ЭХО+» [10]. Эхосигналы регистрировались двумя АР (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента 0,9×10 мм, зазор 0,1 мм), установленной на плексигласовую 20-градусную призму. База была равна 70,5 мм. Измерения эхосигналов проводились в 11 положениях с шагом 5 мм. На рис. 6 две АР на призмах показаны в начальном положении, равном 56 мм.

При изготовлении сменного анизотропного блока возникла проблема, связанная со сложностью приобретения анизотропного материала с упругими коэффициентами и углом наклона кристаллических осей, известными с точностью менее 0,5 %. Поэтому, как было предложено в разделе «Численные эксперименты», изотропные сменные блоки из аустенита и дюралюминия рассматривались как материалы с кубической симметрией.

Результаты модельного эксперимента

Для повышения отношения сигнал/шум на примерно 20 дБ эхосигналы в каждом положении АР измерялись 200 раз, после чего проводилось их усреднение. На рис. 7 показаны измеренные эхосигналы 17-го выстрела третьего положения при использовании аустенитного сменного блока. На рис. 7 видно больше двадцати импульсов в каждом эхосигнале, сформированных по разным акустическим схемам. Выносками красного цвета указаны

эхосигналы, полученные по некоторым акустическим схемам. Выноской «?» отмечены импульсы, природа которых непонятна и частота которых заметно ниже, чем у других импульсов. На рис. 7 видно, что даже при использовании процедуры повышения отношения сигнал/шум, амплитуды измеренных эхосигналов по акустическим схемам LL и LLLL относительно малы. Поэтому для уменьшения времени расчета эхосигналов будем использовать не все эхосигналы, а лишь эхосигналы большой амплитуды, например LT и TL.

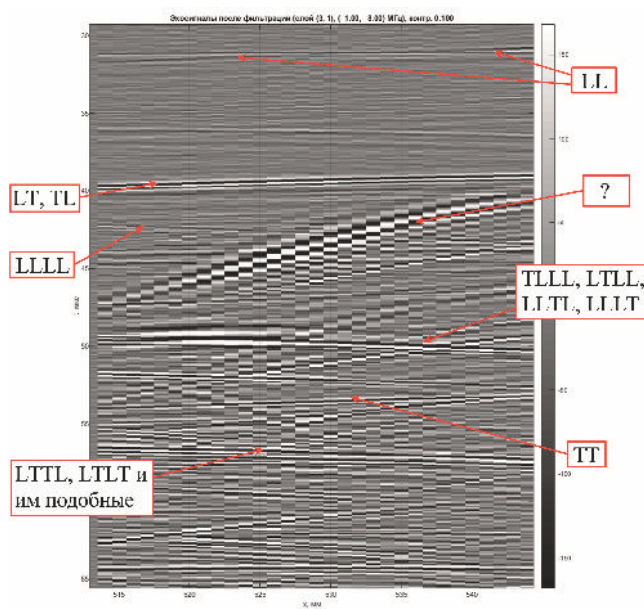


Рис. 7. Эхосигналы 17-го выстрела третьего положения при использовании аустенитного сменного блока

Измерение продольной скорости звука

Измеренные в модельных экспериментах эхосигналы были использованы и для дополнительной проверки алгоритма определения скорости продольной ультразвуковой волны сварного соединения предложенного в статье [6], но с применением прямого расчета целевой функции $D_m(\mathbf{v}; 1; 0,25)$.

В табл. 3 показаны результаты определения скорости продольной волны в аустенитном и дюралюминиевом сменных блоках с применением прямого расчета целевой функции (см. раздел «Прямой расчет целевой функции»), для расчета которой использовались эхосигналы пяти выстрелов (1-, 9-, 17-, 24-, 32-й выстрелы). Для расчета целевой функции использовались эхосигналы при первом, втором, третьем положениях, а также всех трех положений при одновременной обработке эхосигналов. Полученная относительная погрешность расчета для аустенитного и дюралюминиевого блоков при использовании эхосигналов разных положений меньше 0,1%. Это значительно лучше, чем относительная погрешность определения скорости продольной волны в сварном соединении, равная 0,7%, полученная в статье [6], где применяется метод, описанный в разделе «Минимизация целевой функции». Так как результаты расчетов, полученные при работе алгоритма для разных положений АР (см. табл. 3), близки друг к другу, то это свидетельствует об устойчивости его работы.

Измерение упругих коэффициентов

В табл. 4 показаны относительные погрешности расчета упругих коэффициентов сменных блоков с использованием целевой функции $D_m(\mathbf{v}; 1; 0,25)$. Для аустенитного блока расчеты проводились по эхосигналам 17-го выстрела, а для дюралюминиевого блока по эхосигналам выстрелов 1, 8, 17, 24 и 32. Учитывались акустические схемы LL, LLLL, TT при использовании эхосигналов четырех положений (1-, 3-, 5- и 7-е положение). В отличие от численных экспериментов достигнутая относительная

3. Результаты работы алгоритма определения скорости продольной волны в сменных блоках с использованием прямого расчета целевой функции

| Положение АР | Относительная погрешность расчета, % | |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| | Аустенитный сменный элемент | Дюралюминиевый сменный элемент |
| 1 (-56 мм) | 0,04 | 0,04 |
| 2 (-51 мм) | 0,01 | -0,02 |
| 3 (-46 мм) | 0,10 | 0,02 |
| 1, 2, 3 | 0,04 | 0,01 |

погрешность определения упругих коэффициентов оказалась менее 1,5%. Такое большое значение относительной погрешности определения упругих коэффициентов связано со слабым изменением скорости звука при достаточно сильном изменении упругих коэффициентов сварного соединения, что усложняет процесс сравнения рассчитанных и полученных эхосигналов (см. раздел «Численные эксперименты»). Даже при учете многих акустических схем не удастся решить задачу достаточно точно. Относительная погрешность расчета скорости продольной волны $c_{l,1}$ и $c_{l,2}$ по рассчитанным упругим коэффициентам (4) оказалось менее 0,26%, а модуль относительной погрешности расчета (4) поперечной волны c_s – менее 0,15%. Как и в численном эксперименте, относительная погрешность определения скорости поперечной волны c_s и коэффициента C_{66} меньше, чем для скорости продольной волны $c_{l,1}$ и $c_{l,2}$ и коэффициентов $\{C_{11}, C_{12}\}$.

Для повышения точности работы алгоритма определения упругих коэффициентов анизотропного соединения необходимо переходить на расчет эхосигналов, отраженных от границ ОК, методом Кирхгофа и рассчитывать эхосигналы, проводя интегрирование по всей поверхности излучающего и приемного пьезоэлементов.

4. Относительны погрешности определения упругих коэффициентов в аустенитном сменном блоке по схемам LL, LLLL, TT и относительные погрешности скоростей продольной волны по формуле (4)

| Положение АР | Относительная погрешность расчета упругих параметров аустенитного блока, % | | | | | |
|---|--|----------|----------|-----------|-----------|-------|
| | C_{11} | C_{12} | C_{66} | $c_{l,1}$ | $c_{l,2}$ | c_s |
| 1, 3, 5, 7 (17-й выстрел) | 0,97 | 1,44 | -0,13 | 0,23 | 0,26 | -0,10 |
| Относительная погрешность расчета упругих параметров дюралюминиевого блока, % | | | | | | |
| 1, 3, 5, 7 (1-, 8-, 17-, 24- и 32-й выстрелы) | -0,34 | -1,23 | -0,29 | -0,79 | -0,22 | -0,15 |

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Создана программа трассировки для расчета эхосигналов при многократном отражении импульса от границ ОК и прохождения через анизотропное сварное соединение.

2. Разработан алгоритм и написана программа для определения упругих коэффициентов по эхосигналам, измеренным двумя АР по NP-каналу.

3. В численных экспериментах относительная погрешность расчета скорости продольной волны в дюралюминиевом сварном соединении оказалась порядка 0,1 %. Относительная погрешность определения упругих коэффициентов для случая кубической симметрии составила порядка 0,3 %.

4. В модельном эксперименте относительная погрешность расчета скорости продольной ультразвуковой волны в аустенитном и дюралюминиевом сменных блоках оказалась порядка 0,2 %. Относительная погрешность определения упругих коэффициентов для случая кубической симметрии сменных блоков (аустенит, дюралюминий) меньше 1,5 %.

Авторы благодарны С. Ю. Романову, ведущему научному сотруднику НИВЦ МГУ им. М. В. Ломоносова, за замечания и предложения, высказанные в процессе подготовки статьи.

Библиографический список

1. **Воронков В. А., Воронков И. В., Козлов В. Н. и др.** О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1(51). С. 64 – 70.
2. **EXTENDE:** официальный сайт фирмы. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 15.01.2020).
3. **Базулин Е. Г.** Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12 – 22.
4. **Буров В. А., Сергеев С. Н., Шуруп А. С.** Роль выбора базисных функций в задачах акустической томографии океана // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 6. С. 791 – 808.
5. **Goncharsky A. V., Romanov S. Yu.** Iterative methods for solving coefficient inverse problems of wave tomography in models with attenuation // Inverse Problems. 2017. V. 33. No. 2. P. 025003. URL: <https://doi.org/10.1088>
6. **Кравцев Ю. А., Орлов Ю. И.** Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
7. **Бабич В. М., Киселев А. П.** Упругие волны. Высокочастотная теория. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 320 с.
8. **Петрашень Г. И.** Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.
9. **Мэтьюз Д. Г., Финк К. Д.** Численные методы. Использование MATLAB 3-е изд. М.: ИД «Вильямс», 2001. 720 с.
10. **«ЭХО+»:** официальный сайт фирмы. URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 15.01.2020).

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ РЕВОЛЮЦИИ 4.0 В ПРОДУКЦИИ «НПЦ «ЭХО+»



А. Е. Базулин,
канд. техн. наук,
гл. конструктор



Е. Г. Базулин,
д-р техн. наук,
зам. ген. директора
по науч. вопросам,
нач. системного отдела



Д. С. Тихонов,
канд. техн. наук,
зам. ген. директора

Рассматриваются примеры применения современных технологий, относящихся к индустриальной революции 4.0 в ультразвуковом контроле, реализованные или запланированные к реализации в продукции ООО «НПЦ «ЭХО+».

В журнале «В мире НК» в 2018 году вышла статья Тейера Питера «Неизбежность четвертой промышленной революции и роль НК и мониторинга». Статья переведена и перепечатана из журнала Insight (сентябрь 2017 года) [1]. В статье анализируются итоги прогнозов касательно тенденций развития технологий неразрушающего контроля, сделанные пять лет назад (в целом сбываются), и представлены прогнозы на следующие 5, 10 и 20 лет.

Рассмотрим основные направления, по которым развивается продукция ООО «НПЦ «ЭХО+» в приложении к индустриальной революции 4.0 в ультразвуковом контроле. Среди таких технологий:

- 1) беспроводные технологии:
 - а) удаленное управление системой сбора данных;
 - б) передача данных в «облако» и расшифровка экспертом или автоматическим алгоритмом;
- 2) роботизация и автоматизация:
 - а) автоматизация настройки и проведения контроля, самодиагностика аппаратуры;
 - б) автоматизация анализа данных (в том числе с применением технологий машинного обучения) при определении типа дефектов и качества собран-

ных данных для различных технологий контроля (ФР, ЦФА, TOFD);

- с) создание «цифровых двойников» и интеграция данных УЗК и УЗТ в систему управления жизненным циклом предприятия;
- 3) учет параметров объекта контроля:
 - а) снижение влияния параметров поверхности;
 - б) учет профиля наружной поверхности, интеграция с автоматизированным визуальным контролем;
 - с) учет профиля внутренней поверхности;
 - д) учет анизотропии объекта контроля;
 - 4) продвинутое моделирование процесса ультразвукового контроля.

Беспроводные технологии и базы данных

Среди прочих примеров использования беспроводных технологий, таких как объединение всевозможных датчиков и встраивания их в АСУ ТП предприятия, в системах и дефектоскопах серии «АВГУР» реализованы следующие возможности:

- привязка места контроля к данным контроля по координатам GPS/GLONASS;
- удаленное подключение эксперта к системе или дефектоскопу для конфигурирования;
- передача собранных данных контроля в «облачное» хранилище для оперативной расшифровки квалифицированным оператором.

Объединение нескольких методов и технологий контроля позволяет приблизить задачу построения цифрового двойника опасного промышленного объекта для принятия решения об объемах диагностики и остаточном ресурсе. Мы в «ЭХО+» еще в начале 2000-х прочувствовали, к чему все идет, и сразу строили нашу систему «АВГУР» вокруг базы данных, которая включает в себя сведения об объекте контроля, методиках, настройках, данных контроля, нормах оценки качества и результатах анализа данных (рис. 1). Пример роста объема базы данных на сервере ООО «НПЦ «ЭХО+» показан на

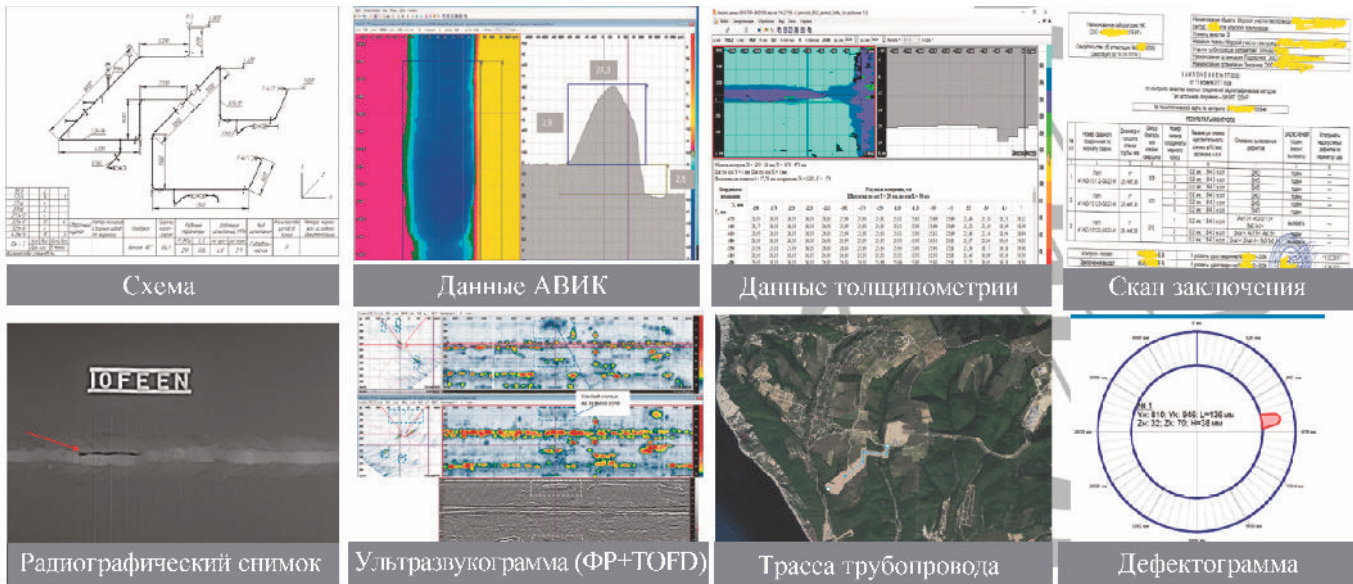


Рис. 1. Принцип построения общей базы данных результатов контроля

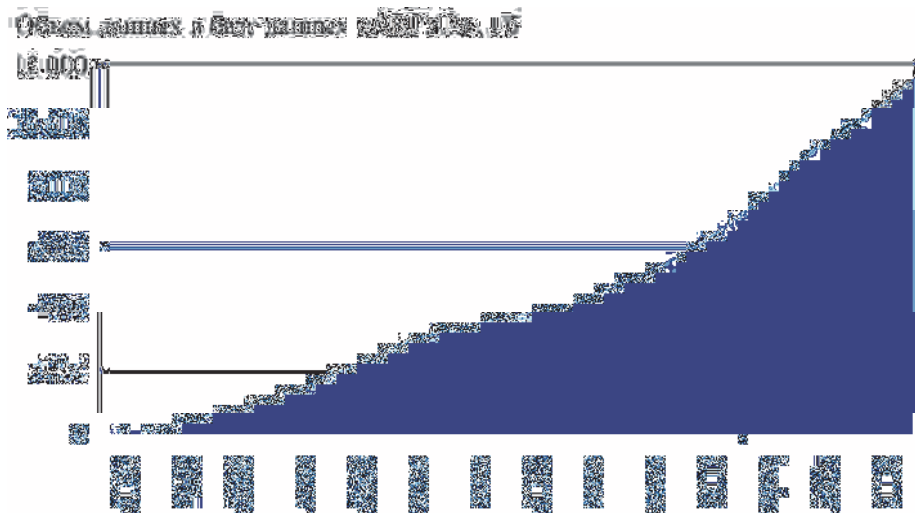
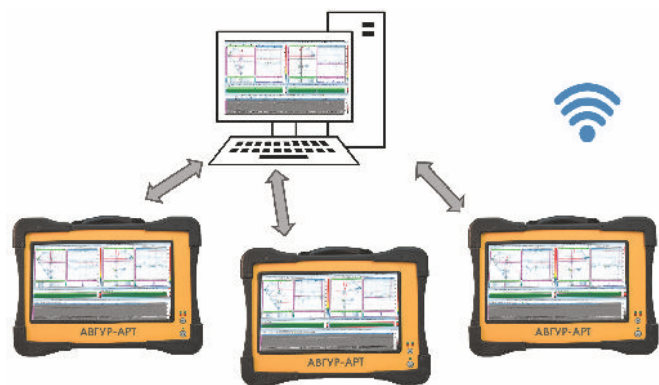


Рис. 2. Объем данных, хранящихся в базе данных «АВГУР» на сервере ООО «НПЦ «ЭХО+»

рис. 2. Полученная база данных, переданная заказчику – эксплуатирующей организации, позволяет проверить целостность данных, провести мониторинг состояния ответственных узлов и в объединении с системой, реализующей методологию Risk Based Inspection [2], планировать проведение диагностики и ремонтов.

К централизованной базе данных организован доступ со множества терминалов (рис 3). Таким образом обеспечивается разделение ответственности между пользователями:

- специалист III уровня готовит настройку прибора в соответствии с утвержденной методикой или технологической картой;
- специалист II или I уровня загружает настройку в прибор, выполняет калибровку чувствительности, сбор данных на объекте и прочие



Передача настроек на системы и дефектоскопы

Рис. 3. Принцип обмена данными между сервером и портативными дефектоскопами

операции по контролю. Загружает результаты калибровки и контроля в базу данных;

- специалист III или II уровня выполняет расшифровку данных и может дать обратную связь по качеству собранных данных (ре-скан), необходимости перекалибровки или ремонта;

- в случае необходимости специалист III уровня может подключиться к рабочему столу пользователя и проверить корректность работы, а также оказать консультацию прямо во время осуществления контроля.

Автоматизация и роботизация

Роботизированный и автоматизированный контроль находит все большее распространение в практике (рис. 4). Применяются и устройства для дистанционного контроля тех объектов, к которым осложнен или невозможен прямой доступ (ядерные реакторы, внутренняя часть трубопроводов, не подверженных внутритрубной диагностике, сварные

швы и основной металл емкостей), роботизированная рука с шестью степенями свободы, планшетные сканеры, относительно простые двухкоординатные сканеры для сварных швов, пилотируемые и автономные дроны. Главное назначение такой автоматизации – обеспечение воспроизводимости и документирования результатов контроля, снижение влияния субъективного фактора, а в ряде случаев и принципиальное повышение скорости контроля.

Все поколения дефектоскопов «АВГУР» были созданы с прицелом на автоматизированный контроль с визуализацией и архивацией данных ультразвукового контроля.

Самодиагностика и автоматизация анализа данных

Проверка работоспособности по модулям

Каждый модуль, входящий в состав системы (модули управления сканерами, модули ультразвуковые, модули автоматизированного ВИК), проходит

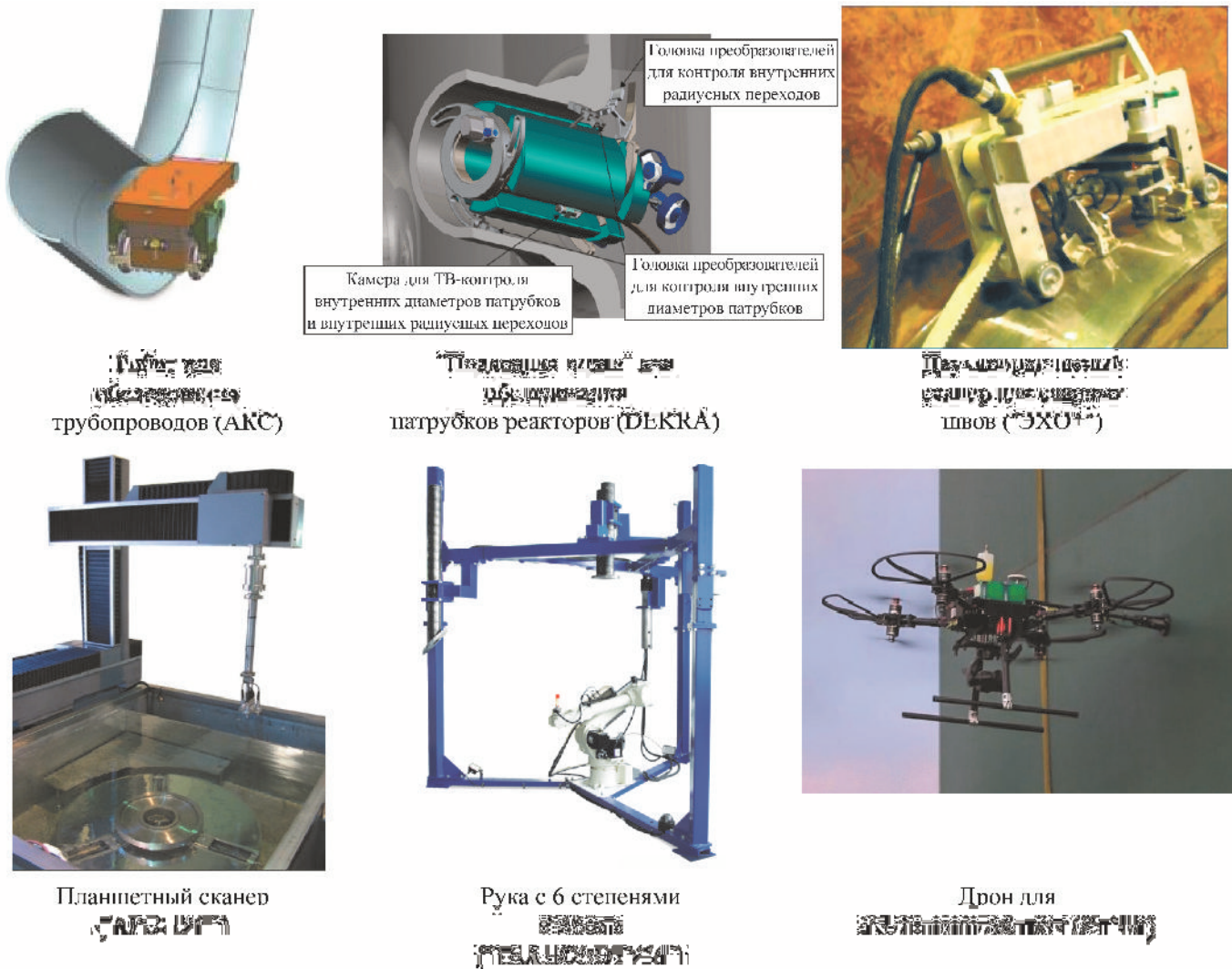
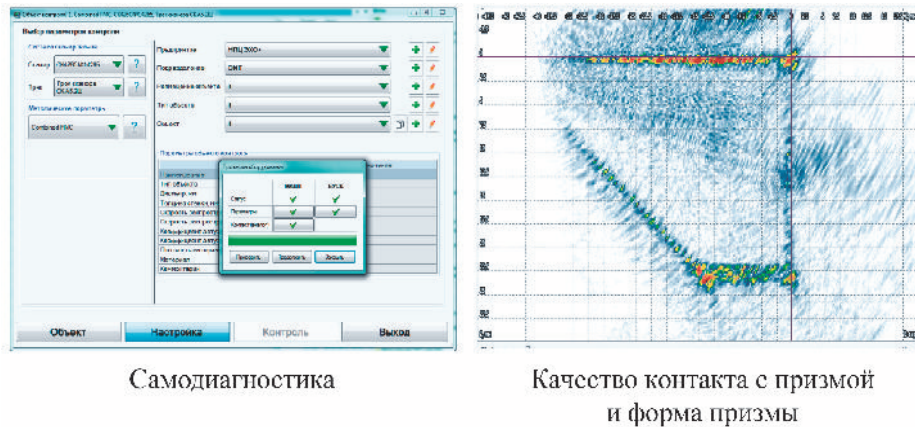


Рис. 4. Варианты роботизации ультразвукового контроля



Самодиагностика

Качество контакта с призмой и форма призмы

Рис. 5. Элементы самодиагностики и способ проверки качества контакта с призмой ФР

самодиагностику: при опросе сообщает номера версий программного обеспечения, параметры и возвращает свое состояние после самотестирования. Если какие-то из модулей не прошли тест, выводится диалог с пояснениями по возникшей проблеме (рис. 5).

Проверка линейности усилителя

Периодическая проверка линейности усилителя выполняется автоматически при изменении диапазона усилителя в диапазоне не менее 24 дБ и замере амплитуды эхосигнала от выбранного отражателя.

Проверка акустического контакта

Для слежения за качеством акустического контакта к каждому каналу сбора данных в режиме ФР (фазированные решетки) или ЦФА (цифровая фокусировка антенных решеток) может быть создан отдельный канал для замера амплитуды донного сигнала при использовании продольных волн. Канал может быть как совмещенным (для одной ФР), так и отдельным (для двух ФР, расположенных по обе стороны от сварного шва). В зависимости от требований методики контроля устанавливается недопустимый уровень падения амплитуды этого сигнала (в диапазоне 3 ... 6 дБ), при котором возникает индикация потери акустического контакта.

Для проверки качества акустического контакта ФР и сменной призмы достаточно визуализировать изображение, указав скорость звука в объекте контроля, равной скорости звука в призме. В результате визуализируется граница раздела призма–объект и геометрия самой призмы (см. рис. 5).

Проверка подключенных преобразователей и призм

Ряд производителей встраивает в свои фазированные решетки чип EEPROM, который распознается дефектоскопом. Сложность здесь в том, что

отсутствует общий стандарт, обеспечивающий совместимость ФР и приборов разных производителей.

Соблюдение требований к порядку выполнения контроля

Столкновение реальности с требованиями документа может в ряде случаев привести к неизбежным отклонениям от заданных требований. В то же время программное обеспечение выполняет анализ: отклонений в выборе параметров преобразователей, траектории сканирования, наличия и качества акустического контакта, пропуска данных в целях окончательного принятия решения о соответствии фактически проведенного контроля требованиям и причинам этих отклонений.

Автоматическая обработка данных

Понимая важность снижения субъективного фактора при анализе данных АУЗК, еще в начале 2000-х годов в ООО «НПЦ «ЭХО+» велись работы по автоматизации анализа данных УЗК, в том числе с применением технологий искусственного интеллекта [3]. Однако к настоящему моменту оптимальным признан алгоритмический подход к анализу данных контроля, включающий в себя этапы [4], приведенные в табл. 1.

В результате автоматического поиска определяются следующие параметры для каждой несплошности:

- превышение браковочного уровня (дБ);
- расположение в объекте контроля по осям X, Y, Z (мм);
- условная протяженность (мм);
- протяженность по осям X, Y, Z (мм);
- тип несплошности.

1. Основные этапы алгоритма автоматизированного поиска дефектов

| Этап | Назначение этапа |
|---|--|
| Отсечка шума | Предназначена для удаления низкоамплитудного шума на изображении. Проверяется каждая точка изображения, если амплитуда в этой точке ниже заданного уровня, то амплитуда приравнивается к нулю |
| Фильтрация изображения | Предназначена для удаления высокоамплитудного шума на изображении. Проводится путем сглаживания изображения эллиптическим фильтром. Длины полуосей и угол поворота эллипса задаются в параметрах алгоритма |
| Поиск локальных максимумов | В каждой плоскости фильтрованного изображения, полученного на предыдущем этапе, выполняется поиск локальных максимумов по маске в виде эллипса, которые могут соответствовать области локализации дефекта |
| Поиск контуров | Для каждого локального максимума послойно рассчитываются размеры контура локализации несплошности по Z и X . Проверяется каждая точка изображения, если амплитуда в этой точке больше заданного уровня отсечки от локального максимума (по умолчанию уровень -6 дБ), то точка включается в контур |
| Объединение контуров | Выполняется объединение контуров в каждой плоскости изображения, если расстояние между ними меньше заданного |
| Удаление малых контуров | Удаляются контуры, размер которых менее 50% размера элемента разрешения (размер точечного отражателя) |
| Поиск 3D-контуров | Проводится объединение контуров в соседних плоскостях в 3D-контуры, если расстояние между их максимумами меньше заданной величины, пропорциональной размерам элемента разрешения |
| Объединение 3D-контуров | 3D-контуры объединяются, если расстояние между ними меньше заданного значения, пропорционально размерам элемента разрешения |
| Удаление малых 3D-контуров | 3D-контур удаляется, если его размеры меньше заданного значения |
| Определение амплитуды и условных размеров дефекта | Максимум амплитуды определяется по исходному неотфильтрованному изображению в области, ограниченной 3D-контуром |
| Удаление 3D-контуров несплошностей с низкой амплитудой | Удаляются 3D-контуры несплошностей с амплитудой ниже контрольного уровня |
| Проверка параметров несплошности по нескольким схемам контроля (положениям ПЭП) | Одна и та же несплошность может быть выявлена при контроле с различных сторон сварного соединения, а также при изменении координаты призмы относительно оси шва. При выявлении несплошностей по разным схемам контроля, в случае если перекрытие рамок несплошностей не превышает заданного значения, из найденных рамок несплошностей по разным схемам остается та, в которой амплитуда изображения наибольшая. Если амплитуды одинаковые, то остается та рамка, у которой протяженность больше |
| Определение типа несплошностей | Определяется превышение амплитудой несплошности контрольного и браковочного уровней и ее положение по толщине объекта контроля (наружная, внутренняя, подповерхностная). Также определяется, является ли несплошность объемной либо плоскостной |
| Сохранение списка найденных 3D-контуров несплошностей в базу данных | Все оставшиеся в результате работы алгоритма 3D-контуры несплошностей сохраняются в базу данных для текущего объекта контроля |

После завершения поиска автоматически формируется заключение по результатам контроля. Данные УЗК в виде изображений и протокол работы программы автоматического поиска дефектов могут быть использованы как при-

ложение к заключению. На рис. 6 показан пример работы алгоритма автоматизированного поиска и образмеривания дефектов в испытательном образце со сварным швом толщиной 145 мм.



Рис. 6. Пример работы алгоритма автоматического поиска дефектов по данным АУЗК в сварном соединении толщиной 145 мм

Адаптация к изменению объекта контроля

Неидеальность объекта контроля затрудняет как проведение контроля, так и интерпретацию результа-

тов контроля. К таким осложняющим факторам можно отнести изложенные в табл. 2, ряд иллюстраций приведен на рис. 7 – 9.

2. Влияющие факторы объекта контроля и способ их учета

| Факторы, осложняющие интерпретацию результатов контроля | Способ учета осложняющих факторов |
|--|--|
| Неровная наружная поверхность | При отсутствии возможности проведения иммерсионного контроля возможно применение «псевдоиммерсионного» режима, когда столб воды заменяется или кремнийорганическим полимером, или иным материалом, принимающим форму объекта контроля. При этом дефектоскоп решает задачу восстановления профиля поверхности, а затем и визуализации внутреннего сечения объекта контроля [5, 6] (см. рис. 8) |
| Неровная внутренняя поверхность (проточки, коррозионный и эрозийный износ) | Продвинутые технологии контроля позволяют получить изображение донной поверхности и затем учесть форму донной поверхности при визуализации изображений внутреннего сечения объекта [7] |
| Сложная геометрия (патрубки, тавровые сварные соединения, фасонные детали, резьба, см. рис. 9) | Здесь помогает применение программного обеспечения для моделирования распространения ультразвуковых волн в лучевом приближении или применение конечно-элементного моделирования [8], или, как минимум, средства для наложения эскиза объекта контроля на изображения, полученные при УЗК |
| Анизотропия скорости звука | Неравномерное распределение скорости звука в объекте контроля, или зависимость скорости распространения волны в объекте, приводит к погрешностям в определении координат и амплитуд индикаций от дефектов и геометрических отражателей. За счет построения модели объекта, учитывающей эти изменения и расчет задержек сигнала, реализуется получение более достоверного изображения. Пример решения задачи определения неизвестных параметров анизотропии приведен в публикации в этом сборнике [9] |
| Повышенное затухание | Для борьбы с повышенным затуханием ультразвуковых волн существует несколько подходов, в частности все оборудование ООО «НПЦ «ЭХО+» для автоматизированного и механизированного УЗК поддерживает технологию сложных сигналов, позволяющую существенно повышать энергию, закачиваемую в объект контроля, и увеличивать отношение сигнал/шум [10] |

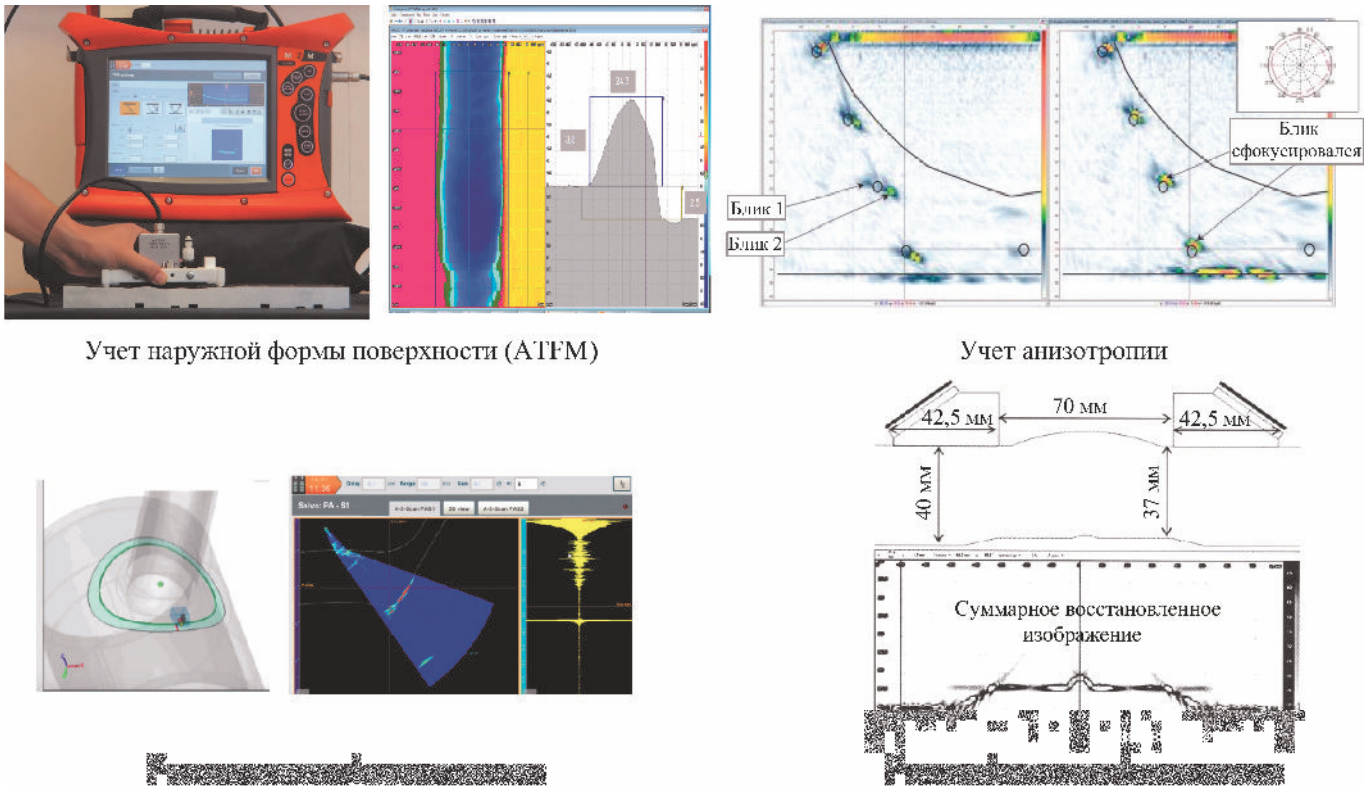


Рис. 7. Учет неидеальности объекта контроля

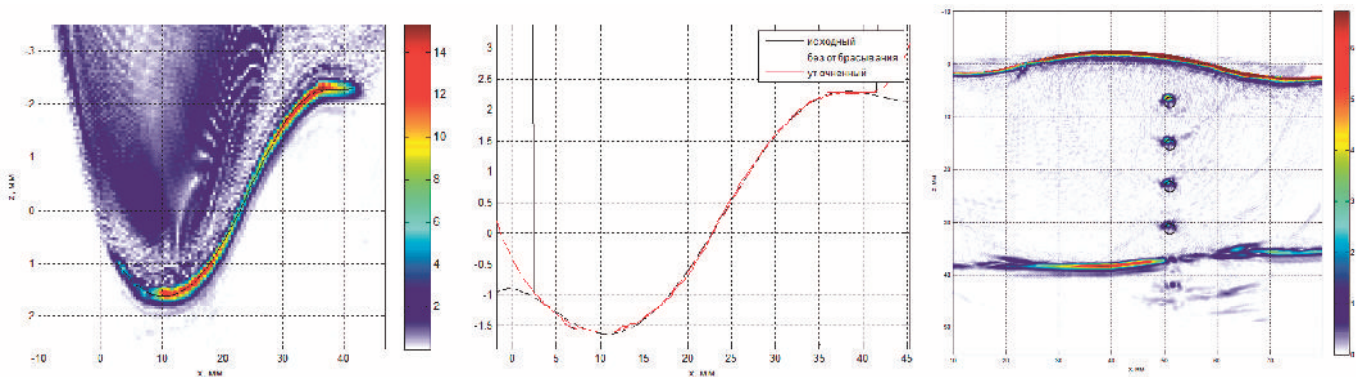


Рис. 8. Изображение поверхности тест-образца, ее профиль и ЦФА-Х-изображение отражателей

Продвинутое моделирование

Развитие вычислительных средств позволяет в ряде случаев выполнять достаточно сложное моделирование процессов распространения ультразвуковых волн в различных средах. В ООО «НПЦ «ЭХО+» применяется моделирование с применением программного средства CIVA [8, 16, 17], реализующего вычисления в приближении модели лучевых трубок, и моделирование с использованием конечно-разностных моделей [11].

Основные области применения моделей (примеры см. на рис. 9, 10):

- моделирование для расчета кривой вероятности выявления PoD;
- моделирование полей излучения и приема;
- учет сложной геометрии объекта контроля;
- учет анизотропии;
- оптимизация параметров схемы прозвучивания и преобразователей.

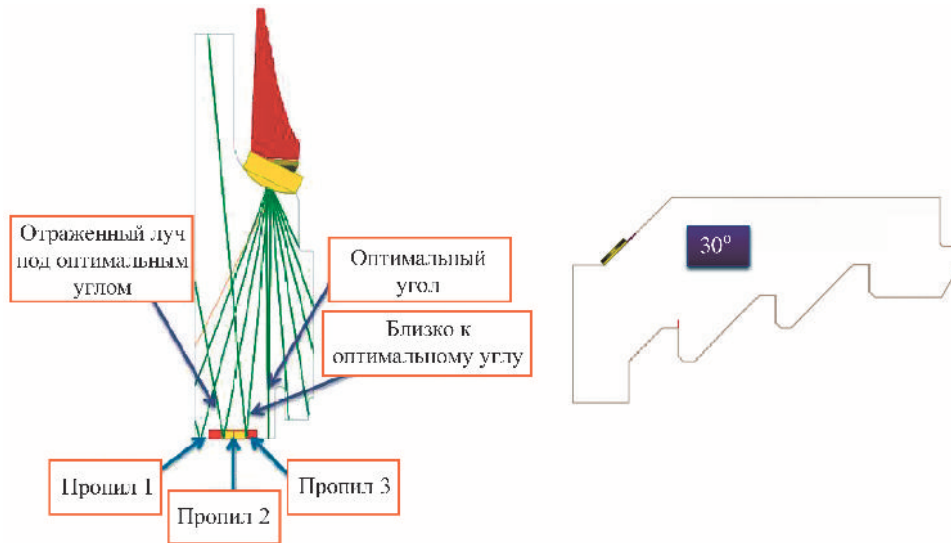


Рис. 9. Учет неидеальности объекта контроля (сложная геометрия)

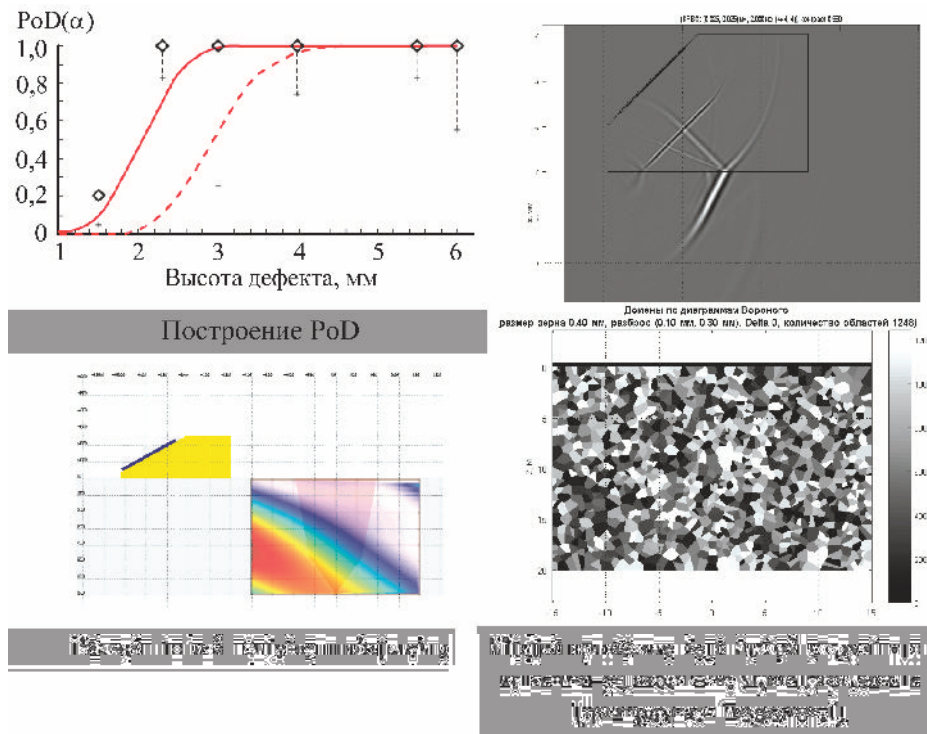


Рис. 10. Моделирование кривых выявляемости дефекта, расчет поля фазированной решетки, применение конечно-разностного моделирования и диаграмм Вороного

Blockchain и цифровая подпись

Одного формального проведения контроля может быть недостаточно для обеспечения целостности опасного промышленного объекта. Нередки случаи, когда под «флагом» определенной лаборатории выпускаются поддельные заключения по результатам контроля. Преодолеть эту беду должно требование 100%-ной фиксации результатов

контроля на электронном носителе, а защитить само заключение от подделки можно или с помощью технологии Blockchain (в идеале вся исполнительная документация должна быть создана с применением этой технологии, гарантирующей неизменность данных), или с помощью одной из технологий, реализующих электронную цифровую подпись, например в виде зашифрованной QR-метки (рис. 11) [12].

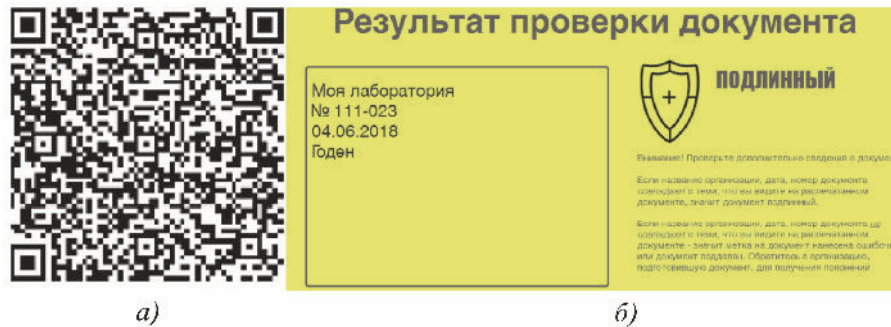


Рис. 11. Пример QR-метки (а), предназначенной для защиты заключений от подделки, и результат проверки подлинности (б)

Цифровые двойники, Big Data и машинное обучение

Обсуждая технологии уровня 4.0, нельзя обойти вниманием темы цифровых двойников, обработки больших данных и технологий искусственного интеллекта [19]. «Цифровой двойник» – это модель объекта, которая предсказывает его поведение и состояние, в том числе сроки обслуживания и остаточного ресурса. Модель постоянно обновляется и перекалибровывается. Важной частью моделей таких цифровых двойников является следующая информация:

- о фактической дефектности узлов (результаты неразрушающего контроля);
- о вероятности выявления тех или иных дефектов (кривые PoD, RoC), определенных как по результатам испытаний, так и по результатам моделирования и эксплуатации [13, 14].

Учитывая все эти модели, возможно, что в будущем уже модель будет подсказывать выбор конструкции, материалов и способа производства, оптимизирующие расходы на обслуживание и продляющие срок эксплуатации.

Методы машинного обучения как одной из дисциплин области искусственного интеллекта (AI) позволяют выполнять классификацию и предсказания, выявляя скрытые закономерности. Обучение возможно с учителем или самостоятельное. Если обучаемая нейросеть имеет много скрытых слоев, то обучение называется глубоким.

Массовое распространение машинного обучения в различных отраслях промышленности связано в том числе с тем, что:

- широко распространены готовые библиотеки алгоритмов (для Python, Matlab);
- имеются готовые наборы данных для обучения алгоритмов – доступные или открытые, или частные;
- есть «железо» для параллельных вычислений (особенно когда схлынула волна майнинга биткойна);
- существует запрос общества на такие технологии, как автопилоты для машин, диагностика в медицине или в онлайн-коммерции.

Как показано на рис. 12, позаимствованном из доклада [15], внедрение алгоритмов искусственного



Рис. 12. Этапы внедрения технологий искусственного интеллекта: ИИ-модель – модель с поддержкой искусственного интеллекта

интеллекта состоит из множества шагов, включающих помимо разработки модели с поддержкой искусственного интеллекта как таковой еще и физический уровень (датчики, файлы и базы данных), и уровень подготовки данных к анализу. Наибольший интерес и наибольшую сложность представляют сбор и разметка первичных данных для обучения.

Компаниями и лабораториями, выполняющими УЗК, накоплено множество данных ФАР, ЦФА, TOFD, полученных при механизированном или автоматизированном УЗК. Целесообразно применять к этим данным алгоритмы автоматического анализа данных: как для облегчения рутинной работы оператора, так и для обеспечения аудита за качеством выполняемых работ. Здесь на помощь может также прийти применение математического моделирования, в том числе моделирования ультразвукового контроля [16, 17]. Перспективным выглядит подход, когда данными для обучения алгоритмов искусственного интеллекта специалисты отрасли начнут делиться друг с другом и создавать открытые базы знаний, содержащие анонимизированные размеченные данные контроля. Некоторая сложность состоит в том, что пока не выработан общепринятый стандарт по разметке данных АУЗК.

Несколько достаточно актуальных задач для АУЗК могут быть реализованы с применением тех или иных технологий искусственного интеллекта:

- классификации по типам дефектов (например, плоскостные и объемные) или тренировки алгоритма на дефекты определенного типа, например на трещины; для ФР-режима или для метода TOFD интересной задачей является выявление признаков поперечной трещины;
- автоматического анализа данных, полученных при волноводном распространении ультразвука в трубопроводе;
- мониторинга изменений в состоянии объекта при повторном контроле;
- поиска дефектов на фоне конструктивных отражателей (эта задача актуальна и для УЗК с применением ФАР, и для анализа TOFD-данных);
- «цифрового слепок» и проверки дубликатов в базе данных. Важной задачей для эксплуатирующей организации или строительного подрядчика является контроль за добросовестным исполнением подрядчиком работ по неразрушающему контролю. Для проверки целостности данных может служить «цифровой слепок» сварного шва по данным УЗК – характерные индикации от корня шва, анализируемые на повышенной чувствительности [18], по аналогии с подобным механизмом, применяемым при проверке дублирования снимков при радиографическом контроле.

Выводы

Отрасль неразрушающего контроля и технической диагностики достойно встречает вызовы четвертой научно-технической революции, быть может, несколько медленнее, чем в ряде других отраслей.

С точки зрения заказчика все больший интерес представляет получение продукта, который бы объединял в себе средства как для диагностики, мониторинга, неразрушающего контроля, так и для проверки целостности собранных данных, обработки их и принятия решения о сроках обслуживания и эксплуатации объекта. Таким образом, неизбежно появление или вертикальная интеграция компаний, которые могут объединить свою техническую экспертизу с IT-инфраструктурой заказчика.

При этом создаваемые системы контроля приобретают все больше сложных функций и требуют более интенсивной подготовки и тренировки специалистов, выполняющих контроль. Как указано в обзорной статье [19]: «Эксперт по неразрушающему контролю может постепенно становиться специалистом по данным, который понимает как технические, так и бизнес-задачи и разбирается в методах управления данными и технологиях машинного обучения».

В отрасли назревает необходимость интеграции усилий производителей оборудования для УЗК в целях:

- унификации способов представления, описания и стандартов обработки данных УЗК;
- унификации типов разъемов для фазированных решеток и сканеров, подключаемых чипов для автоматической идентификации фазированных решеток;
- создания хранилища размеченных данных контроля с тем, чтобы стимулировать разработчиков алгоритмов автоматизации анализа данных, машинного обучения, тренировать свои программы и участвовать в конкурсах наподобие реализуемых на сайте Kaggle.com для данных медицинской диагностики.

Производство (системы контроля, программное обеспечение) и услуги (разработки уникальных систем, проведение контроля, консалтинг) ООО «НПЦ «ЭХО» как высокотехнологичной компании с сильным IT-компонентом отвечают вызовам четвертой промышленной революции в области неразрушающего контроля и технической диагностики.

Библиографический список

1. Тайер П. Незбежность четвертой промышленной революции и роль НК и мониторинга // В мире НК. 2018. Т. 21. С. 5 – 8.
2. Wintle J. B., Kenzie B. W., Amphlett G. J., Smalley S. Best practice for risk based inspection as a part of plant integrity management HSE. Health and Safety Executive, 2001. 186 p.

3. **Бадалян В. Г.** Автоматизация оценки параметров дефектов в системах АУЗК с когерентной обработкой данных // *Контроль. Диагностика.* 2010. № 1. С. 57 – 64, 69.
4. **Базулин А. Е., Коколев С. А., Тихонов Д. С.** Аттестация системы и методики ультразвукового контроля с полным циклом автоматизации // 10-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» / ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 16 – 19 мая 2017 г., Подольск, Россия. Подольск, 2017.
5. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г.** Применение антенных решеток и кремнийорганического полимера в качестве иммерсионной среды для проведения ультразвукового контроля объектов с неровной поверхностью // *Дефектоскопия.* 2014. № 7. С. 3 – 11.
6. **Casula O., Toullelan G., Roy O., Dumas Ph.** Ultrasonic nondestructive testing of complex components with flexible phased-array transducers // 10th ECNDT. Moscow, Russia, June 7 – 11, 2009. М., 2009.
7. **Пронин В. В., Базулин А. Е., Тихонов Д. С., Шкатов П.Н.** Построение профиля внутренней поверхности трубопроводов ультразвуковым методом с применением технологии цифровой фокусировки антенны // *Приборы.* 2015. № 11. С. 16 – 26.
8. **Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Тихонов Д. С.** Математическое моделирование при разработке и аттестации методик УЗК // *Ультразвуковая дефектометрия.* 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 137 – 152.
9. **Базулин Е. Г., Вopilкин А. Х., Тихонов Д. С.** Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1 // *Контроль. Диагностика.* 2015. № 8. С. 7 – 22.
10. **Авагян В. К., Базулин Е. Г.** Использование псевдоортогональных сигналов для уменьшения уровня шума при проведении ультразвукового контроля материалов с большим поглощением // *Дефектоскопия.* 2019. № 8. С. 3 – 13.
11. **Базулин Е. Г., Коновалов Д. А., Садыков М. С.** Метод конечных разностей во временной области. Расчет эхосигналов в анизотропных неоднородных материалах, структурный шум // *Дефектоскопия.* 2018. № 8. С. 3 – 11.
12. **Сервис** по защите заключений от подделок. URL: <https://www.protectmydoc.com> (дата обращения 25.12.2019).
13. **Бадалян В. Г., Самарин П. Ф.** Расчет кривых вероятности выявления дефектов в сварных соединениях трубопроводов АЭС. Доклад. Презентация // 20-я Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 3 – 6 марта 2014 г. М., 2014. С. 92 – 94.
14. **Бадалян В. Г.** Риск-ориентированный подход в диагностике и ультразвуковая дефектометрия // *Ультразвуковая дефектометрия.* 30 лет: юбилейный сб. тр. ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: ИД «Спектр», 2020. С. 116 – 124.
15. **Туревский А.** Keynote: Искусственный Интеллект / The MathWorks, Inc. URL: <https://exponenta.ru/events/2y10cfn8nrcoc3chtkf6u5ebzuouuiy1j6bothpy7x8wpwafvuj7ps> (дата обращения 20.01.2020)
16. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Базулин А. Е. и др.** Использование моделирования для оптимизации методик УЗК // *Сварка и диагностика.* 2014. № 6. С. 18 – 22.
17. **Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Базулин А. Е. и др.** Разработка и аттестация методик АУЗК с использованием программного комплекса CIVA // *Ультразвуковая дефектометрия.* 25 лет: юбилейн. сб. тр. ООО НПЦ «ЭХО+» / под ред. А.Х. Вopilкина. М. – СПб.: СВЕН, 2015. С. 92 – 100.
18. **Sednev D., Kataeva O., Abramets V. et al.** Ultrasonic fingerprinting by phased array transducer // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Bristol, 2016. V. 135.
19. **Wunderlich Ch., Tschöpe C., Duckhorn F.** Advanced methods in NDE using machine learning approaches // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 1949. 020022.

Приложение 1. Содержание юбилейного сборника трудов к 20-летию ООО «НПЦ «ЭХО+» «Автоматизированный ультразвуковой контроль объектов повышенной опасности»

Предисловие к юбилейному сборнику

А.Х. Вopilкин. Почему ультразвуковая автоматизированная голография?

В. Г. Бадалян, А. Х. Вopilкин. Оценка состояния и продление ресурса объектов с использованием АУЗК

В. Г. Бадалян, А. Х. Вopilкин. Мониторинг сварных соединений трубопроводов с использованием систем АУЗК с когерентной обработкой данных

В. Г. Бадалян, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов. Методология выбора структуры АУЗК для конкретной задачи

Д. С. Тихонов. Основные этапы АУЗК с определением размеров дефектов системами серии «Авгур»

С. В. Ромашкин, Д. С. Тихонов. Опыт применения системы «Авгур-Т» на объектах нефтегазовой отрасли промышленности

А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, Ю. Л. Гордеев, А. Г. Костылов, Д. С. Тихонов, А. М. Штерн. Мобильные измерительные системы АУЗК серии «Авгур»

В. Г. Бадалян, П. Ф. Самарин, Д. С. Тихонов. АУЗК сварных соединений оборудования АЭС с применением систем «Авгур 5.2»

Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов, О. О. Шнель. Новая технология применения антенных решеток для АУЗК сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300

В. А. Гапанович, А. Х. Вopilкин, Д. А. Кононов, Д. С. Тихонов, А. К. Гурвич, А. Г. Казанцев, З. М. Славинский. Автоматизированные средства диагностирования объектов повышенной опасности методом многоакурсной акустической голографии

А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов. Автоматизированная система для измерения параметров ультразвуковых пьезопреобразователей

А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, А. А. Коваль, Д. С. Тихонов. Ультразвуковой контроль толстостенных аустенитных сварных соединений с узкой разделкой в рамках проекта ИТЭР

А. Х. Вopilкин. Примеры экономической эффективности применения голографических автоматизированных комплексов

Приложение 2. Содержание юбилейного сборника трудов ООО «НПЦ «ЭХО+» «Ультразвуковая дефектометрия. 25 лет»

А. Х. Вopilки. Введение

А. Х. Вopilкин. Без истории нет будущего

В. Г. Бадалян, А.Х. Вopilкин. 25-летний опыт диагностики сварных соединений объектов повышенной опасности системами Авгур

В. Г. Бадалян, А. Х. Вopilкин. Радиография или ультразвук - что лучше?

В. Г. Бадалян, А. Е. Базулин, А. Х. Вopilкин. Методическое обеспечение приборов ультразвукового контроля, использующих метод синтезированной апертуры

Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решётками

Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум

А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, С. А. Коколев, Д. С. Тихонов. Применение метода фронтальной проекции в спектральном пространстве для ультразвукового контроля трубопроводов

А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, Ю. Л. Гордеев, В. Л. Козлов, С. А. Коколев, К. А. Кузнецов, С. В. Ромашкин, Д. С. Тихонов, А. М. Штерн. Система автоматизированного контроля АВГУР -АРТ – от искусства применения новых возможностей к практической диагностике

А. Х. Вopilкин, С. В. Ромашкин, Д. С. Тихонов. Опыт применения автоматизированного ультразвукового контроля технологических трубопроводов из аустенитных сталей взамен радиографического контроля на примере строительства комплекса каталитического крекинга ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез»

В. Г. Бадалян, А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, П. Ф. Самарин, Д. С. Тихонов. Разработка и аттестация методик АУЗК с использованием программного комплекса CIVА

А. Е. Базулин, Х. Бенитес, В. В. Пронин, Д. С. Тихонов, О.О. Шнель. Сплошная ультразвуковая тощинометрия основного металла и сварных швов

Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов. Сравнение изображений, восстановленных ФАР - и ЦФА-дефектоскопами

К. А. Кузнецов, Д. С. Тихонов. Сканирующие устройства автоматизированного УЗК

АВТОРЫ СТАТЕЙ ЮБИЛЕЙНОГО СБОРНИКА «НПЦ «ЭХО+»



Авагян Ваган Каренович

Инженер третьей категории ООО «НПЦ ЭХО+».
Закончил Национальный исследовательский университет «МЭИ» в 2019 году по специальности «Приборы и методы контроля качества и диагностики».
С 2019 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка алгоритмов обработки данных ультразвукового контроля.



Бадалян Владимир Григорьевич

Главный научный сотрудник ООО «НПЦ ЭХО+», доктор технических наук, III уровень по акустическим методам контроля.
Закончил Московский государственный университет им. М.И. Ломоносова, физический факультет в 1965 году.
С 1990 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка когерентных методов и средств ультразвукового контроля.



Базулин Андрей Евгеньевич

Главный конструктор ООО «НПЦ «ЭХО+», кандидат технических наук, III уровень по УЗК с применением ФР и TOFD, II уровень по РК.
В 2004 году закончил Московский авиационный институт им. Серго Орджоникидзе.
С 2004 года с перерывом на 1 год работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка автоматизированных систем ультразвукового контроля, внедрение новых IT-решений для управления инфраструктурой опасных промышленных объектов.



Базулин Евгений Геннадьевич

Заместитель генерального директора по научным вопросам, начальник системного отдела ООО «НПЦ «ЭХО+», доктор технических наук.
Закончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1980 году.
С 1990 года с перерывом на 3 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка алгоритмов восстановления изображений отражателей по рассеянным ультразвуковым импульсам.



Бутов Александр Витальевич

Ведущий инженер системно-методической лаборатории ООО «НПЦ «ЭХО+», II уровень по УЗК.
Окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1991 году.
С 2013 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка методик автоматизированного ультразвукового контроля.



Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор ООО «НПЦ «ЭХО+», доктор технических наук.

Закончил Московский горный институт в 1967 году.

С 1990 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».

Научные интересы: ультразвуковая дефектometрия, автоматизированные системы диагностики с когерентной обработкой данных.



Заушицын Александр Васильевич

Ведущий научный сотрудник системно-методической лаборатории ООО «НПЦ «ЭХО+», II уровень по УЗК.

Окончил Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова в 2003 году.

С 2007 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».

Научные интересы: разработка методик автоматизированного ультразвукового контроля.



Козлов Василий Львович

Заместитель начальника отдела информационных технологий ООО «НПЦ «ЭХО+».

Окончил Белорусский государственный университет в 2001 году по специальности «Физика» и в 2002 году специальный факультет бизнеса и информационных технологий Белорусского государственного университета по специальности переподготовки «Информатика».

С 2009 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».

Научные интересы: создание программных комплексов автоматизированных средств управления.



КокOLEV Сергей Анатольевич

Начальник лаборатории разработки алгоритмов ООО «НПЦ «ЭХО+», II уровень по УЗК.

Окончил Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана в 2006 году с отличием по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств».

С 2006 года с перерывом на 2 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».

Научные интересы: разработка алгоритмов обработки данных ультразвукового контроля.



Ромашкин Сергей Владимирович

Начальник системно-методической лаборатории ООО «НПЦ «ЭХО+», кандидат технических наук, II уровень по УЗК.

Закончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. Ульянова (Ленина) в 1997 году.

С 2003 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».

Научные интересы: разработка автоматизированных систем ультразвукового контроля.



Рубен Евгений Александрович

Ведущий инженер-электроник лаборатории электроники ООО «НПЦ «ЭХО+».

Закончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1987 году.

С 1990 года с перерывом 2 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».

Научные интересы: разработка аналоговой техники.



Садыков Магомедрасул Садыкович

Инженер третьей категории ООО «НПЦ ЭХО+».
Закончил Национальный исследовательский университет «МЭИ» в 2019 году.
С 2019 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка автоматизированных систем ультразвукового контроля.



Самарин Павел Фёдорович

Ведущий научный сотрудник ООО «НПЦ «ЭХО+», кандидат физ.-мат. наук, II уровень по акустическим методам контроля.
Закончил Московский инженерно-физический институт в 1972 году.
С 1998 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка методик и моделирование автоматизированного ультразвукового контроля.



Тихонов Дмитрий Сергеевич

Заместитель генерального директора ООО «НПЦ «ЭХО+», кандидат технических наук, III уровень по УЗК с применением ФР и TOFD.
Закончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1987 году.
С 1990 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка оборудования, методик и алгоритмов когерентной обработки данных автоматизированного ультразвукового контроля.



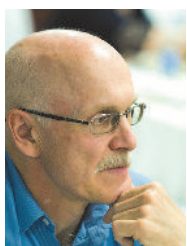
Тишин Георгий Валерьевич

Начальник лаборатории электроники ООО «НПЦ ЭХО+».
Закончил Московский институт электронной техники (МИЭТ) 1986 году.
С 2015 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка электронных модулей для ввода и обработки цифровой информации с различных преобразователей.



Федотовских Вадим Геннадьевич

Ведущий научный сотрудник ООО «НПЦ ЭХО+».
Аттестован в соответствии с ГОСТ Р 50.05.11-2018 по ультразвуковому контролю с присвоением уровня компетентности СПВЗ.
Закончил Ленинградский электротехнический институт «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) в 1986 году.
С 2001 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: разработка методик ультразвукового контроля.



Штерн Андрей Михайлович

Начальник отдела информационных технологий ООО «НПЦ «ЭХО+».
Закончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1979 году.
С 1990 года с перерывом 4 года работает в ООО «НПЦ «ЭХО+».
Научные интересы: создание программных комплексов автоматизированных средств управления.

Ультразвуковая дефектометрия. 30 лет

Юбилейный сборник трудов
ООО «НПЦ «ЭХО+»

Редактор *Сидоренко С.В.*
Корректор *Смольянина Н.И.*
Инженер по компьютерному макетированию *Евсейчев А.И.*
Художественное оформление *Смольянина Н.И.*

Сдано в набор 12.02.2020 г. Подписано в печать 16.03.2020 г.
Формат 60×90 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 26,46. Уч.-изд. л. 27,0.
Тираж 600 экз. Заказ

ООО «Издательский дом «Спектр»
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1.
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: info@idspektr.ru

Отпечатано в типографии ООО «МЕДИАКОЛОР»
127273, г. Москва, Сигнальный проезд, д. 19

ISBN 978-5-4442-0151-0



9 785444 201510