



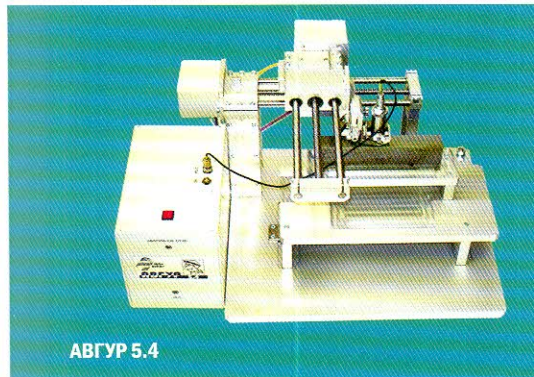
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ «ЭХО+»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ
ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ
ОПАСНОСТИ

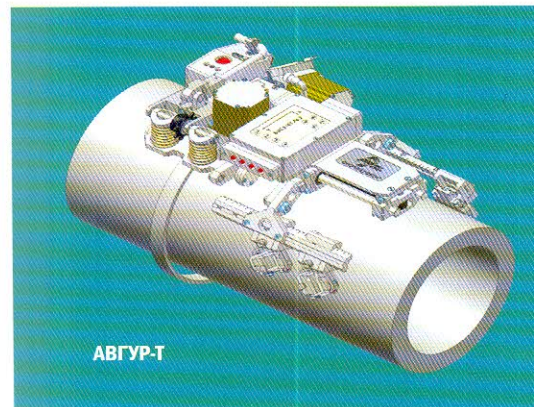
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ



АВГУР 5.2



АВГУР 5.4



АВГУР-Т

АВГУР 5.2

Система автоматизированного УЗК сварных соединений и основного металла трубопроводов (в т. ч. внутритрубного) и тройников сварных с накладками

- + **экспресс-режим контроля**
Выявление дефектов от 5 % толщины, расположенных на значительном расстоянии (до 3 м) от места ввода ультразвука
- + **поисковый режим контроля**
Обнаружение дефектов в области сканирования, определение их эквивалентных и условных размеров
- + **измерительный режим контроля**
Определение геометрических размеров дефектов, когерентная обработка данных, трёхмерная визуализация дефектов

АВГУР 5.4

Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей в соответствии с ГОСТ 23702-90 и EN 12668-2

АВГУР-Т

система для внешнего и внутреннего АУЗК сварных соединений и основного металла трубопроводов и тройников сварных с накладками предназначена для высокопроизводительного АУЗК основного металла, кольцевых и продольных сварных соединений трубопроводов и другого оборудования в трёх основных режимах:

- + **экспресс-режим контроля**
Фиксации дефектов, расположенных на значительном расстоянии от места ввода ультразвука (до 2 м)
- + **поисковый режим контроля**
Обнаружение дефектов в области сканирования и определения их условных размеров
- + **измерительный режим контроля**
Определение геометрических размеров и трёхмерная визуализация дефектов

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

ВСЯ ПРОДУКЦИЯ СЕРТИФИЦИРОВАНА

**ПОЛНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОДУКЦИИ
И ПРИМЕРЫ РАБОТ ПРЕДСТАВЛЕНЫ
НА САЙТЕ КОМПАНИИ**



**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ
ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ**

**ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК ТРУДОВ
ООО НПЦ «ЭХО+»**

МОСКВА; САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЕН»
2010

ББК 30.607я43
УДК 620.1(082)
А22

**Автоматизированный ультразвуковой контроль объектов повышенной опасности : юбилейный сборник трудов
ООО НПЦ «Эхо+».** – Москва; Санкт-Петербург : Свен, 2010. – 64 с.

ISBN 978-5-91161-004-3

I. «ЭХО+», научно-производственный центр неразрушающего контроля (Москва)
«Каталогизация перед публикацией», РНБ

В сборник статей включены основные работы коллектива НПЦ «ЭХО+», посвященные созданию систем автоматизированного ультразвукового контроля опасных промышленных объектов. Отмечается, что использование в автоматизированных ультразвуковых системах голографических методов обработки данных позволило осуществить переход от дефектоскопии к дефектометрии с выходом на оценку остаточного ресурса. Новая технология нашла широкое применение в ведущих отраслях народного хозяйства, прежде всего в атомной энергетике, ОАО «Газпром», ОАО «Транснефть», ОАО «Российские Железные Дороги». Приводятся результаты разработок систем «Авгур» и их применения в названных отраслях. Показано, что применение автоматизированных систем дает значительный технико-экономический эффект.

ISBN 978-5-91161-004-3

Ответственные за выпуск – М. Я. Грудский, Л. С. Хотулёва
Оригинал-макет изготовлен ЗАО «Свен»
195220, Санкт-Петербург, а/я 277
Тел.: (812) 534 0543, факс: (812) 534 0194
E-mail: editor@ndtworld.com
www.ndtworld.com

Дизайн, компьютерная верстка и допечатная подготовка
Д. В. Метальникова, В. О. Цветкова

Издательство «Свен», Санкт-Петербург

Подписано в печать 15.03.2010

Формат 70 × 100 1/8

Объем 4,5 п. л. Бумага мелованная. Печать офсетная.

Тираж 1000 экз. Бесплатно

Отпечатано в типографии ООО «Белл»

Санкт-Петербург, ул. Книпович., д. 12, к. 2

ББК 30.607я43
УДК 620.1(082)

© ООО НПЦ «ЭХО+», 2010 г.
© ЗАО «СВЕН», 2010 г.



Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор
 ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,
 г. Москва, доктор техн. наук, профессор.
 Научные интересы: методы и средства определения
 параметров дефектов, разработка ультразвуковых
 автоматизированных систем с когерентной обработкой
 данных.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЮБИЛЕЙНОМУ СБОРНИКУ

2 апреля 1990 – день рождения «ЭХО+». Исполнилось 20 лет нашей компании. Какими они были для меня, для коллектива? Попытаюсь вспомнить некоторые события, что удалось, что не удалось сделать. Оговорюсь сразу, для меня эти годы были очень тяжелыми, но в тоже время – счастливыми, годами сбывшихся и не во всем сбывшихся надежд и чаяний.

До создания компании я уже более 20 лет работал в ультразвуковой дефектоскопии и имел немалый опыт в этой области. Защитил докторскую диссертацию по ультразвуковым дифракционным методам повышения информативности контроля, но большого удовлетворения не было, поскольку кардинально не удалось решить главную проблему – измерение реальных размеров дефектов. Уже тогда я понимал, что главное направление развития ультразвуковой дефектоскопии связано с решением именно этой задачи. Дело в том, что знание этих параметров дефектов позволяет оценивать степень их опасности, определять остаточный ресурс опасных промышленных объектов и управлять этим ресурсом. Как показало дальнейшее развитие компании, это направление дает значительный технико-экономический эффект как с позиций повышения эксплуатационной надежности, так и с позиций существенного

сокращения потерь, связанных с необоснованным простоем дорогостоящего оборудования.

По предложению и при активном участии академика Н. П. Алешина было решено направить деятельность создаваемой фирмы именно на решение этой жизненно важной проблемы. К тому времени в Акустическом институте АН СССР в течение ряда лет под руководством В. Г. Бадаляна велись работы по изучению возможностей применения ультразвуковой голографии в дефектоскопии. Примечательно, что эти исследования были связаны с актуальной в те годы проблемой – контролем сварных швов роторов турбин. В них неизбежно из-за неудачной конструкции в корне развивались трещины, которые на фоне технологических отражателей невозможно было выявлять и измерять их высоту. Было даже два аварийных останова АЭС вследствие поломки роторов. По предложению И. Н. Ермолова как раз и начались работы в Акустическом институте по этой тематике.

Знания и опыт, накопленные группой В. Г. Бадаляна к моменту создания компании, и легли в основу ее деятельности на первом этапе. Повезло с кадровым составом – вместе с руководителем группы согласился перейти ряд молодых хорошо образованных

энергичных и творческих специалистов. Среди них: Е. Г. Базулин, А. М. Штерн, Д. С. Тихонов, Е. А. Рубен, А. В. Ломакин, М. В. Пентюк, С. Каплун – цвет молодежи Акустического института им. акад. Н. Н. Андреева. Большинство из них и сегодня работают в «ЭХО+».

Принципы создания нашей компании были нетипичными для тех лет. Обычно подобные компании создавались при крупных организациях, используя кадры, помещения, оборудование, средства и тематику этих организаций. При этом, не неся никаких расходов, сотрудники этих компаний рассматривали работу в них как подработку к тем небольшим заработкам, которые имели на основном месте работы. У нас же из перечисленного не было ничего, кроме удачно выбранного направления деятельности, профессиональных знаний, энтузиазма и увлеченности. И этого оказалось не так мало.

Уже через полгода нам удалось сделать первый макет голографической системы, а через год – полноценную систему «Авгур 2.2» и испытать ее на Ленинградской АЭС. В этой системе применены самые прогрессивные решения на тот момент времени, например, оптоволоконный кабель для управления системой и регистрации данных.

Шесть лет деятельности «ЭХО+» ушли на создание промышленного образ-

ца, с которым уже можно было проводить работы на объектах («Авгур 4.2»). Благодаря быстрому развитию компьютерной техники (появились ноутбуки, промышленные компьютеры) удалось сделать систему компактной. Первые же встречи с директорами Смоленской (Е. М. Сафрыгин) и Ленинградской (В. И. Лебедев) АЭС с демонстрацией оборудования показали высокую заинтересованность российских АЭС в эксплуатационном голографическом контроле с измерением реальных размеров дефектов. 1996 г. явился годом начала промышленного применения новой технологии эксплуатационного контроля с применением систем «Авгур». С этого времени основным источником существования стали хозяйственные договоры на поставку аппаратуры, проведение диагностики и разработку и аттестацию методик.

В последующих статьях сборника подробно изложены результаты применения этой технологии в различных отраслях промышленности.

За 20 лет существования НПЦ «ЭХО+», включая самые тяжелые перестроечные годы, мы много раз находились на грани выживания по причине нестабильности ситуации в обществе – политической, экономической. И всякий раз воля коллектива и помощь самых разных структур и конкретных людей позволяла нам выходить из трудных ситуаций и продолжать развиваться. Можно с благодарностью вспомнить ИЦД НИКИЭТ и его директора Б. П. Стрелкова, а также М. В. Григорьеву, который был в то время начальником отдела НИКИЭТ, первыми поверивших в новое направление и, начиная с дня рождения компании, в течение нескольких лет поддерживавших наши разработки. Хочу поблагодарить В. В. Бойко, начальника департамента Роснауки, рекомендации которого помогли нам получить контракты Фонда Технологического Развития в период 2003 – 2006 гг. Позитивную роль в трудные периоды сыграл Е. О. Адамов – в прошлом директор НИКИЭТ, затем Министратомной энергетики. Благодаря его рекомендациям мы с 2003 года обосновались в РНЦ «Курчатовский институт», где удалось создать все наши главные разработки. Я благодарю руководство РНЦ «Курчатовский Институт» за предоставленные хорошие условия для развития компании. В настоящее время мы располагаемся в технопарке «Строгино» – прекрасные условия, внимательное руководство, оказывающее реальную помощь малому бизнесу.

За создание и внедрение новых разработок на опасных промышленных объектах ряд ученых компании в со-

ставе авторского коллектива нескольких организаций удостоены Премии Правительства России за 2006 г. Привожу выдержку из Российской газеты от 28.02.2007 г.

Постановление Правительства РФ от 22 февраля 2007 г. № 121, г. Москва «О присуждении премий Правительства РФ 2006 года в области науки и техники»

«Рассмотрев предложения Межведомственного совета по присуждению премий Правительства РФ в области науки и техники, Правительство РФ постановляет:

Присудить премии Правительства РФ 2006 г. в области науки и техники и присвоить звание «Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники»:

6. *Вопилкину Алексею Харитоновичу*, доктору технических наук, профессору, генеральному директору общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+», руководителю работы, *Бадалянну Владимиру Григорьевичу*, кандидату физико-математических наук, заместителю генерального директора, *Тихонову Дмитрию Сергеевичу*, техническому директору – работникам того же общества; *Дымкину Григорию Яковлевичу*, доктору технических наук, профессору, директору филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт мостов и дефектоскопии Федерального агентства железнодорожного транспорта»; *Казанцеву Александру Георгиевичу*, доктору технических наук, заведующему отделом Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научный центр Российской Федерации – Научно-производственное объединение по технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ)»; *Караеву Алибеку Басхануковичу*, заведующему лабораторией, *Санькову Николаю Ивановичу*, *Сугирбекову Болату Азимбаевичу*, кандидатам технических наук, ведущим научным сотрудникам, – работникам того же предприятия; *Коннову Владимиру Васильевичу*, доктору технических наук, генеральному директору закрытого акционерного общества «Научно-производственный центр «Молния»; *Харегову Владимиру Георгиевичу*, генеральному директору общества с ограниченной ответственностью «ИНТЕРЮНИС» – **за создание и промышленное внедрение технологической комплексной диагностики, методов и импортзамещающих приборов с целью снижения аварийных ситуа-**

ций на потенциально опасных объектах».

Сегодня в составе компании имеются все необходимые подразделения, обеспечивающие разработку автоматизированных диагностических комплексов, малосерийное производство и оказание услуг по диагностике опасных промышленных объектов.

Специалистами НПЦ «ЭХО+» за 20-летний период накоплен значительный объем знаний в области разработок и применения голографических компьютерных систем, самые последние из которых мы постарались привести в данном сборнике.

Учитывая перспективность направления комплексной диагностики в самых различных отраслях промышленности, надеюсь, что сборник будет полезен широкому кругу специалистов, занятых разработками и применением средств неразрушающего контроля.

Основной практический материал данного сборника получен при решении конкретных задач диагностики для атомной энергетики. Эти работы проводились под руководством и при теснейшем сотрудничестве с концерном «Росэнергоатом» и с российскими АЭС. Я хочу выразить признательность руководителю департамента материаловедения В. Н. Ловчеву, заместителю руководителя Д. Ф. Гуцеву, руководителям служб неразрушающего контроля на всех российских АЭС. Именно при их поддержке и непосредственном участии и создано новое направление «Ультразвуковая диагностика металлов с применением методов акустической голографии».

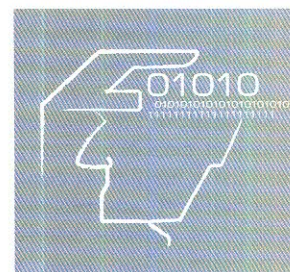
В заключении хочу выразить благодарность всем сотрудникам НПЦ «ЭХО+», трудами которых созданы все разработки, представленные в этом сборнике.

Хочу также поблагодарить коллектив журнала «В мире неразрушающего контроля» за высокий профессионализм и оперативность, проявленные им при подготовке сборника к печати.

Why Ultrasonic Automated Holography?

A. Kh. Vopilkin

The efficiency of new approach application to dangerous industrial object diagnostics based on usage of ultrasonic holographic algorithms for signal beaming, receipt and processing is practically substantiated. These algorithms have been served as a basis for creation of automated systems named Augur. They were created in Russia for the first time and are successfully used in various industrial sectors, first of all in atomic engineering. Some examples are given illustrating the efficiency of Augur systems.



ПОЧЕМУ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ГОЛОГРАФИЯ?

Я пришел в ультразвуковую дефектоскопию в 1968 г. по окончании Московского горного института; был распределен в НПО «ЦНИИТМАШ» и через месяц после начала работ меня послали в первую командировку на Харьковский турбинный завод, где при УЗК сварных швов ротора турбины обнаружили недопустимый дефект. Там впервые я столкнулся с вопросом, на который не мог ответить. Главный конструктор и главный сварщик завода мучили меня вопросом, что это за дефект и каких он размеров. Выяснилось, что это очень важно знать для совершенствования конструкции ротора и технологии сварки. В своей многолетней практике эти вопросы мне задавали бесчисленное количество раз, и всегда приходилось уходить от ответа. Позднее я узнал, что на этот вопрос нет однозначного ответа ни у инженеров, ни у ученых. Решение этой проблемы оказалось очень непростым. Многие ученые как российские, так и зарубежные бились над ней. Придумывали различные способы повышения информативности контроля, например, коэффициенты формы, признаки типа дефектов, различные методики распознавания. Но все они в лучшем случае решали частную задачу и не давали общего решения.

Как выход из этой ситуации, И. Н. Ермоловым и А. К. Гурвичем было предложено применение эквивалентных

и условных размеров, определяющих сравнительную отражательную способность дефекта по отношению к плоскостному отверстию. Многие ученые в своих трудах показывали очень плохую корреляцию между реальными и условными размерами. Тем не менее, из-за отсутствия лучшего эквивалентные и условные размеры заложены практически во всех методиках контроля. Нерешенная проблема определения типа и измерения реальных размеров дефектов приводила ранее и приводит сейчас к ряду негативных последствий. Во-первых, нормы браковки пришлось повсеместно сделать необоснованно жесткими. Это часто приводит к завышению объемов ремонтных работ. Во-вторых, из-за этого не разработаны нормы на эксплуатационный контроль, которые должны базироваться на типе и размерах дефектов и их влиянии на работоспособность конструкции. В-третьих, несмотря на жесткость норм браковки, они не гарантируют выявление наиболее опасных дефектов типа трещин из-за их сложной конфигурации и, вследствие этого, их малой отражательной способности. В-четвертых, существенно ограничиваются возможности оценки остаточного ресурса объектов, в которых присутствуют дефекты. Наконец, в-пятых, УЗК часто проигрывал в конкуренции с таким методом, как радиографический контроль именно потому, что в нем имеется возможность «видеть» дефект и измерять реальные размеры, хотя по многим другим характеристикам он существенно уступает УЗК (в первую очередь по выявляемости плоскостных дефектов).

Позднее пришло понимание, почему эта задача так тяжело решается. Дело в недостаточном объеме информации, в частности, в очень низкой разрешающей способности УЗК. Ультразвуковой пучок от акустического преобразователя распространяется как по глубине, так и по

фронтально под углом $10 - 20^\circ$. Отсюда следует, что дефект озвучивается широким пучком, и невозможно выделить отдельные составляющие пучка, соответствующие отдельным фрагментам дефекта. Поэтому информация обо всех параметрах дефекта несет в себе амплитуду отраженного сигнала. Т. е. весьма проблематично разложить один параметр – амплитуду – на многие параметры, характеризующие дефект. Дополнительные информационные признаки о дефекте не дают кардинального улучшения, поскольку они коррелируют с амплитудой.

Решение проблемы, как оказалось, лежит в другой плоскости: применение фокусированных пучков, озвучивающих область дефекта. Традиционная технология фокусирования известна очень давно и детально проработана. Однако она также не дает желаемого результата ввиду очень ограниченной области фокусировки. Нужна технология формирования узких, не расходящихся пучков на всю глубину распространения ультразвука.

Такую возможность предоставляет технология синтезированной апертуры (SAFT) и как ее разновидность – технология ультразвуковой голографии, разработанная и широко применяющаяся в радиолокации. Упрощенно технология ультразвуковой голографии состоит в следующем (рис. 1):

- в изделие излучают короткие ультразвуковые импульсы с широкой диаграммой направленности ($30 - 60^\circ$);
- сканируют преобразователем с малым шагом ($0,2 - 0,6$ мм) по поверхности изделия;
- в каждой точке сканирования принимают отраженные от дефектов сигналы и оцифровывают их;
- обрабатывают полученную последовательность сигналов с помощью алгоритма проекции в спектральном пространстве (ПСП);

Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», г. Москва, доктор техн. наук, профессор. Научные интересы: методы и средства определения параметров дефектов, разработка ультразвуковых автоматизированных систем с когерентной обработкой данных.

– визуализируют полученные данные в виде проекции изображения на три плоскости (В-, С-, Д- изображения).

Физически это означает, что путем измерения фазовых сдвигов между излученным и принятым сигналами во всем пространстве контролируемого участка, можно на приеме сформировать узкий нерасходящийся пучок, тем самым визуализировать отдельные сечения, сложив которые, получить изображение дефекта. При этом разрешающая способность может повышаться в десятки раз. Подробнее алгоритм ультразвуковой голографии описан в [3].

В качестве подтверждения высокой разрешающей способности ультразвуковой голографии на рис. 2 приведены результаты измерений длины дефектов (а) и их высоты в отдельных сечениях (б). Приведенный на рис. 2б массив данных из 120 измерений имеет среднеквадратичную ошибку определения высоты дефекта $\sigma = 0,86$ мм. Заметим, что почти все измерения находятся в коридоре ошибок ± 1 мм. Погрешность измерения реальных размеров дефектов составляет

по высоте $\pm 1,5$ мм и по длине ± 5 мм при доверительной вероятности 95 % [4].

Основное и единственное направление деятельности НПЦ «ЭХО+», созданного в 1990 г., определено как разработка, производство и применение ультразвуковых автоматизированных систем на основе использования алгоритмов акустической голографии, решающих упомянутую проблему.

НПЦ «ЭХО+» впервые предложил новый подход в ультразвуковой диагностике, заключающийся в трехуровневой технологии [5]. На первом этапе осуществляется поиск дефектов по действующим нормам. На втором этапе – измерение реальных размеров и типа дефектов с применением алгоритмов акустической голографии. На третьем этапе эта информация используется для оценки работоспособности объекта с учетом параметров дефектов. Именно этот подход реализован в ультразвуковых автоматизированных системах «Авгур». За 12 лет применения новой технологии диагностирования сварных швов только на объектах АЭС проверены многие тысячи

швов. За развитием трещин в 2000 швов ведется мониторинг.

Постепенно новая технология начала проникать и в другие отрасли. Так, например, в одной из структур ОАО «Газпром», а именно, в «Кавказтрансгаз» на компрессорных станциях было забраковано при традиционном УЗК по стандартной методике ВСН 012-88 около 400 сварных швов труб большого диаметра. Ремонт их потребовал бы выключения на длительный период ряда компрессорных станций из сети поставки газа на экспорт. Примененное нами в 2003 – 2004 гг. обследование по новой комплексной технологии системами «Авгур» с последующими прочностными расчетами специалистами ВНИИСТ показали, что ремонта требуют не более 20 швов (рис. 3). Во всех остальных швах наблюдались отражатели либо не являющиеся дефектами внутренней структуры (смещения кромок шва, неровности корня и др.), либо дефекты, форма и размер которых не представляют угрозу работоспособности конструкции.

Как оказалось, с применением голографических алгоритмов эффективно решаются задачи контроля аустенитных сварных швов, характеризующихся высоким уровнем структурных шумов, соизмеримых с сигналами от выявляемых дефектов. При этом отношение сигнал/шум увеличивается в 2 – 3 раза. Добавив к этому алгоритм двухмодового контроля, удалось повысить это отношение до 8 – 9 раз, что вполне достаточно для решения большинства задач контроля (рис. 4). Особо хочу подчеркнуть, что

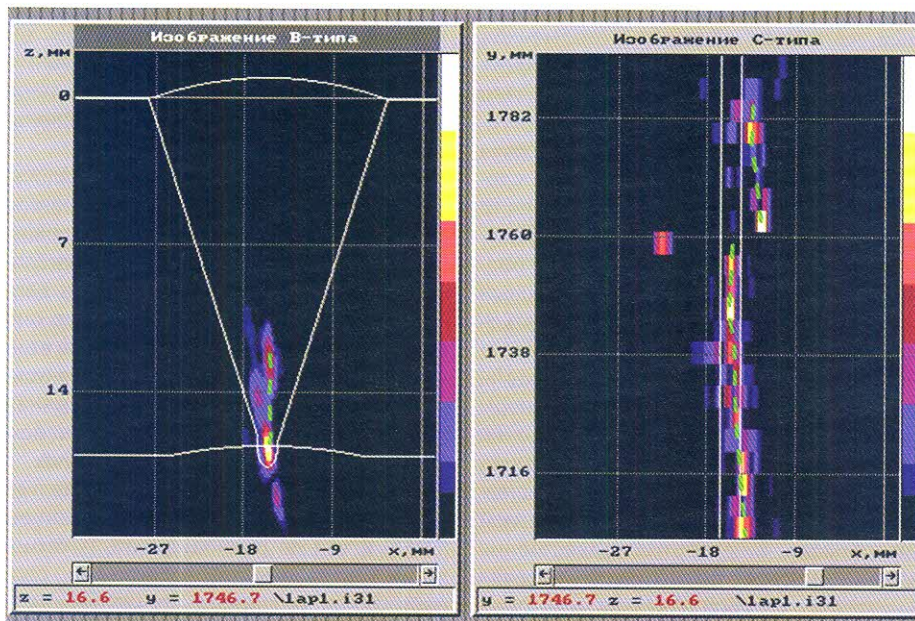


Рис. 1. Изображения В- и С-типа трещин в сварном шве трубопровода Ду300: пунктирной линией схематично изображены дефекты



Рис. 3. Контроль нефтепровода с использованием системы «Авгур»

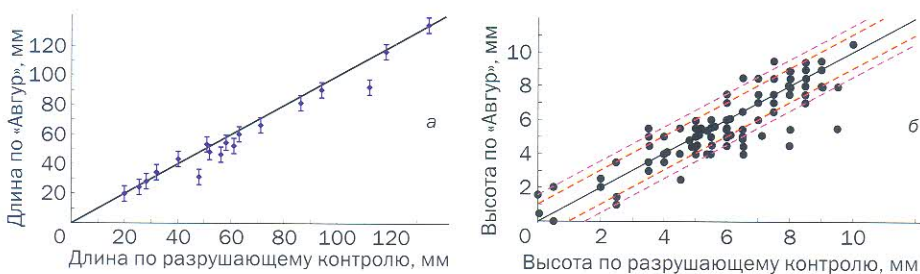


Рис. 2. Результаты определения длины (а) и высоты (б) дефектов по данным «Авгур» и при разрушающем контроле (металлография, трехточечный изгиб): черная, красная и лиловая линии – соответствуют погрешностям 0, ± 1 и $\pm 1,5$ мм

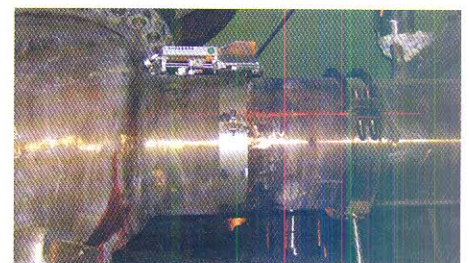


Рис. 4. Автоматизированный голографический контроль аустенитного сварного соединения Ду500 реактора ВВЭР 440

при этом решается не только задача обнаружения, но и оценка реальных параметров дефектов и их влияние на работоспособность конструкции. Благодаря этим разработкам удалось решить многие задачи контроля аустенитных швов, которыми изобилуют атомные станции. Кроме того, данные разработки легли в основу создания средств контроля аустенитных швов корпуса исследовательского термоядерного реактора (ИТЭР). Этот международный проект начал реализовываться во Франции, и участие в нем нашей компании представляется для нас весьма перспективным.

На наши работы обратили внимание специалисты ОАО «РЖД» и предложили нам создать системы диагностики колесных пар грузовых и пассажирских вагонов. Такие системы были созданы (Авгур 5.3 и СД2), причем впервые в мировой практике в них реализован тот же комплексный подход, что и применительно к сварным швам. Оказалось, что нормы на эксплуатационный контроль можно существенно смягчить, а также пересмотреть периодичность обследования колесных пар вагонов в сторону увеличения. Это позволяет получить значительный экономический эффект за счет сокращения затрат на проведение диагностики. Еще одна разработка, выполненная для ОАО «РЖД» (автоматизированная голографическая система СДЗР), позволила визуализировать дефекты рельсов, уложенных в путь, определить их тип и оценить возможность и срок

эксплуатации рельсов с измеренными дефектами. Для этого в программном обеспечении системы имеется программа расчета ресурса (специально разработанная в НПО «ЦНИИТМАШ» под руководством А. Г. Казанцева), учитывающая 19 факторов, влияющих на развитие дефектов.

Приведенные примеры разработки и использования аппаратуры, способной отвечать на вопрос, какой это дефект и каких он размеров, показывают, что этот подход является весьма актуальным при эксплуатации практически всех опасных промышленных объектов. Более того, появилась практическая основа для разработки норм браковки в процессе эксплуатации объектов. Ведь именно из-за отсутствия возможности определять тип и измерять реальные размеры дефектов при эксплуатации в подавляющем большинстве случаев используют нормы браковки при производстве оборудования.

Последняя разработка НПЦ «ЭХО+» позволила реализовать ультразвуковую автоматизированную голографию применительно к контролю трубопроводов и тройников магистральных газопроводов (система «Авгур Т»). В ней впервые применена трехмерная голография, позволяющая сфокусировать ультразвуковой луч на расстоянии 1 м, что обеспечило обнаружение дефектов в тройниках с накладками.

Отвечая на вопрос: «Почему ультразвуковая автоматизированная голография?» – можно констатировать следующее:

1. Применение ультразвуковой автоматизированной голографии позволило решить давнюю проблему УЗК – измерений реальных размеров дефектов, осуществить переход от дефектоскопии к дефектометрии, которая открыла много новых возможностей и приложений.

2. Предложенная новая технология диагностики объектов повышенной опасности, заключающаяся в трехуровневом контроле с измерением реальных размеров дефектов позволила проводить оценку состояния эксплуатируемых объектов по их фактическому состоянию и выйти на управление остаточным ресурсом.

3. Разработано несколько вариантов автоматизированных систем «Авгур», которые обеспечивают 100 % высокопроизводительный контроль основного металла и сварных швов широкого класса объектов. Для ряда объектов решена задача полной автоматизации контроля с выдачей заключения без участия оператора.

4. Имея возможность измерять реальные дефекты, специалистами по прочности начаты работы по созданию эксплуатационных норм на диагностику объектов. Наш опыт показывает, что наличие эксплуатационных норм сокращает объем ремонтных работ не менее чем в 10 раз.

5. Внедрение новых разработок и технологий позволяет получить огромный экономический эффект, исчисляющийся многими десятками и сотнями миллионов рублей, за счет сокращения простоев оборудования, увеличения срока безопасной эксплуатации, уменьшения эксплуатационных затрат.

В последующих статьях будут развернуты основные положения данной статьи.

Литература

1. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. – Киев: Техника, 1972. – 460 с.
2. Алешин Н. П., Вопилкин А. Х., Гурвич А. К. и др. Методы акустического контроля металлов / Под ред. Н. П. Алешина. – М.: Машиностроение, 1985. – 450 с.
3. 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.
4. Бадалян В. Г. Погрешность измерений дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных. – Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 12–23.
5. Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х. Комплексный ультразвуковой контроль сварных швов трубопроводов с определением ресурса и мониторингом. – Контроль. Диагностика. 2001. № 6. С. 3–7.

Статья опубликована в журнале «В мире НК», 2010. № 1(47)

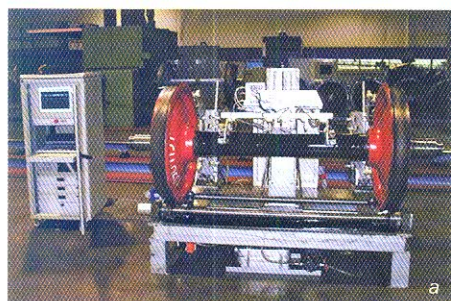


Рис. 5. Система диагностики колесных пар железнодорожных вагонов: а – мобильная система контроля КП со свободной средней частью; б – стационарная, встраиваемая в поток система для контроля КП со свободной средней частью или с редуктором привода генератора, или с тормозными дисками

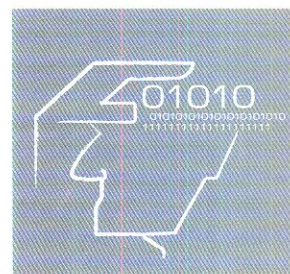


Рис. 6. Автоматизированный голографический контроль сварных соединений тройников с накладками магистральных газопроводов

The Object Condition Evaluation and Resource Prolongation with Automated Ultrasonic Inspection Usage

V. G. Badalyan, A. Kh. Vopilkin

The complex technology of potentially dangerous object diagnostics is considered. It represents a combination of automated ultrasonic inspection methods (and tools) and devices. The former enable to get the detailed information about defects, the primary goal of the latter is fast search of flaw areas in the object inspected. The equipment intended for this complex technology realization is described and some examples of technology application are given.



ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АУЗК

Введение

В России эксплуатируется большое количество промышленных потенциально опасных объектов в нефтехимическом производстве, энергетике (и, в первую очередь, атомной), на трубопроводном и железнодорожном транспорте, в оборонной и многих других отраслях промышленности. Случающиеся аварии приводят к человеческим жертвам, экологическим катастрофам, значительным материальным потерям. Особенности состояния промышлен-

ности России состоит еще и в том, что в большинстве отраслей заканчивается срок эксплуатации оборудования и изделий. Экономические трудности не всегда позволяют провести плановую замену. Для повышения эксплуатационной безопасности и снижения аварийности в последнее время все больше внимания уделяется диагностике оборудования, которая позволяет на ранних стадиях проводить оценку его работоспособности, предупреждать возникновение аварийных ситуаций и, по возможности, продлевать сроки эксплуатации объектов. Одним из основных методов диагностики состояния объектов являются ультразвуковые методы НК. Однако наиболее широко распространенные методы УЗК имеют ряд существенных недостатков, в частности, не позволяют измерить истинные (а не условные и эквивалентные) размеры дефектов. Это связано с тем, что информационными параметрами таких методов являются наличие несплошности (дефекта), амплитуда отраженного сигнала, условная длина и координаты дефекта. Это приводит к необоснованно жестким нормам на ультразвуковой контроль и, в результате, к значительному объему ремонта неопасных сварных швов. Кроме того, использование амплитуды сигнала как основного информационного параметра, по которому оцениваются характеристики дефекта, приводит к значительному ограничению возможностей УЗК. В частности, сильная зависимость амплитуды сигнала от качества акустического контакта и от индикатрисы рассеяния дефекта [1] приводит к значительным трудностям при выполнении мониторинга дефектных объектов.

Вместе с тем в последние десятилетия в практику УЗК внедрены приборы, широко использующие различные методы обработки данных контроля, в том числе

и когерентные. Применение таких приборов позволяет производить количественную оценку результатов УЗК, увеличив число информационных параметров, описывающих дефект: наличие дефекта, длина, высота и профиль дефекта, координаты дефекта [2 – 4]. В этом случае появляется возможность более эффективно сотрудничать со специалистами по прочности, которыми разработаны методы расчета прочностного состояния сварных швов и конструкций с учетом влияния дефектов. Для значительного числа различных потенциально опасных объектов разработаны утвержденные методики расчетов. Однако их применение сдерживается слабым распространением средств УЗК, позволяющих определять реальные параметры дефектов.

Сочетание методов и средств УЗК, обеспечивающих подробную информацию о дефектах, и приборов, основной задачей которых является экспресс-поиск дефектных областей в контролируемом объекте, позволяет быстро и качественно осуществить сплошной УЗК изделий с оценкой состояния объекта и определением ресурса. Разработанный в НПЦ «ЭХО+» комплекс приборов серии «Авгур» позволяет реализовать комплексную технологию диагностики объектов с применением автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК).

Комплексная технология диагностики потенциально опасных объектов

В комплексную технологию (рис. 1) включены те методы, которые в сумме позволяют получить исчерпывающую информацию о состоянии объекта. В нее вошли три группы методов, последовательно решающих задачи углубления информативности диагностики. На первом этапе решаются задачи интегральной диагностики, т. е. быстрая и производительная оценка состояния объекта без



Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва:

Бадалян Владимир Григорьевич

Заместитель директора, д. т. н.

Научные интересы: методы и средства обработки акустических изображений и сигналов, разработка когерентных методов и ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных.

Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор, д. т. н., профессор.

Научные интересы: методы и средства определения параметров дефектов, разработка ультразвуковых автоматизированных систем с когерентной обработкой данных

углубленного изучения. Для этого обычно используются метод акустической эмиссии и волноводные ультразвуковые методы, основными задачами которых являются обнаружение и локализация дефектных областей контролируемого объекта. Тем не менее, интегральные методы диагностики, обеспечивая высокую экономическую эффективность, не всегда достаточны для решения практических задач. В ряде случаев в силу особенностей конструкции объекта контроля, а также для обеспечения повышенной чувствительности или помехозащищенности необходимо применять традиционные методы, позволяющие выполнять оценку качества объекта в локальных зонах.

Поэтому на втором этапе используются ультразвуковые эхо-методы, задачей которых является детальное изучение выявленных областей и качественная оценка состояния объекта традиционными методами дефектоскопии. Вместе с тем описание выявленного дефекта такими параметрами, как условные раз-

меры, эквивалентная площадь и др., которые характерны для традиционной дефектоскопии, явно недостаточно, так как все эти параметры далеко не всегда адекватно описывают реальные параметры дефекта.

Задачей третьего этапа является количественная оценка выявленных несплошностей – определение типа и реальных размеров дефектов, их локализация в объекте. Именно эта информация о дефектах необходима для эффективного выполнения прочностных расчетов. Для решения этой задачи используются методы и приборы, реализующие алгоритмы когерентной обработки данных (ПСП, SAFT), аналоговые когерентные методы управления акустическим пучком и его фокусировкой (ФАР) и специальные схемы регистрации и интерпретации данных контроля (TOFD). В них используются данные об амплитудной и фазовой составляющих измеренных данных. Полученные на третьем этапе результаты АУЗК вместе с данными оценки эксплуатационной деградации

механических свойств материала контролируемого объекта используются для выполнения прочностных расчетов оценки состояния объекта, его работоспособности, определения ресурса. Таким образом, выполнение всех этапов комплексной технологии диагностики позволяет замкнуть диагностическую цепь: предварительная оценка качества объекта — обнаружение несплошности — классификация несплошности — установление остаточного ресурса контролируемого объекта. В результате повышается надежность и достоверность диагностики, что способствует повышению эксплуатационной безопасности и снижению аварийности.

Аппаратура для реализации комплексной диагностики

В НПЦ «ЭХО+» разработан ряд систем УЗК серии «Авгур», позволяющих выполнить все три этапа получения достоверной информации о контролируемом объекте: система «Авгур-Т» – для выполнения интегрального АУЗК, система «Авгур 5» с когерентной обработкой данных – для применения на втором и третьем этапах комплексной диагностики.

Автоматизированные дефектоскопы для интегрального контроля трубопроводов «Авгур-Т»

Система «Авгур-Т» предназначена для осуществления сплошного УЗК металла трубопроводов для поиска нарушений сплошности и определения их координат в объекте контроля. С этой целью используется контроль, основанный на волноводном эффекте распространения ультразвуковых волн в пластинах и оболочках. В контролируемом трубопроводе возбуждают ультразвуковые колебания, которые распространяются по его окружности. При взаимодействии волн с нарушениями сплошности возникают отраженные ультразвуковые колебания, которые формируют акустическое поле. Перемещение акустического преобразователя вдоль образующей трубопровода X позволяет сформировать изображение B -типа в координатах XL , которое отображается на мониторе прибора. Здесь L – координата вдоль окружности трубопровода. По характеристикам этого поля делают вывод о наличии в контролируемом объекте несплошностей, их координатах и их размерах. Система «Авгур-Т» позволяет обнаруживать дефекты в металле в виде:

- общей точечной коррозии (питтинга) – глубиной более 10 % от толщины стенки и протяженностью более 20 мм;
- расслоений, протяженностью более 30 мм;

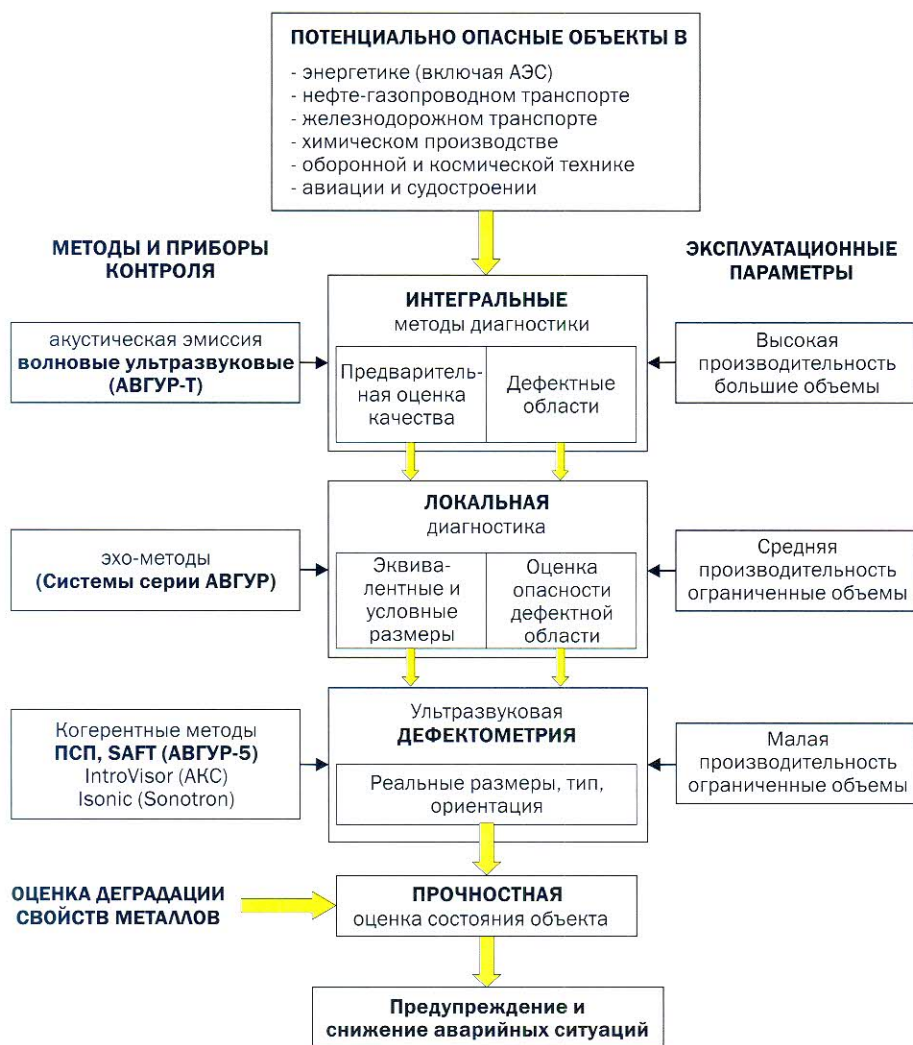


Рис. 1. Комплексная технология диагностики потенциально опасных объектов

- трещин, включая стресс-коррозионные, высотой более 10 % от толщины стенки и протяженностью более 20 мм;
- непроваров и трещин в продольных и кольцевых сварных соединениях высотой более 3 мм и протяженностью более 20 мм.

При этом производительность интегрального контроля составляет до 30 м/ч при дальности обнаружения несплошностей до 2 м. Отметим, что в зависимости от вида контролируемых сварных соединений используются системы «Авгур-Т» различных комплектаций.

Технология выполнения 100 % диагностики трубопроводов, задачей которой является обнаружение несплошностей и определение места их расположения, представлена на рис. 2.

Автоматизированные дефектоскопы для локального контроля и дефектометрии серии «Авгур 5»

Система «Авгур 5» предназначена для проведения высокопроизводительного АУЗК сварных соединений и основного металла технологического оборудования и трубопроводов, выполненных из сталей перлитного и аустенитного классов, с измерением характеристик (размеры, местоположение, тип) выявляемых несплошностей для последующего расчета прочности конструкций и оценки их допустимости к эксплуатации [5]. В этих системах реализованы два режима работы: поисковый и измерительный.

Целями поискового режима являются:

- обнаружение дефектов, определение их эквивалентных размеров и определение годности сварного шва по действующим нормам;
- определение дефектных зон и выбор зон измерительного контроля.

Для реализации этапа ультразвуковой дефектометрии в системах «Авгур 5» используется измеритель-

ный режим, целью которого является детальная регистрация акустического поля, рассеянного несплошностями, с подробностью, достаточной для получения по этим данным, после когерентной обработки, изображения контролируемого объема объекта с высоким разрешением. Данные, полученные в измерительном режиме, обрабатываются с применением когерентных алгоритмов для получения изображений SAFT, FT-SAFT (ПСП). При этом используются амплитудные и фазовые характеристики зарегистрированного ультразвукового поля. Получаемые в результате такой обработки изображения имеют ряд особенностей:

- высокое разрешение $\approx \lambda$, что связано с использованием амплитудно-фазовых характеристик рассеянного акустического поля;
- сжатие динамического диапазона изображений, которое является следствием высокого разрешения;
- повышенное отношение сигнал/шум как следствие совместной обработки А-сканов при восстановлении изображений;
- относительная нечувствительность к амплитуде эхо-сигнала из-за того, что около 70 % информации содержится в фазовой составляющей А-сканов. Это обстоятельство позволяет проводить периодический УЗК изделий, осуществляя мониторинг.

Отметим, что изображения дефектов являются промежуточным результатом измерительного режима контроля. Оценка совокупности полученных данных и изображений различного типа позволяют определить тип выявленного дефекта, его реальные геометрические размеры и локализацию.

Эти особенности акустических изображений, полученных в результате когерентной обработки данных, и возможности систем «Авгур 5» позволяют, несколько

видоизменив описанную выше комплексную технологию, использовать ее для контроля сварных соединений, осуществляя анализ качества сварных швов через анализ влияния дефектов на прочность шва (рис. 3).

Эта технология состоит из трех шагов. Сначала выполняется поисковый контроль, используя ручной или автоматизированный УЗК по стандартным методикам контроля. Для исключения случаев пропуска («недобраковки») опасных дефектов плоскостного типа чувствительность фиксации контроля увеличивается по сравнению со стандартными методиками на 6 – 12 дБ. Если амплитуда эхо-сигнала от отражателя не достигает уровня фиксации, то шов признается годным и пропускается в эксплуатацию.

После выполнения поискового контроля проводится автоматизированный измерительный (экспертный) УЗК с помощью систем серии «Авгур» с целью определения типов и размеров дефектов. Экспертному контролю подвергаются те швы, в которых на первом этапе были обнаружены отражатели с амплитудой эхо-сигналов, достигающей уровня фиксации. Измерительный УЗК характеризуется использованием методов когерентной обработки данных, что значительно повышает чувствительность и разрешающую способность контроля. Затем выполняется обработка данных автоматизированного экспертного контроля с целью получения трехмерных изображений несплошностей. По этим изображениям после обработки и анализа данных определяются размеры и типы дефектов и несплошностей.

В заключение информация о параметрах дефектов используется для прочностного расчета ресурса работы сварного шва с учетом других характеристик, влияющих на ресурс. Если по расчетам запас прочности таков, что имеется возможность дальнейшей эксплуатации, оборудование с этим швом допускается в работу. В противном случае шов отправляется в ремонт.

Рассмотренная технология ультразвукового диагностирования позволяет:

- проводить мониторинг развития дефектов в процессе эксплуатации объектов;
- составить базу данных о наличии в сварных швах различного рода допустимых несплошностей (осуществить паспортизацию швов);
- осуществлять эксплуатацию оборудования с «непроходимыми» (по действующим нормам) дефектами благодаря возможности оценки ресурса работы сварной конструкции по установленным размерам несплошностей и параметрам напряженного состояния;



Рис. 2. Технология выполнения 100 % контроля трубопроводов системой «Авгур-Т»

- 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 ответственных случаях.

Заключение

Реализация технологии комплексной диагностики и ее модификации для контроля сварных соединений с использованием разработанной аппаратуры была выполнена в атомной энергетике, в нефтегазовом комплексе, где применяются интегральный метод диагностики, основанный на волноводном эффекте распространения ультразвуковых волн, методы локальной диагностики и мето-

ды ультразвуковой дефектометрии, использующие некогерентные и когерентные методы. Полученные в результате их применения данные о дефектности контролируемого объекта затем использовались в прочностных расчетах специалистами НИКИЭТ, ИАЭ им. Курчатова, ГИДРОПРЕСС, ВНИИСТ и др.

В частности, модификация технологии для контроля сварных соединений (рис. 3.) успешно применяется в атомной энергетике на действующих АЭС с реакторами типа РБМК и ВВЭР при эксплуатационном контроле трубопроводов различных диаметров с 1996 г. и при предэксплуатационном контроле (1998 – 2000, 2009 гг.) на I и II блоках Волгодонской АЭС и строящемся блоке Калининской АЭС (2002 г.).

Технология комплексной диагностики трубопроводов была реализована при строительстве подводных пере-

ходов нефтепровода ВСТО через реки Лена, Вилюй, Керенг-юрях (2008 г.); при контроле тройников «Газпромтрансгаз Москва» (2009 г.).

Литература

1. Вopilкин А. Х. Волны дифракции и их применение в ультразвуковом неразрушающем контроле (Обзор). – Дефектоскопия. 1985. № 2. С. 72–85.
2. Бадалян В. Г., Вopilкин А. Х. Компьютерные системы для ультразвукового неразрушающего контроля. – Дефектоскопия. 1993. № 5. С. 7–13.
3. Schlengermann U. Determination of crack depth using ultrasonics – An overlook. – NDTnet. 1997. V. 2. No. 5.
4. Lawson Sh. Recent developments for automatic on-line TOFD inspection. – NDTnet. 1997. V. 2. No. 9.
5. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Вopilкин А. Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов. – М.: Машиностроение, 2008. – 368 с.

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2010. № 1(47)

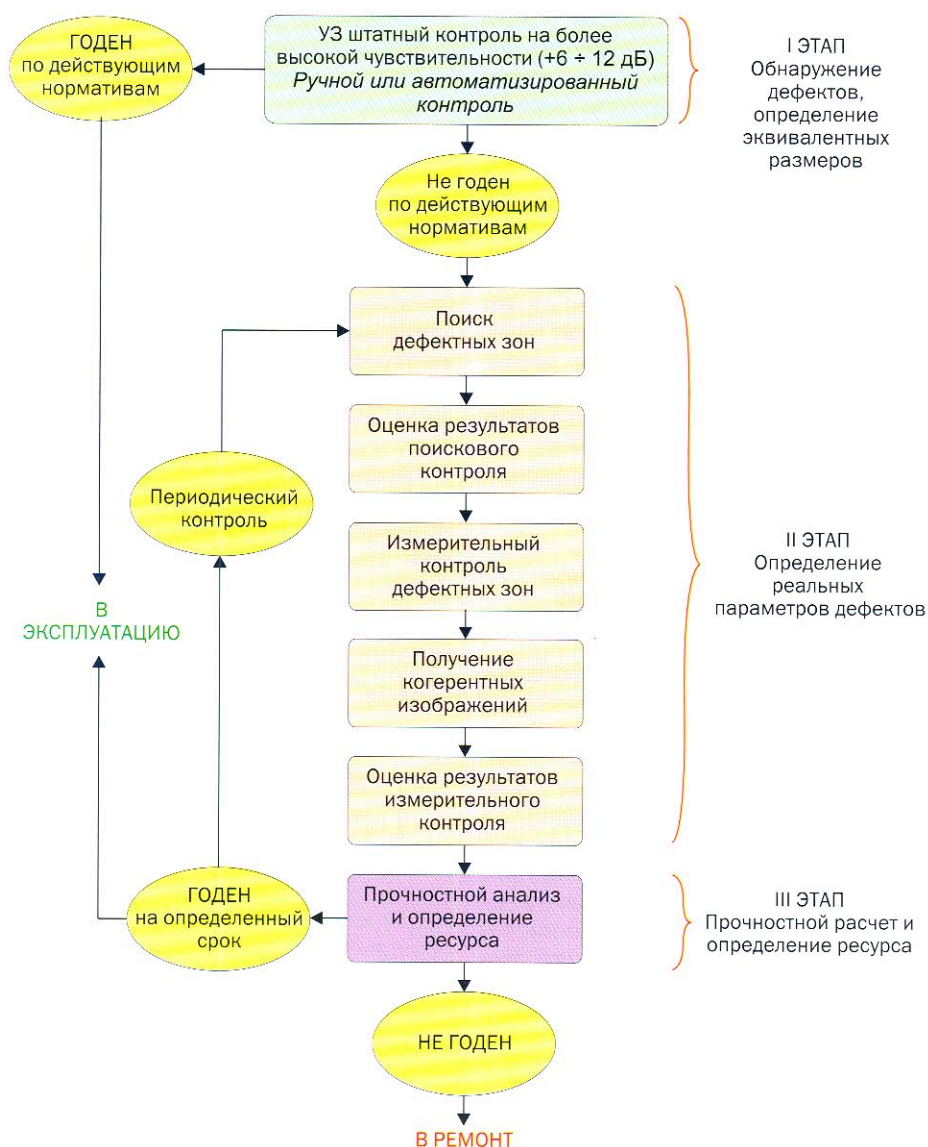
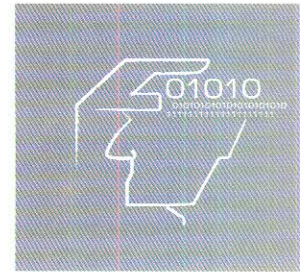


Рис. 3. Технология контроля сварных соединений с применением систем АУЗК «Авгур 5»

Monitoring of the Welded Seams in the Pipelines Condition Based on the Results of the AUT with the Coherent Data Processing

V. G. Badalyan, A. Kh. Vopilkin

The remaining safe service life is predicted for the welds upon inspecting them automatically using Avgur automatic ultrasonic testing (AUT) equipment providing the coherent data processing. The examples of the weld defects shape monitoring entire 5 years are presented and discussed along with the results of the periodical inspection of the welded seams in the pipelines related to the oil and gas transportation and nuclear power generation.



МОНИТОРИНГ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ АУЗК С КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ

Введение

Широко распространенные методы УЗК имеют ряд недостатков, основным из которых является невозможность измерить истинные (а не условные и эквивалентные) размеры дефектов. Использование амплитуды ультразвукового сигнала как основного информационного параметра, по которому выполняется оценка характеристик дефекта, приводит к значительному ограничению возможностей УЗК. Например, сильная зависимость амплитуды сигнала от качества акустического контакта и индикатрисы рассеяния дефекта [1] приводит к значительным трудностям при мониторинге дефектных сварных соединений.

Применение цифровых приборов с когерентной обработкой данных позволяет производить количественную

оценку результатов УЗК, так как в этом случае информационными параметрами являются наличие дефекта, его длина, высота, профиль и координаты дефекта [2]. Появляется возможность эффективного сотрудничества со специалистами по прочности, которыми разработаны методы расчета прочностного состояния сварных швов и конструкций с учетом влияния дефектов. Имеются утвержденные методики расчетов. Однако до тех пор, пока отсутствовали средства определения реальных параметров дефектов при УЗК, применение таких методик было очень ограничено. С появлением средств, позволяющих определять реальные параметры дефектов, появилась возможность выполнить оценку ресурса сварного соединения [3].

Комплексный УЗК сварных швов трубопроводов с определением ресурса

НПЦ «ЭХО+» разработал системы серии «Авгур», в которых используется когерентная обработка сигналов. Алгоритм обработки — многочастотная, многокурсовая акустическая голография — аналогичен методу FT-SAFT [4, 5]. При этом используются амплитудные и фазовые характеристики зарегистрированного ультразвукового поля. Получаемые в результате такой обработки данных ультразвуковые изображения имеют ряд особенностей:

- высокое разрешение ($\approx \lambda$) за счет использования амплитудно-фазовых характеристик рассеянного акустического поля;
- сжатие динамического диапазона изображений, которое является следствием высокого разрешения;

- повышение отношения сигнал/шум благодаря совместной обработке А-сканов при восстановлении изображений;
- относительная нечувствительность к амплитуде эхо-сигнала поскольку около 70 % информации содержится в фазовой составляющей А-сканов [6].

Последнее позволяет проводить периодический УЗК (мониторинг) изделий. Отметим, что изображения дефектов являются промежуточным результатом экспертного контроля. Их анализ заканчивается составлением протокола контроля, в котором отражен тип несплошности и координаты ее залегания.

Указанные особенности акустических изображений, полученных в результате когерентной обработки данных, позволяют применять комплексную технологию

Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва:

Бадалян Владимир Григорьевич

Заместитель директора, д. т. н.

Научные интересы: методы и средства обработки акустических изображений и сигналов, разработка когерентных методов и ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных.

Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор, д. т. н., профессор.

Научные интересы: методы и средства определения параметров дефектов, разработка ультразвуковых автоматизированных систем с когерентной обработкой данных

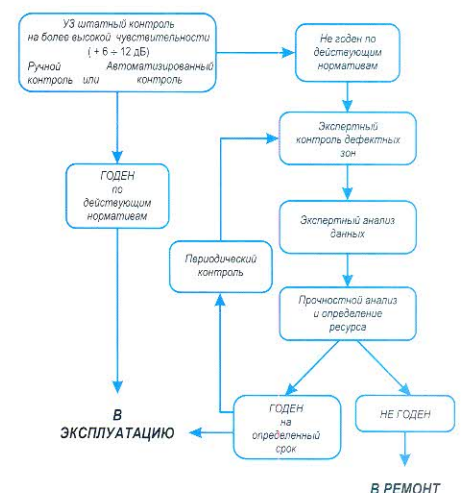


Рис. 1. Комплексная технология контроля сварных соединений с применением систем серии «Авгур»

гию [3] контроля сварных соединений и осуществлять анализ качества сварных швов с учетом влияния дефектов на прочность шва (рис. 1).

На первом этапе проводится поисковый контроль по стандартным методикам ручного (РУЗК) или автоматизированного УЗК (АУЗК). Для исключения случаев пропуска («недобраковки») опасных дефектов плоскостного типа уровень чувствительности фиксации увеличивается в сравнении со стандартными методиками на 6–12 дБ. Если амплитуда эхо-сигнала от отражателя не достигает уровня фиксации, то шов признается годным и пропускается в эксплуатацию.

В противоположном случае на втором этапе проводится автоматизированный измерительный (экспертный) УЗК с помощью систем серии «Авгур» с целью определения типа и размеров дефектов. Экспертному контролю подвергаются те участки, где на первом этапе были обнаружены отражатели с амплитудой эхо-сигналов, достигающей уровня фиксации. По трехмерным изображениям несплошностей, полученным после обработки и анализа данных экспертного контроля, составляются заключения о размерах и типах дефектов (несплошностей).

На третьем этапе информация о параметрах дефектов используется для прочностного расчета ресурса работы сварного шва с учетом других характеристик, влияющих на ресурс. Если по расчетам запас прочности таков, что имеется возможность дальнейшей эксплуатации, шов допускается в работу. В противном случае шов отправляется в ремонт.

Данная технология ультразвукового диагностирования позволяет:

- проводить мониторинг развития дефектов в процессе эксплуатации объектов;
- составить базу данных о наличии различного рода допустимых несплошностей (осуществить 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;
- 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.

Для того, чтобы в полной мере реализовать преимущества описанной выше технологии комплексного контроля и мониторинга, необходимо использовать приборы АУЗК, которые значительно повышают надежность УЗК. Кроме того, эти приборы должны позволять выполнять количественный контроль с измерением реальных параметров дефектов с известной погрешностью и возможностью наблюдения за поведением выявленного дефекта в течение длительного времени. Для реализации этой концепции использовались системы серии «Авгур» [3, 7]. Многолетний опыт эксплуатации этих систем показал их эффективность.

Сопоставление результатов ручного и автоматизированного УЗК

В качестве примера рассмотрим результаты анализа данных контроля 219 аустенитных сварных швов трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325 мм, выполненного в 1997–2000 гг. по штатной методике РУЗК и АУЗК с использованием системы «Авгур» (рис. 2). Все эти швы были первоначально забракованы по данным РУЗК.

На рис. 2а приведены сравнительные результаты дефектности швов по результатам АУЗК. Оказалось, что из 219 забракованных при РУЗК сварных швов 16 являются бездефектными. Заметим, что длины дефектов по данным РУЗК в этом случае превышали 100–200 мм. Анализ данных показал, что имеют место либо геометрические отражатели, либо аномально большое зерно в аустенитном сварном шве. Таким образом, «перебраковка» для РУЗК составляла около 7–8 %.

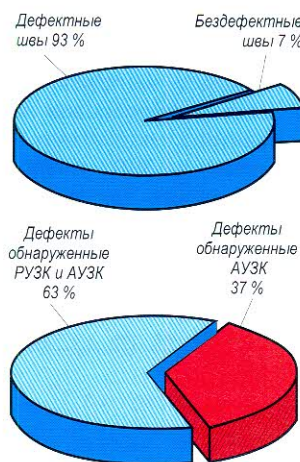


Рис. 2. Результаты контроля аустенитных сварных швов, полученные при РУЗК по штатной методике и АУЗК с использованием системы «Авгур»: а – дефектность швов, забракованных по данным РУЗК, по результатам АУЗК; б – сопоставление числа дефектов, обнаруженных при РУЗК и АУЗК

Вместе с тем, при ручном контроле произошла «недобраковка» швов. Всего в результате АУЗК было обнаружено 345 дефектов различной протяженности и высоты. Из них 218 были выявлены и при РУЗК, и при АУЗК (рис. 2б). Таким образом, почти 37 % дефектов было дополнительно обнаружено при автоматизированном контроле. На рис. 3 приведено распределение по длине дефектов, обнаруженных при АУЗК и не обнаруженных штатным РУЗК. Большинство из них (59 %) имеет размеры от 10 до 30 мм. Однако из 24 % дефектов с длиной свыше 40 мм 12 % длиннее 60 мм. Таким образом, при РУЗК возможны пропуски дефектов значительной длины, что может представлять серьезную опасность.

Необходимо отметить, что подобные результаты получены и за рубежом при анализе результатов различных методов НК [8]. На рис. 4 приведена диаграмма, построенная по результатам последнего обзора Датского института сварки. Видно, что вероятность обнаружения дефектов и достоверность контроля при использовании АУЗК более чем на 30 % выше, чем при РУЗК, а ошибка при определении размеров почти в 2 раза меньше.

Погрешность определения размеров дефектов при АУЗК

Начиная с 2000 г., совместно с НИКИЭТ, ЛАЭС, КуАЭС и СМАЭС проводились работы по сопоставлению результатов измерения высоты дефектов, выявленных

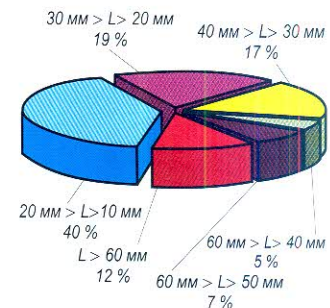


Рис. 3. Длина L дефектов, обнаруженных при АУЗК

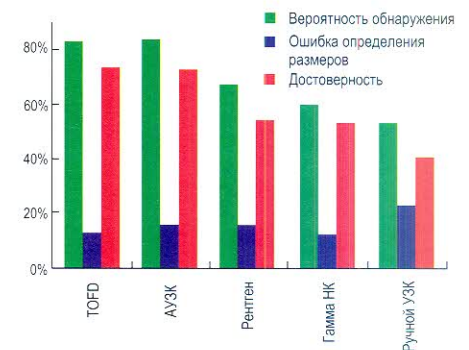


Рис. 4. Характеристики различных методов НК (по данным Датского института сварки)

системой «Авгур», с данными разрушающего контроля: металлографией и методом трехточечного изгиба (долом). На рис. 5 приведено распределение 138 измерений высоты дефектов в аустенитных сварных швах трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325×15 мм в зависимости от разности $\Delta h = h_{\text{МГИ}} - h_{\text{А}}$, где $h_{\text{МГИ}}$ и $h_{\text{А}}$ – соответственно высота дефекта по результатам металлографических исследований и высота, измеренная системами «Авгур». Аналогичные результаты получены при сопоставлении измерений высоты дефектов (120 измерений) системами «Авгур» и методом трехточечного изгиба (рис. 6). Видно, что почти все измерения находятся между красными штриховыми прямыми, соответствующими ошибке измерений $\pm 1,5$ мм.

Исследования, выполненные на частоте 2,5 МГц, показали, что погрешность определения реальной высоты обнаруженных дефектов составляет $\pm 1,5$ мм (в 95 % доверительном интервале) [9]. Приведенные данные по погрешностям относятся к первичному определению высоты дефектов. При повторных УЗК погрешность уменьшается и составляет ± 1 мм (в 95 % доверительном интервале) [9]. Это связано с тем, что ряд факторов, определяющих величину погрешности, отсутствуют при повторном контроле.

Такая относительно малая погрешность позволяет определять профиль дефекта. В качестве примера на рис. 7 приведены профили трещины, полученные в результате МГИ и по данным «Авгур»¹. Здесь $Z_{\text{верх}}$ и $Z_{\text{ниж}}$ – глубины залегания соответственно верхнего и нижнего концов дефекта.

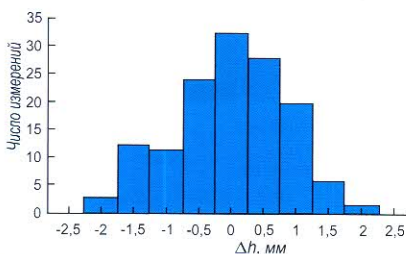


Рис. 5. Распределение числа измерений высоты дефектов в зависимости от разности Δh результатов металлографических исследований и АУЗК

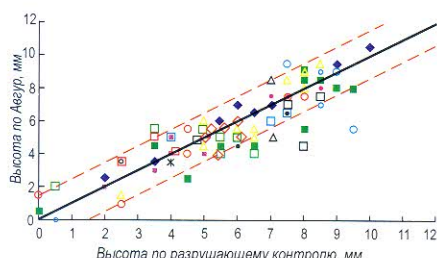


Рис. 6. Сопоставление результатов определения высоты дефектов по данным экспертного АУЗК и последующего долома

Мониторинг контролируемого объекта

Очень важным свойством систем с когерентной обработкой данных является возможность осуществления повторных измерений параметров дефектов, что позволяет наблюдать за развитием выявленных дефектов. Как пример на рис. 8 приведены результаты периодического измерения профилей дефектов в 2000–2004 гг. в сварных швах трубопроводов диаметром 325×15 мм. Дефекты были обнаружены при измерительном контроле в 2000 г. На рис. 8а дан профиль неразвивающейся трещины. Практически все значения измеренных точек для определенной координаты на длине сварного шва за разные годы находятся в пределах ошибки измерений. На рис. 8б приведены результаты измерения профиля другой трещины. В течение 2000–2003 гг. при периодическом контроле ее рост не наблюдался. Однако в 2004 г. было установлено, что дефект начал активно развиваться как по высоте, так и по длине. В результате было принято решение о ремонте этого сварного шва.

Опыт применения комплексной технологии УЗК и мониторинга

Контроль трубопроводов оборудования АЭС

В 1996–2004 гг. комплексная технология НК была успешно применена при эксплуатационном контроле трубопроводов различных диаметров в атомной энергетике как для действующих АЭС, так и при предпусковом контроле (1998–2000 гг.) первого блока Волгодонской АЭС.

На действующих АЭС с реакторами типа РБМК (Ленинградской, Курской, Смоленской) основными объектами эксплуатационного контроля являлись сварные швы трубопроводов первого контура реактора: перлитные Ду 800 и аустенитные Ду 300. Аналогичные работы выполнялись также на АЭС с реакторами типа ВВЭР (Балаковской, Волгодонской, Калининской, Кольской,

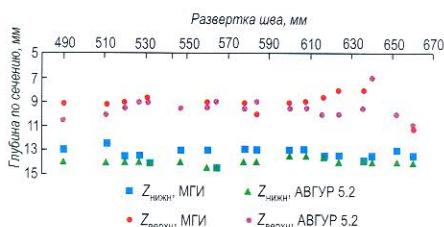


Рис. 7. Профиль продольной трещины в околошовной зоне аустенитного сварного шва трубопровода из нержавеющей стали диаметром 325 мм

¹ Данные представлены О. О. Шнелем

Нововоронежской). Контролировались перлитные сварные швы трубопроводов первого и второго контуров Ду 850, Ду 200 – Ду 600 и аустенитные Ду 400, Ду 500. Общая длина проконтролированных сварных швов превышает 20 км.

Основная цель контроля – не только первичная оценка надежности сварных соединений, но также и слежение за параметрами дефектов, обнаруженных в прежние годы. В качестве примера на рис. 9 приведены данные по числу проконтролированных аустенитных сварных швов трубопроводов первого контура Ду 300 в 1997–2004 гг. Различными цветами выделено число сварных швов, подвергнутых первичному контролю и проконтролированных повторно. Причем некоторые из них контролировались в течение нескольких лет.

Работы были организованы следующим образом:

- контроль системами серии «Авгур» выполнялся специалистами АЭС, обученными в НПЦ «Эхо+»;
- по результатам контроля составлялись экспертные заключения со сравнительным анализом полученных данных и данных систем серии «Авгур» прошлых лет;
- на основании экспертного заключения выполнялся прочностной анализ и принималось решение о допустимости эксплуатации; эту часть работы осуществляла специализированная организация (НИКИЭТ, РНЦ «Курчатовский институт, ВНИИАЭС).

В 1998 – 2000 гг. был выполнен обширный цикл работ по предпусковому контролю трубопроводов I и II контуров первого блока Волгодонской АЭС. Было проконтролировано свыше 1200 сварных швов, в том числе 260, в которых

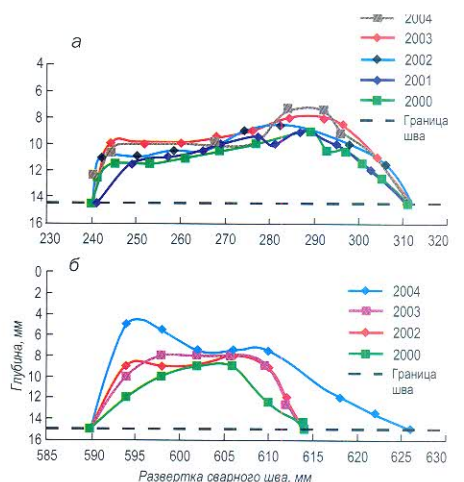


Рис. 8. Наблюдение за трещинами при периодическом контроле трубопроводов в 2000 – 2004 гг.: а – неразвивающаяся трещина; б – развивающаяся трещина

по данным штатного контроля имелись несплошности. При этом 157 сварных соединений были забракованы. На рис. 10 приведена классификация несплошностей по результатам контроля на АЭС в 2000 г.

Прочностные расчеты показали, что только три сварных соединения требовали ремонта, остальные имели допустимые в эксплуатации несовершенства конструкции. Те сварные швы, в которых были обнаружены несплошности, уже в течение нескольких лет контролируются во время планово-предупредительного ремонта с использованием систем серии «Авгур».

Контроль трубопроводов обвязки на газокomppressorных станциях (ГКС) ОАО «Газпром»

Был выполнен АУЗК кольцевых сварных соединений на трубопроводах ГПА, ГМК, ПУ, абсорберов и выходных коллекторов с использованием системы «Авгур 4.2» по методике МА-ОП-НГ-01 [10] (рис. 11). Всего было проконтролировано 57 соединений (104 погонных метра). Все они имели дефекты, недопустимые по результатам штатного контроля. Были определены типы и геометрические размеры несплошностей (рис. 12). Из результатов экспертного контроля видно, что 94 % несплошностей является непроварами корня и межваликовыми несплавлениями, 5 % – включения, а 1 % – трещины. Данные АУЗК позволили сделать вывод о том, что большинство обнаруженных несплошностей появилось в сварных соединениях в процессе монтажа трубопровода. Однако эти несплошности являются концентраторами напряжений и могут развиваться в процессе эксплуатации.

Сварные соединения, содержащие несплошности, были подвергнуты расчету на прочность, на основании которого были даны рекомендации по их дальнейшей эксплуатации (табл. 1). Таким образом, из 57 сварных швов, подлежащих немедленному ремонту на трех ГКС в 2003 г. по результатам штатного



Рис. 9. Контроль аустенитных сварных швов трубопроводов первого контура реактора РБМК за период 1997–2004 гг.

Табл. 1. Результаты применения комплексной технологии контроля сварных соединений на ГКС в 2003 г.

№ ГКС	N_2	D_{Σ}	N_2	N_1	$N_{1/2}$	$N_{\text{рем}}$
1	27	114	26	—	1	—
2	15	35	14	—	—	1
3	15	85	12	3	—	—
Итого	57	234	52	3	1	1

N_2 — число проконтролированных швов;

D_{Σ} — число выявленных несплошностей;

$N_2, N_1, N_{1/2}$ — число швов, нуждающихся в контроле через соответственно 2; 1 и 0,5 года;

$N_{\text{рем}}$ — число швов, направленных в ремонт.

контроля по методике ВСН 012-88, был отремонтирован один шов, а остальные подлежат периодическому АУЗК с различной периодичностью (от полугода до 2 лет). У руководства ГКС появилась обоснованная возможность планировать ремонт этих швов на длительный период.

Контроль сварных соединений нефтепроводов ОАО «Транснефть»

Был выполнен АУЗК кольцевых сварных соединений на трубопроводах Ду 1000, Ду 800, Ду 600 (рис. 13), всего 230 соединений (около 600 погонных метров). В 38 соединениях несплошностей не было зафиксировано, в остальных (192 шва) были обнаружены несплошности. В результате работы были определены типы и геометрические размеры несплошностей в проконтролированных соединениях. Обобщенные результаты АУЗК приведены на рис. 14.



Рис. 10. Классификация несплошностей по результатам экспертного контроля на Волгодонской АЭС в 2000 г.



Рис. 11. Контроль системой «Авгур» трубопровода Ду 1200 на ГКС

Все сварные швы, содержащие дефекты, были подвергнуты прочностным расчетам. Для 10 % дефектов, не имевших однозначных признаков для отнесения их к какому-либо типу, прочностной расчет шва проводился по наиболее консервативной оценке – предполагалось, что несплошности неустановленного типа имеют плоскостной характер (являются трещинами).

Полученные данные АУЗК позволяют сделать вывод о том, что подавляющая часть обнаруженных дефектов (не менее 77 %) появилась в сварных швах в процессе монтажа трубопровода. Однако имеются также опасные дефекты плоскостного типа, которые могут развиваться в процессе эксплуатации.

По результатам прочностных расчетов большинство сварных соединений (172) с несплошностями было допущено в эксплуатацию без ограничений, и их необходимо контролировать через 4 года; 16 соединений допущено в эксплуатацию с ограничениями, их необходимо повтор-

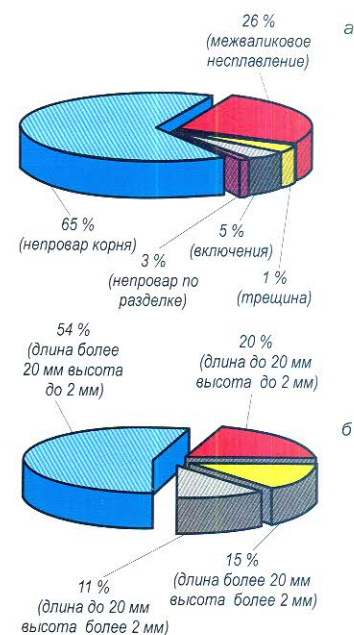


Рис. 12. Классификация по типам (а) и распределение по размерам (б) несплошностей, обнаруженных при проведении АУЗК на ГКС

но проконтролировать через 1 год. После повторного контроля и расчета на прочность следует установить срок следующего контроля или выдать заключение о необходимости ремонта шва. Один сварной шов содержал недопустимый дефект – трещину значительной длины и высоты – и был отремонтирован.

Некоторые особенности систем серии «Авгур»

Системы могут работать в двух режимах:

- режиме поиска несплошностей по длине сварного шва (быстрый обзорный режим), в котором обнаруживаются несплошности, определяется их длина и маркируются области их расположения;
- в экспертном режиме, в котором обеспечивается детальная регистрация акустического поля, рассеянного несплошностью, определяется высота и профиль дефекта; полученные данные обрабатываются методом FT-SAFT, что дает изображения несплошностей с высоким разрешением и позволяет определить истинные (а не условные) параметры несплошностей такие, как координаты, длина, высота, тип.

Многолетний опыт эксплуатации систем серии «Авгур 4.2» на различных объектах показал, что в общем объеме контроля только 10–15 % занимает экспертный высокоточный контроль, остальной объемом приходится на поисковый контроль, который наряду с обнаружением области залегания несплошности позволяет определять ее параметры в соответствии с нормативными документами. Вместе с тем система после доработки может выполнять как функции высокоскоростного штатного контроля, так и экспертного контроля, объединив, таким образом, первый и второй этапы технологии контроля. Для решения этой задачи в НПЦ «Эхо+» раз-

работана система нового поколения – «Авгур 5», отличающаяся:

- возможностью выполнения сплошного штатного контроля и выборочного (в соответствии с технологией) экспертного контроля;
- новым программным обеспечением, которое учитывает особенности штатного контроля (средства сжатия данных, автоматизированное формирование протокола и т. д.);
- средствами автоматизации количественной оценки результатов контроля;
- использованием базы данных.

Применение систем серии «Авгур» имеет большие перспективы там, где используются изделия большой стоимости или когда очень высока цена возможной аварии. Это атомная промышленность и теплоэнергетика, нефтегазовый комплекс, химическая промышленность, судостроение.

Выводы

1. Предложена и апробирована новая комплексная технология контроля сварных соединений с применением систем серии «Авгур» на объектах атомной энергетики, газо- и нефтепроводах.

2. Разработана серия приборов АУЗК с когерентной обработкой данных, позволяющих перейти к количественному НК.

3. Разработанные технология и средства АУЗК позволили:

- резко (более чем в 10 раз) сократить объем необоснованного ремонта швов;
- исключить пропуск в эксплуатацию опасных дефектов;
- создать условия для оптимального планирования ремонтных работ.

4. Автоматизация УЗК по сравнению с ручным УЗК дает кроме прочих преимуществ более высокую (примерно на 30 %) достоверность результатов и выявляемость дефектов.

Литература

1. Вопилкин А. Х. Волны дифракции и их применение в ультразвуковом неразрушающем контроле/Обзор – Дефектоскопия. 1985. № 2. С. 72–85.
2. Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х. Компьютерные системы для ультразвукового неразрушающего контроля. – Дефектоскопия. 1993. № 5. С. 7–13.
3. Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х., Тихонов Д. С. Новый подход к ультразвуковому неразрушающему автоматизированному контролю ответственных сварных соединений. – Контроль. Диагностика. 1999. № 10. С. 23–31.
4. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. – Акустический журнал. 1988. Т. 34. № 2. С. 222–231.
5. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Алгоритм совместной обработки многочастотных и многоконфигурационных голограмм для восстановления изображения дефектов. – Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 25–32.
6. 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.
7. 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.
8. Celebrating TOFD's 25th anniversary. – NDT.net. 1999. V. 4. No. 6 / <http://www.ndt.net/article/v04n06/tofd25/tofd25.htm>
9. Бадалян В. Г. Погрешность измерения дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных. – Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 12–23.
10. Методика автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля сварных соединений газо- и нефтепроводов с применением систем серии «Авгур». МА-ОП-НГ-01.



Рис. 13. Контроль нефтепровода системой «Авгур»

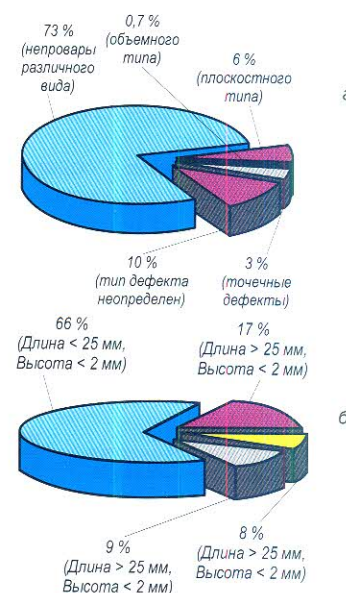


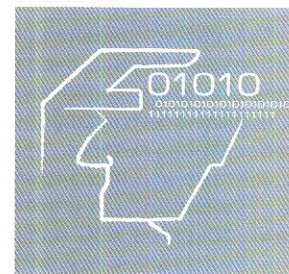
Рис. 14. Классификация по типам (а) и распределение по размерам (б) несплошностей, обнаруженных при проведении АУЗК в кольцевых сварных швах нефтепровода

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2004. № 4(26). С. 22–27

Selection Strategy of Automated Ultrasonic Testing Structure for a Specific Purpose

V. G. Badalyan, A. Kh. Vopilkin,
D. S. Tikhonov

The factors influencing on selection strategy of automated ultrasonic testing system structure and modules are considered for various objects. Examples of such systems developed according to inspected object parameters and customer requirements are given. It is shown that application of the systems developed is most efficient for operational inspection of high danger objects because in these cases flaw detection transfers into flaw measurement with evaluation of remaining life.



МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ АУЗК ДЛЯ КОНКРЕТНОЙ ЗАДАЧИ

Введение

В последние годы все большее распространение получают автоматизированные системы АУЗК. Высокие производительность и достоверность, документирование результатов контроля, снижение субъективного фактора оператора, возможность применения различных видов обработки и анализа данных контроля предопределили активное развитие этого направления. При создании любой системы АУЗК приходится учиты-

вать многие факторы, влияющие на качество контроля. Среди них основными являются:

- параметры объекта;
- требования заказчика;
- методическое обеспечение (имеющееся или разрабатываемое);
- опыт и возможности изготовителя;
- стадия, на которой осуществляется АУЗК (производство, монтаж или эксплуатация объекта).

Эти факторы определяют, какой должна быть система: простой или сложной, дорогой или не очень, более или менее информативной.

В НПЦ «ЭХО+» в течение последних 20 лет создаются системы АУЗК главным образом для АЭС и объектов, находящихся в эксплуатации. Накопленный опыт позволил структурировать методологию построения систем АУЗК различных объектов. Рассмотрим общие методические вопросы выбора систем для решения конкретных задач с примерами их реализации.

Общие положения

Обобщенная схема современной системы АУЗК представлена на рис. 1. Центральной, наиболее стабильной частью системы является многоканальный цифровой дефектоскоп, управляемый компьютером, с блоком управления сканером, который может также управляться от микропроцессора или того же компьютера. Выбор компьютера в значительной степени диктуется условиями контроля: это может быть промышленный или специальный компьютер, Note-book в различном исполнении и др. Наиболее динамично могут меняться такие части системы, как сканер и акустический блок. Состав акустического блока и, в частности, число и ориентация электроакустических преобразователей в значительной степени зависит

от методики измерений, тогда как выбор сканера, предназначенного для доставки акустического блока к области контроля и обеспечения выбранной области регистрации ультразвуковых данных, в значительной степени определяется условиями контроля. В частности для контроля трубопроводов изнутри, сканер может быть выполнен в виде автономного устройства – кроулера, снабженного акустическим блоком; для контроля трубопровода по наружной поверхности – в виде одно- или двухосного манипулятора. Чрезвычайно важную роль играет программное обеспечение. Современное программное обеспечение систем АУЗК использует базу данных, что обеспечивает упорядоченное хранение результатов контроля за любой период времени и возможность проведения сопоставительного анализа – мониторинга состояния объекта. В состав программного обеспечения входят блок «Регистрация данных», в котором выполняется настройка и управление аппаратурой, запись данных в базу данных; блок «Анализ данных», в котором осуществляется просмотр, обработка и оценка данных, используя все виды их представления; блок сервисных программ, обеспечивающих калибровку, формирование заключений АУЗК, запросы из базы данных и др.

Факторами, оказывающими влияние на архитектуру системы АУЗК при оптимальной ее адаптации для конкретной задачи (рис. 2), являются параметры объекта, методика контроля, возможности изготовителя, требования заказчика. Причем требования заказчика не всегда могут быть удовлетворены возможностями изготовителя аппаратуры, поэтому часто требуется согласование и уточнение требований заказчика с возможностями изготовителя. Рассмотрим эти факторы подробнее.

Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+»,
г. Москва:

Бадалян Владимир Григорьевич

Заместитель директора, д. т. н.

Научные интересы: методы и средства обработки акустических изображений и сигналов, разработка когерентных методов и ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных.

Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор, д. т. н., профессор.

Научные интересы: методы и средства определения параметров дефектов, разработка ультразвуковых автоматизированных систем с когерентной обработкой данных



Тихонов Дмитрий Сергеевич

Технический директор, к. т. н.

При проектировании оптимальной архитектуры в первую очередь необходимо удовлетворить *требованиям заказчика* и, прежде всего, связанным с условиями проведения контроля (при изготовлении и монтаже или при эксплуатации объекта). Например, при изготовлении и монтаже объектов АЭС радиационный фон – нормальный, а при эксплуатационном контроле – повышенный. Поэтому в архитектуре системы АУЗК должна быть предусмотрена возможность размещения сканера и компьютера на значительном расстоянии, а также возможность обмена экспресс-информацией между операторами компьютера и сканера (наличие переговорного устройства). Заказчик определяет, какими параметрами описывается выявленный дефект: эквивалентными и условными размерами или необходимо дополнительно измерять реальные размеры дефекта. В зависимости от набора параметров, количественно описывающих дефект, выбирается тип сканера и акустический блок, режимы регистрации и виды обработки данных. Существенное влияние на аппаратуру оказывает необходимая степень автоматизации контроля: предусматривается ручное сканирование или

автоматическая регистрация, при этом обработку, анализ и оценку данных выполняет специалист, или необходима полная автоматизация этого процесса, включая анализ, и документирование результатов. В этом случае сервисные программы и программы обработки результатов контроля могут серьезно отличаться. Бесспорно, значительное влияние на исполнение и состав аппаратуры оказывают внешние условия: температурный режим, влажность, вибрации и т. д. Кроме того, очень важны требуемая скорость контроля, которая диктует необходимость применения многоканальных систем регистрации данных, и возможность наблюдения за развитием дефекта, что может привести к выбору такой архитектуры системы АУЗК, при которой можно использовать такие методы обработки данных, как ПСП, SAFT, TOFD, или системы с фазированными антенными решетками.

Параметры объекта, такие как геометрия, расположение, условия доступа весьма существенно сказываются на выборе сканеров и исполнении акустического блока.

Существенные требования к выбору элементов аппаратуры предъявляет ме-

тодика контроля конкретного объекта, которая диктует выбор параметров акустического блока, задает требования к электронной и механическим составляющим системы, порядку регистрации и оценки данных контроля. Чрезвычайно важную роль при выборе структуры системы играют возможности изготовителя: какой комплекс электронных блоков с необходимыми для контроля параметрами он имеет, какие сканеры он изготавливает или может приобрести у других изготовителей, каково программное обеспечение разработанных им систем (в том числе – возможности программных блоков регистрации, обработки и оценки данных АУЗК), какие типы акустических преобразователей и с какими характеристиками можно применить в проектируемой системе контроля.

Таким образом, опираясь на требования заказчика, учитывая условия контроля и параметры контролируемого объекта, требования методики контроля и возможности изготовителя, можно из разработанных изготовителем совместимых между собой элементов электронных блоков, сканеров, акустических преобразователей, программного обеспечения сформировать систему АУЗК,

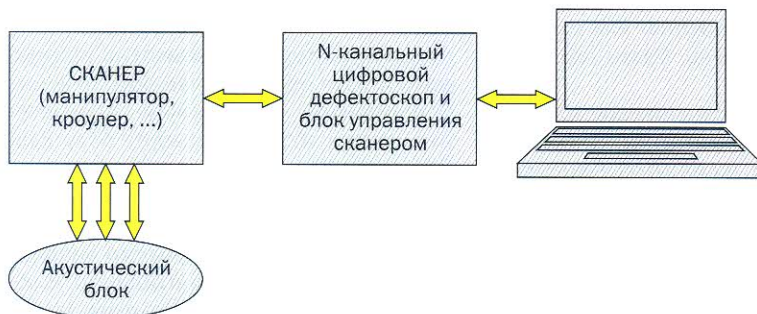


Рис. 1. Обобщенная схема системы АУЗК



Рис. 2. Факторы, влияющие на архитектуру аппаратуры

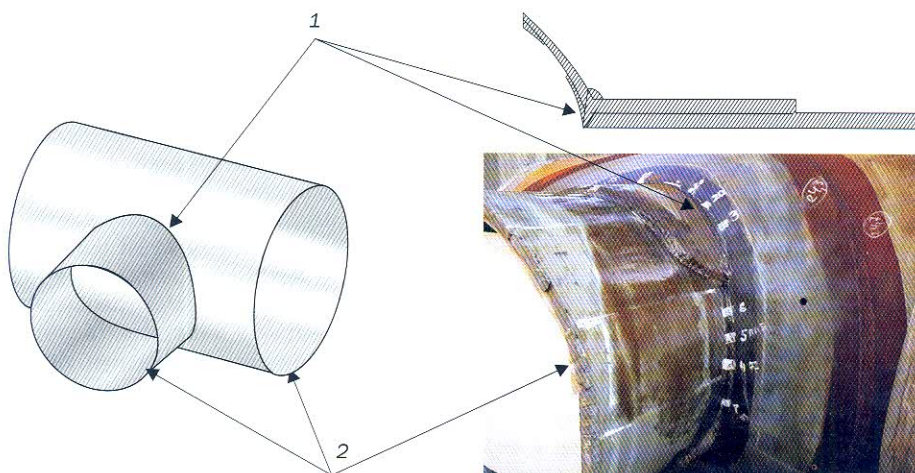


Рис. 3. Объект контроля: 1 – внутреннее угловое сварное соединение приварки патрубка к обечайке (магистральной части) тройника; 2 – кольцевые стыковые сварные соединения приварки обечайки и патрубка тройника к газопроводу

оптимальную для выполнения контроля конкретного объекта.

Пример реализации общих положений

В качестве примера рассмотрим найденное НПЦ «ЭХО+» техническое решение системы АУЗК для контроля переходных сварных тройников с усиливающими накладками на корпусе и патрубке (ТСН). Контролю подлежат основной металл и сварные соединения врезки патрубков в корпуса ТСН (рис. 3). Поставленная задача распадается на три подзадачи:

- контроль внутреннего сварного соединения приварки патрубка к обечайке тройника;
- контроль кольцевых стыковых сварных соединений приварки обечайки и патрубка тройника к газопроводу;

– контроль основного металла обечайки и патрубка тройника.

Эта задача была решена на основе комбинирования элементов системы АУЗК, разработанных в НПЦ «ЭХО+» (табл. 1). Для решения упомянутых подзадач требуются существенно отличающиеся виды сканеров; разные методы контроля (для контроля стыковых сварных соединений применяется традиционный эхо-метод, для контроля основного металла используется эффект волноводного распространения ультразвуковых волн в пластинах и оболочках); программное обеспечение для каждой задачи также различается, например, при контроле внутренних сварных соединений приварки патрубка к обечайке тройника требуется трехмерная когерентная обработка данных и более подробная регистрация данных в двумерной плоскости.

Контроль внутреннего углового сварного соединения приварки патрубка к обечайке тройника

Анализ условий и методики контроля показал, что аппаратура, решающая эту задачу, должна использовать стандарт-

ный электронный блок на базе ПК с интерфейсом ISA (рис. 4), сканер СК.426Т (рис. 5), комплект из трех ПЭП на частоте 2,5 МГц с углом ввода акустического пучка 70°. Основной особенностью программного обеспечения является наличие модуля когерентной обработки данных алгоритмами трехмерного ПСП и фронтальной голографии. Исследования показали, что, так как расстояние между областью ввода акустического пучка и внутренним сварным соединением велико, для получения хорошо интерпретируемого изображения контролируемой области внутреннего сварного шва необходима трехмерная когерентная обработка данных контроля. Только в этом случае изображения от дефектов хорошо выделяются на фоне изображения сварного шва и геометрических отражателей.

Контроль основного металла обечайки и патрубка тройника

Как упоминалось, задача контроля основного металла обечайки и патрубка тройника была решена использованием явления волноводного распространения

ультразвуковых волн в пластинах и оболочках. Для этого применялись сканеры СК.А5.5-ОМТ для автоматизированного перемещения акустических блоков по объекту и СК.БРД-У для их ручного перемещения. Электронный блок был выполнен либо на базе ПК (рис. 4) – для контроля области тройника, либо на базе планшетного ноутбука – при контроле основного металла трубопровода. Комплект ПЭП состоит из двух преобразователей на частоту 1,2 МГц с углом ввода ультразвука 60°. Программное обеспечение включает модули анализа данных ВМТ-Viewer, компенсации затухания и динамической настройки ВРЧ, автоматического образмеривания данных основного металла трубопроводов, построения трехмерной маски, шаблоны заключений контроля.

Контроль кольцевых стыковых сварных соединений приварки обечайки и патрубка тройника к газопроводу

Этот контроль выполняется обычными методами ультразвуковой дефектоскопии. В качестве сканера применяется модель СК.426Т (рис. 5); используется электронный блок, выполненный на базе ПК (рис. 4), стандартный комплект ПЭП. В программном обеспечении применяются некогерентная обработка данных, позволяющая осуществлять уверенный контроль сварных соединений в соответствии с нормативными документами.

Заключение

В НПЦ «ЭХО+» за 20 лет создано большое количество систем АУЗК различного назначения, в состав которых входят электронные модули, узлы сканирования, программное обеспечение. С помощью этих систем решается новая очень важная задача перехода от дефектоскопии к дефектометрии, что открывает путь к созданию эксплуатационных норм и оценке остаточного ресурса.

Имея в арсенале разветвленный набор сканеров, электронных блоков и программного обеспечения в виде законченных модулей, можно создавать в сжатые сроки системы АУЗК, максимально учитывая параметры объектов и требования заказчика.

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2010. № 1(47)

Табл. 1. Элементы системы АУЗК, разработанные НПЦ «ЭХО+» (возможности изготовителя)

Сканеры	Электронные блоки	Программное обеспечение	Акустические преобразователи
СК.219	На базе ПК с интерфейсом ISA	Хранение данных в БД	ПЭП для дефектоскопии
СК.325		Просмотр изображений А-, В-, С-, D-типа	
СК.426	Комплект модулей цифрового дефектоскопа	Модуль когерентной обработки	ПЭП для дефектометрии
СК.426Т		Модуль визуализации данных	
СК.560	Блок регистрации с интерфейсом USB	Представление данных в виде карты коррозии	ПЭП многомодовые
СК.590		Представление данных TOFD	
СК.А5.5-ОМТ	Цифровой дефектоскоп стороннего производителя	Модуль компенсации затухания	ПЭП с сухим контактом
СК-Т300		Модуль трехмерной маски	
СК.БРД-У		Модуль построения дефектограмм	ПЭП с контактной жидкостью
СК-Р		Модуль автоматического создания заключений АУЗК	



Рис. 4. Электронный блок

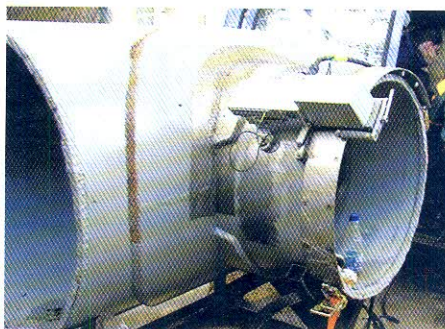
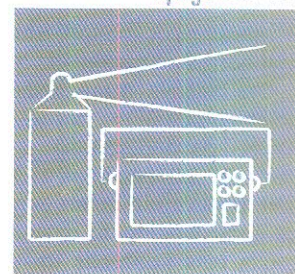


Рис. 5. Сканер СК.426Т на объекте контроля

Main Stages of Automated Ultrasonic Inspection with Defect Sizing by AUGUR Series Systems

D. S. Tikhonov

Generalized sequence of operations during automated ultrasonic inspection of welds with defect sizing by AUGUR system is given. Main features of every inspection stage are specified. Effective application of measuring regime requires additional operational stages such as transducer calibration, surface irregularity consideration, coherent data processing and detailed data analysis.



ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ АУЗК С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ СИСТЕМАМИ СЕРИИ «АВГУР»

Среди задач эксплуатационного НК промышленного оборудования все более актуальной становится задача определения характеристик обнаруженных несплошностей. Порядок дальнейшей эксплуатации, решение задачи продления ресурса оборудования однозначно связаны со сведениями о таких параметрах несплошностей, как размер, тип, местоположение. С этой точки зрения наиболее перспективными методами НК являются когерентные вычислительные методы формирования трехмерных изображений несплошностей. Когерентными называются методы обработки ультразвуковых данных, учитывающие не только амплитудные значения эхо-сигналов, но и закономерности их пространственно-фазовых распределений, что позволяет существенно повысить разрешающую способность и отношение сигнал/шум в изображениях дефектов.

Многие из этих методов реализованы в системах автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) серии «Авгур» [1 – 3]. Однако получение точных, хорошо интерпретируемых изображений при контроле реальных сварных соединений часто представляет собой весьма сложную задачу. Во-первых, такие изображения обладают рядом существенных отличий от реальных оптических образов несплошностей, во-вторых, они являются весьма зависимыми от таких факторов, как наличие теневых (неизлучающих) конфигураций дефектов [4, 5], неров-

ностей поверхности объекта контроля, точности настройки параметров аппаратуры и т. д. На преодоление этих особенностей, пренебрежение которыми приводит к существенному снижению точности когерентных методов визуализации дефектов, ориентированы программы

обработки данных контроля и множественное методическое обеспечение систем серии «Авгур».

На рис. 1 представлена типовая последовательность действий при проведении АУЗК сварных соединений системами «Авгур». Ее отличительными особенно-

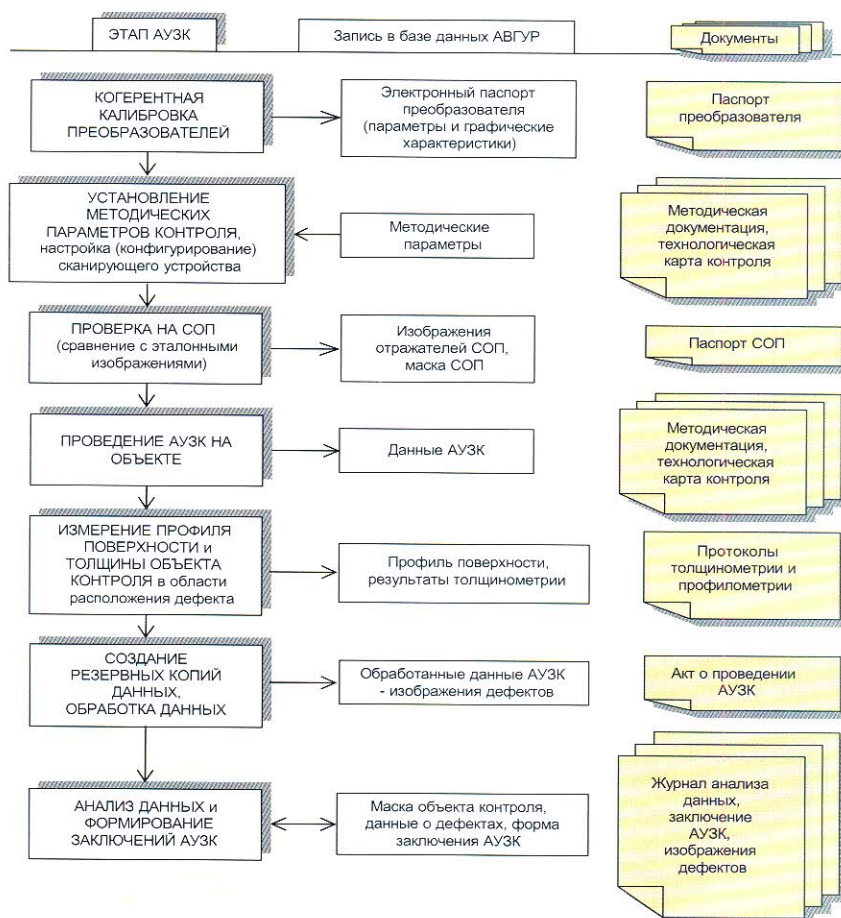


Рис. 1. Основные этапы проведения АУЗК системами серии «Авгур»

Тихонов Дмитрий Сергеевич

Технический директор ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва, к. т. н.

стями в сравнении с методиками контроля, присущими большинству автоматизированных средств УЗК, является наличие этапа когерентной калибровки преобразователей, этапов, связанных с учетом формы поверхности объекта контроля, и соответствующей обработки и анализа данных контроля.

Существенно, что каждый этап фиксируется записями в базе данных системы (второй столбец на рис. 1). В третьем столбце приведены документы, сопровождающие процесс АУЗК на каждом его этапе.

Когерентная калибровка ПЭП проводится с целью определения их основных параметров, а также параметров, определяющих фокусирующие свойства ПЭП при когерентной обработке данных, полученных в совмещенном режиме контроля. При когерентной калибровке проводится регистрация эхо-сигналов от цилиндрического отверстия $\varnothing 6$ мм в стандартном образце СО-2 или аналогичном ему образце со скругленной контактной поверхностью для притертых ПЭП. Зарегистрированный набор эхо-сигналов условно называется калибровочным В-сканом для данного ПЭП (СВ-

скан). Все необходимые для дальнейшей работы параметры ПЭП определяются по этим данным и заносятся в базу данных системы в виде электронного паспорта.

Перед определением параметров полученный СВ-скан обрабатывается методом пространственной фильтрации (для наклонных преобразователей) и пространственно-временной селекции (для всех ПЭП). Пространственная фильтрация проводится с целью исключения шумовых сигналов, имеющих спектр с заведомо известной областью пространственных частот (например, сигналов реверберационных шумов). Селекция выполняется для исключения сигнала обегания и других посторонних сигналов, не связанных с непосредственным отражением от эталонного отверстия.

Из обработанного СВ-скана рассчитываются импульсная и спектральная характеристики, диаграмма направленности, реверберационно-шумовая характеристика (РШХ), вид излучаемого поля калибруемого ПЭП. Далее определяются длительность импульса, центральная частота, полоса частот, эхо-импульсная чувствительность, угол ввода, параметры фокусировки ПЭП. На основе этих пара-

метров проводится расчет кривых АРД и, впоследствии, их совместный вывод на экран с РШХ.

Импульсная характеристика определяется по максимальному сигналу обработанного СВ-скана, а спектральная рассчитывается методом дискретного преобразования Фурье импульсной характеристики. Длительность импульса, полоса частот, центральная частота (t_i, f_L, f_U, f_0) определяются согласно [6]. Также в соответствии с [6] определяется относительная полоса частот ($\Delta f_{rel}, \%$). Полученный при калибровке максимальный уровень эхо-сигнала считается в дальнейшем опорным при настройке чувствительности контроля.

Диаграмма направленности рассчитывается из нескольких одночастотных голограмм $h(x, f_i)$ – пространственных спектров СВ-скана в диапазоне частот $\Delta f = f_U - f_L$. Затем рассчитываются пространственные спектры голограмм $-H(k_x, f_i)$, где $k_x = (2\pi f_i / C) \sin \alpha$, C – скорость звука, α – угол ввода соответствующей плоской волны. Затем формуруется функция $D(k_x) = \sum_i H(k_x, f_i)$, после чего $D(k_x)$ переводится в угловую зависимость $D(\alpha)$ и в таком виде представляется в виде импульсной диаграммы направленности ПЭП, по которой определяются угол ввода и ширина ее основного лепестка.

С использованием полученных параметров ПЭП производится восстановление нескольких изображений эталонного отверстия с различными параметрами его фокусировки. По изображению, имеющему оптимальную фокусировку, определяется местоположение условного фокуса преобразователя – некоей области, которая «программно» принимается за область расхождения лучей ПЭП. Координаты этой точки в системе координат ПЭП однозначно связаны с такими его параметрами, как стрела и время задержки распространения ультразвука в призме. Установление точек условного фокуса для всех используемых при контроле ПЭП позволяет получать сфокусированные изображения дефектов в единой системе координат, что обеспечивает точное объединение изображений, полученных при различных направлениях прозвучивания. На рис. 2 приведен вид паспорта ПЭП, сохраняемый в базе данных системы «Авгур 5.2».

Этап настройки параметров системы и проверки правильности этих настроек на стандартном образце предприятия (СОП) присущ всем методам УЗК. Для проверки точности полученных изображений отражателей в СОП в системах «Авгур» используются маски – схематические изображения профиля сварного шва или других объектов (отверстий, про-

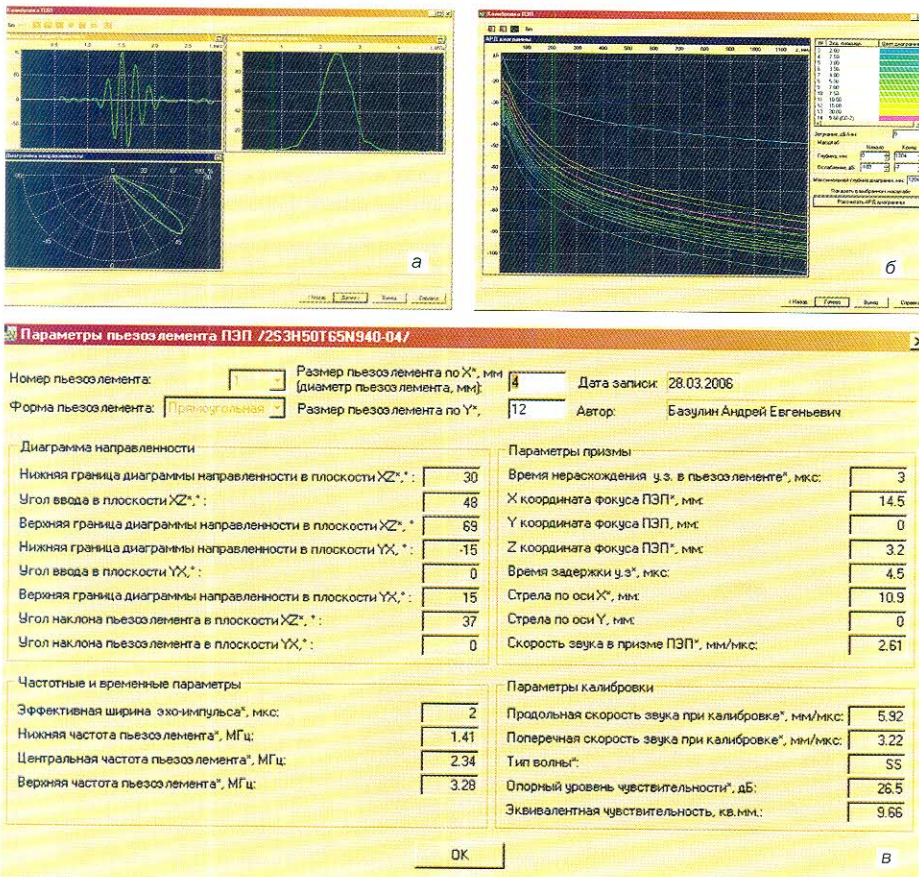


Рис. 2. Паспорт наклонного ПЭП: а – импульсная, спектральные характеристики ПЭП и диаграмма (импульсная) направленности; б – АРД-диаграммы ПЭП; в – числовые параметры ПЭП и калибровочного образца

пилов и пр.), отображаемые на экране вместе с В-изображениями, полученными системой «Авгур». Назначение масок – облегчить оператору привязку деталей изображения к объекту контроля. На рис. 3 приведено когерентное изображение отверстия $\varnothing 6$ мм в стандартном образце СО-2, полученное с помощью одного наклонного ПЭП (60°; 2,5 МГц) и маски этого отверстия.

Проведение контроля на объекте обычно связано с операциями доставки системы на объект контроля, ее развертывания, установки сканера. Контроль системами «Авгур» с последующим определением размеров дефектов проводится в двух режимах: поисковом и измерительном [7]. В поисковом режиме обеспечивается поиск областей вероятной локализации дефектов, а в измерительном – сканирование этих областей с малым шагом перемещения ПЭП, обеспечивающее возможность последующей обработки полученных данных когерентными методами. Для выявления опасных дефектов, отражающих эхо-сигналы ниже контрольного уровня, контроль в поисковом режиме проводится на повышенной чувствительности. Определение степени опасности дефектов (их типов и размеров) производится по результатам измерительного контроля. На рис. 4 приведены изображения плоскостных дефектов в корне сварных соединений, полученные в поисковом режиме.

Чаще всего измерительный режим АУЗК используется при контроле объектов, находящихся в эксплуатации или при отладке технологических процессов, когда актуально точно знать тип и размер

неплотностей. При изготовлении или при проведении монтажных работ важнее иметь оперативную информацию об обнаруженных отклонениях, поэтому чаще всего достаточно результатов поискового режима АУЗК, когда о наличии или отсутствии дефектов можно судить сразу после проведения контроля.

Если в измерительном режиме в плоскости когерентного сканирования имеются существенные неровности поверхности, то даже при сохранении нормального акустического контакта когерентная обработка приводит к большим ошибкам в изображениях. Такие неровности часто образуются после грубой и многократной зачистки поверхности сканирования, а также могут образоваться после применения технологии обжатия трубопроводов, использующейся для снятия внутренних избыточных напряжений сварных соединений. На рис. 5 приведены изображения отверстия $\varnothing 6$ мм стандартного образца СО-2 для ровной поверхности и для выпуклой в области сканирования поверхности различной высоты. Максимальные значения высоты гладкой выпуклости 1,28 и 2,56 мм соответствуют высоте в одну и две длины сдвиговой волны на частоте 2,5 МГц. Видно, что искажения при неровностях высотой более одной длины волны уже неприемлемы для определения геометрических характеристик отражателя.

Для устранения такого рода погрешности когерентных изображений применяются алгоритмы, использующие паракиральное приближение. Эти алго-

ритмы выполняют коррекцию фазы измеренного поля или пространственного спектра голограмм, приводя их тем самым к случаю регистрации на плоской поверхности, когда можно использовать существующий алгоритм восстановления изображений [8]. Аналогичный подход используется в гибких фазированных антенных решетках с измерением неровностей поверхности [9].

Для выполнения точной корректировки данных, зарегистрированных на «плоских» поверхностях, предусмотрен **этап измерения неровностей поверхности**, а в системах «Авгур» – специальный режим корректировки данных. На рис. 6 приведены изображения отверстия $\varnothing 2$ мм, полученные наклонным совмещенным ПЭП на плоской поверхности, на вогнутой поверхности с прогибом 1,3 мм, и изображение, восстановленное после корректировки данных, полученных на вогнутой поверхности.

Все данные, полученные в измерительном режиме, обрабатываются с использованием когерентных методов. Результатом обработки являются изображения отражателей, представленные в системе координат объекта контроля. Основным алгоритмом обработки является алгоритм проекции в спектральном пространстве [10] (он же – SAFT, в Фурье-области – FT SAFT), а также модификация этого алгоритма для трансформированных на дефекте волн [11]. Для получения дополнительной информации об отражателях используются также алгоритмы различных видов фильтрации, некогерентная

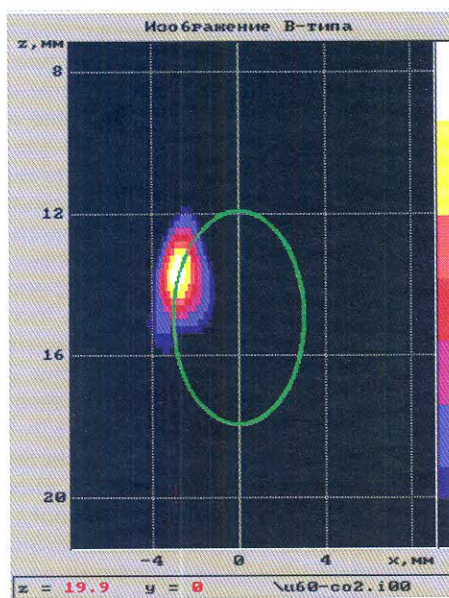


Рис. 3. Изображение отверстия СО-2, полученное наклонным ПЭП при прозвучивании с одного направления

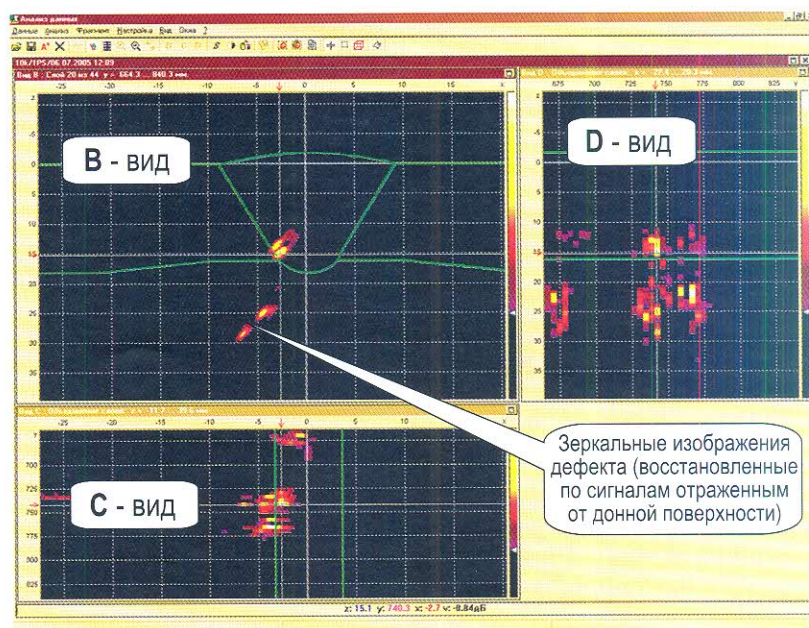


Рис. 4. Три сечения (вида) трехмерного изображения двух плоскостных дефектов, расположенных в корне сварных соединений: хорошо видны блики от трещины из корня шва и зеркальные блики, отраженные от верхней части трещины (в нижней части В-вида); линиями обозначены контуры разделки сварного соединения

визуализация исходных А-сканов, алгоритмы сверхразрешения, зеркальное отражение изображений, различные виды объединения изображений.

Для подтверждения факта контроля, фиксации отклонений от типовой формы реального объекта контроля и отражения другой дополнительной информации, важной для последующего анализа данных, рекомендуется составлять акт о выполнении АУЗК. Особенно важно составление такого акта, когда анализ полученных данных и формирование результирующего заключения выполняется специалистами, не участвовавшими в контроле.

Основными задачами **этапа анализа данных** АУЗК являются:

- идентификация несплошностей: фиксация и определение типа;
- определение координат и размера несплошностей;
- заключение о реальном характере несплошностей.

Все данные АУЗК, включая данные поискового режима, исходные и обработанные данные (изображения) измерительного режима для каждой из областей вероятной локализации дефектов подвергается анализу в целях выявления информационных признаков данных, по которым принимается решение о наличии несплошности и ее типе. При анализе трехмерных изображений основными объектами являются контуры локализации несплошности (или пятна на В-, С- и D-срезах), построенные путем околонурирования локальных максимумов изображений, превышающих уровень шумового изображения. На рис. 7 приведена схема формирования контура локализации несплошности. При выделении таких контуров необходимо учитывать возможное влияние различных искажающих факторов: нарушения контакта, нелинейные искажения сигнала при регистрации данных (зашкаливание), препятствия равномерному сканированию,

шумы, возникающие при обработке данных.

На одном изображении и для одного дефекта могут фиксироваться несколько контуров локализации несплошности. Их размер и взаимное расположение определяют состояние информационных признаков данных. Вот некоторые из них:

- контур несплошности не более элемента разрешающей способности изображения (обычно точечные дефекты);
- превышение определенного амплитудного контрольного уровня (для фиксации зеркального типа отражения);
- неизменность координат несплошности от слоя к слою (обычно вдоль шва), в т. ч. нитевидное изображение (характерно для конструктивных отражателей, межваликовых протяженных непроваров и т. п.);
- многоэлементное изображение (коррозионные дефекты, трещины различного типа и т. д.);
- цель, группа (скопление пор, повышение уровня структурного шума и т. д.).

По выделенным контурам локализации несплошности определяются размеры дефектов. По данным привязки сканера к объекту контроля фиксируется его местоположение, например, для сварного соединения – в корне, в теле шва, по границе сплавления, в околошовной зоне. По сочетанию выявленных информационных признаков, используя данные о размерах и местоположении несплошности, делается заключение о реальном характере дефекта.

Когерентная обработка, визуализация данных АУЗК, зарегистрированных в широком динамическом диапазоне для некоторых объектов контроля, позволили выявить ряд дополнительных информационных признаков. Один из них – эффект экранировки, когда изображение предполагаемой несплошности экранирует сигналы структурных шумов или сигналы каких-либо отражателей, расположенных за несплошностью по

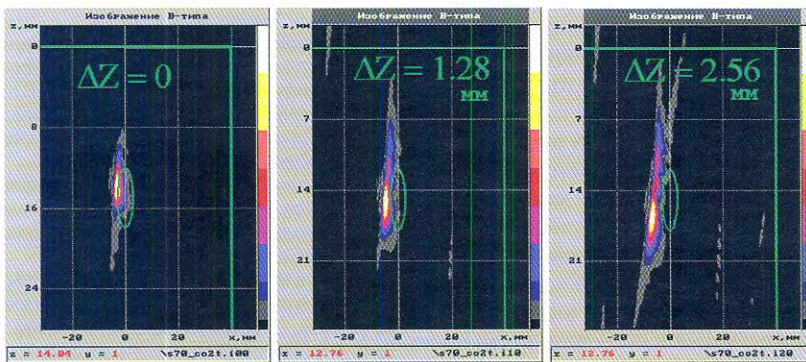


Рис. 5. Искажающее влияние неровностей поверхности: ΔZ – максимальная стрела выпуклости поверхности относительно исходной прямой линии

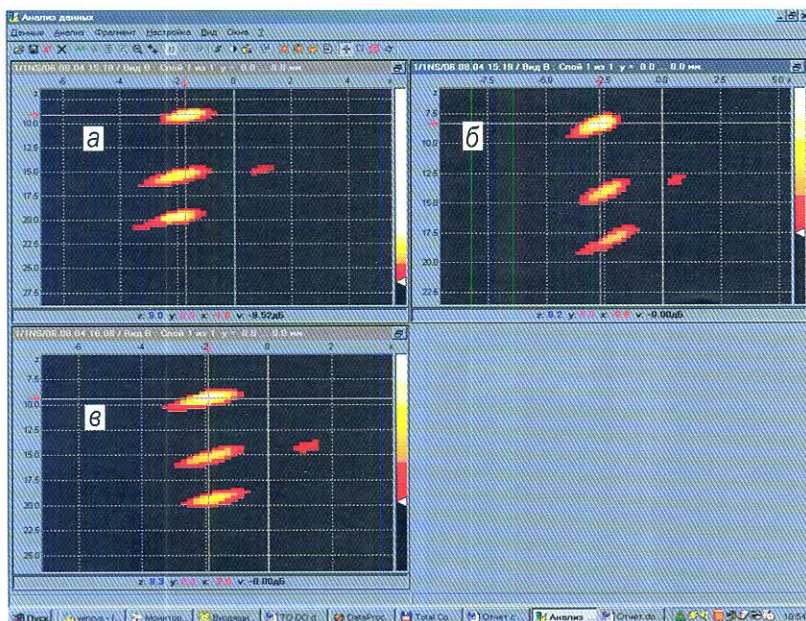


Рис. 6. Изображения отверстия бокового сверления для измерений с плоской поверхностью (а) и с поверхности с прогибом (б); в – то же после коррекции

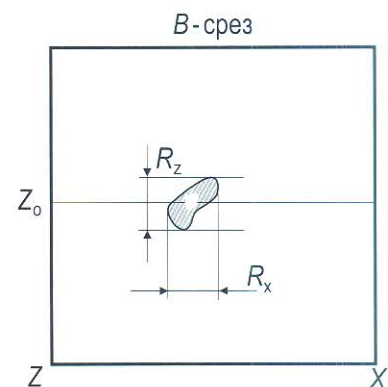


Рис. 7. Построение контура локализации несплошности

ходу распространения ультразвуковых волн. На рис. 8 приведены данные поискового режима контроля с эффектом экранировки структурных шумов трещинами, расположенными в околосварной зоне аустенитного сварного соединения. Эффект хорошо проявляется при повышении контрастности изображения, когда увеличивается заполнение шумовыми сигналами.

Другой эффект – образование многократных отражений трансформированных волн, возникающий на неровностях корня шва или на конусных проточках сварных соединений. Эти волны, хорошо идентифицируемые при АУЗК, при ручном контроле воспринимаются как сигналы из сечения шва. Многократные переотражения трансформированной волны в толще трубы приводят к образованию цепочки постепенно затухающих сигналов. На рис. 8 сверху приведены D -изображения, полученные в поисковом режиме. Видно, что на одном участке шва конусная проточка стала причиной эхо-сигналов, образованных трансформированными волнами; эти сигналы имеют большую амплитуду и попадают в зону контроля. Этот участок шва при ручном контроле был забракован. Внизу на рис. 9 приведено изображение, полученное в измерительном режиме в области существования этих сигналов, трансформированные волны образуют хорошо идентифицируемую цепочку пятен, расположенных вне области контроля сварного соединения.

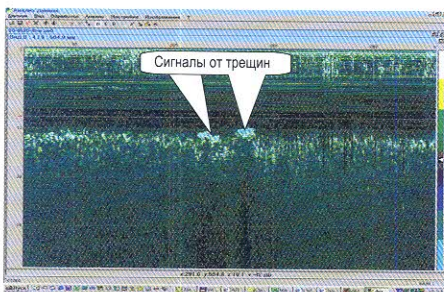


Рис. 8. Эффект экранировки структурных шумов в аустенитных сварных соединениях: видна полоса с пониженным уровнем шумовых сигналов из шва, расположенная ниже сигналов от трещин

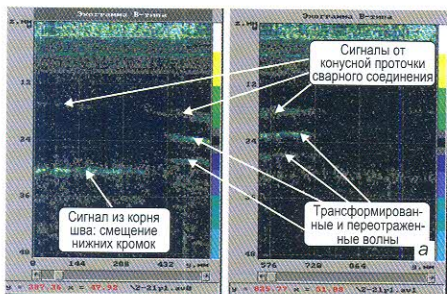


Рис. 9. Результаты поискового (а) и измерительного (б) режимов контроля при наличии трансформированных сигналов, образующихся на конусной проточке сварного соединения

При анализе данных обзорного режима АУЗК, проведенного по всему периметру сварного соединения, хорошо заметен эффект перехода сигнала углового отражения с одной стороны шва на другую. При одинаковых толщинах стыкуемых труб такой эффект позволяет сделать точный вывод о несоосности стыковки.

В дополнение к возможности идентифицировать смещение нижних кромок можно добавить возможность определения величины смещения. В некоторых случаях определение высоты смещения кромок возможно даже по измерениям с одной стороны от шва. Проводя автоматизированный контроль на повышенной чувствительности, можно легко заметить сигналы, отраженные от внутренней поверхности трубы. Они особенно заметны при контроле преобразователями сдвиговых волн с углом ввода 45° . После обработки эти сигналы точно повторяют профиль внутренней поверхности трубы на изображении. При определенных условиях можно наблюдать перепад уровней внутренней поверхности трубы, соответствующий смещению нижних кромок. Измерение высоты этого перепада может быть выполнено с точностью не хуже 1 мм.

Более чем десятилетний опыт практического применения систем «Авгур» на различных объектах дает множество и других признаков, совокупное использование которых существенно повышает достоверность результатов контроля.

Основные результаты анализа данных, включающие в себя важнейшие информационные признаки изображений, заносятся в журнал анализа данных. По результатам анализа формируется заключение, содержащее данные о характеристиках дефектов. В некоторых случаях заключения АУЗК сопровождаются распечатками изображений.

Рассмотренный порядок проведения АУЗК предполагает активное участие оператора, что подчас является основным источником ошибок. Однако уровень формализации процесса анализа данных позволяет уже сейчас использовать алгоритмы, берущие на себя боль-

шую часть рутинной работы оператора: поиск дефектов в большом объеме данных, обнаружение конструктивных отражателей, оконтуривание, автоматическое образмеривание, генерация заключений контроля. Это, в свою очередь, позволяет «безболезненно» применять все большее число схем прозвучивания при контроле одного объекта, увеличивая информативность УЗК.

Еще один путь совершенствования АУЗК – это стандартизация и автоматизация процесса документирования. Первый шаг в этом направлении сделан: как видно из рис. 1, записи в базе данных системы «Авгур» во многом соответствуют типовой отчетной и технологической документации контроля.

Литература

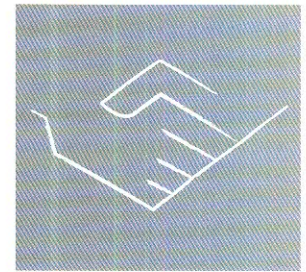
1. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Бычков И. В. и др. Компьютерная система ультразвукового контроля с когерентной обработкой данных «Авгур 2.1». – Дефектоскопия. 1993. № 7. С. 3–15.
2. Бадалян В. Г., Вopilкин А. Х. Компьютерные системы для ультразвукового неразрушающего контроля. – Там же. № 5, с. 7–13.
3. Тихонов Д. С., Штерн А. М., Ромашкин С. В. и др. Пятое поколение систем автоматизированного ультразвукового контроля «Авгур». – В кн.: XVII Российская научно-техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика» / Тезисы докладов. – Екатеринбург, 2005.
4. Базулин Е. Г., Тихонов Д. С. Экспертная оценка типа и размеров дефекта с помощью когерентного ультразвукового дефектоскопа. – Дефектоскопия. 1995. № 5. С. 13–19.
5. Буров В. А., Горюнов А. А., Сасковец А. В., Тихонова Т. А. Обратные задачи рассеяния в акустике (обзор). – Акустический журнал. 1986. Т. 32. Вып. 4. С. 433–449.
6. Non-destructive testing / Characterization and verification of ultrasonic examination equipment. Part 2: Probes // English version of DIN EN 12668-2, 2001.
7. Бадалян В. Г., Вopilкин А. Х., Тихонов Д. С. Новый подход к ультразвуковому автоматизированному неразрушающему контролю ответственных сварных соединений. – Контроль и диагностика. 1999. № 10. С. 23–31.
8. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Тихонов Д. С. Влияние поверхности объекта на восстановленное изображение при иммерсионном контроле в акустической голографии. – Дефектоскопия. 1989. № 11. С. 51–60.
9. Casula O., Roy O., Cattiaux G. A flexible phased array transducer for contact examination of component with complex geometry. – In: 16th World Conf. on NDT / Book of Abstracts. – Montreal (Canada), 2004, p. 39.
10. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. – Акустический журнал. 1988. Т. 34. Вып. 2. С. 222–231.
11. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Вopilкин А. Х., Тихонов Д. С. Использование трансформированных волн для получения изображений вертикальных трещин по многочастотным цифровым акустическим голограммам. – Дефектоскопия. 1993. № 6. С. 3–9.

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2006. № 3(33). С. 24–28

Experience of AUGUR-T System Application on Objects of Oil and Gas Industry

S. V. Romashkin, D. S. Tikhonov

Modes of ultrasonic testing of pipeline base metal and internal «nozzle-shell» welded joints of welded tees with overlays are presented. Ultrasound waveguide propagation effect and coherent data processing methods form the basis of these modes. The results received by automated ultrasonic inspection of gas and oil transport objects are presented. Efficiency of inspection modes considered is shown.



ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ «АВГУР-Т» НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В последние годы истекает срок эксплуатации большого количества газо- и нефтепроводов, а строительство новых требует огромных средств и ресурсов. Значительно сэкономить средства можно путем продления срока эксплуатации трубопроводов. Для решения этой задачи необходима информация о фактическом состоянии материала деталей трубопровода, которая может быть получена в результате проведения диагностического обследования. Недостатком применяемых в настоящее время при диагностическом обследовании методов НК основного металла трубы является их низкая производительность, обусловленная необходимостью сканирования преобразователем всей поверхности объекта контроля. Поэтому был разработан высокопроизводительный способ диагностики состояния стенки трубы, в котором использован волноводный эффект распространения ультразвуковых

импульсов в объектах с параллельными границами. Этот способ может применяться как при входном контроле труб, так и при контроле трубопроводов в процессе эксплуатации. В системе «Авгур-Т» он реализуется при выполнении автоматизированного УЗК в экспресс-режиме. Волноводный эффект дает потенциальную возможность проводить контроль областей, удаленных на значительное расстояние от положения приемоизлучающего акустического преобразователя в объектах с параллельными границами. Наибольший объем металла, который необходимо проконтролировать, приходится на трубопроводы диаметром от 426 мм с толщиной стенки от 8 до 40 мм. Для таких соотношений диаметра и толщины распространение ультразвука в стенке, ограниченной двумя параллельными криволинейными поверхностями, можно рассматривать как распространение в плоскопараллельном волноводе.

Возбуждение, распространение и применения упругих волн в таких объектах для решения задач НК достаточно полно изучено в [1].

Контроль основного металла трубопроводов

Принцип работы системы «Авгур-Т» в экспресс-режиме состоит в том, что в металл трубопровода излучаются ультразвуковые волны, которые в результате многократных переотражений от поверхностей заполняют все сечение стенки трубы и распространяются на значительное расстояние от преобразователя с малым затуханием (рис. 1). При наличии в стенке трубы каверн, пустот, коррозионных язв, трещин и др. аномалий ультразвуковые волны рассеиваются на них в разные стороны, и часть энергии возвращается в обратном направлении. В результате регистрируются значения амплитуды упругого поля на поверхности трубы и временной задержки, соответствующей времени прихода эхо-сигнала. Сравнивая это изменение упругого поля с пороговым значением амплитуды поля, можно сделать вывод о наличии дефекта и его относительной величине.

Обычно применяется контактный способ ввода ультразвука в стенку трубы с помощью наклонных ПЭП. Акустические оси преобразователей направлены перпендикулярно к образующей трубы. В процессе сканирования положение точек приема и излучения изменяется вдоль образующей трубы, что позволяет реализовать высокопроизводительный контроль (рис. 1). Максимальная скорость сканирования при проведении АУЗК в экспресс-режиме – 2 м/мин.

Эффективность АУЗК основного металла труб в экспресс-режиме контроля была продемонстрирована на ряде предприятий ОАО «Газпром», ОАО



Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва:

Ромашкин Сергей Владимирович

Руководитель группы методического обеспечения систем автоматизированного ультразвукового контроля трубопроводов, II уровень по акустическому виду НК, к. т. н.

Тихонов Дмитрий Сергеевич

Технический директор, к. т. н.

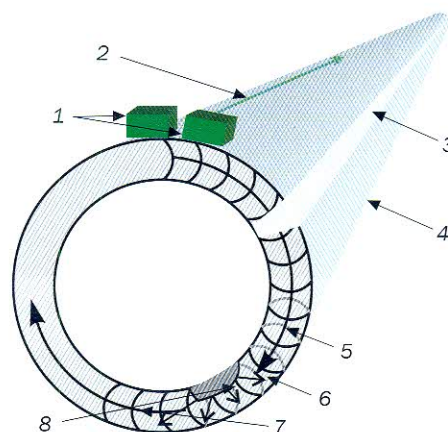


Рис. 1. Схема проведения АУЗК в экспресс-режиме: 1 – ПЭП, 2 – направление перемещения преобразователей, 3 – продольное сварное соединение, 4 – труба, 5 – направление излучения ультразвука, 6 – отраженная обратно УЗ волна, 7 – идущая в первоначальном направлении УЗ волна, 8 – рассеяние волны на аномалии

«Транснефть». Для примера на рис. 2 и 3 приведены отметки индикаций, полученных в экспресс-режиме, которые соответствуют искусственным моделям дефектов в основном металле трубы диаметром 1000 мм и толщиной стенки 14 мм. На рис. 2 представлены результаты АУЗК в виде индикации от «выборки» прямоугольной формы размерами 90 × 120 мм и глубиной 3 мм, расположенной на расстоянии 1790 мм от преобразователя. Результаты АУЗК искусственных дефектов в виде группы «глухих» конических сверлений на глубину 3 мм, расположенных на расстоянии 1320 мм от преобразователя, имитирующих питтинговую коррозию, показаны на рис. 3.

Вместе с тем наблюдается эффект увеличения измеряемого условного размера дефекта вдоль оси сканирования за счет расхождения излучаемого ультразвукового пучка в плоскости развертки трубы. Например, для дефекта протяженностью 120 мм вдоль оси сканирования, рас-

положенного на расстоянии 1790 мм от преобразователя, измеренная условная длина составляет 275 мм. Компенсация этого эффекта достигается применением алгоритмов обработки данных АУЗК, позволяющих компенсировать расхождение ультразвукового пучка.

Кроме того, были выполнены специальные исследования по анализу эффективности экспресс-режима для контроля стресс-коррозионного растрескивания. Испытания проводились на производственных площадках ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» и ООО «Газпром трансгаз Чайковский». На рис. 4 показаны индикации от стресс-коррозионной трещины глубиной 6 мм в трубе диаметром 1200 мм и толщиной стенки 12 мм и фотография самой трещины (АУЗК проводился с наружной стороны трубы).

Была установлена уверенная выявляемость дефектов глубиной равной или более 10 % толщины стенки трубы и

длиной вдоль образующей трубы равной или более 30 мм. Заметим, что в области шириной около 150 мм, примыкающей к сварному соединению, обнаружение дефектов практически невозможно из-за наличия сигналов с высокой амплитудой и длительностью от самого сварного соединения. В остальной области за сварным соединением отношение сигнал/шум падает не менее чем на 10 дБ. Поэтому при проведении АУЗК в экспресс-режиме линии сканирования выбираются таким образом, чтобы сварное соединение было на максимально возможном удалении от преобразователей. Этому требованию отвечает схема проведения контроля, при которой две и более линии сканирования расположены на одинаковом расстоянии по окружности трубы, а продольные сварные соединения находятся посередине между двумя соседними линиями. Наиболее рациональным является проведение АУЗК по двум линиям сканирования двумя преобразователями вдоль каждой из них. В этом случае каждый преобразователь контролирует свою четверть периметра трубы, а продольные сварные соединения лежат на стыке этих четвертей (рис. 5). Для снижения мертвой зоны между преобразователями их акустические оси развернуты навстречу друг другу, возбуждение выполняется последовательно. В этом случае удается обеспечить чувствительность контроля 10 % номинальной толщины по всему периметру за исключением околошовной зоны шириной 80 мм с каждой стороны шва.

Также проводились испытания в экспресс-режиме со стороны внутренней поверхности трубы (рис. 6). Результаты АУЗК той же трубы представлены на рис. 7. Индикации от дефектов на рисунке обведены рамками и пронумерованы. По полученным данным была отмечена ранее не обнаруженная другими

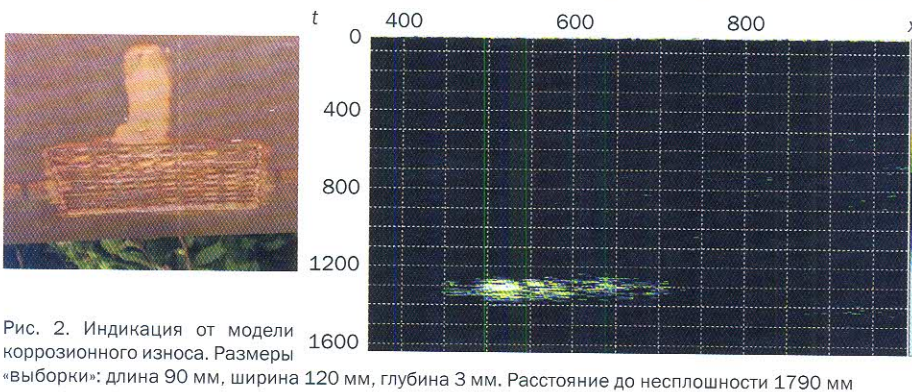


Рис. 2. Индикация от модели коррозионного износа. Размеры «выборки»: длина 90 мм, ширина 120 мм, глубина 3 мм. Расстояние до несплошности 1790 мм

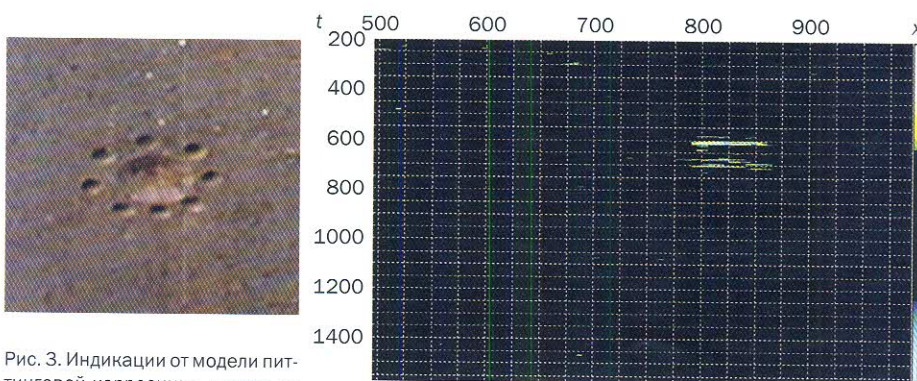


Рис. 3. Индикации от модели питтинговой коррозии: в центре на расстоянии 1320 мм засверловка \varnothing 14 мм, вокруг нее по диаметру 20 мм 8 засверловок \varnothing 4 мм

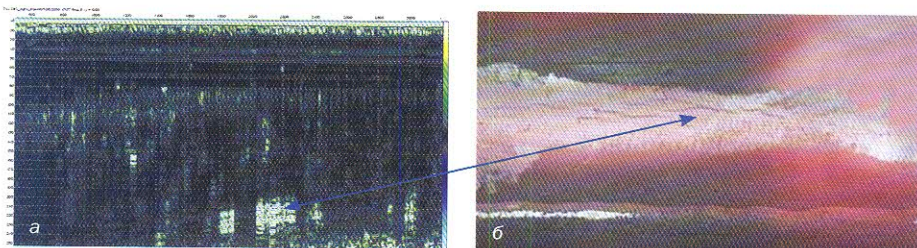


Рис. 4. Индикация (а) и фото (б) стресс-коррозионной трещины

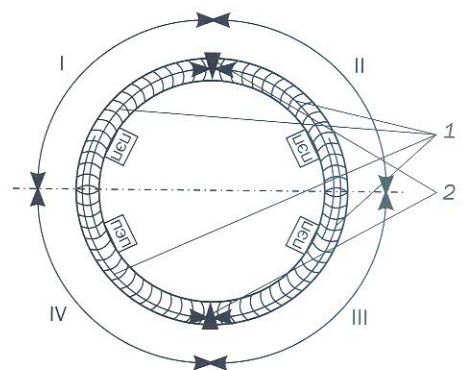


Рис. 5. Зоны контроля акустических преобразователей: 1 – направление излучения ультразвуковых волн, 2 – продольные сварные соединения, I – IV – номера зон контроля (четверти периметра трубы) для преобразователя

методами контроля область с дефектом. Последующий дополнительный магнитопорошковый контроль подтвердил наличие в этой области стресс-коррозионного растрескивания.

Выполненные исследования позволили применить систему «Авгур-Т» для решения задачи разделения труб, бывших в эксплуатации и вырезанных из газопровода, на ремонтпригодные и неремонтпригодные. Эта работа проводилась на площадках складирования труб в трассовых условиях до снятия с них изоляционного покрытия. Всего было проконтролировано более 200 труб, из них около 80 было признано неремонтпригодными. При выполнении этой работы эффективно выявлялись дефекты типа расслоений, расположенные не только в середине стенки трубы, но и выходящие на поверхность.

Заметим, что АУЗК в экспресс-режиме имеет высокую чувствительность не только к дефектам основного металла труб, но и к различного рода неоднородностям на их поверхностях: отложения грязи, отслоения изоляции с проникновением под нее воды, наличие различного рода отложений как на внутренней, так и на внешней поверхностях трубы. Все они дают индикации по амплитуде, соизмеримые, а иногда и превосходящие индикации от дефектов. Поэтому перед проведением АУЗК в экспресс-режиме проводится очистка внутренней поверхности трубы от грязи и воды, а после проведения контроля в областях, где обнаружены индикации, осуществляется подтверждающий контроль другими методами. Вместе с



Рис. 6. Проведение АУЗК со стороны внутренней поверхности



Рис. 8. Плеты труб для подводного перехода

тем, при контроле новых труб отсутствуют как дефекты, так и неоднородности на внешней и внутренней поверхностях, и наличие индикаций можно с наибольшей степенью вероятности связывать с присутствием дефектов. Поэтому одним из наиболее эффективных применений АУЗК в экспресс-режиме является входной контроль труб.

Инструкция по внутритрубному УЗК основного металла труб магистральных газопроводов с применением системы «Авгур-Т» внесена в сводный реестр технологий, допущенных к использованию на объектах транспорта газа при проведении ремонтных и диагностических работ.

В 2008 г. были проведены работы по входному контролю труб, выполненных в виде плетей длиной около 200 м (рис. 8), со стороны внутренней поверхности,

предназначенных для строительства подводных переходов нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан через реки Лена, Гилую, Керинг-Юрях. При проведении АУЗК необходимо было обеспечить чувствительность не хуже 5 % номинальной толщины стенки трубы. Так как трубы новые, то их внутренняя и внешняя поверхность не имели большого числа неоднородностей, являющихся источником повышенного шума. Это позволило выполнять сканирование по трем вместо двух, как это указано в инструкции, равноотстоящих по окружности трубы линиям сканирования при указанной чувствительности контроля.

По результатам АУЗК в экспресс-режиме было обнаружено 53 индикации, некоторые из которых представлены на рис. 9.

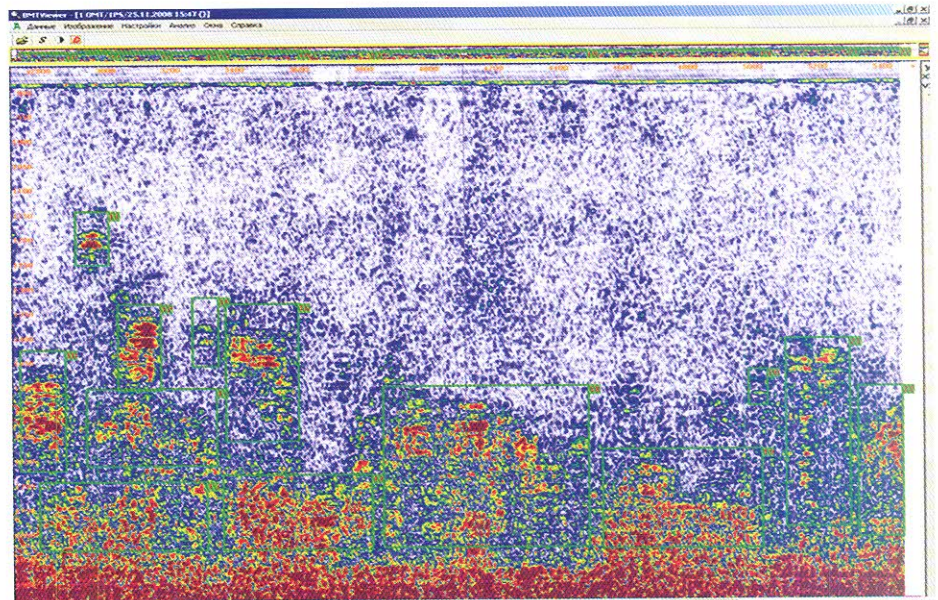


Рис. 7. Результаты АУЗК

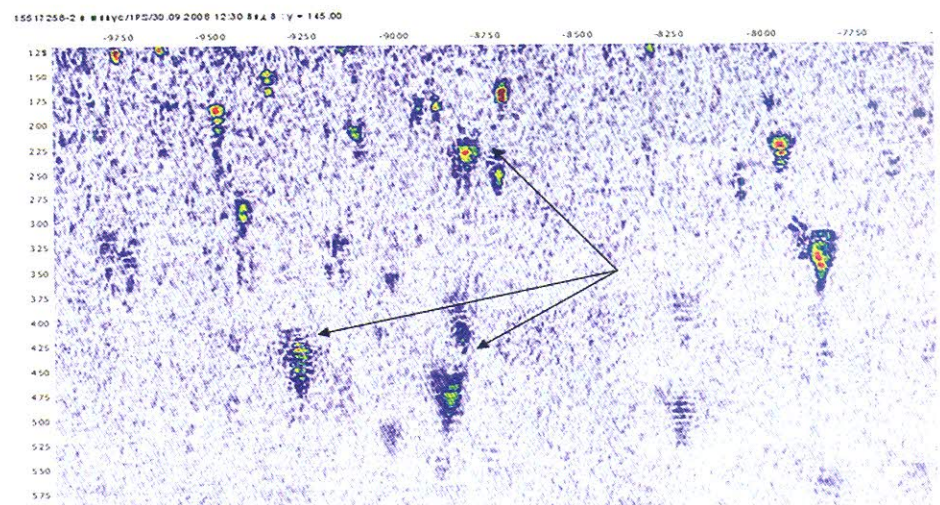


Рис. 9. Индикации несплошностей в виде включений в основном металле (стрелками показаны некоторые из них)

Контроль внутреннего сварного соединения «патрубок–обечайка» тройника сварного с накладками

Одними из важных элементов газопровода, которые должны проходить диагностическое обследование, являются тройники (рис. 10). Эти элементы работают в условиях значительных статических и динамических эксплуатационных нагрузок. Наибольшие напряжения в тройнике возникают в области сочленения патрубка и трубы магистрального газопровода. Это сочленение в сварных тройниках выполнено с помощью сварного шва сложной конфигурации. Поэтому в таком сварном соединении даже небольшие дефекты, образовавшиеся в процессе изготовления тройника, выступают в роли концентраторов напряжений, которые могут привести к образованию и развитию усталостных трещин в процессе эксплуатации.

Эффективный контроль внутреннего сварного соединения «патрубок–обечайка» тройника, установленного в газопровод, значительно усложнен наличием усиливающей накладки на патрубок и воротника на обечайке тройника. Эти накладки не позволяют обеспечить непосредственный доступ к этому сварному соединению.

Для достижения требуемого уровня чувствительности в системе «Авгур-Т» использован метод, основанный на эффекте волноводного распространения звука (рис. 11) и обработки данных, зарегистрированных на поверхности патрубка



Рис. 10. Проведение АУЗК внутреннего сварного соединения «патрубок–обечайка»

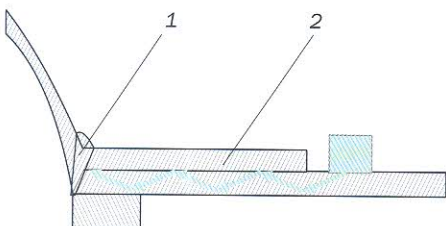


Рис. 11. АУЗК внутреннего сварного соединения «патрубок–обечайка»: 1 – внутреннее сварное соединение «патрубок–обечайка», 2 – накладка на патрубок

стрированных на поверхности патрубка по большой двумерной апертуре, алгоритмом трехмерного SAFT (фокусировка методом синтезированной апертуры). При этом используются сканирующие устройства, обеспечивающие перемещение преобразователей по двум взаимно перпендикулярным осям с точностью 0,1 мм, что позволяет применять алгоритмы трехмерного SAFT. Полученные в результате обработки акустические изображения имеют высокую разрешающую способность и высокое отношение сигнал/шум. Заметим, что чем дальше объект контроля удален от области регистрации эхо-сигналов, тем заметнее преимущества такой обработки.

Рассмотренный подход при контроле таких объектов как внутренние сварные соединения тройников сварных с накладками (ТСН) позволяет очень эффективно обнаруживать и оценивать размеры дефектов вдоль оси сварного соединения, но не позволяет определить размеры и местоположение дефектов в поперечном сечении из-за большого количества схем излучения-приема, возникающих при многократном переотражении ультразвуковых волн.

Для учета непараллельности оси шва и продольной оси сканирования преобразователей используются несколько азимутально развернутых преобразователей, обеспечивающих равные возможности выявления продольных дефектов в областях сварного соединения, имеющих различную ориентацию к образующей патрубка тройника.

Испытания системы «Авгур-Т» на образце с искусственными отражателями, выполненными в виде сегментных отражателей в разных частях сварного

соединения (по границе сплавления патрубок-шов, в области корня шва и по границе сплавления шов-обечайка), показали, что:

- все дефекты в виде сегментных отражателей надежно выявляются при отношении сигнал/шум более 12 дБ (рис. 12);
- возможно измерение размеров дефектов вдоль оси сварного соединения с погрешностью не более 2 мм.

Система АУЗК «Авгур-Т» внесена в сводный реестр средств, допущенных к использованию на объектах транспорта газа при проведении ремонтных и диагностических работ, а Временная инструкция по УЗК сварных соединений и основного металла тройников сварных с накладками с применением системы «Авгур-Т» внесена в сводный реестр технологий, допущенных к использованию на объектах транспорта газа при проведении ремонтных и диагностических работ.

Системы АУЗК «Авгур-Т» поставлены на ряд предприятий, выполняющих диагностические работы по обследованию тройников сварных с накладками, установленных в магистральные газопроводы (рис. 10). Контроль проводится в соответствии с инструкцией по УЗК сварного соединения и основного металла тройников [2]. Всего было обследовано 32 тройника, из них в трех тройниках, во внутренних сварных соединениях «патрубок–обечайка» были обнаружены недопустимые дефекты. Для примера на рис. 13 представлено изображение области тройника диаметром 1440 мм с толщиной стенки патрубка и обечайки 26 мм с усиливающей накладкой и без нее. Видны две протяженные дефектные

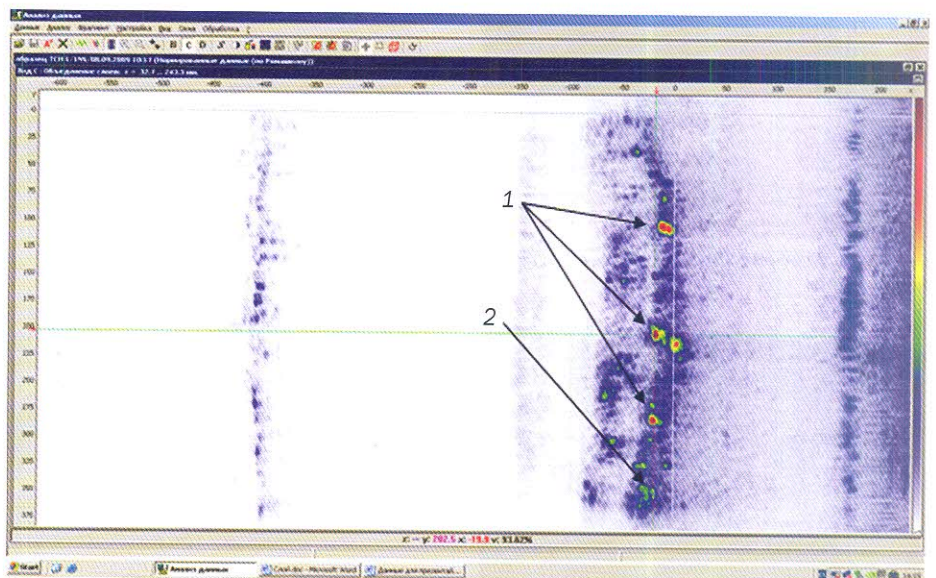


Рис. 12. Изображения дефектов в образце: 1 – сегментные отражатели, 2 – боковое сверление

области (желтый цвет), находящиеся во внутреннем сварном соединении, длиной вдоль оси шва более 100 мм каждая. Дефекты превосходят контрольный уровень, но ниже браковочного. Одна область находится под усиливающей накладкой, а другая – вне усиливающей накладки.

Проведение контроля внутреннего сварного соединения ТСН показало, что наиболее затратным по времени является процесс сканирования поверхности патрубка. Например, время сканирования по патрубку диаметром 1020 мм переходного ТСН составляет 2 ч 40 мин; по патрубку диаметром 1220 мм – 3 ч 20 мин.

В случае контроля равнопроходных ТСН это время должно быть умножено на два, так как требуется дополнительное сканирование с преобразователями, развернутыми на азимутальный угол $\pm 30^\circ$. Остальные процедуры за исключением обработки данных и выдачи заключения (настройка системы, ее разворачивание, установка сканирующего устройства на объект контроля) обычно занимают не более одного часа.

Выводы

Таким образом:

1. Наиболее эффективно применение системы «Авгур-Т» в экспресс-режиме для целей входного контроля труб.

2. АУЗК внутреннего сварного соединения обеспечивает эффективное выявление протяженных и компактных дефектов в различных участках по длине сварного соединения ТСН.

Литература

1. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике. – М.: Наука, 1966. – 168 с.
2. Временная инструкция по ультразвуковому контролю сварных соединений и основного металла тройников сварных с накладками с применением системы АВГУР-Т. Утв. 21.04.2009 начальником Департамента по транспортировке, подземному хранению и использованию газа ОАО «Газпром».

Статья опубликована в журнале «В мире НК», 2010. № 1(47)

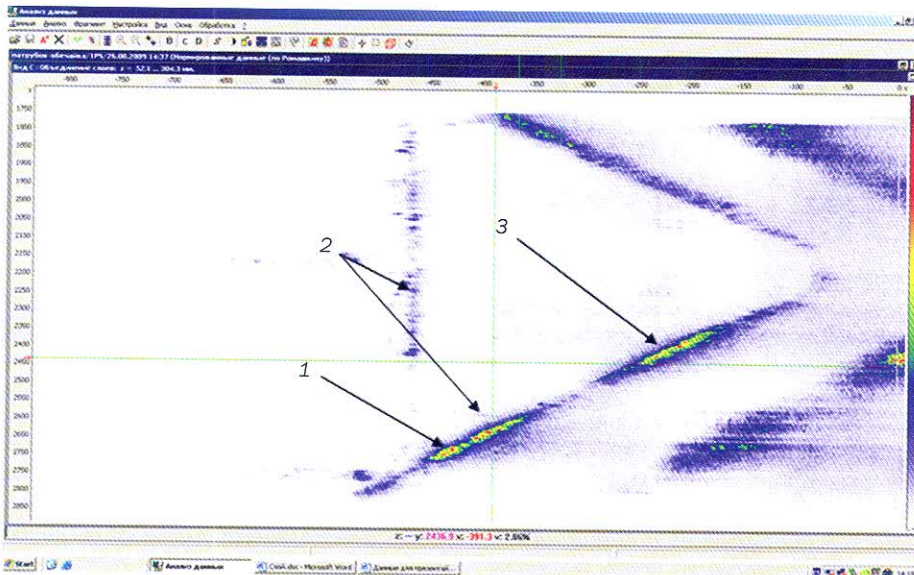
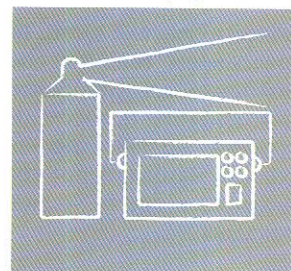


Рис. 13. Изображение дефектов во внутреннем сварном соединении равнопроходного ТСН: 1 – дефект перед усиливающей накладкой, 2 – шов усиливающей накладки, 3 – дефект под усиливающей накладкой

Mobile Measuring AUGUR Systems for Automated Ultrasonic Inspection

A. E. Bazulin, E. G. Bazulin,
Yu. L. Gordeev, A. G. Kostylov,
D. S. Tikhonov, A. M. Shtern

This article describes main construction principles of mobile measuring AUGUR systems for automated ultrasonic inspection, their operation logic and software features. Systems for different purposes, their basic technical characteristics and methodical application features are given as examples. Scanners and manipulators used as parts of systems are described.



МОБИЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АУЗК СЕРИИ «АВГУР»

Введение

Деление на мобильные и стационарные системы АУЗК определяется способом соединения объекта и системы контроля: в стационарных системах объект контроля доставляется к системе контроля, в мобильных – наоборот. Данная работа посвящена мобильным системам АУЗК серии «Авгур». Эти системы предназначены для обнаружения и измерения параметров дефектов (их типов, размеров, координат) в металлических конструкциях и сварных швах технологического оборудования, в том числе труб различного диаметра и толщины, выполненных из сталей перлитного, аустенитного классов и других материалов. Параметры дефектов в системах «Авгур» определяются по изображениям, полученным после компьютерной обработки исходных данных контроля с использованием когерентных методов: SAFT, FT-SAFT (2D- и 3D-), учитывающих преобразования типов волн, методы пространственной фильтрации, свертывания и другие.

Весь арсенал программных и аппаратных средств систем АУЗК серии «Авгур» обеспечивает проведение контроля практически всеми основными методами УЗК, разработанными за десятки лет, в соответствии с требованиями российских и международных норм [1 – 7].

Внесение систем «Авгур» в государственный реестр средств измерений РФ и аттестация методического обеспечения систем впервые проведена не только по электронно-механическим параметрам, но и по данным о погрешности определения реальных размеров отражателей.

Основные блоки мобильных систем

В типовом случае мобильная система, нацеленная на контроль какого-либо одного объекта, состоит из системного и выносного блоков, сканирующего устройства с блоком электроники, соединительных кабелей и комплекта ПЭП.

Дополнительно в нее могут входить система автоматической подачи контактной жидкости, переговорные устройства для связи операторов (один оператор – на объекте контроля со сканером, другой – управляет системой с компьютера), дополнительный компьютер для обработки и хранения данных (сервер базы данных).

Системный блок (или блок регистрации данных) представляет собой компьютерный дефектоскоп, обеспечивающей программное управление сканером и коммутацию каналов блока ультразвукового.

Для генерации ультразвуковых сигналов используется прямоугольный двупольный импульс с регулируемой длительностью периода, количеством периодов и амплитудой (до 400 В). С помощью компьютера, входящего в состав системного блока с установленным программным обеспечением, оператор осуществляет управление системой – запись, обработку и представление данных контроля. Системный блок представляет собой электронный блок, соединяемый с любым внешним компьютером через стандартный интерфейс USB, питающийся от стандартных источников питания 12 В или от сети 220 В. На рис. 1 приведены варианты системных блоков для различных задач контроля.

Выносной блок размещается вблизи сканера и обеспечивает его работу на значительном удалении от системного блока без увеличения веса и габаритов соединяющего их кабеля. На сканере может также размещаться электронный блок с коммутатором каналов и предусилителем. Более подробные сведения о параметрах систем можно почерпнуть в монографии [22].

Сканирующие устройства

Для работы в составе системы «Авгур» разработано множество сканирующих устройств, среди которых, кроме скане-



Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва:

Базулин Андрей Евгеньевич

Старший научный сотрудник

Базулин Евгений Геннадиевич

Начальник научно-методического отдела, к. ф.-м. н.



Гордеев Юрий Леонидович

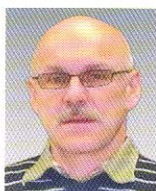
Начальник лаборатории электроники

Костылов Андрей Геннадиевич

Начальник конструкторского бюро

Тихонов Дмитрий Сергеевич

Технический директор, к. т. н.



Штерн Андрей Михайлович

Начальник отдела информационных технологий

ров для типовых объектов (например, кольцевые и продольные сварные соединения трубопроводов), есть и специализированные.

Для автоматизированного двухмерного сканирования трубопроводов с внешним диаметром от 426 мм используется сканер СК.426Т. Он состоит из трека, неподвижно закрепленного на объекте контроля, и подвижного сканера (рис. 2), обеспечивающего перемещение ПЭП вдоль и поперек сварного соединения в соответствии с алгоритмом методики контроля. Сканер может использоваться как для контроля кольцевых (применя-

ется кольцевой трек), так и продольных (продольный трек) сварных соединений. Типовая длина области поперечного сканирования (привод перемещения по оси Х) составляет 120 мм, что обеспечивает решение большинства задач контроля. Однако для объектов большой толщины, например валов роторов большого диаметра, корпусов реакторов различного назначения, область поперечного сканирования Х увеличивается до необходимой величины. Так для контроля сварных соединений сосудов реакторов гидрокрекинга толщиной 205 мм поперечная длина области сканирования СК.426Т составляет 350 мм.

Аналогичную задачу двухкоординатного сканирования группой или блоком ПЭП решают сканеры СК.325 и СК.219 (рис. 3) с цепным приводом для трубопроводов диаметром от 219 до 426 мм.

Однокоординатное перемещение ПЭП в процессе АУЗК основного металла трубопроводов, а также кольцевых и продольных сварных соединений труб с наружным диаметром 500 мм и более

обеспечивает сканер СК.А5-ОМТ (рис. 4). Он включает в себя привод, направляющие прижимов ПЭП, прижимы ПЭП, блок электроники сканера, датчик пути и комплект треков, состоящий из продольного трека на магнитном креплении и кольцевых треков. Под каждый номинальный диаметр трубы система комплектуется отдельным кольцевым треком.

Для точного позиционирования преобразователей в условиях, где обеспечивается свободный доступ оператора, разработаны однокоординатные сканеры с ручным и механизированным приводом. Ручной сканер на рис. 5 слева можно использовать для работы с дефектоскопами, использующими фазированные антенные решетки (ФАР), и другими дефектоскопами, поддерживающими запись ультразвуковых данных синхронно с показаниями энкодера.



Рис. 1. Различные варианты системных блоков: а – системный блок на базе промышленного компьютера, б – в конструктиве переносного ящика с планшетным компьютером или ноутбуком, в – системный блок для использования в сложных климатических условиях с подключенным к нему ноутбуком

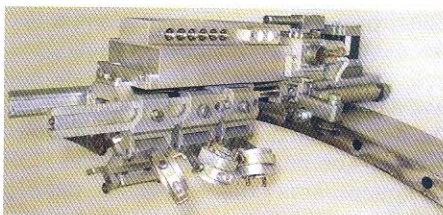


Рис. 2. Сканер СК.426Т

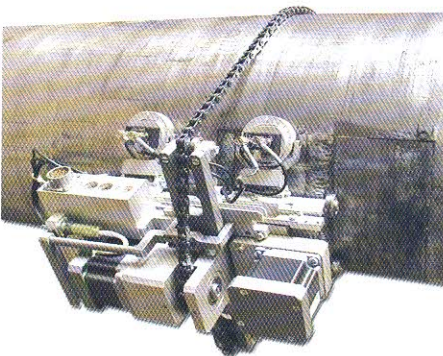


Рис. 3. Сканеры для АУЗК кольцевых швов труб малого диаметра (от 219 до 426 мм)

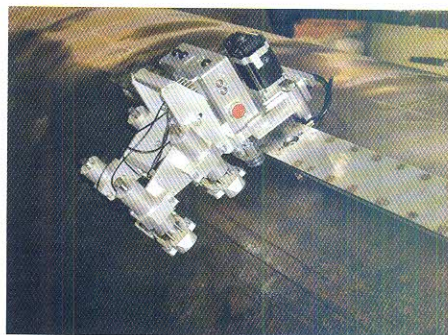


Рис. 4. Сканер СК.А5-ОМТ

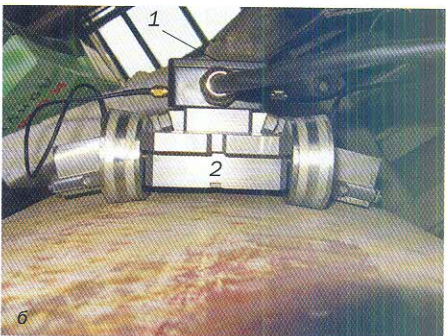
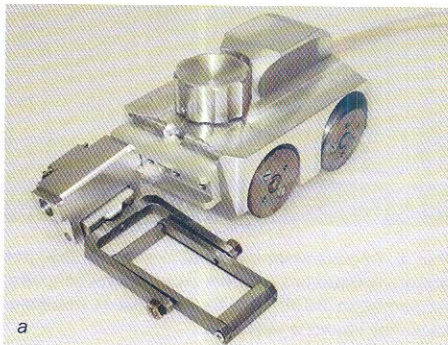


Рис. 5. Однокоординатные сканеры с ручным (а) и механизированным (б) приводами: 1 – блок управления, 2 – механизированный сканер на магнитных колесах

Механизированный сканер на рис. 5 справа используется вместе с системным блоком. Этот сканер состоит из тележки с магнитными колесами, электронного блока управления, двух прижимов ПЭП и кабелей подключения. Тележка удерживается на поверхности объекта контроля силой притяжения, создаваемой постоянными магнитами, размещенными в колесах. В корпусе тележки находится мотор и редуктор с датчиком пройденного пути, связанные с передними колесами тележки. На блоке управления сканером размещены кнопки включения мотора редуктора (задается направление движения: вперед или назад), регулятор скорости движения, разъемы для подключения ПЭП. Для перемещения тележки нужно взяться рукой за корпус блока управления, нажать и удерживать левую кнопку для движения вперед или правую для движения назад, и начать ручную перемещать сканер в нужном направлении. Мотор редуктора при этом обеспечивает равномерность перемещения и предотвращает превышение скорости перемещения, заданной регулятором. При отпускании кнопки мотор редуктора отключается, и перемещение тележки блокируется.

Для контроля кольцевых сварных соединений приварки различных па-

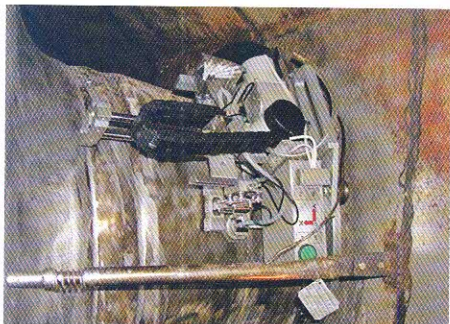


Рис. 6. Специализированный сканер СК.560 для контроля главного циркуляционного трубопровода реактора ВВЭР-440. Сканер имеет изменяемый угол наклона «ветки» X

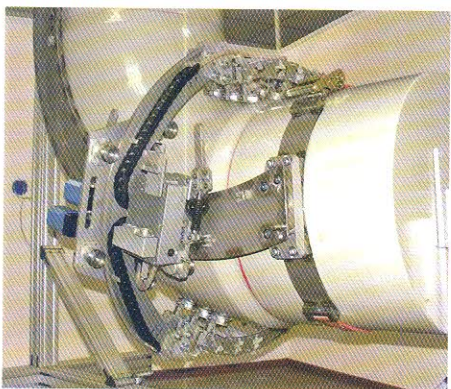


Рис. 7. Сканер для УЗК продольных сварных соединений гибов трубопровода Ду500

трубков к аустенитному трубопроводу Ду500 разработана серия специализированных сканеров СК.500. На рис. 6 приведен сканер СК.560 для контроля шва приварки главного циркуляционного трубопровода к конусной втулке патрубка корпуса реактора ВВЭР-440. Сканер обеспечивает полное кольцевое синхронное сканирование восемью ПЭП вдоль и поперек оси сварного шва по поверхности конусной втулки. К этой же серии сканеров относится специализированный сканер для контроля продольных сварных соединений колен (гибов) трубопроводов главного циркуляционного трубопровода реакторной установки ВВЭР-440 Ду500 (рис. 7), который обеспечивает одновременное проведение контроля двух продольных сварных соединений двумя группами ПЭП, размещенными диаметрально в плоскости разреза гiba.

Для системы «Авгур», предназначенной для контроля рельсов, был создан сканер для локальной диагностики (визуализации и определения реальных размеров) областей с дефектами рельсов, обнаруженных другими методами, а также для контроля сварных стыков рельсов, выполненных электроконтактной или алюминотермитной сваркой (рис. 8). Он позволяет осуществлять продольно-поперечное перемещение четырех ПЭП по поверхности катания рельса. Сканер выполнен быстросъемным и предназначен для применения в широком климатическом диапазоне. На рис. 8 сверху показан сканер, установленный на рельс, снизу – схемы прозвучивания, реализованные при локальной диагностике дефектных сечений рельса.

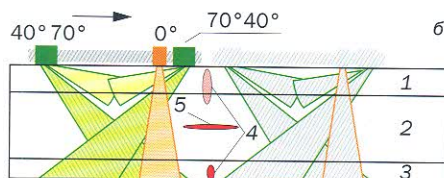
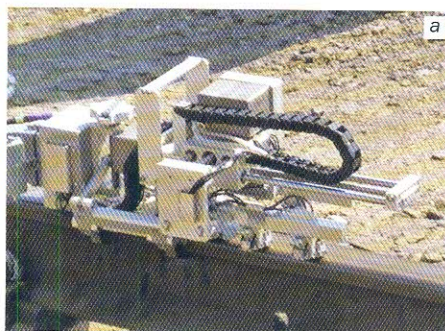


Рис. 8. Сканер для локальной диагностики рельсов и контроля рельсовых стыковых соединений и схема контроля: 1 – головка рельса, 2 – шейка рельса, 3 – подошва рельса, 4 – поперечные трещины, 5 – продольная трещина

Кроме сканеров для систем «Авгур» в НПЦ «ЭХО+» разработаны и изготавливаются сканеры для других ультразвуковых систем контроля. Например, для дефектоскопов, использующих ФАР, в частности, для Harfang X32 и Omniscan MX разработаны сканеры модели T-300 для контроля аустенитных кольцевых швов номинальным диаметром 325 мм, которые обеспечивают одновременное перемещение четырех многоэлементных преобразователей на призмах вокруг сварного соединения за одну минуту. На рис. 9 приведен общий вид такого сканера. При этом осуществляется одновременный контроль сварного соединения на наличие продольно и поперечно ориентированных дефектов. Небольшой электронный блок обеспечивает питание и управление сканером.

Также для последних моделей систем ISONIC (фирма Sonotron NDT) разработан сканер ПРП-100, обеспечивающий перемещение группы ПЭП и электронного блока вдоль кольцевых швов диаметром более 152 мм по трекам, которые используются системами автоматической сварки (рис. 10). Сканер обеспечивает оптимальную организацию проведения АУЗК при проведении монтажных работ.



Рис. 9. Сканер T-300 для дефектоскопов с ФАР

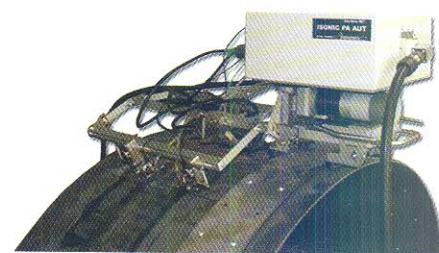


Рис. 10. Сканер ПРП-100 для дефектоскопов серии ISONIC

Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) систем «Авгур» управляет их аппаратной частью и реализует функциональность, определяемую методиками контроля – сбор, обработку, представление данных, инструменты анализа данных.

ПО обеспечивает выполнение следующих функций, которые определяются основными этапами проведения АУЗК [8]:

- калибровка используемых ПЭП;
- настройка методических параметров контроля;
- проведения контроля;
- обработка полученных данных АУЗК;
- представление и анализ данных, и формирование заключений АУЗК.

Уникальной особенностью ПО является наличие базы данных контроля (БД), которая наполняется в течение всей жизни объекта контроля, при этом мощный инструментальный синхронного просмотра данных, полученных в разное время, обеспечивает проведение мониторинга состояния объекта. БД имеет авторизованный доступ, что позволяет документировать все этапы проведения контроля с возможностью последующего аудита. Другая важная особенность ПО «Авгур» – это использование архитектуры клиент-сервер, что дает возможность создания распределенных рабочих мест при обращении к единому серверу данных.

ПО построено по модульному принципу и может формироваться в зависимости от особенностей решаемой задачи контроля и требований Заказчика в целях реализации сценария проведения АУЗК и анализа данных в соответствии с выбранной методикой контроля. Ниже описаны основные функции и особенности некоторых программ и их модулей.

Программа калибровки ПЭП предназначена для быстрого измерения основных параметров ПЭП перед проведением контроля. В соответствии с ГОСТ 23702-

90 [9] и EN 12668-2-2002 определяются стрела, угол ввода и ширина диаграммы направленности, импульсная и частотная характеристики, условная чувствительность и другие. Типичный паспорт ПЭП приведен на рис. 11. По этим параметрам определяется пригодность ПЭП для проведения контроля по конкретной методике. Кроме того, для каждого ПЭП рассчитываются индивидуальные АРД-диаграммы для последующего измерения эквивалентной площади выявленных отражателей. Кроме того, при калибровке определяются параметры фокусировки ПЭП, необходимые для проведения когерентной обработки получаемых при контроле данных. Подробная методика и алгоритмы калибровки ПЭП описаны в работе [10].

Программы сбора данных для разных систем «Авгур» устроены по общему принципу. Оператор указывает параметры контролируемого объекта, загружает методические параметры для проведения контроля данного объекта, указывает параметры оборудования, применяемого при контроле, и запускает процесс контроля.

При выполнении контроля программа управляет движением сканирующего устройства и выполняет сбор данных в соответствии с используемой методикой. Обеспечивается 100 % запись данных АУЗК без каких-либо отсечек, что позволяет удовлетворить требованиям ASTM 2235 при замене радиографического контроля на ультразвуковой [6]. Данные в процессе контроля могут быть представлены в требуемом методикой виде – A-, B-, C-, D-разверток, карты коррозии, представления TOFD. Могут быть включены индикаторы качества акустического контакта и строб автоматической сигнализации о дефекте.

Программа сбора данных позволяет одновременно использовать несколько схем прозвучивания с большим количеством преобразователей для одного цик-

ла контроля. Сочетание широко используемых методов УЗК (эхо-, эхо-зеркального, дифракционного, зеркально-теневого и др.) с когерентной (голографической) обработкой позволяет получать высококачественные трехмерные изображения дефектов на пределе информационной насыщенности. Только по этим изображениям возможно точное определение размеров и типов дефектов. В программе сбора данных реализован многоканальный просмотр эхо-сигналов, их огибающих и спектров, настройка параметров акустического канала (со всеми основными функциями ручных дефектоскопов) при ручном управлении сканирующим устройством (последний режим используется при настройке на СОП перед проведением контроля в соответствии с СТО Газпром 2-2.4-083-2006 [2]).

Программа анализа данных позволяет представить на экране требуемое количество трехмерных изображений (кубов данных), полученных в процессе АУЗК и подвергнутых обработке. Данные представляются в виде A-, B-, C-, D- и S-разверток с кодированной цветовой амплитудой, в виде карты коррозии, в TOFD палитре, в трехцветной палитре, с цветами, соответствующими уровню слежения за акустическим контактом, поисковому и браковочному уровням.

На рис. 12 показано главное окно программы анализа данных с готовыми для анализа эхо-сигналами (слева) и изображением дефектов в сварном соединении толщиной 55 мм (справа). Показаны шкалы (x, y, z, t), срезы на файле с эхо-сигналами, виды на кубе данных изображений, маркеры. С помощью маркеров могут быть измерены расстояния в трехмерной системе координат. Выполняется синхронизация положения маркера на всех показываемых изображениях, что позволяет одновременно проводить анализ данных, полученных по нескольким каналам, напри-

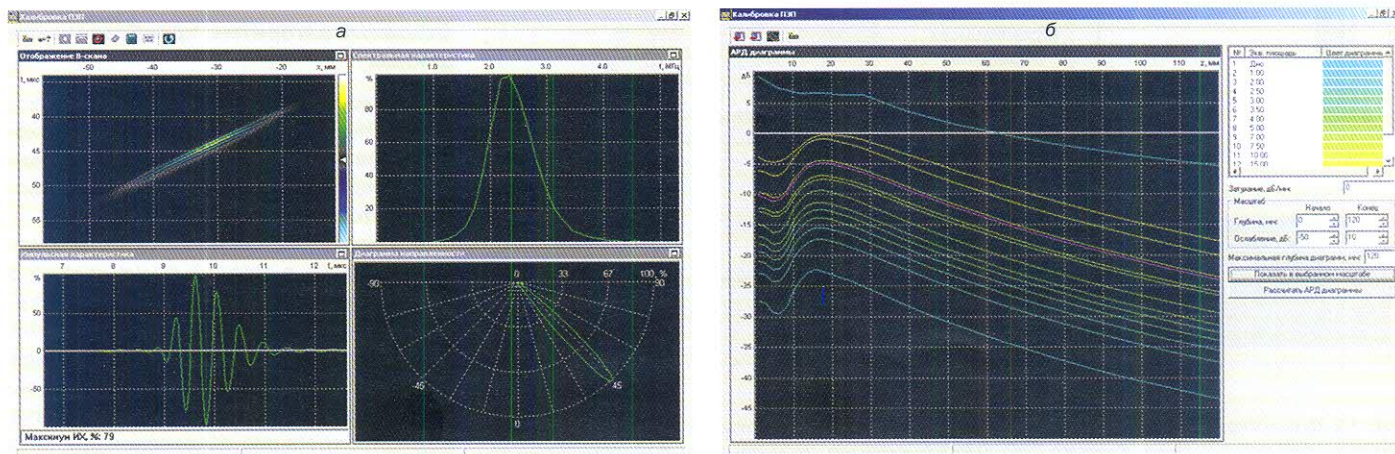


Рис. 11. Окно программы калибровки ПЭП на этапе расчета характеристик ПЭП (а) и расчета индивидуальных АРД-диаграмм (б)

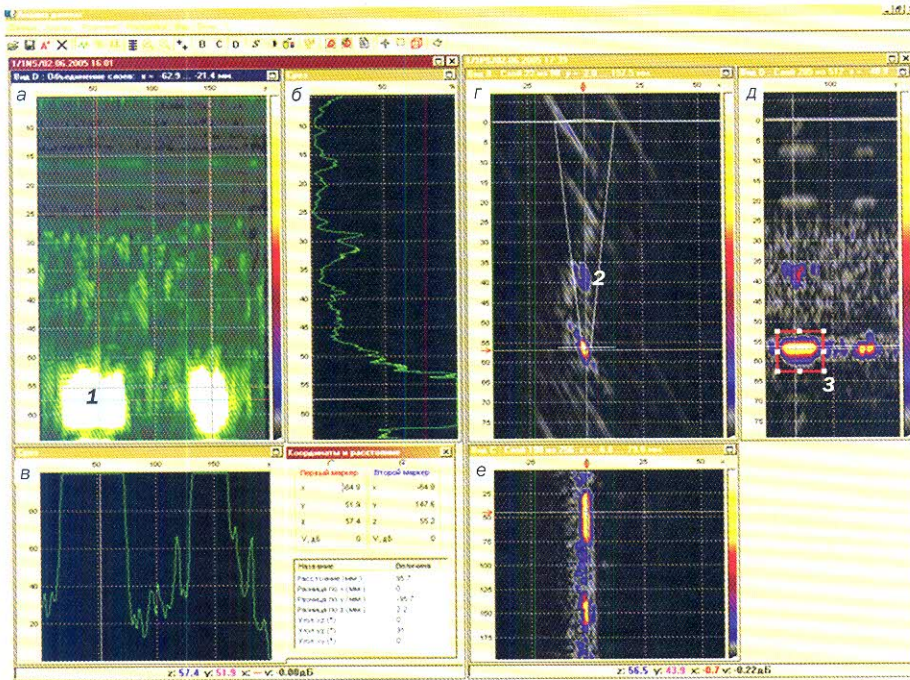


Рис. 12. Главное окно программы анализа данных. Показаны основные элементы и варианты представления данных сварного шва толщиной 55 мм: а – D-развертка, б – А-развертка, в – эхо-сигнал, г – B-развертка, д – A-развертка, е – C-развертка; 1 – маркеры, 2 – эскиз объекта, 3 – рамка дефекта

мер при прозвучивании сварного шва под двумя углами ввода или с применением двумодовой методики [11].

Для описания параметров несплошностей (координат, размеров, условной или эквивалентной амплитуды) используется инструмент ручного оконтуривания дефектных областей. При указании на изображение рамки, описывающей габаритные размеры дефекта, программа определяет его амплитуду и вместе с указанием номера канала, по которому выявлен дефект, заносит его в общий список.

В ПО реализованы алгоритмы обработки данных, позволяющие выполнять визуализацию несплошностей, повышать качество эхо-сигналов и изображений, автоматизировать процесс анализа данных и создания заключений АУЗК. Все обработки в программе анализа данных делятся на три типа:

- изменение отображения данных, когда в динамическом (управляемом оператором) режиме изменяется представление данных;
- преобразование данных, когда путем математической обработки выполняется преобразование полученных данных АУЗК с целью повышения их качества;
- выявление и образмеривание дефектов, когда выполняются алгоритмы, извлекающие из данных АУЗК информационные параметры, необходимые для выдачи заключения о наличии, размере, типе и расположении дефектов.

Основными вариантами **изменения отображения данных** являются применение отсечки, изменения коэффициента усиления и ВРЧ, синхронизация нескольких изображений по выбранной координате, масштабирование произвольного фрагмента, смена цветовой палитры, выполнение проекции данных на один из видов для ускорения анализа, преобразование данных в текстовый формат для чтения внешней программой обработки и представления данных.

Основные алгоритмы преобразования данных

1. **Визуализация эхо-сигналов.** При обработке вычисляется огибающая эхо-сигналов с преобразованием изображения в систему координат объекта контроля с учетом параметров ПЭП.

2. **Когерентная обработка.** Суть обработки состоит в синтезе фокусирующего ПЭП с пластиной, размер которой определяется апертурой сканирования, что позволяет получить высококачественное изображение в любой части контролируемого изделия, даже на большой глубине и дальности. На рис. 13 пояснен принцип когерентной обработки, применяемой в одной и в двух плоскостях.

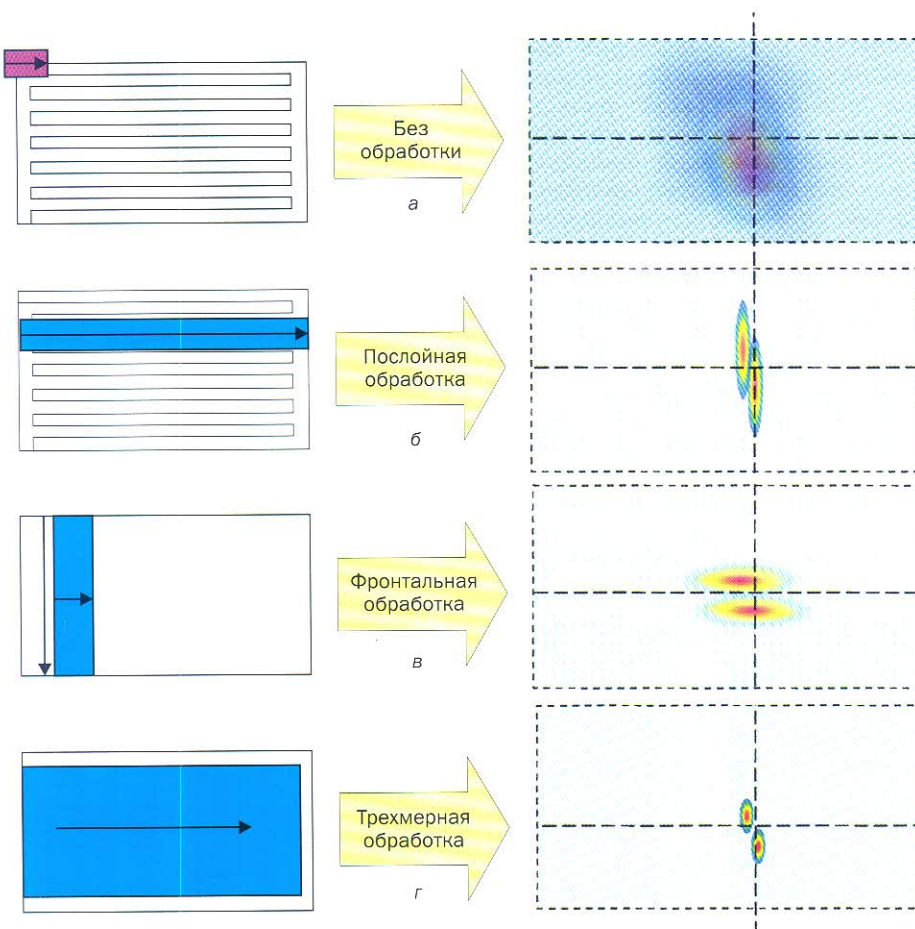
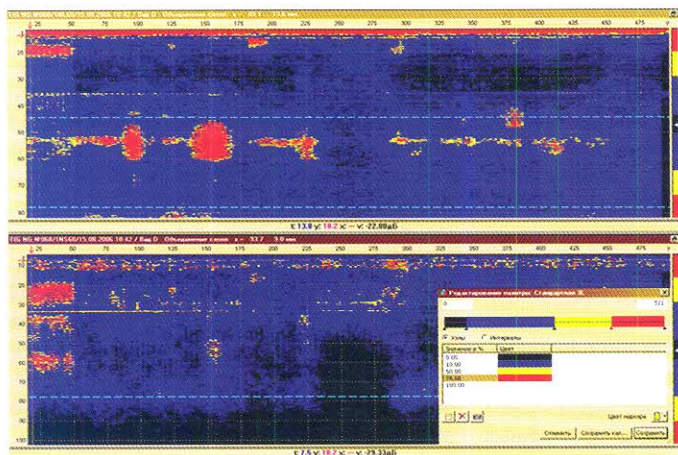
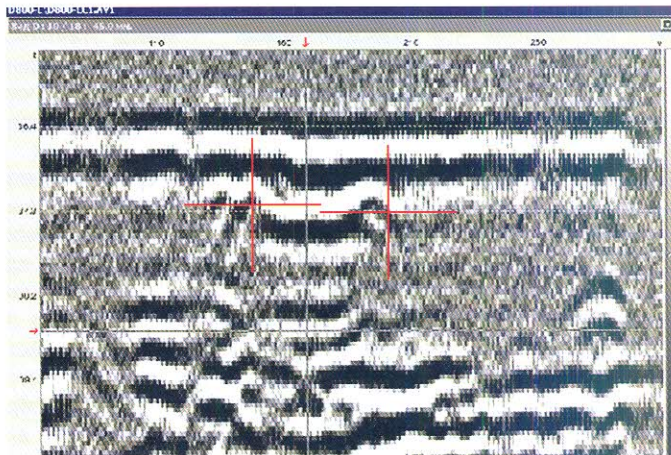


Рис. 13. Суть когерентной обработки: синтез фокусирующего ПЭП с большой апертурой, равной по размеру зоне сканирования обычного ПЭП. Слева схематично показаны зоны сканирования на поверхности объекта контроля обычного ПЭП (красный) и синтезированного в результате обработки (синий). Справа приведены C-сканы от двух компактных дефектов до (а) и после (б, в, г) обработки

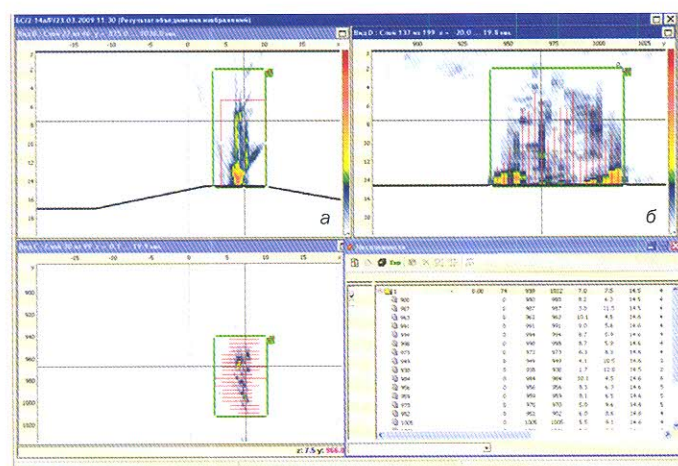
Таблица. Варианты и примеры представления данных АУЗК



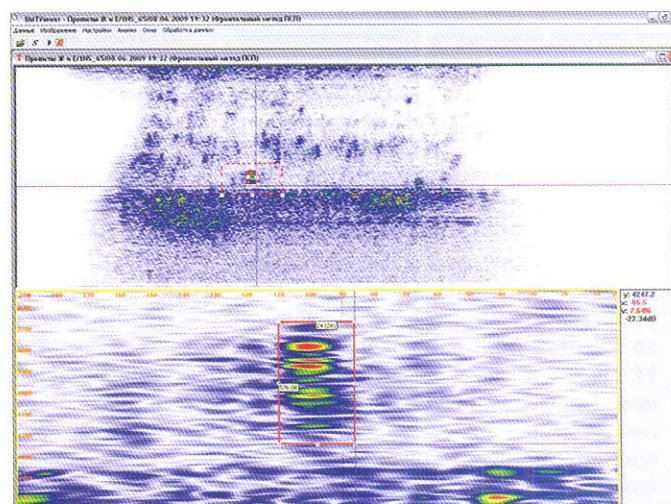
Представление данных, полученных с двух сторон сварного шва в палитре уровней (контрольный и браковочный). Данные получены путем визуализации



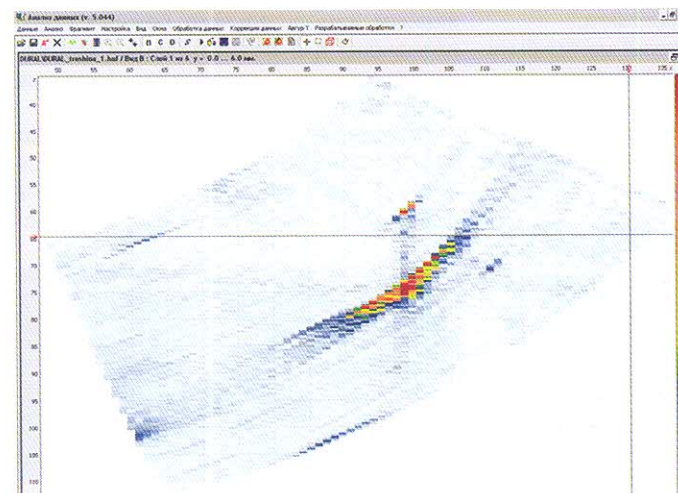
Представление в виде палитры TOFD позволяет выявлять дефекты по затенению донного сигнала или сигнала боковой волны и измерять размер дефекта по сигналам дифракции на его краях



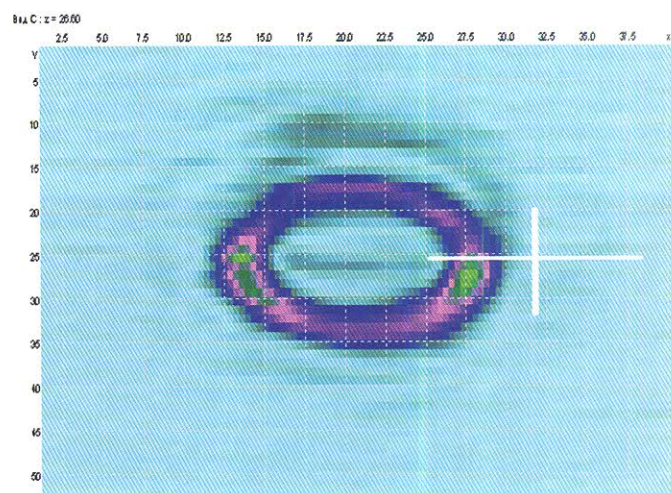
Представление данных после послышной когерентной обработки. Изображение показывается в трех сечениях с послышным измерением высоты дефекта и занесением информации о дефекте в таблицу. На примере показано изображение трещины высотой 12 мм поперек (а) и вдоль (б) шва трубопровода Ду300



Представление данных контроля основного металла трубопровода на дальней дистанции с применением фронтальной когерентной обработки. В верхней части окна показан фрагмент участка трубопровода длиной 12 м, в нижней части – увеличенный фрагмент данных и оконтуренный дефект



Представление данных, полученных прибором с ФАР, в виде сектора (S-скан) с наложением эскиза тест-образца с пропилом высотой 15 мм



Карта коррозии. Цветом кодируется отклонение толщины стенки от номинального значения

Получаемые изображения имеют высокое разрешение и повышенный уровень сигнал/шум, что позволяет измерить реальные размеры и расположение дефекта. Используются два основных алгоритма когерентной обработки – метод проекции в спектральном пространстве (ПСП [12], за рубежом называемый FT-SAFT) и метод SAFT [13].

Основные варианты применения когерентной обработки:

- для обработки данных, полученных при сканировании в плоскости перпендикулярной сварному шву, выполняется *плоская когерентная обработка*, что позволяет визуализировать сечение сварного шва и сделать заключение о расположении и высоте несплошности [14];
- для обработки эхо-сигналов, полученных при продольном сканировании и выявлении несплошностей в основном металле, применяется *фронтальная когерентная обработка*, обеспечивающая равномерную чувствительность и высокую точность измерения месторасположения и протяженности дефекта на удалении до 3 – 5 м от ПЭП при использовании эффекта многократного отражения от поверхностей объекта контроля;
- при обработке всех эхо-сигналов, полученных при двумерном сканировании, применяется *трехмерная обработка*; такой подход эффективен при контроле изделий большой толщины (более 60 мм), а также изделий с повышенным структурным шумом и затуханием или на дальней дистанции при многократном переотражении, например, при контроле поднакладочных сварных соединений тройников сварных на магистральных газопроводах [15];
- *многокурсные методы когерентной обработки* применяются при контроле объектов с цилиндрической симметрией при возможности прозвучить контролируемую область под разными углами с накоплением полезного сигнала на фоне помех [16, 17];
- *объединение изображений*, полученных по разным схемам прозвучивания в единой системе координат для получения

целостной информации о расположении и форме дефектов в объекте контроля;

- *метод эталонной голограммы* применяется как один из этапов метода ПСП и позволяет повысить лучевую и фронтальную разрешающую способность системы [18];
- *устранение реверберационного шума* эффективно выполняется для наклонных ПЭП с помощью пространственной фильтрации; при обработке больших трехмерных массивов данных применяется метод вычитания медианного шаблона, то есть регулярно повторяющейся во всех слоях структуры;
- *когерентная обработка методом C-SAFT* применяется для данных, полученных при использовании многоэлементных антенных решеток [19], и позволяет получать изображения высочайшего качества на глубинах, не превышающих ближнюю зону антенной решетки, и также, как и метод SAFT, позволяет учесть всевозможные трансформации типов волн, что значительно повышает качество изображений дефектов и информативность контроля;
- *сверхразрешение* позволяет при контроле аустенитных материалов эффективно программным образом уменьшить длину импульса ПЭП в 3 – 4 раза и повысить отношение сигнал/шум [20];
- *коррекция естественного упругого люфта* сканера, возникающего при сканировании в прямом и обратном направлениях, выполняется автоматически при обнаружении систематической разницы эхо-сигналов в четных и нечетных слоях данных;
- *алгоритмы слежения за качеством акустического контакта* позволяют построить карту качества контакта, а при наличии сигналов от прямого ПЭП выполнить компенсацию локальных изменений качества акустического контакта;
- *фильтрация изображений* может быть выполнена любым фильтром, заданным в виде двух- или трехмерной матрицы с целью устранения несущественных деталей изображения или подчеркивания границ.

В таблице показаны некоторые варианты представления данных в различных системах АУЗК серии «Авгур».

Алгоритмы выявления и образмеривания дефектов служат для автоматизации распознавания дефектных участков и определения размеров и типа дефектов. Алгоритмы настраиваются для выбранного объекта и методики контроля. Наиболее детально отработаны алгоритмы автоматического определения размеров дефектов аустенитных сварных соединений труб Ду300 [21] и дефектов рельсов. Настройки параметров и проверка алгоритмов требует обработки относительно большой выборки данных по реальным или искусственным дефектам.

Алгоритм автоматического выявления и определения условных размеров дефектов при проведении штатного АУЗК может быть настроен в соответствии с требованиями действующей нормативной документации. На рис. 14 показан пример выявления дефектов в тест-образце композиционного сварного шва приварки главного циркуляционного трубопровода к корпусу реактора ВВЭР-440.

Алгоритм поиска дефектных зон выполняет очистку изображения от шумов и выявляет участки с повышенной амплитудой сигнала вдоль сварного соединения. Алгоритм может применяться как к исходным эхо-сигналам, так и к изображениям, полученным методами когерентного восстановления. Его предназначение – сократить рутинную работу оператора системы и сконцентрировать его внимание на участках, подозрительных на наличие дефекта. На рис. 15 приведен пример автоматического выявления двух реальных трещин в аустенитном сварном соединении труб Ду300.

Алгоритмы автоматического или полуавтоматического образмеривания по данным измерительного режима предназначены для автоматизации определения реальных параметров дефектов по когерентным изображениям [21].

Программа построения трехмерных эскизов объектов контроля предоставляет оператору возможность совместить на одном изображении трехмерное когерент-

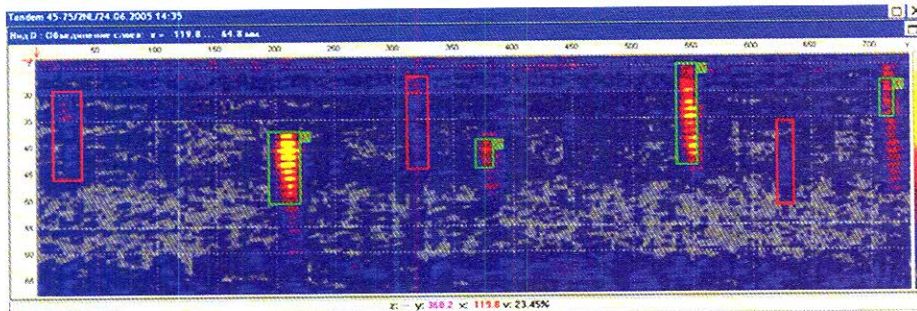


Рис. 14. Результаты применения алгоритма автоматического оконтуривания по данным поискового АУЗК в тест-образце композиционного сварного шва

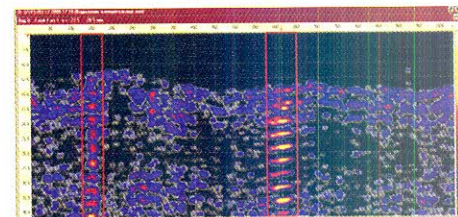


Рис. 15. Результаты применения алгоритма поиска дефектных зон в двух аустенитных сварных соединениях Ду300, красным цветом выделены дефектные зоны

ное изображение внутренней структуры объекта и контуров конструкции объекта. На рис. 16 показан пример наложения эскиза разделки продольного сварного соединения трубопровода Ду500 на когерентное изображение отверстия бокового сверления в тест-образце. Эта возможность значительно облегчает определение координат дефектов по отношению к сварному шву и другим геометрическим отражателям, позволяет уточнять форму дна объекта и разделки сварного шва по диффузным отражениям.

Программа для составления дефектограмм позволяет представить картину расположения дефектов в объекте в любой выбранной проекции, представить образы дефектов на трехмерном изображении объекта контроля и в результате дополнить заключение АУЗК понятной схемой расположения дефектов (рис. 17).

Заключение

Мобильные системы АУЗК серии «Авгур» предназначены для обнаруже-

ния и измерения параметров дефектов в металлических конструкциях и сварных швах технологического оборудования, в том числе труб различного диаметра и толщины, выполненных из сталей перлитного, аустенитного классов и других материалов. Параметры дефектов в этих системах определяются по изображениям высокого качества, полученным после компьютерной обработки исходных данных контроля.

Контроль системами серии «Авгур» выполняется в соответствии с требованиями российских и международных норм, а аппаратно-программные средства систем обеспечивают проведение контроля практически всеми основными методами УЗК.

Литература

1. ПНАЭ Г-7-030-91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Ч. II. Контроль сварных соединений и наплавки. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1992.
2. СТО Газпром 2-2.4-083-2006. Инструкция по неразрушающим методам контроля качества

сварных соединений при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. – М.: ООО «Центр безопасности труда», 2007.

3. РД 34.17.302-97 (СО 34.17.302-97). Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды, сосуды. Сварные соединения. Контроль качества. Ультразвуковой контроль. Основные положения. (ОП 501 ЦД-97). – М.: PAO «ЕЭС России», Госгортехнадзор России, 1997.

4. WK23635 – Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique. Пересмотр текущей версии стандарта ASTM E2373-04. – ASTM, 2004.

5. EN 1714. Non-destructive examination – Ultrasonic examination of welded joints. Европейский стандарт, 1997.

6. Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography, Code Case 2235-6, ASME Boiler and Pressure Vessel Code. – New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2003.

7. EN 12680-1. Founding. Ultrasonic examination. Part 1: Steel castings for general purposes. Европейский стандарт, 2003.

8. Тихонов Д. С. Основные этапы автоматизированного УЗК с определением размеров дефектов системами серии «АВГУР». – В мире НК. 2006. № 3(33). С. 24–28.

9. ГОСТ 23702-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 127 с.

10. Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Вопилкин А. Х., Тихонов Д. С. Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4. Ч. I. Описание системы и методики калибровки. – Контроль. Диагностика. 2009. № 9. С. 8–18.

11. Гребенников В. В., Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х., Гребенников Д. В. Голографические методы УЗК аустенитных сварных швов. – В мире НК. 2001. № 4(14). С. 36–38.

12. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. – Акустический журнал. 1988. Т. 34. № 2. С. 222–231.

13. Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Коваль Д. А. Применение схемы ТАНДЕМ для восстановления вертикально ориентированных трещин методом SAFT. – Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 13–26.

14. Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х. Компьютерные системы для ультразвукового неразрушающего контроля. – Дефектоскопия. 1993. № 5. С. 7–13.

15. Временная инструкция по ультразвуковому контролю сварных соединений и основного металла тройников сварных с накладками с применением системы АВГУР-Т. – ОАО «Газпром», 2009.

16. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г., Тихонов Д. С. Неразрушающий контроль цилиндрических объектов методами многочастотной акустической голографии. – Дефектоскопия. 1991. № 10. С. 29–36.

17. Базулин А. Е., Кретов Е. Ф., Самарин П. Ф., Тихонов Д. С. Применение когерентных методов при УЗК цилиндрических заготовок большого диаметра. – В кн.: XVI Российская научно-технич. конф. «НК и диагностика»/Труды конф. – СПб., 2002. с. 44.

18. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. О численном восстановлении в акустической голографии. – Акустический журнал. 1983. Т. 29. Вып. 3. С. 403–404.

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

20. Базулин Е. Г., Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х. и др. Применение методов сверхразрешения при экспертном контроле сварных швов трубопроводов АЭС. – Дефектоскопия. 2000. № 1. С. 58–65.

21. Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х., Доленко С. А. и др. Алгоритмы обработки данных для автоматизации работы ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных. – Дефектоскопия. 2004. № 12. С. 4–15.

22. 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.

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2010. № 1(47)

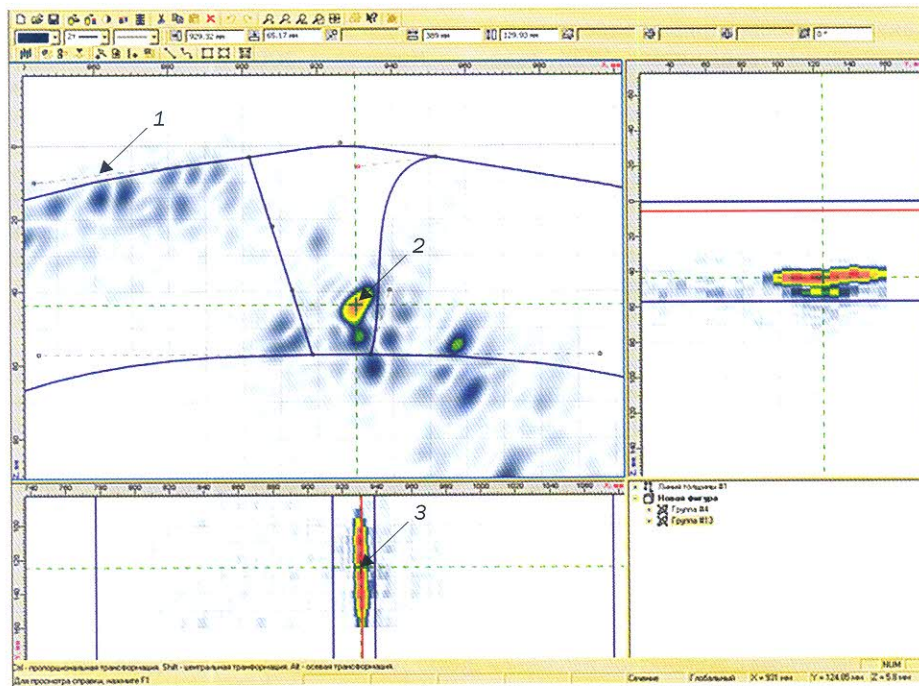


Рис. 16. Создание эскиза разделки продольного сварного соединения гибов трубопроводов Ду500. Приведено изображение бокового сверления в настроечном образце: 1 – поверхность трубы, 2 – изображение отражающей части отверстия, 3 – протяженность отверстия вдоль сварного соединения

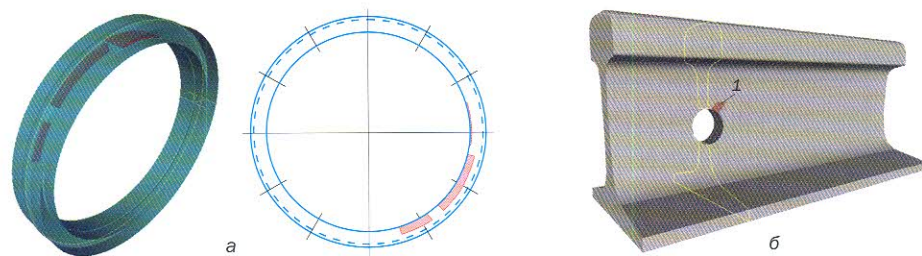
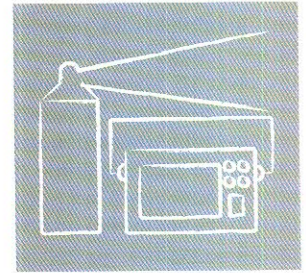


Рис. 17. Варианты представления дефектограмм кольцевого сварного соединения (а) и железнодорожного рельса (б): 1 – дефект № 1

The Automated Ultrasonic Inspection of Welded Joints of Nuclear Power Plant Equipment with AUGUR 5.2 Systems Usage

V. G. Badalyan, P. F. Samarin,
D. S. Tikhonov

Techniques for automated ultrasonic testing of pipelines and nuclear power plant equipment with reactors of RBMK and VVER types are considered. Applications of these techniques for testing of pearlite and austenite welded joint are given as examples. The testing techniques used provide reliable flaw detection and flaw geometry definition.



АУЗК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ «АВГУР 5.2»

Введение

Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации АЭС необходимо использование современных достижений техники НК и диагностики. Одно из таких современных средств контроля – аппаратура, позволяющая перейти от качественного описания выявленной несплошности (условные размеры, эквивалентная площадь и т. д.) к ее количественному описанию – измерению длины, высоты, определению типа несплошности, ее точного местоположения. При этом появляется возможность в полной мере реализовать технологию анализа качества объекта, объединяющую возможности дефектоскопии, дефектоме-

трии и прочностного анализа [1]. Для реализации этой технологии наиболее подходят приборы с когерентной обработкой данных, в частности, системы серии «Авгур», разрабатываемые в ООО НПЦ «ЭХО+» [2].

Первые разработки (1993 г.) были связаны с обеспечением современными техническими средствами АУЗК сварных соединений трубопроводов первого контура АЭС с реакторными установками типа РБМК-1000. Были разработаны голографические системы и методики контроля аустенитных сварных соединений трубопроводов из нержавеющей стали Ду300 и перлитных с аустенитной наплавкой Ду800. В исследованиях реальных сварных соединений Ду300 были определены погрешности измерений несплошностей в этих изделиях: $\pm 1,5$ мм для высоты дефекта и ± 5 мм для его длины при доверительной вероятности 0,95 [3]. Особенности систем с когерентной обработкой серии «Авгур» позволили

сформулировать и реализовать комплексную технологию УЗК, объединяющую в себе дефектоскопию, дефектометрию и прочностные расчеты. Эта технология применяется при эксплуатационном контроле трубопроводов различных диаметров и элементов оборудования атомной энергетики на АЭС [4, 5].

Начиная с 2003 г., при выполнении контроля трубопроводов используется новая система – «Авгур 5.2». Принципы построения и архитектура этой системы нового поколения подробно рассмотрены в статье в этом сборнике. АУЗК оборудования реакторных установок РБМК-1000, ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 проводится по разработанным методикам (табл. 1), которые применяются в настоящее время на всех российских АЭС.

Основная часть разработанных методик определяет процедуру АУЗК достаточно сложных сварных соединений трубопроводов первого контура, выполненных из разных материалов (перлит,

Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва:

Бадалян Владимир Григорьевич

Заместитель директора, д. т. н. Научные интересы: методы и средства обработки акустических изображений и сигналов, разработка когерентных методов и ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных.



Самарин Павел Федорович

Руководитель группы, к. ф.-м. н., II уровень по акустическому методу НК.

Тихонов Дмитрий Сергеевич

Технический директор, к. т. н.

Табл. 1. Методики АУЗК сварных соединений

№ п/п.	Тип сварного соединения	Тип реактора	Наружный диаметр, толщина стенки, мм
1	Аустенитные Ду300	РБМК-1000	Ду300, 15 ÷ 18
2	Перлитные с аустенитной наплавкой Ду800	РБМК-1000	Ду800, 35 ÷ 60
3	Композитные № 10.	ВВЭР-440	Ду500, 75 ÷ 90
4	Аустенитные Ду200.	ВВЭР-440	Ду200, 12 ÷ 19
5	Композитные Ду1100	ВВЭР-440	Ду1100, 70 ÷ 85
6	Аустенитные Ду500 ГЗЗ	ВВЭР-440	Ду500, 70 ÷ 80
7	Аустенитные Ду500 кольцевые	ВВЭР-440	Ду500, 35 ÷ 40
8	Аустенитные Ду500 продольные	ВВЭР-440	Ду500, 50 ÷ 70
9	Аустенитные Ду500 ГЦЭН-310	ВВЭР-440	Ду500, 70 ÷ 80
10	Перлитные Ду1200 (СС № 111)	ВВЭР-1000	Ду1200, 70 ÷ 72
11	Аустенитные турбинного отделения	ВВЭР-1000	Ду159, 6; Ду219, 10; Ду1220, 12
12	Аустенитные КД	ВВЭР-1000	Ду219 ÷ Ду273, 17 ÷ 20
13	Композитные КД (2 методики)	ВВЭР-1000	Ду200, 90; Ду426, 40

аустенит, композит) с большим диапазоном толщин, часто с односторонним или ограниченным доступом.

Рассмотрим особенности методик контроля аустенитных соединений трубопроводов Ду300 и перлитных соединений главного циркуляционного трубопровода с парогенератором Ду1200.

Примечание: композит – это сварное соединение элемента из перлитной стали с элементом из аустенитной стали.

АУЗК сварных соединений Ду300

Трубопроводы первого контура реакторной установки РБМК-1000 Ду300 изготовлены из нержавеющей стали и соединяются аустенитными сварными соединениями. Как известно, распространение акустических волн в аустенитах носит сложный характер. Поэтому в методике их контроля применяется комплекс мер для повышения выявляемости дефектов на фоне высоких структурных шумов, улучшения качества акустических изображений несплошностей и, следовательно, к упрощению интерпретации результатов и повышению достоверности контроля [6]. Кроме выбора оптимальных схем и частотного диапазона прозвучивания, учитывающих конструктивные особенности этого сварного соединения, используются:

– двухмодовый способ контроля, использующий одновременно два типа волн: продольные и поперечные;

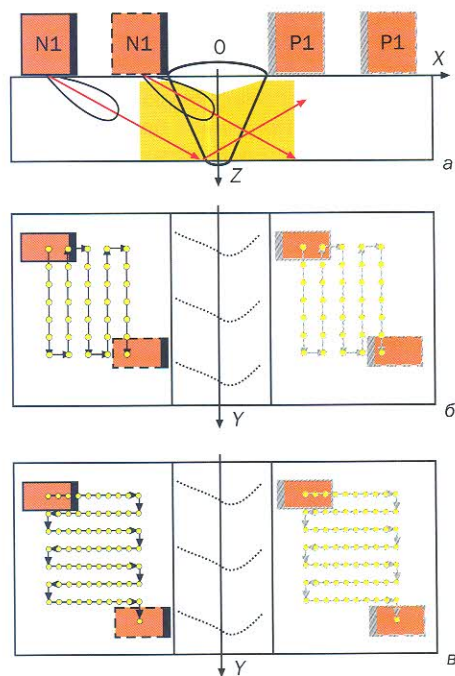


Рис. 1. Схема прозвучивания (а) кольцевого сварного соединения Ду-300 в поисковом режиме с шагом сканирования 10 мм по оси X и 2 мм по оси Y (б); и в измерительном режиме с шагом сканирования 0,2 мм по оси X и 4 мм по оси Y (в)

– пространственная фильтрация данных контроля;

– когерентная обработка данных контроля;

– получение изображений с учетом преобразования типов волн на дефектах.

Применение продольных и сдвиговых волн связано с особенностями распространения ультразвуковых волн в аустенитных материалах, где затухание и рассеяние продольных волн ниже, чем сдвиговых. Вместе с тем опыт использования только сдвиговых волн показал в большинстве случаев их эффективность, однако, в ряде случаев, из-за особенностей структуры аустенита интерпретация результатов АУЗК сильно затруднена. Совместный анализ изображений несплошности, полученных с применением различных типов волн, позволяет значительно упростить оценку данных контроля, сделать ее более надежной. Для реализации такого двухмодового контроля используются двухэлементные ПЭП: один элемент представляет преобразователь сдвиговой, другой – продольной волны, работающих на двух частотах – 4 МГц для сдвиговой волны и 5 МГц – для продольной.

Кроме того, применение перечисленных выше видов обработки данных и использование дополнительных возможностей для их анализа также увеличивает надежность контроля.

Использовался сканер, который позволяет регистрировать данные контроля за один оборот вокруг оси трубопровода. Схемы контроля при двустороннем доступе к сварному шву приведены на рис. 1а; на рис. 1б и рис. 1в даны схемы сканирования ПЭП в поисковом и измерительном режимах соответственно. В областях сканирования кружками обозначены места выполнения измерений поля (излучение и прием ультразвуковых импульсов). В поисковом режиме, задачей которого является выявление не-

сплошностей и локализация дефектных зон, шаг измерений достаточно большой: через 10 мм по оси X и 4 мм – по оси Y; в измерительном режиме, целью которого является подробная регистрация рассеянного дефектом акустического поля, чтобы использовать когерентные методы получения изображений, шаг измерений другой: 4 мм по оси Y и 0,2 мм – по оси X.

Для иллюстрации методологии проведения контроля слева на рис. 2 приведено изображение реального дефекта, полученное при АУЗК на АЭС системой «Авгур 4.2» и справа – результаты металлографии дефектной области. На изображениях В- и D-типа дефекты отображены сплошными белыми линиями: двумя сплошными линиями показано местоположение двух вертикальных трещин (изображение В-типа); профиль вдоль шва одной из них показан на изображении D-типа. По таким изображениям определяются положение дефектов и их размеры. В частности, высоту трещины легко можно измерить – она составляет 6 мм. Здесь же схематично изображена разделка шва, которая соответствует его реальному профилю. На фото справа дано сечение дефекта в том же слое, где выполнено сканирование в измерительном режиме АУЗК. Заметим, что преобладающим типом дефектов по данным металлографических исследований являются трещины, образовавшиеся по механизму коррозионного растрескивания в околошовной зоне под действием напряжений в водной среде, содержащей кислород.

Так как «Авгур 5.2» относится к измерительным системам, были выполнены исследования по определению величины погрешностей измерения высоты и протяженности продольно ориентированных несплошностей на образцах с искусственными отражателями. Максимальная погрешность измерения длины моде-

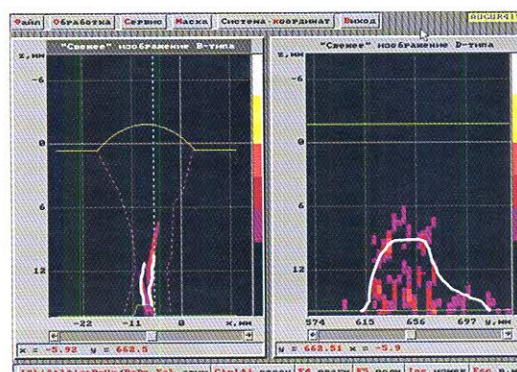


Рис. 2. Изображения реального дефекта в сварном соединении трубопровода Ду300, полученные когерентным восстановлением данных измерительного АУЗК с использованием системы серии «Авгур» (слева), и фотография металлографического шлифа этого шва в области дефекта (справа)

лей трещин (пропиллов) при доверительной вероятности 0,95 составила 5 мм. Максимальная погрешность измерения их высоты на этих образцах составила 1 мм. Результаты измерения погрешностей на реальных объектах приведены на рис. 3 в виде обобщенной гистограммы распределения погрешностей для 65 измерений координаты верхней кромки трещины $Z_{\text{верхн}}$ и высоты одиннадцати трещин. Для 95 % случаев погрешность измерения высоты трещин находится в интервале $\pm 1,5$ мм. Максимальная абсолютная погрешность измерения длины несплошностей, определенная по данным металлографических исследований, составила 5 мм.

К весьма важным элементам НК относятся наблюдения за выявленным дефектом в процессе эксплуатации. Одна из особенностей аппаратуры «Авгур» состоит в том, что параметры дефектов, определенные при анализе их изображений, слабо зависят от условий акустического контакта, так как около 70 % информации о дефектах содержится в фа-

зовой составляющей измеренного акустического поля [7]. Если дополнительно учесть, что при сборе данных система сохраняет полученные координаты ультразвуковых эхо-сигналов с достаточной точностью, чтобы при повторном АУЗК получить изображение дефекта в тех же координатах, то это позволяет наблюдать за развитием дефектов. При достижении критических размеров дефектный шов ремонтируется.

На основании анализа данных по дефектам с учетом прочностных расчетов НИКИЭТ, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ГУЦ ИЦТ МАЭ, ГУП ИДЦ НИКИЭТ были выработаны нормативы допускаемых размеров дефектов в сварных соединениях трубопроводов Ду300 [8], которые отражены на диаграмме (рис. 4), где показаны безопасные области эксплуатации, которые определяются длиной и высотой трещин межкристаллитной коррозии под напряжением. Кривые соответствуют длительности межконтрольного срока эксплуатации с учетом подрастания трещины за этот период времени в длину и глубину.

Всего на всех российских АЭС с реакторными установками РБМК были обследованы несколько тысяч сварных соединений Ду300.

АУЗК сварных соединений № 111 Ду1200

Одним из ответственных сварных соединений на АЭС с реакторными установками ВВЭР-1000 являются перлитные соединения № 111, состояние которых контролируется во время ежегодного планово-предупредительного ремонта АЭС. Сварное соединение главного циркуляционного трубопровода с парогенератором № 111 представляет собой достаточно сложный узел, во внутренней полости которого между наружной поверхностью коллектора и внутренней поверхностью патрубка в процессе эксплуатации возникают дефекты. Анализ условий эксплуатации показал, что в этой зоне металл подвергается интенсивной коррозии за счет агрессивных воздействий теплоносителя при неравномерно напряженном состоянии [9].

Методика [10] обеспечивает:

- обнаружение и локализацию технологических и эксплуатационных несплошностей, эквивалентная площадь которых равна или превышает $3,5 \text{ мм}^2$;
- выявление трещин различной ориентации: продольной, поперечной и диагональной (под углом 45° к оси шва), и близким к ним – протяженностью 10 мм и более и высотой 2 мм и более;
- измерение геометрических размеров несплошностей длиной более 10 мм с абсолютной погрешностью измерения длины ± 10 мм (протяженность вдоль оси шва) и ± 2 мм для высоты при доверительной вероятности 0,95.

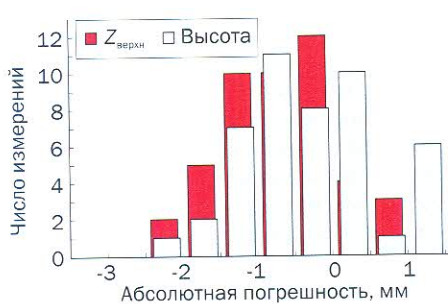


Рис. 3. Гистограмма погрешностей измерения высоты трещин для сварного соединения Ду300 по данным «Авгур 5.2» и результатов металлографических исследований

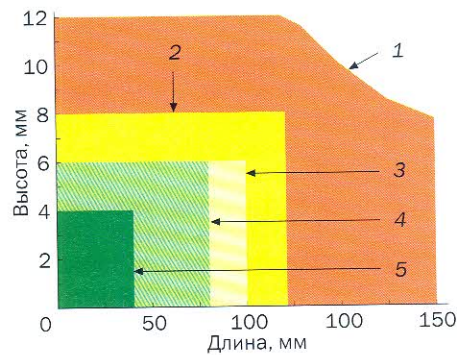


Рис. 4. Диаграмма допускаемых размеров дефектов: 1 – предельно допускаемые дефекты; 2 – область, безопасная на срок эксплуатации объекта; 3 – область, безопасная для эксплуатации на 1 год; 4 – область, безопасная для эксплуатации на 2 года; 5 – область, безопасная для эксплуатации 4 года

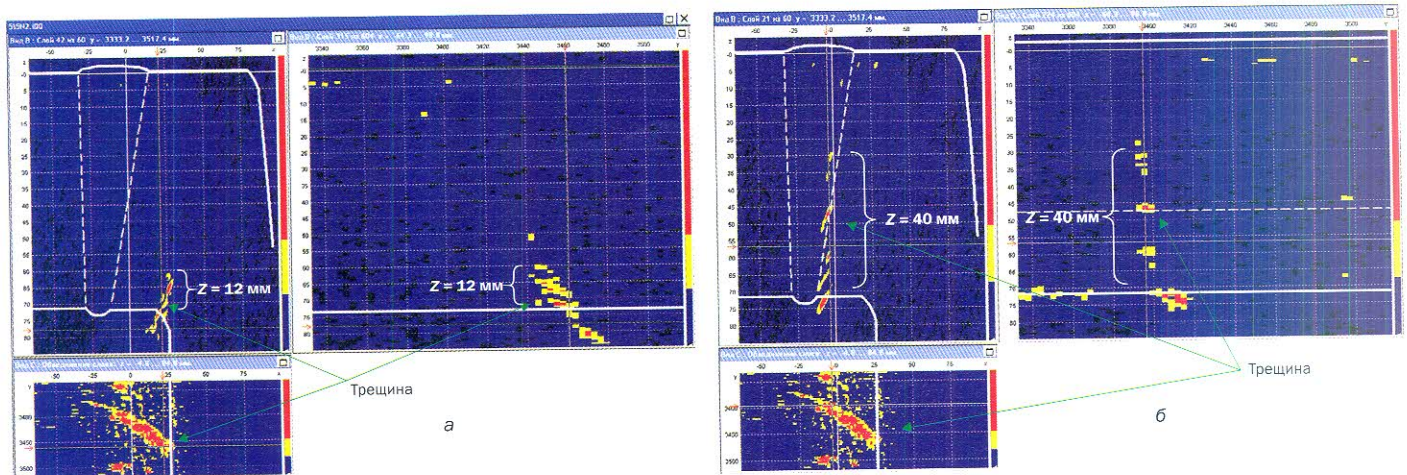


Рис. 5. Когерентные изображения дефекта сварного соединения № 111: а – начало трещины, б – максимальная величина трещины

В методике предусмотрено два режима контроля: поисковый и измерительный, в которых применяются различные схемы контроля:

- для несплошностей, ориентированных вдоль оси шва, используются ПЭП с углами ввода 40° и 55° и частотой 2,5 МГц (применяются двухэлементные совмещенные ПЭП типа 2S3H40T55);
- выявление несплошностей типа межваликовых несплавлений осуществляется прямым ПЭП с углом ввода 0° (тип L2S3H0T50);
- для выявления диагонально ориентированных несплошностей используются двухэлементные ПЭП с углом ввода 50°;
- для выявления поперечно ориентированных несплошностей используются трехэлементные ПЭП с углами ввода 50° и 0°.

В измерительном режиме применяются ПЭП, использующие только сдвиговые волны: 2S3H40T55, L2S3H0T50 с углами ввода 40, 50 и 55°. Особенности этих ПЭП являются довольно широкая полоса рабочих частот и сравнительно широкая диаграмма направленности в плоскости X-Z или Y-Z при сканировании в измерительном АУЗК по оси X или Y соответственно.

С момента утверждения методики в 2006 г. сотрудниками «НПЦ ЭХО+» ежегодно проводится контроль этих сварных соединений на всех блоках ВВЭР-1000 российских АЭС. Основной тип выявленных несплошностей связан с коррозионным эрозийным износом внутренней поверхности в области галтели и корня. Вторыми по представительности являются несплавления, расположенные на различных глубинах в областях кромок швов.

На рис. 5 приведен пример изображения обнаруженного дефекта, по которому было установлено, что дефект образовался в области галтели и затем развился в сторону шва [11]. Начало дефекта сформировалось параллельно оси сварного соединения и находилось на глубине ≈ 75 мм. Высота трещины в

области галтели составляла ≈ 12 мм, а в шве достигала максимума ≈ 40 мм.

По результатам контроля во время планово-предупредительного ремонта на одной из АЭС с ВВЭР-1000 были зафиксированы около 200 отражателей, распределения которых по высоте и по длине показаны на рис. 6 и 7. Подавляющее большинство отражателей (около 92 %) имеют высоту менее 5 мм и более 90 % – длину менее 60 мм. Одна несплошность имела критические размеры (критические размеры несплошностей: высота 14 мм, длина 70 мм [9]), и этот шов был отремонтирован. Вместе с тем имеется значительное число несплошностей (менее 10 % от их общего количества), существенно превосходящие допустимые размеры по высоте и длине (2 ÷ 3 и 12,5 мм [11] соответственно), за которыми требуется детальное наблюдение при АУЗК во время планово-предупредительного ремонта.

За время выполнения АУЗК сварных соединений № 111 на всех АЭС с ВВЭР-1000 выполнено около 200 циклов контроля.

Заключение

Таким образом, в последние годы в НПЦ «ЭХО+» по заданиям ОАО «Концерн Энергоатом» разработаны более 15 методик автоматизированного УЗК оборудования АЭС с реакторными установками типа РБМК-1000, ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 с использованием систем серии «Авгур» (приняты к применению в период 2003 – 2008 гг.). Эти методики обеспечивают измерение реальных геометрических размеров несплошностей, что позволяет увеличить достоверность НК, наблюдать за развитием несплошности в процессе эксплуатации оборудования, повысить надежность прочностных расчетов по оценке ресурса.

Литература

1. Бадалян В. Г., Вopilкин А. Х., Тихонов Д. С. Новый подход к ультразвуковому неразрушающему автоматизированному контролю ответственных сварных соединений. – Контроль. Диагностика. 1999. № 10. С. 23–31.

2. Бадалян В. Г., Вopilкин А. Х. Опыт применения системы «Авгур» на российских АЭС. – В мире НК. 1999. № 6. С. 29–31.

3. Бадалян В. Г. Погрешность измерения дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных. – Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 12–23.

4. Бадалян В. Г., Вopilкин А. Х. Мониторинг сварных соединений трубопроводов с использованием систем автоматизированного ультразвукового контроля с когерентной обработкой данных. – В мире НК. 2004. № 4(26). С. 22–27.

5. Вopilкин А. Х., Самарин П. Ф., Тихонов Д. С. Опыт применения систем АВГУР 5.2 для контроля аустенитных сварных соединений оборудования реакторной установки ВВЭР-440. – В кн.: 6-я Межд. научно-технич. конф. по обеспечению безопасности АЭС с ВВЭР. – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2009.

6. Методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК с применением системы АВГУР 5.2 (с дополнениями) (МА5-АЭ2-Т2М/2-К-06), 2006.

7. Gallagher N. C. Optimum quantization and relative information content of holographic magnitude and phase. – Acoust. Imaging and Holography. 1979. V. 1, No. 2. P. 119–132.

8. Методика расчета и нормы допускаемых размеров дефектов в сварных соединениях трубопроводов Ду300 КМПЦ РБМК (РД ЭО 0489-03).

9. Харченко С. А., Трунов Н. Б., Денисов В. В., Коротаев Н. Ф. Анализ причин повреждения металла в зоне сварного шва № 111 парогенераторов ПГФ-1000М. – В кн.: 7-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам / Сб. трудов. – Подольск: 2006. Докл. F71.

10. Методика автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений узлов приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам Ду1200 парогенераторов реакторных установок ВВЭР-1000 с применением системы АВГУР 5.2 (МА5-АЭ1-П1Б/8-ПК-06).

11. Бадалян В. Г., Самарин П. Ф., Тихонов Д. С. Технология УЗ контроля толстостенных кольцевых сварных соединений Ду1200 парогенераторов реакторов типа ВВЭР-1000. – Контроль. Диагностика. 2009. № 6. С. 59-70.

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2010. № 1(47)

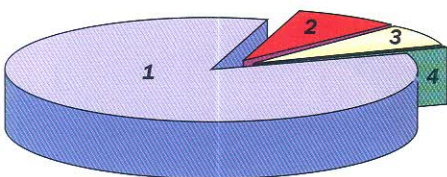


Рис. 6. Распределение несплошностей, выявленных при АУЗК сварного соединения № 111, по высоте: 1 – до 2 мм, 84 %; 2 – от 2 до 5 мм, 8 %; 3 – от 5 до 14 мм, 7 %; 4 – 14 мм и более, 0,5 %

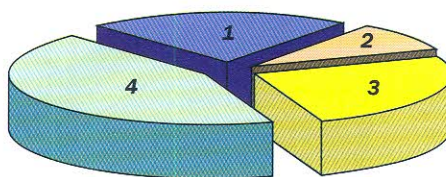
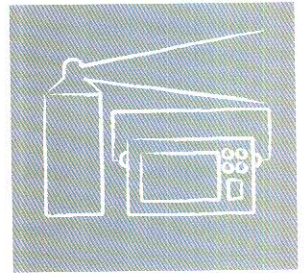


Рис. 7. Распределение несплошностей, выявленных при АУЗК сварного соединения № 111, по длине: 1 – от 40 до 60 мм, 22 %; 2 – 60 мм и более, 9 %; 3 – 20 мм и менее, 25 %; 4 – от 20 до 40 мм, 44 %

New Technique of Antenna Array Implementation for Automated Ultrasonic Inspection of Austenitic Pipes Du300 Girth Welds

E. G. Bazulin, A. Kh. Vopilkin,
D. S. Tikhonov, O. O. Shnel

While ultrasonic inspection of girth welds with significant weld reinforcement the indications at half skip could be hardly detected. Meanwhile signals with reflection at uneven inner and outer pipe surfaces could be detected. Such situation is distinctive for 300 mm diameter pipes with wall width 18 mm (Du300). SPC «ECHO+» has recently developed inspection technique for this object. It based on acquisitions of signals by antenna array with double-scan mode and flaw image reconstruction with C-SAFT algorithm. Multiple reflections at pipe uneven surfaces are taken into account. The AUGUR 6 system implements this technique. System has passed blind test and is supported by the approved inspection procedure.



НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ АУЗК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АУСТЕНИТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ Ду300

Совершенствование технологий изготовления антенных решеток (АР) и акустических многоканальных систем излучения и приема ультразвуковых волн привело к созданию относительно дешевых дефектоскопов, использующих фазированные антенные решетки (ФАР). Их применение позволило полу-

чить изображение В-типа контролируемого объема изделия с частотой не менее 10 Гц и вызвало огромный интерес у специалистов по ручному УЗК [1 – 3]. Для многих ответственных объектов контроля в атомной энергетике, нефтегазовом хозяйстве, судостроении, авиации стали разрабатываться методики контроля, основанные на применении дефектоскопов с ФАР. Однако для ряда практических приложений применение ФАР-технологий может оказаться недостаточно эффективным.

К таким приложениям можно отнести контроль сварных соединений, например трубопроводов диаметром около 300 мм с толщиной стенки около 18 мм (Du300), применяемых на атомных электростанциях (АЭС). Из-за широкого валика усиления информация о дефекте в них несут эхо-сигналы, отраженные от неровного дна.

В НПЦ «Эхо+» разработана новая технология контроля таких соединений, обеспечивающая получение наиболее

информативных изображений за счет совместного использования нескольких схем прозвучивания каждой контролируемой области. Эта технология основана на обработке эхо-сигналов, полученных АР в режиме двойного сканирования [4], методом C-SAFT [5 – 7] с учетом отражения от неровных границ объекта контроля. На рис. 1 показана схема прозвучивания сварных соединений Ду300. Цикл измерений заключается в излучении ультразвуковых импульсов АР с N-стороны и приеме АР с P-стороны (две желтые стрелки), в излучении и приеме АР с N-стороны (голубая стрелка) и с P-стороны (зеленая стрелка). Измеренные эхо-сигналы записываются в три файла, которые именуются соответственно NP-файлом, N-файлом и P-файлом, а затем АР перемещаются в следующую точку вдоль шва для повторения цикла измерений.

В отличие от классической схемы контроля излучение происходит не сканирующим ПЭП, а неподвижной АР, рабо-

Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва:

Базулин Евгений Геннадиевич

Начальник научно-методического отдела, к. ф. - м. н.

Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор, д. т. н., профессор.

Тихонов Дмитрий Сергеевич

Технический директор, к. т. н.



Шнель Олег Оскарович

Руководитель участка УЗК Лаборатории металлов Отдела ядерной безопасности и надежности филиала «Ленинградская АЭС» концерна «Росэнергоатом».

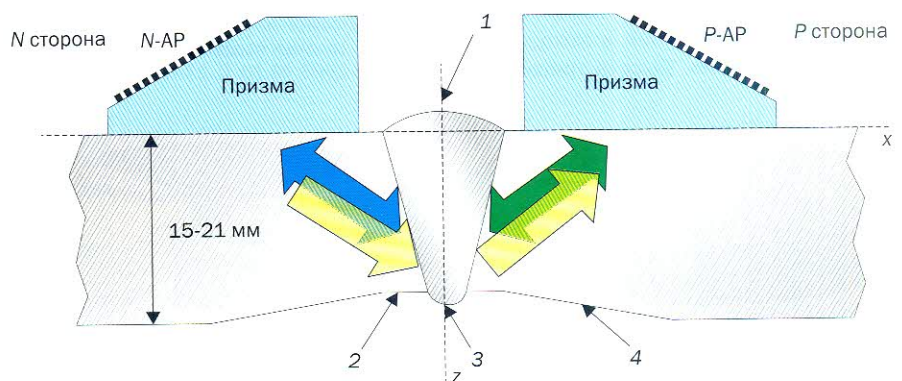


Рис. 1. Схема контроля Ду300 с неровным дном: 1 – валик усиления, 2 – полка, 3 – провисание, 4 – конусный переход

тающей в режиме двойного сканирования, когда регистрируются эхо-сигналы, излученные и принятые всеми парами элементов АР. Измерение эхо-сигналов проводилось с использованием АР типа PE-5.0M32E0.8P, состоящей из 32 элементов с шагом 0,8 мм с резонансной частотой 5,0 МГц.

Один из алгоритмов, который позволяет обработать этот богатейший объем информации, – метод C-SAFT. С его помощью восстанавливаются изображения, на которых блики, соответствующие дефектам, не смещены по осям xz и лучше сфокусированы по всей области восстановления изображения. Эти два недостатка характерны для изображений, полученных современными дефектоскопами с ФАР.

После регистрации эхо-сигналов в NP -, N - и P -файлах нужно восстановить изображения методом C-SAFT. Сначала обрабатываются эхо-сигналы по теневой схеме (желтые стрелки на рис. 1), записанные в NP -файле. Полученные изображения позволяют получить информацию о форме дна Ду300 и обнаружить зоны затенения, которые уверенно указывают на наличие придонных трещин высотой более 4,0 мм. Использование трех акустических схем, учитывающих трансформацию типов волн при отражении от дна объекта контроля, позволяет восстановить изображение дна по оси x в широком диапазоне от – 50,0 до 50,0 мм и оценить его профиль.

На следующем этапе нужно получить изображения дефектов по эхо-сигналам, записанным в N - и P -файлах, соответствующих облучению с разных сторон шва (голубая и зеленая стрелки на рис. 1). Метод C-SAFT позволяет получить шесть парциальных изображений дефектов при учете отражения эхо-сигналов от неровного дна и поверхности по акустическим схемам на прямом луче, одно- и двухкратном отражении от границ объекта контроля. «Освещение» дефектов в широком диапазоне углов около 130° позволяет получить качественное объединенное изображение дефектов. В простейшем случае объединение достигается суммированием модулей всех шести парциальных изображений. Более высокое качество объединенного изображения позволяет надежно автоматизировать процесс измерения и распознавания дефектов. На рис. 2 показан результат суммирования всех шести парциальных изображений, по которому можно уверенно определить тип дефекта и его геометрические размеры. Следует отметить, что антенная решетка находилась на расстоянии примерно 50 мм от центра валика усиления, поэтому на прямом луче трещину можно только уверенно обнаружить дефектоскопом с ФАР, но точно определить ее высоту невозможно.

Обработка этих же эхо-сигналов в N - и P -файлах методом C-SAFT в предположении излучения и приема АР продольных волн позволяет получить изображение

дна и оценить по амплитуде его бликов качество акустического контакта. Толщины соединяемых труб с двух сторон от шва рассчитываются по восстановленным изображениям дна при многократных отражениях между границами объекта. На рис. 3 представлен результат определения толщины трубы, на котором хорошо видно, что ее толщина по окружности меняется на 0,6 мм. Если не учитывать это обстоятельство, погрешность определения высоты дефектов на отраженном луче будет равна удвоенному значению отклонения истинной толщины трубы от заданной в расчетах, то есть 1,2 мм.

На этом же рисунке черной линией показан результат измерения толщины трубы в четырех точках с помощью штангенциркуля. Такие измерения были возможны, так как шов с дефектом был вырезан из трубопровода. Разницу в 100 мкм между измерениями можно объяснить погрешностью задания скорости продольных волн в трубе.

Таким образом, при сканировании в каждой точке вдоль сварного соединения формируются три файла с эхо-сигналами, по которым можно получить семнадцать изображений. Однако оператору нет необходимости анализировать все эти изображения, так как практически вся обработка происходит в автоматизированном режиме.

Были проведены исследования по оценке достоверности определения высоты трещин в Ду300 по объединенному изображению. На рис. 4 представлен результат определения профиля практически сквозной трещины на внутренней поверхности, полученный по объединенному изображению и после проведения металлографических исследований (МГИ).

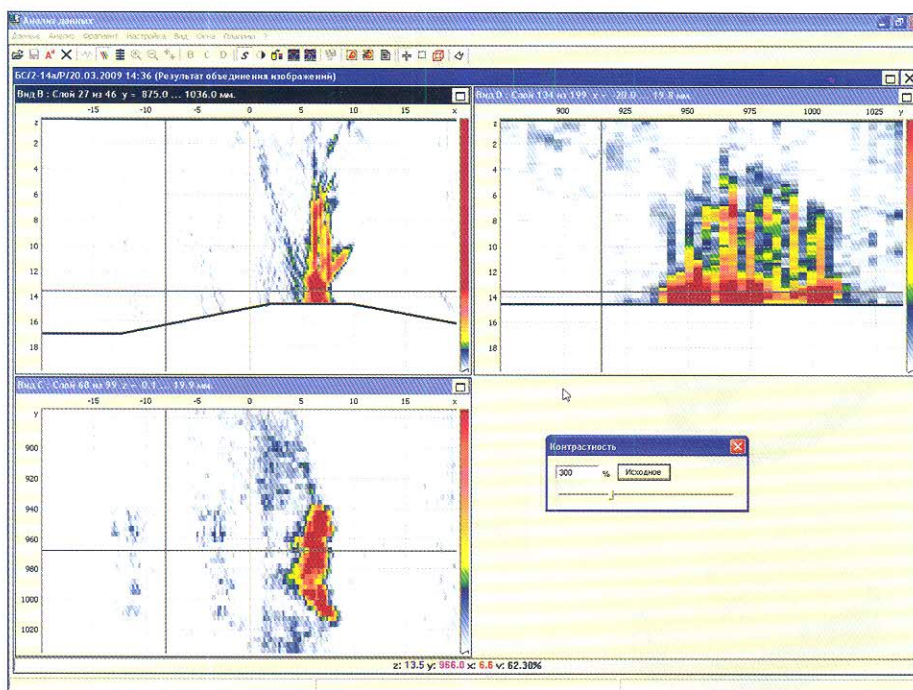


Рис. 2. Объединенное изображение реальной трещины в реальном сварном соединении Ду300 при регистрации эхо-сигналов АР из 32 элементов с рабочей частотой 5,0 МГц

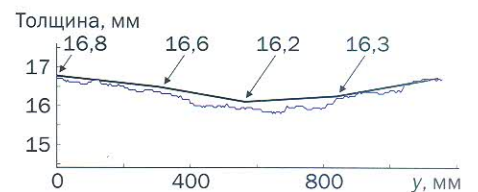


Рис. 3. Результаты толщинометрии трубопровода Ду300

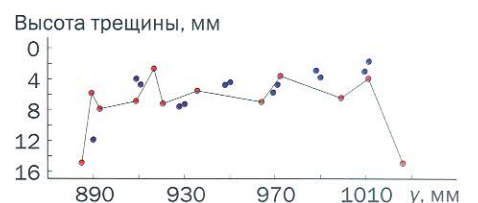


Рис. 4. Результаты определения высоты трещины по объединенному изображению и по результатам МГИ: ● – МГИ, ● – «Авгур 6»

Сопоставление профиля пяти реальных придонных трещин, полученных по результатам образмеривания их изображений по новой технологии, с данными МГИ показало, что максимальная ошибка определения высоты трещины составила 1,5 мм.

Созданная система «Авгур 6» позволяет с помощью двух АР на специальных призмах обнаруживать и поперечные трещины. На рис. 5 показана АР, излучающая импульсы, которые отражаются от поперечного дефекта, изображенного ломаной линией красного цвета, и принимаются второй АР. Так как АР развернуты на 90° на призме, то увеличивается область по оси x, в которой могут обнаруживаться поперечные дефекты. Изображения дефектов позволяют не только решать задачу обнаружения, но и задачу определения их размеров.

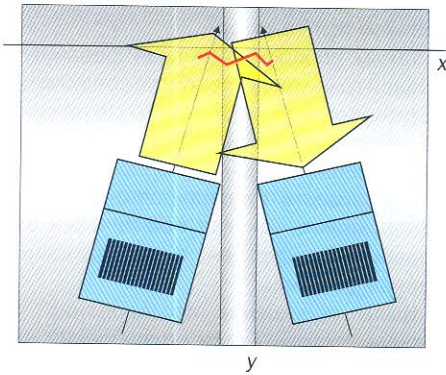


Рис. 5. Схема применения двух АР для обнаружения поперечных трещин



Рис. 8. Сканер Т300 системы «Авгур 6» на образце трубы Ду300: 1 – мотор-редуктор, 2 – маховик каретки x, 3 – прижимы для АР, 4 – основная часть сканера, 5 – трек, 6 – дополнительная часть сканера, 7 – прижимы для АР

На рис. 6 представлено изображение поперечной трещины длиной 20,0 мм и высотой 4,0 мм при двукратном отражении от границ объекта контроля, полученное методом C-SAFT. Контур поперечной трещины на рисунке изображены красной линией. Важно отметить, что изображение трещины получается в той же системе координат и в диапазоне глубин, что и ранее полученные изображения. Это очень важная особенность данной методики контроля, позволяющая совместно анализировать изображения дефектов, полученных по самым разным акустическим схемам. Такой подход приводит к тому, что разница между изображениями поперечных и продольных дефектов несущественна, а значит, их выявление и определение размеров становятся равнозначными.

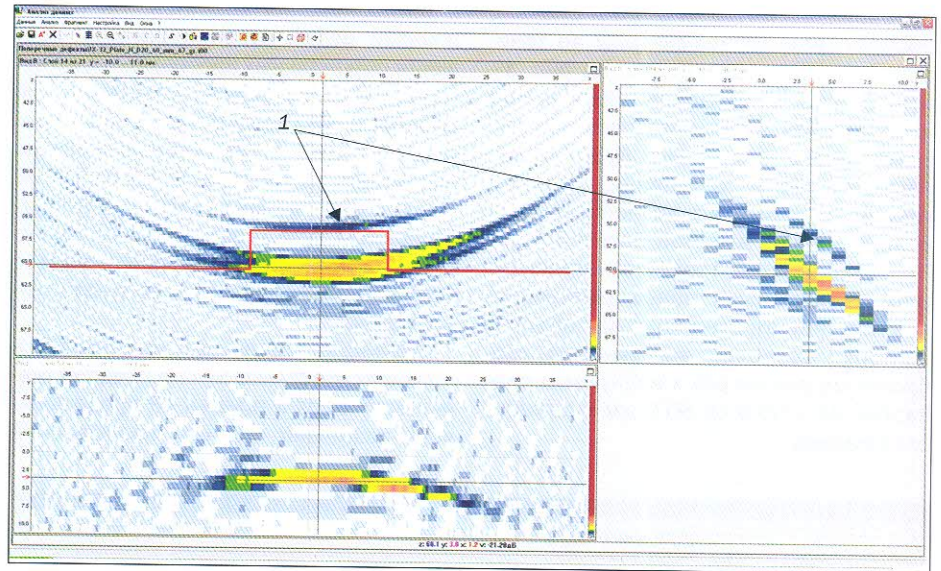


Рис. 6. Изображение модели поперечной трещины длиной 20,0 мм и высотой 4,0 мм при двукратном отражении от границ объекта контроля. Контур поперечной трещины изображены красной линией: 1 – вершина трещины

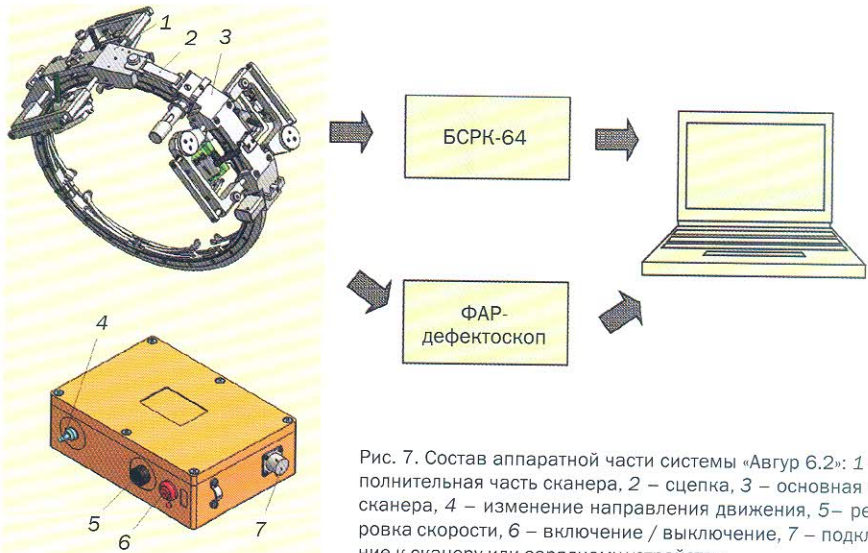


Рис. 7. Состав аппаратной части системы «Авгур 6.2»: 1 – дополнительная часть сканера, 2 – сцепка, 3 – основная часть сканера, 4 – изменение направления движения, 5 – регулировка скорости, 6 – включение / выключение, 7 – подключение к сканеру или зарядному устройству

фектов, к которому может быть присоединена дополнительная часть сканера для поперечных дефектов. Это позволяет проводить сканирование четырьмя АР в соответствии с разработанной в НПЦ «Эхо+» методикой. Конструкция сканера позволяет легко перестроиться для контроля в случае одностороннего доступа. Перемещать сканер можно автоматически от блока управления или вручную. Маховик каретки x позволяет регулировать расстояние от АР до шва. Этот сканер можно использовать и для проведения контроля большинством современных дефектоскопов с ФАР, например, такими как «Х-32» или «Omniscan MX».

В состав системы входит также персональный компьютер с программой, которая по заданному сценарию автоматически проводит поэтапную обработку эхо-сигналов практически без вмешательства оператора. Ниже перечислены основные этапы сценария:

- автоматическая оценка качества контакта и определение зон тени от трещин;
- автоматическое получение информации о форме дна в теневом режиме с учетом трансформации типов волн на дне образца;
- автоматическая профилометрия трубы с N - и P -сторон вдоль всего шва по изображениям, полученным на продольных волнах;
- демонстрация полученных результатов оператору для подтверждения или корректировки;

- автоматическое восстановление парциальных изображений по шести акустическим схемам;
- автоматическое объединение парциальных изображений в одно высококачественное изображение;
- демонстрация изображения оператору для подтверждения полученных результатов или корректировки;
- печать протокола контроля.

Все эхо-сигналы, изображения и информация о дефектах записываются в специализированную базу данных. Просмотреть схематическое изображение дефектов, привязанных к конкретной трубе, по результатам нескольких измерений можно с помощью программы «Дефектограф», которая позволяет в наглядной форме анализировать информацию об обнаруженных дефектах в 2D, 3D-представлениях и в текстовом формате. Пример такого изображения приведен на рис. 9.

Предложенная технология и аппаратура контроля могут применяться и при одностороннем доступе к сварному соединению.

Таким образом, можно утверждать следующее:

1. Для регистрации эхо-сигналов с помощью АР можно использовать режим двойного сканирования.
2. Для контроля тонкостенных изделий предложена технология контроля на базе модифицированного метода C-SAFT, учитывающего отражение ультразвуковых импульсов от неровного дна и поверхности объекта контроля и позволяющего

получать высококачественное объединенное изображение дефектов.

3. Для обнаружения поперечных дефектов предложена схема, которая позволяет получить изображение дефекта в тех же самых координатах, что и объединенные изображения.

4. Работа системы максимально автоматизирована и выполняется по заданному сценарию.

5. Система «Авгур 6» прошла успешные «слепые» испытания на образцах с реальными трещинами.

Авторы статьи признательны В. Г. Бадялянцу за ценные замечания в процессе подготовки статьи.

Литература

1. Х-32 – ультразвуковой дефектоскоп на фазированной решетке (Harfang). – В кн.: Средства акустического контроля: технический справочник. – СПб.: Свен, 2008, с. 130–131.
2. OmniScan MX – модульный дефектоскоп (Olympus NDT). – Там же, с. 124–126.
3. Пасси Г. Технология фазированных решеток – современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке. – В мире НК. 2009. № 2(44). С. 56–64.
4. Базулин Е. Г., Голубев А. С., Коколев С. А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. – Дефектоскопия. 2009. № 2. С. 18–32.
5. A1550 IntroVisor – томограф ультразвуковой низкочастотный (АКС). – В кн.: Средства акустического контроля: технический справочник. – СПб.: Свен, 2008, с. 68–69.
6. Bulavinov A., Dalichow M., Kröning M. et al. Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array. – In: Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation. – Hyderabad, 2006, p. 437–448.
7. 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.

Статья будет опубликована в журнале «В мире НК». 2010. № 3(49)

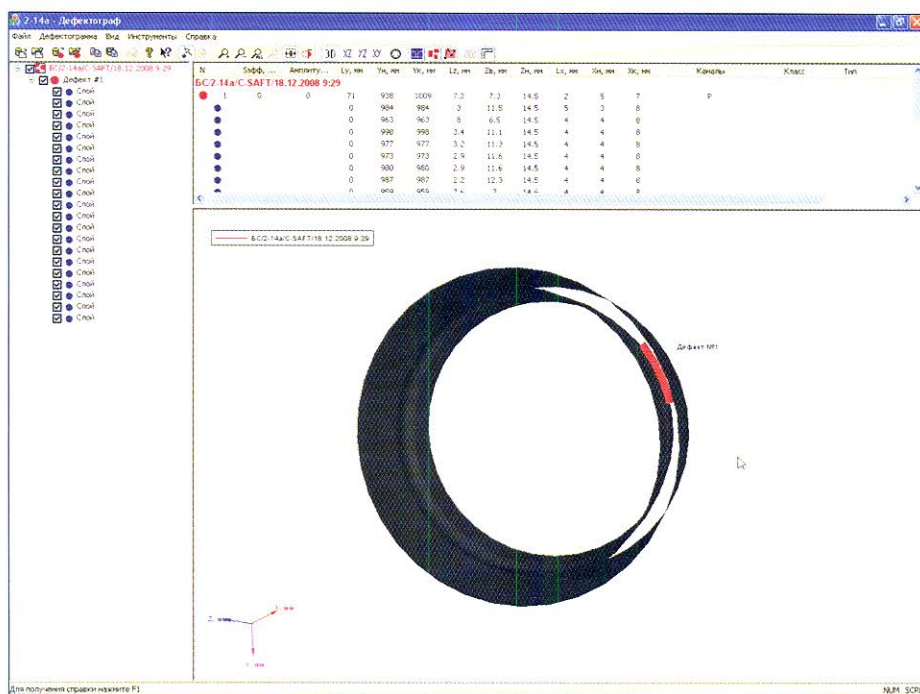
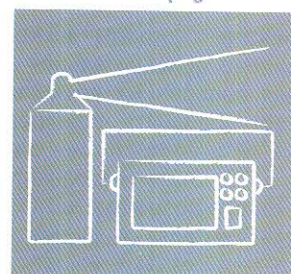


Рис. 9. Изображение дефекта в программе «Дефектограф» системы «Авгур 6»

Automated Means of Hazardous Structures Diagnostics by Multiangle Acoustic Holography Technique

V. A. Gapanovich, A. H. Vopilkin,
D. A. Kononov, D. S. Tikhonov,
A. K. Gourvitch, A. G. Kazantsev,
Z. M. Slavinsky

The necessity of developing nondestructive testing system with defect type and actual size determination is clearly demonstrated. This data will be used for sorting defects by their potential threat, correcting current equipment rejection standards and determining the next inspection date.



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ МЕТОДОМ МНОГОРАКУРСНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

«Нет ничего опаснее для новой истины, как старое заблуждение»
Александр Суворов

Гапанович Валентин Александрович

Вице-президент – главный инженер ОАО «РЖД», председатель совета главных инженеров ОАО «РЖД», лауреат Премии Правительства РФ.

Сотрудники НПЦ «ЭХО+»,
г. Москва:

Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор, д. т. н., профессор, III уровень по акустическому виду НК

Кононов Дмитрий Анатольевич

Старший научный сотрудник, II уровень по акустическому виду НК

Тихонов Дмитрий Сергеевич

Технический директор, II уровень по акустическому виду НК

Гурвич Анатолий Константинович

Д. т. н., профессор ПГУПС, лауреат Премий Правительств СССР и РФ, III уровень по акустическому виду НК

Казанцев Александр Георгиевич

Нач. отдела прочности ОАО «НПО «ЦНИИТМАШ»», д. т. н.

Славинский Зиновий Михалевич

Д. т. н., профессор, лауреат Госпремии СССР, РФ, Правительства РФ

Вводные замечания

К объектам повышенной опасности предъявляются жесткие (в ряде случаев неоправданно жесткие) требования в части отсутствия в них дефектов в виде внутренних и поверхностных несплошностей. Объясняется это невозможностью определения типа и фактических размеров выявленных дефектов с использованием современных методов НК. Подсознательно идя на перебраковку объектов с целью обеспечения безопасности их эксплуатации, к числу недопустимых относят дефекты различного типа (трещины, непровары, скопления и цепочки одиночных включений в сварных соединениях металлоконструкций, в осях и колесах подвижного состава, рельсах, сварных стыках рельсов и др.) независимо от их размеров [1].

Поэтому очевидна необходимость создания систем НК объектов, прежде всего повышенной опасности, с определением типа, координат расположения и размеров выявленных дефектов, а также методологии контроля, позволяющей оценить потенциальную опасность выявленных дефектов и рассчитать ресурс объекта до последующего диагностирования.

Именно этот подход положен в основу функционирования системы НК оборудования и трубопроводов реакторных установок АЭС на стадии эксплуатации [2]. Естественно, после создания таких систем потребуется определенный период времени для подтвержде-

ния и осмысления значимости такого подхода.

В 2005 г. НПЦ «ЭХО+» разработал и изготовил опытный образец системы диагностики колесных пар грузовых вагонов методом многокурсовой акустической голографии. Дальнейшее рассмотрение автоматизированных средств диагностики с оценкой ресурса будет дано на примере этой системы. Оси и колеса колесных пар (КП), с точки зрения безопасности являющиеся одними из самых ответственных конструктивных компонентов железнодорожного подвижного состава, при эксплуатации подвергаются интенсивным знакопеременным вращательно-изгибным циклическим нагрузкам, определяющим возможность возникновения усталостных повреждений. Ранее проводились расчеты запаса прочности новых (неизношенных) осей, но исследования кинетики развития дефектов в элементах колесных пар не проводились. Для своевременного выявления усталостных трещин и изъятия дефектных КП из эксплуатации уже более 50 лет используются ультразвуковые и магнитные методы НК.

Методология НК за прошедшие 50 лет практически не изменилась: оси с выявленными усталостными поперечными трещинами любых размеров бракуют и отправляют в металлолом. В то же время, как показывает длительный опыт эксплуатации подвижного состава, оси с неглубокими трещинами эксплуатируются десятилетиями, а излом осей с усталостными трещинами происходит при

поражении трещиной 40 – 60 % сечения оси. Таким образом, действующая методология НК осей и колес предопределяет перебраковку осей, неоправданно снижая их ресурс. Перебраковка особенно часто происходит при проведении магнитопорошкового контроля согласно [1], когда бракуются оси КП с трещинами глубиной от 0,1 мм.

Специалистами в области прочности накоплен большой опыт по расчетам запаса прочности (остаточного ресурса) тяжело нагруженных металлоконструкций с дефектами. Исходными данными для такого расчета являются местоположение дефектов в конструкции, их тип и размеры. К сожалению, современные средства УЗК позволяют определить только условные размеры дефекта, значительно отличающиеся от реальных.

Акустическая голография

Применение акустической голографии позволяет определить тип и измерить фактические размеры дефектов [3]. Акустическая голография – двухступенчатый способ получения изображения объекта. Он состоит из регистрации акустической голограммы на поверхности объекта, т. е. распределения акустического поля после его взаимодействия с несплошностями в объекте, и последующей обработки данных для восстановления волнового фронта на несплошностях. В процессе регистрации происходит сканирование объекта контроля с шагом порядка четверти длины волны. Далее путем математической обработки совокупности А-сканов с учетом фазы принятого эхо-сигнала проводится восстановление акустического изображения несплошностей. В результате изображение имеет высокое качество вне зависимости от глубины залегания дефекта, что позволяет с большей точностью оценить истинные местоположение и размеры дефектов.

Акустическая голография в сочетании с последующим прочностным расчетом получила широкое применение при контроле сварных швов потенциально опасных объектов АЭС, газопроводов, нефтепроводов и других ответственных

объектов. Возможности голографии позволяют с большей достоверностью интерпретировать результаты поискового контроля: порядка 95 % сварных швов, забракованных при проведении «традиционного» УЗК, были разбракованы по результатам проведения автоматизированного УЗК с применением голографических систем [2].

При разработке первой в мировой практике системы автоматизированного УЗК (АУЗК) колесных пар вагонов методом многоакурсной акустической голографии, в частности, были проведены:

- структурирование (с учетом новых функциональных возможностей акустической голографии) новой схемы прозвучивания, позволяющей выявлять трещины в осях при расположении искателей (преобразователей) на средней части оси;
- разработка и изготовление специализированных ПЭП;
- разработка (с привлечением ведущих специалистов в области прочности металлоконструкций) на базе теоретических расчетов и экспериментов с применением пресс-пульсатора программы компьютерного моделирования развития усталостной трещины в оси.

Система состоит из установочного стенда и передвижной стойки (рис. 1) и предназначена для выявления следующих типов дефектов:

В осях: поперечные трещины на цилиндрических поверхностях и в галтелях шеек, предподступичных и подступичных частях; поперечные и продольные трещины в средней части оси.

В колесах:

- в ободе: выщербины; поверхностный откол у наружной грани обода; откол кругового напльва; продольные трещины; поперечные единичные трещины; сетка термических трещин; подповерхностные дефекты, связанные с несплошностью металла; внутренние несплошности в металле;
- в диске: продольные трещины (включая приободную и приступичную зоны);

– в гребне: внутренние несплошности в металле; термические трещины; поперечные усталостные трещины.

Примечательно, что при НК колесных пар ввод ультразвука осуществляется со средней части оси, а также с поверхности катания, внутренней грани обода и внутренней поверхности диска колеса. Поэтому диагностика может осуществляться при трех состояниях колесных пар:

- с демонтированными внутренними кольцами подшипников;
- без демонтажа внутренних колец подшипников;
- без демонтажа буксового узла.

При подготовке КП к контролю проводится очистка и проверка состояния участков поверхностей КП, через которые вводится ультразвук. При этом очищаются от загрязнений средняя часть оси, внутренние поверхности ободьев и дисков колес; удаляются отслоения и наплывы краски; обточкой поверхности катания ободьев колес удаляются нарушения поверхности катания, недопустимые согласно [6].

Диагностика колесных пар вагонов является трехуровневой: первый уровень – поиск дефектов; второй – измерение размеров дефектов с применением вычислительной акустической голографии; третий – расчет остаточного ресурса по разработанной методике.

Результатом диагностики дефектной КП является ее остаточный ресурс (рис. 2) при некоторых исходных данных и заданных условиях эксплуатации подвижного состава.

Контроль осей

Для контроля оси применяются двенадцать ПЭП, работающих на частотах 1,25 – 5,0 МГц по совмещенной схеме. Их восемь – для обнаружения поперечно ориентированных дефектов во всех частях оси и четыре – для обнаружения продольно ориентированных дефектов в средней части (рис. 3). ПЭП, предназначенные для обнаружения поперечно ориентированных дефектов, излучают волны под углами ввода 40 – 72° к середине оси и в сторону шеек, чем обеспечивают ее сплошной контроль от торца правой шейки до торца левой шейки.

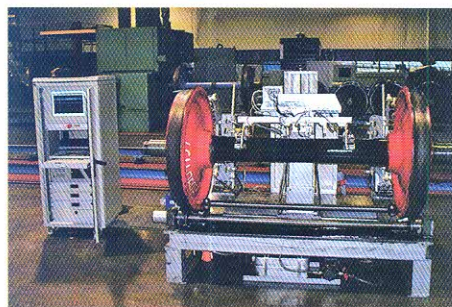


Рис. 1. Общий вид системы АУЗК колесных пар



Рис. 2. Колесная пара с дефектом в оси; указан ресурс оси, рассчитанный с учетом данных УЗК

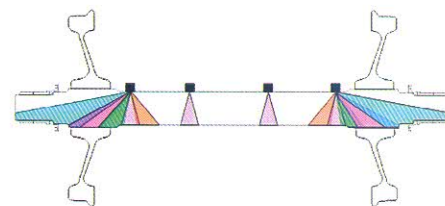


Рис. 3. Схема прозвучивания оси

Разработаны новые алгоритмы математической обработки данных. Так, для контроля шеек, предподступиц и их галтелей применяются ПЭП с углом ввода 72° . Поэтому, чтобы обеспечить высокую чувствительность контроля этих частей оси, применяется алгоритм математической обработки, удаляющий эхо-сигналы от конструктивных отражателей, а именно: от колеса, галтели предподступицы и подступицы, торца предподступицы и шейки (или резьбовой канавки), а также от лабиринтного и внутренних колец подшипников буксового узла. Это позволяет существенно повысить достоверность контроля самой нагруженной зоны оси с наибольшей скоростью роста дефекта – разгрузочной канавки шейки.

Возможность применения различных алгоритмов математической обработки данных позволяет повысить чувствительность контроля и других частей оси. Например, если при ручном контроле необходимо обеспечить отношение сигнал/шум не менее 6 дБ для того, чтобы сигнал мог быть зарегистрирован дефектоскопистом, то программа, реализующая алгоритм математической обработки данных, позволит зарегистрировать полезный сигнал при меньшем отношении сигнал/шум и, следовательно, выявить дефект на более ранней стадии развития. Алгоритмы обработки данных позволяют обнаруживать дефекты, находящиеся вблизи конструктивных отражателей, например трещины в галтелях шеек и предподступиц.

ПЭП, предназначенные для обнаружения продольно ориентированных дефектов, излучают по классической хордовой схеме с углом ввода 40° .

Контроль колес

Для контроля каждого колеса применяются шестнадцать ПЭП, работающих на частотах 2,5 – 5,0 МГц по совмещенной и раздельно-совмещенной схемам и излучающих продольные и поперечные волны. Из них шесть ПЭП вводят ультразвук с внутренней поверхности обода, семь – с поверхности катания и два – с внутренней стороны диска (рис. 4). В отличие от контроля по действующим документам волны Рэлея не применяются.

ПЭП для ввода ультразвука с поверхности катания изготовлены с применением протектора повышенной устойчивости к истиранию. При контроле обода и гребня выявляются как поверхностные дефекты, так и дефекты внутренние, в том числе трещины, растущие от клеймений вглубь металла.

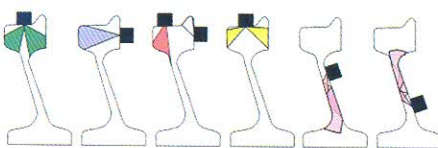


Рис. 4. Схема прозвучивания колеса

Особое внимание уделяется контролю диска, включая приободную и приступичную зоны. Для этого разработаны специализированные ПЭП с протектором из специального материала, который обеспечивает нормальный акустический контакт на поверхности с большой шероховатостью при подаче небольшого количества контактной жидкости. Специальный материал протектора обволакивает неровности внутренней поверхности диска колеса, чем обеспечивает ввод в объект контроля достаточно количества ультразвуковой энергии.

Система контроля колесной пары

Методика поискового контроля, реализованная в настоящей системе, обладает более высокой чувствительностью контроля по сравнению с другими, применяемыми на предприятиях Департамента вагонного хозяйства.

Разработанная система позволяет, с одной стороны, повысить чувствительность контроля, т. е. выявлять дефекты на ранней стадии развития; а с другой – обеспечить безопасность движения при пропуске в дальнейшую эксплуатацию колесных пар, сформированных из элементов с дефектами, «непроходными» по действующей нормативной документации. Характеристики системы:

- время диагностики бездефектной КП – 6 мин;
- время диагностики КП с дефектом – дополнительно не более 10 мин;
- подача КП осуществляется краном.

В качестве контактной жидкости возможно использование минерального масла или технической воды. Подача масла и воды минимальна, что исключает их попадание на внутренние кольца подшипников.

Оценка ресурса осей и колес

Разработке методики оценки ресурса осей и колес предшествовали работы по определению характеристик металла осей и колес. Работы проводились с ис-

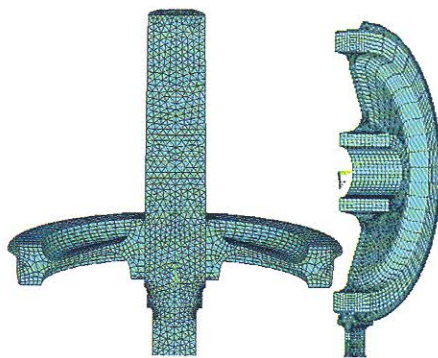


Рис. 5. Конечно-элементная модель расчета напряженно-деформированного состояния

пользованием испытательного оборудования, в том числе машины MTS-810 для испытаний образцов на статическую и циклическую трещиностойкость. Испытание образцов на растяжение проводилось на машине ИМ-4Р. Для проведения испытаний на ударный изгиб использовался инструментированный маятниковый копер PSW 300 фирмы MFL с максимальной энергией удара 300 Дж. Охлаждение ударных образцов осуществлялось в холодильной камере Lauda Ultra-Kryomat K 120 W, нагрев – в мuffleной печи фирмы MFL.

Рассчитано напряженно-деформированное состояние (НДС) осей и колес с учетом взаимодействия колесо-рельс. Выполнен уточненный анализ НДС осей и колес с использованием метода конечных элементов. Расчет НДС осуществлялся в трехмерной упругой постановке. С этой целью была разработана конечно-элементная модель (рис. 5). Для моделирования контактного взаимодействия оси и колеса в зоне посадки использовались контактные элементы со специальными свойствами, позволяющими задавать натяг по цилиндрической поверхности. Кроме того, была предусмотрена возможность управления натягом за счет температурного расширения колеса и оси путем соответствующего подбора коэффициентов температурного расширения и уровня температуры колеса и оси. Используя достаточно широкие возможности конечно-элементного подхода, было проанализировано изменение НДС в зоне посадки в зависимости от величины натяга (рис. 6).

Разработана методика расчета остаточного ресурса, позволяющая рассчитать ресурс оси или колеса при подкатке КП, сформированной из этих элементов, под вагон любого типа. Исходными данными для этой методики являются:

- местоположение, максимальная глубина и протяженность дефекта;
- вес брутто и количество осей вагона;
- напряжения от веса вагона;
- напряжения от нестационарных нагрузок, возникающих, например, при загрузке грузовых вагонов, при прохождении стрелок и криволинейных участков пути, спуске с горок и т. д., учитываются путем ввода коэффициента динамики;
- остаточные напряжения упрочнения поверхностного слоя оси накаткой;
- остаточные напряжения от прессовой посадки.

С целью подтверждения правильности методики расчета остаточного ресурса и определения погрешности

измерения глубины реальной усталостной трещины проведены испытания по нагружению осей с концентратором напряжений методом трехточечного плоского изгиба для выращивания усталостной трещины с доведением их до долома (рис. 7).

Методика расчета остаточного ресурса позволяет осуществлять математическое моделирование развития трещины в элементе КП, а это, в свою очередь, дает возможность:

- оптимизировать количество и объем операций НК (в том числе магнитопорошкового и вихретокового) различных участков осей и колес в процессе освидетельствования КП для различных вариантов осевой нагрузки;
- акцентировать усилия на повышение надежности контроля тех частей осей и колес, в которых скорость роста дефекта наибольшая.

В настоящий момент времени принят подход к упрочнению накаткой путем оптимизации соотношения остаточных сжимающих напряжений на поверхности и качества поверхности, подвергнутой воздействию инструмента, т. е. стремятся снизить вероятность трещинообразования за счет увеличения сжимающих напряжений на поверхности оси. Однако для повышения долговечности оси с уже зародившимся дефектом, особенно в условиях повышенной осевой нагрузки, нужен подход на основе циклической трещиностойкости – оптимизация распределения напряжений по глубине от поверхности оси при возможном повышении качества состояния поверхности. Поэтому расчеты по остаточному ресурсу могут иметь применение при

проектировании новых вагонов, а именно, конструкции и размеров осей и колес, а также путем внесения изменений в режимы упрочнения осей накаткой для повышения их долговечности, а, следовательно, и срока службы. Особенно это актуально для осей, которые будут эксплуатироваться с повышенной нагрузкой порядка 25 – 30 тс.

Варианты применения системы

ВАРИАНТ 1. Система применяется только для поиска дефектов. Для этого необходимо задать минимальный размер выявляемого реального дефекта – усталостной трещины, а не контрольного отражателя в виде пропилы. При таком варианте периодичность диагностирования остается фиксированной.

ВАРИАНТ 2. Система применяется не только для поиска дефектов, но и для расчета ресурса осей с дефектами. Рассчитанный остаточный ресурс оси даст фактическое значение пробега, через который необходимо провести следующую диагностику или просто подвергнуть КП расформированию с последующей отправкой дефектного элемента в переплавку. В случае, если обнаружен неопасный дефект, это позволит избежать операций ремонта, которые необходимо провести по действующим нормам. Например, для дефекта находящегося:

- в шейке оси, ее галтелях и предподступнице не надо будет проводить демонтаж внутренних колец;

- в подступнице оси – избежать отправки КП в вагоноколесные мастерские для расформирования и последующей отточки подступницы;

- в средней части оси, если он поперечный, – избежать отправки на завод-изготовитель для отточки средней части;

- в средней части оси, если он продольный и его длина более 25 мм, – избежать отправки на завод-изготовитель для отточки средней части.

Применение системы позволит осуществить пересмотр существующего порядка проведения НК элементов КП в вагонных депо. Оба варианта в целом приведут к увеличению межремонтных пробегов и, как следствие, снижению затрат на ремонт. Автоматизация процесса контроля позволит, возможно, отказаться от применения для контроля осей и колес других методов НК, что, в свою очередь, улучшит условия труда и позволит сократить штат персонала, проводящего диагностику.

Заключительные замечания

Разработанная система голографии вместе с методикой расчета остаточного ресурса позволят:

- осуществлять выявление дефектов на ранней стадии развития;
- по восстановленным акустическим изображениям определять местоположение и размеры дефектов;
- по измеренным размерам рассчитать ресурс КП до следующего НК;
- продлить эксплуатацию значительно числа элементов КП, забракованных другими методами НК;
- оптимизировать количество и объем операций НК (в том числе магнитопорошкового и вихретокового) различных участков осей и колес в процессе освидетельствования КП для различных вариантов осевой нагрузки;
- акцентировать усилия на повышение надежности контроля тех частей осей и колес, в которых скорость роста дефекта наибольшая.

Литература

1. Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов (РД 32.159-2000). – М.: МПС России, 2000.
2. 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.
3. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. – Акустический журнал. 1988. Т. XXXIV. № 2. С. 222–231.
4. Руководство по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов (РД 07.09-97). – М.: Департамент пассажирских сообщений МПС России, 1998.
5. Комиссаров А. Ф. Вагоны нового поколения. – Вагоны и вагонное хозяйство. 2006. № 1(5). С. 4–8.
6. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию вагонных колесных пар (ЦВ/3429). – М.: Транспорт, 1977.

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2006. № 3(33). С. 6–9

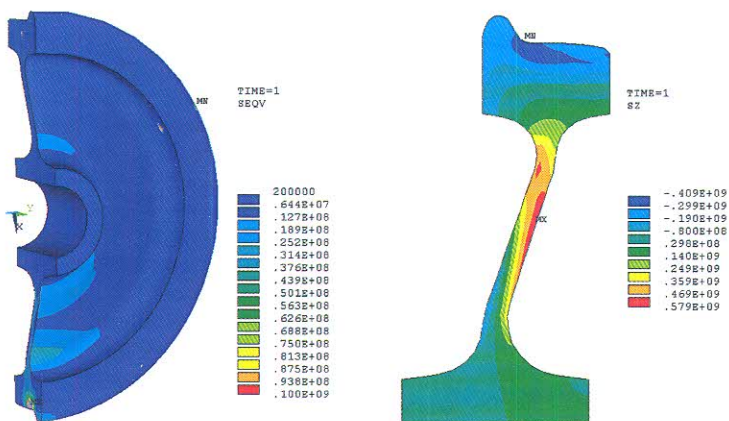


Рис. 6. Изменение НДС в зоне посадки в зависимости от величины натяга

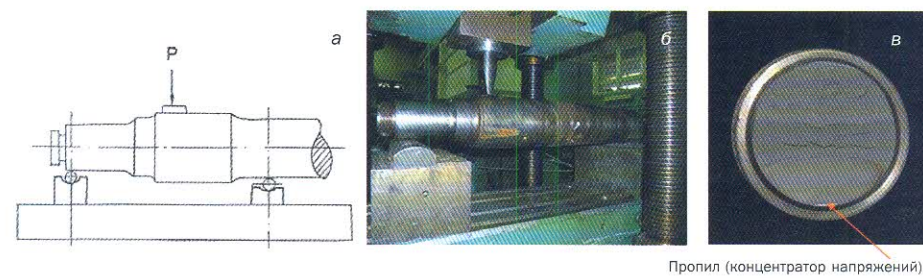
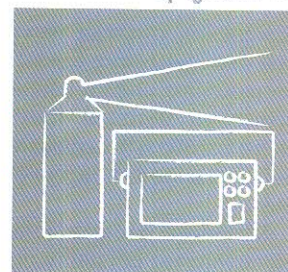


Рис. 7. Схема (а), фото установки (б) и результат (в) испытания по нагружению оси с концентратором напряжений методом трехточечного плоского изгиба

Automated System for Ultrasonic Transducer Verification

A. E. Bazulin, E. G. Bazulin,
A. Kh. Vopilkin, D. S. Tikhonov

Description of automated AUGUR 5.4 system for ultrasonic transducer verification, which was developed in SPC «ECHO+», is presented. The procedure of probe parameter measurement according to GOST 23702-90, EN 12668-2 and ASTM-E 1065 standards is outlined. Application of this automated system allows quick measuring of probe parameters with acceptable accuracy.



АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Возможности ультразвуковой аппаратуры определяются, как правило, параметрами пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), и 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 российским [1] и зарубежными стандартами [2, 3]. Калибровка ПЭП является необходимой процедурой при проведении АУЗК 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». Эти системы много лет применяются в различных промышленных и научных организациях России. Важной целью создания новой системы являлось удовлетворение требованиям европейского стандарта [2] в части перечня определяемых характеристик с тем, чтобы экспортная продукция российских предприятий подвергалась контролю с применением ПЭП, прошедшими паспортизацию в соответствии с международными стандартами. При этом применение новой элементной базы и технических решений позволили 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 система показана в нескольких вариантах комплектации. Она состоит из персонального компьютера; блока системного, представляющего собой цифровой ультразвуковой дефектоскоп, содержащий платы управления приемопередающим трактом и шаговыми двигателями; прецизионного двухкоординатного или однокоординатного 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 ПЭП. Поддерживается измерение параметров прямых и наклонных, совмещенных и раздельносовмещенных, фокусирующих и не фокусирующих 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 ванны 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 возможности измерения параметров ПЭП в соответствии с европейским стандартом [2] и американским стандартом [3]; система позволяет автоматически выдавать паспорт ПЭП по настраиваемому шаблону с указанием выхода фактических параметров за пределы допустимого диапазона; обоснована возможность выполнять измерение параметров контактных ПЭП при выполнении единственного измерения набора эхо-сигналов на стандартном образце СО-3 (СО-ЗР) или полусферическом образце СОП-СФ-55; имеется ударный генератор настраиваемой амплитуды и демпфирующие сопротивления приемного тракта; расширен диапазон усиления приемного тракта; можно измерять параметры ПЭП разных типов, предназначенных для работы с различными дефектоскопами. Применение метода акустической голографии позволяет рассчитать поле иммерсионного ПЭП по

Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+»,
г. Москва:

**Базулин
Андрей Евгеньевич**

Старший научный сотрудник

**Базулин
Евгений Геннадиевич**

Начальник научно-методического отдела, к. ф.-м. н.

**Вопилкин
Алексей Харитонович**

Генеральный директор, д. т. н.,
профессор.

**Тихонов
Дмитрий Сергеевич**

Технический директор, к. т. н.

эхо-сигналам от точечного отражателя, измеренным в ближней зоне, и определить трехмерную диаграмму направленности и параметры фокуса ПЭП, не увеличивая размеров иммерсионной ванны и ограничившись двумя шаговыми двигателями сканирующего устройства. Основные технические характеристики системы приведены в табл. 1.

Методика измерения параметров

В табл. 2 приведены измеряемые и рассчитываемые параметры ПЭП, наименования и обозначения параметров приведены в соответствии с ГОСТ [7]. Цветом отмечены параметры ПЭП, которые не измерялись системами калибровки ПЭП «Авгур» предыдущих поколений.

Табл. 1. Основные технические характеристики системы «Авгур 5.4»

Наименование технической характеристики	Значение
Длительность зондирующего сигнала ударного типа на активной нагрузке 50 Ом и при 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
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
Габаритные размеры, мм: – двухкоординатного сканирующего устройства – однокоординатного сканирующего устройства – блока системного	560×430×394 570×240×250 160×270×230

Форма эхо-импульса фиксируется как донный эхо-сигнал от отражателя в дальней зоне, имеющий максимальную амплитуду. Эхо-сигнал может быть получен как при сканировании ПЭП под управлением оператора с фиксацией эхо-сигнала, имеющего максимальную амплитуду, так и при автоматическом сканировании ПЭП по заданной траектории. Амплитудно-частотная характеристика рассчитывается через преобразование Фурье от импульсной характеристики, эффективная частота, полоса пропускания, длительность эхо-импульса рассчитывается согласно [1] или [2]. Импульсный коэффициент двойного преобразования $K_{\text{УД}}$ и коэффициент преобразования $K_{\text{УП}}$ измеряются в соответствии с [1] при автоматическом измерении формы импульса возбуждения и эхо-импульса. Подавление помех излучатель–приемник (для раздельно-совмещенных ПЭП) автоматически измеряется как отношение амплитуды эхо-сигнала от поверхности ввода к амплитуде донного эхо-сигнала.

Стрела в основной плоскости (по оси X) автоматически определяется как координата точки относительно передней грани, в которой наблюдается максимальное значение амплитуды эхо-сигнала 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 эхо-сигнала от полусферической поверхности образца

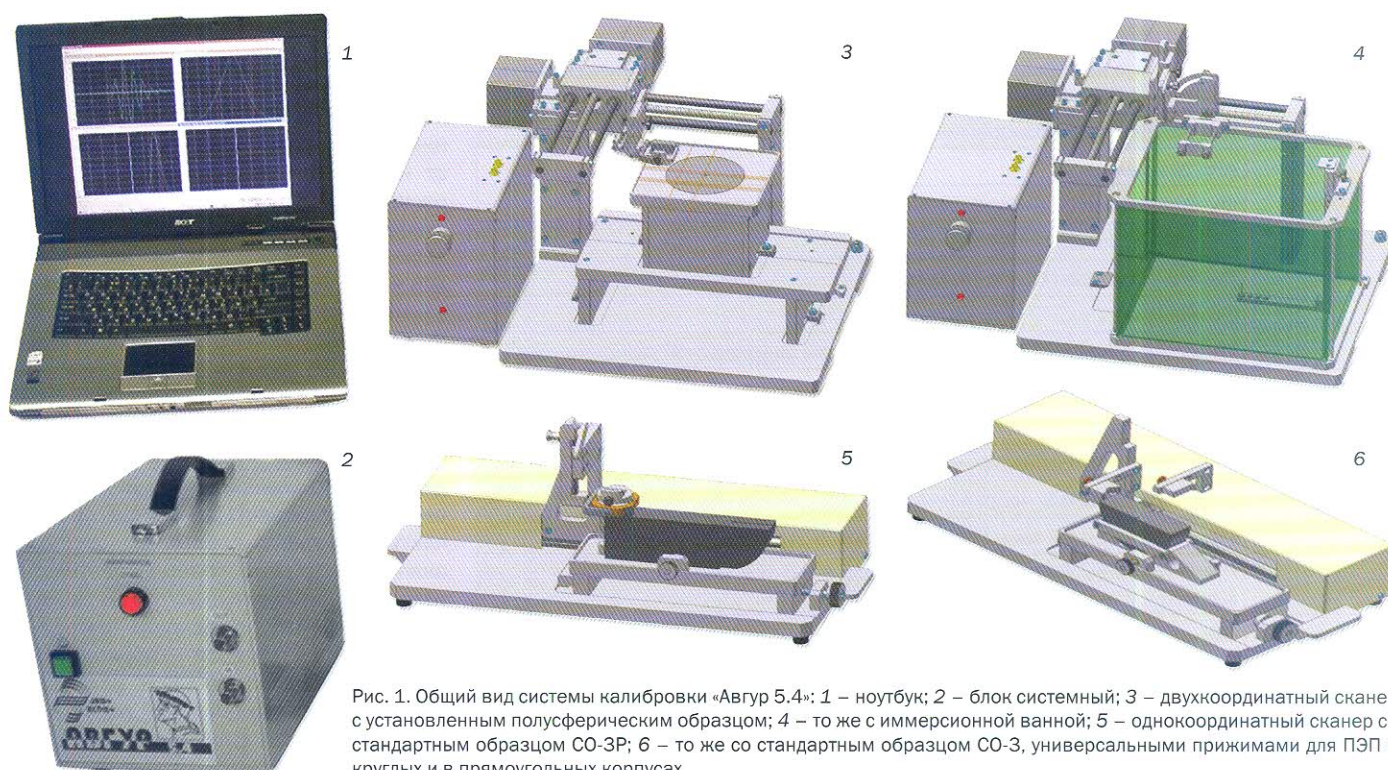


Рис. 1. Общий вид системы калибровки «Авгур 5.4»: 1 – ноутбук; 2 – блок системный; 3 – двухкоординатный сканер с установленным полусферическим образцом; 4 – то же с иммерсионной ванной; 5 – однокоординатный сканер со стандартным образцом СО-3Р; 6 – то же со стандартным образцом СО-3, универсальными прижимами для ПЭП в круглых и в прямоугольных корпусах

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 вычислено смещение луча (параметр, измеряемый по [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 эхо-сигнала от цилиндрической или полусферической поверхности образца по риске в геометрическом центре стандартного образца. *Время распространения (задержки) в призме (акустической задержке)* автоматически вычисляется по времени прихода эхо-сигнала 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 эхо-сигналов (B -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 перенос эхо-сигналов на произвольную глубину, что эквивалентно экспериментальному измерению B -скана от отверстия бокового сверления на глубине 15 или 44 мм. Это позволяет применить стандартную методику измерения угла ввода в соответствии с [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 определяются 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 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 [2] угол ввода в дополнительной плоскости называется «углом 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 [2], либо по формулам, принятым в практике УЗК в России. *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 рассчитываемом сечении определяется максимальный сигнал от «пробного» отражателя. Такой метод расчета повторяет реальную методику экспериментального определения АРД-диаграмм. Поддерживается расчет АРД-диаграмм совмещенных и раздельно-совмещенных ПЭП. *Функция шумов (реверберационно-шумовая характеристика, РШХ)* сохраняется и отображается вместе с АРД-диаграммами. Программа автоматически увеличивает усиление при увеличении глубины, повторяя методику ручного измерения функции шумов, рекомендованную [1]. 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 эхо-сигналам. По функции шумов в указанном диапазоне рассчитывается уро-

Табл. 2. Измеряемые параметры ПЭП

Обозначение	Параметр
U	Форма эхо-импульса (эхо-импульс)
t_{20}	Длительность эхо-импульсной характеристики по уровню -10 дБ от максимального значения
$K_{UU}(\omega)$	Амплитудно-частотная характеристика (спектральная характеристика)
f_3	Эффективная частота эхо-импульса, МГц
Δf_{UU}	Полоса пропускания (полоса частот), МГц
K_{UU}^i	Импульсный коэффициент двойного преобразования (эхо-импульсная чувствительность), дБ
K_{UU}	Коэффициент преобразования, дБ
АРД	АРД диаграмма
$A(z)$	Функция шумов (реверберационно-шумовая характеристика)
$A_{\Delta z}$	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 плоскостях)
e	Смещение оси луча*, мм
a_{eff}, b_{eff}	Эффективные размеры пьезоэлемента*, мм
$A_{ст}$	Подавление помех излучатель-приемник (для раздельно-совмещенных ПЭП)*, дБ

* Обозначение и наименование дано в соответствии с [2].

вень шума, мВ. Методика определения мертвой зоны, реализованная в системе, заключается в автоматическом определении глубины, при которой АРД-диаграмма, соответствующая эквивалентной площади отражателя 3 мм² (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 эхо-сигналам, измеренным от точечного отражателя в ближней зоне на едином расстоянии от ПЭП. Для нефокусирующего ПЭП в качестве фокуса принимается максимум

рассчитанной АРД-диаграммы, то есть 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], а примеры паспортов ПЭП приведены на рис. 3.

Оценка точности измерения параметров ПЭП

Важнейшей характеристикой любой измерительной системы является точность измерения значений физических величин, определяемая сравнением результата из-

мерения с истинным или действительным (условно истинным) значением.

Подробный анализ погрешностей измерения параметров ПЭП системой «Авгур 5.4» приведен в статье [13]. 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, то есть идентичность результатов измерений при серийном производстве систем. Различия этих показателей может быть связано, главным образом, с параметрами стандартных образцов. Были рассмотрены различные функции влияния и показано, что частью функций влияния

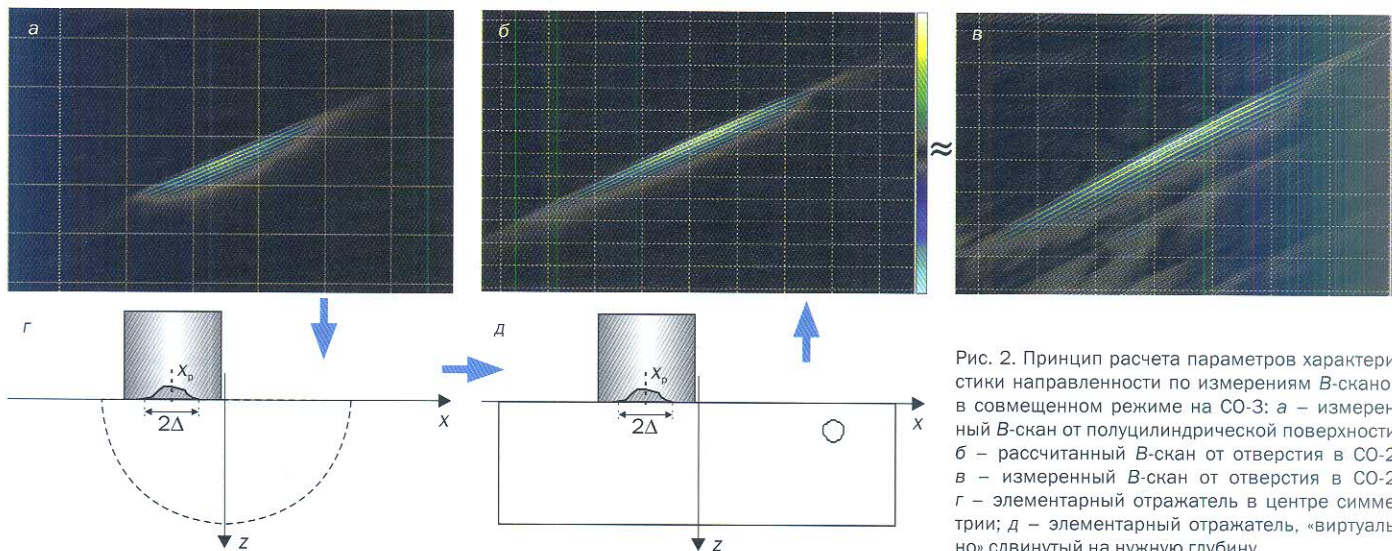


Рис. 2. Принцип расчета параметров направленности по измерениям В-сканов в совмещенном режиме на СО-3: а – измеренный В-скан от полуцилиндрической поверхности; б – рассчитанный В-скан от отверстия в СО-2; в – измеренный В-скан от отверстия в СО-2; г – элементарный отражатель в центре симметрии; д – элементарный отражатель, «виртуально» сдвинутый на нужную глубину

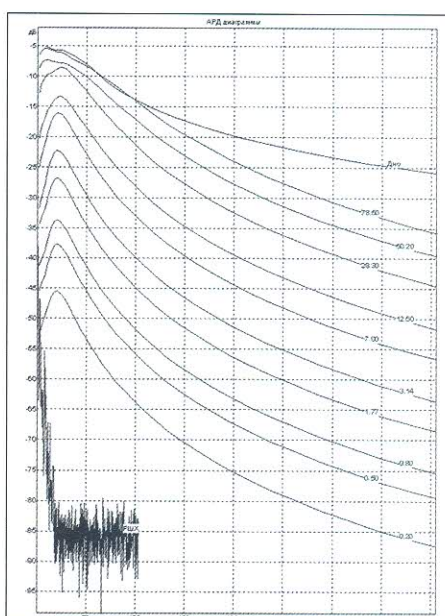
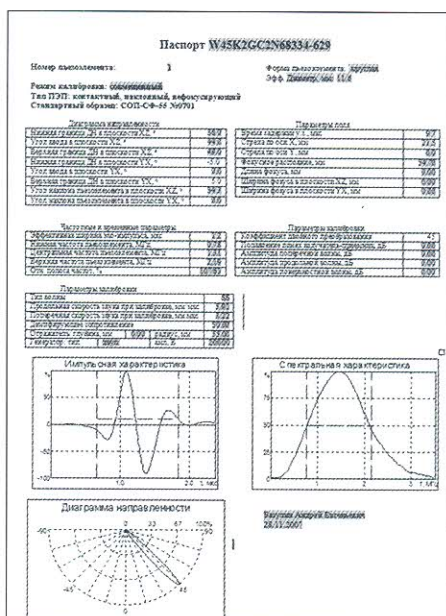
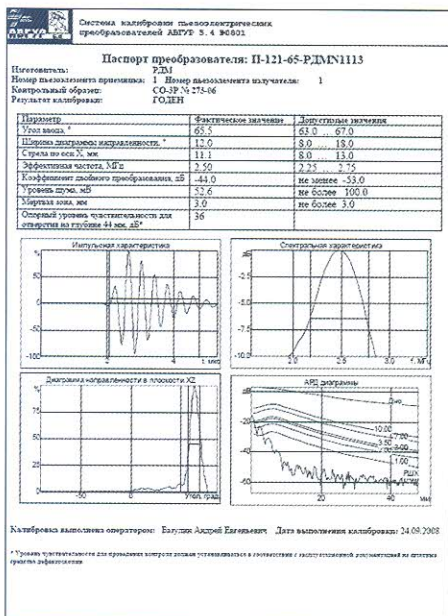


Рис. 3. Примеры паспортов ПЭП типа выданных в соответствии с требованиями эксплуатационной документации на штатные средства дефектоскопии рельсов (слева) и в соответствии с требованиями [2] (справа)

можно пренебречь (затухание в призме, погрешность обработки 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 точности 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 [1]. Указана формула для вычисления пределов допустимых погрешностей применяемого средства измерений по формуле $\delta = \pm (\delta_a^2 + \delta_m^2)^{1/2}$, где δ_m^2 – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностями методов и средств измерения, δ_a^2 – составляющая, обусловленная вариацией акустического контакта. По [1] 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. 3 приведены значения пределов погрешностей измерения для ПЭП класса А (то есть с повышенным уровнем требований к точности) в соответствии с [1] и значения погрешностей измерения, реализуемые системой «Авгур 5.4», установленные экспериментально. Все пределы погрешностей не превышают указанных в [1] кроме стрелы. Вообще говоря, [1] 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 эхо-сигналами (В- или С-скана), автоматической записи реверберационно-шумовой характеристики и дальнейшему автоматическому расчету параметров. Время выполнения измерений и 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 ОАО «РЖД», которые показали пригодность системы для выполнения поверки ПЭП, входящих в состав штатных средств дефектоскопии рельсов.

Пределы погрешностей автоматизированных измерений параметров ПЭП не превышают указанных в [1] 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 заключение авторы считают своим долгом отметить, что инициатором работ по сопоставлению российских и европейских стандартов на методы испытаний ПЭП, по созданию системы, определяющей параметры ПЭП по обоим стандартам, был И. Н. Ермолов. Авторы признательны А. Ф. Захарову (ОАО «ВМЗ») за постоянный интерес и ценные замечания к системе.

Литература

1. ГОСТ 23702-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 127 с.
2. EN12668-2. Non-destructive testing. Characterization and verification of ultrasonic examination equipment. Pt. 2: Probes. Европейский стандарт, 2001.
3. ASTM-E 1065. Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units. – ASTM International, 2008.
4. Тихонов Д. С. Основные этапы автоматизированного УЗК с определением размеров дефектов системами серии «АВГУР». – В мире НК. 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., Випилкин А. Х., Тихонов Д. С. Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4. Ч. I. Описание системы и методики калибровки. – Контроль. Диагностика. 2009. № 9. С. 8–18.
7. ГОСТ 26266-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 26 с.
8. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику / Пер. с англ. под ред. Г. И. Косоурова. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
9. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
10. Базулин А. Е., Базулин Е. Г. Измерение диаграммы направленности пьезоэлектрических преобразователей на стандартном образце СО-3. – Акустический журнал. 2010 (в печати).
11. Базулин А. Е., Базулин Е. Г. Об измерении угла ввода пьезоэлектрического преобразователя на стандартном образце СО-3. – Дефектоскопия. 2010 (в печати).
12. Качанов Е. И., Пигулевский Е. Д., Яричин Е. М. Методы и средства гидроакустической голографии. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
13. Базулин А. Е. Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4. Ч. II. Погрешности измерений. – Контроль. Диагностика. 2010. № 3 (в печати).

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2010. № 1(47)

Табл. 3. Пределы погрешности измерения параметров ПЭП

Измеренный параметр	Предел погрешности измерений параметров	
	В соответствии с [1]	Система «Авгур 5.4»
Длительность эхо-импульса, t_{\max}	$\pm 7\%$	$\pm 4\%^1$
Импульсный коэффициент двойного преобразования, $K_{\text{УИ}}$	$\pm 15\%$	$\pm 15\%^2$
Эффективная частота, f_a	$\pm 5\%$	$\pm 0,5\%^3$
Полоса пропускания, $\Delta f_{\text{УИ}}$	$\pm 4\%$	$\pm 1\%^3$
Стрела (точка выхода луча), l	$\pm 0,5$ мм	$\pm 1,0$ мм
Угол ввода, α	до 60° свыше 60°	$\pm 0,7^\circ$ $\pm 1,0^\circ$
Время задержки в призме, $\tau_{\text{пр}}$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%^4$

Примечания:

¹ Для номинальной длительности импульса 2,5 мкс.

² Не учитывая изменение качества акустического контакта и без учета затухания в образце.

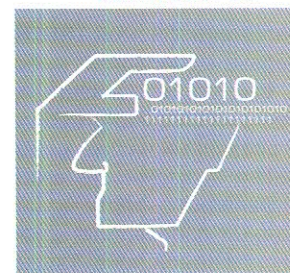
³ Для номинальной частоты 5 МГц.

⁴ Для номинального времени задержки в призме 3,4 мкс, исключая систематическую погрешность, связанную с параметрами образца.

Ultrasonic Testing of Thick Walled Narrow Gap Austenitic Welds in the Context of ITER Project

E. G. Bazulin, A. E. Bazulin,
D. A. Koval, D. S. Tikhonov

This article describes the result of SPC «ECHO+» activity in the ITER project: automated ultrasonic inspection of austenite joint welds, evaluated in 2006-2007; summarized results of various mock-ups inspection since 1997. Also existing inspection procedure and new inspection schemes as well as the ITER mock-ups on which in 2006-2007 the experiments was conducted are briefly described in the article, some flaws images and general summaries are presented.



УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТОЛСТОСТЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С УЗКОЙ РАЗДЕЛКОЙ В РАМКАХ ПРОЕКТА ИТЭР

Введение

С 1996 г. в ООО «НПЦ «ЭХО+» осуществляется разработка методов и средств автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) аустенитных сварных соединений в рамках международного проекта ИТЭР (ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor – Международный экспериментальный термоядерный реактор). Описание проекта можно найти на официальном сайте http://www.iter.org/pdfs/ITER_Design_Phase.pdf. Российская сторона обеспечивает изготовление части деталей вакуумной камеры (рис. 1). Контроль толсто-

стенных (до 90 мм) аустенитных сварных соединений вакуумной камеры – важная часть этого проекта. Общая протяженность указанных сварных соединений составляет около 10 км.

До 2006 г. НПЦ «ЭХО+» выполнил серию работ, связанных с АУЗК толстостенных аустенитных швов с помощью систем «Авгур 4.2» ИТЭР и «Авгур 5» [1, 2]. Контроль проводился с применением двухмодовой методики с когерентной обработкой данных [3] и определением геометрических размеров несплошностей [4]. Краткая сводка по выполненным работам приведена в табл. 1, где в последней строке показаны результаты работы, выполненной в 2006 – 2007 гг. Далее результаты этой работы рассмотрены более подробно.

Для аттестации систем и методик контроля в 2006 г. были организованы сравнительные испытания трех систем и методик УЗК из разных стран, в том числе системы «Авгур» пятого поколения, разработанной в НПЦ «ЭХО+». Для этого были изготовлены несколько тест-образцов с искусственно введенными дефектами

сварки. Один из образцов был разработан и изготовлен в FRAMATOME (Испания), дефекты заложены фирмой TRUEFLAW (Финляндия). Информация о расположении и размерах всех искусственных дефектов была известна участникам, то есть образец был «открытым» и предназначался для настройки систем и испытания методик, разработанных для контроля аустенитных сварных соединений с узкой разделкой. Еще два образца изготовлены по чертежам фирмы CEA и два по чертежам фирмы PHOENIX (Великобритания). Дефекты были также

Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+»,
г. Москва:

**Базулин
Андрей Евгеньевич**

Старший научный сотрудник

**Базулин
Евгений Геннадиевич**

Начальник научно-методического отдела, к. ф.-м. н.



**Коваль
Дарья Андреевна**

Младший научный сотрудник

**Тихонов
Дмитрий Сергеевич**

Технический директор, к. т. н.

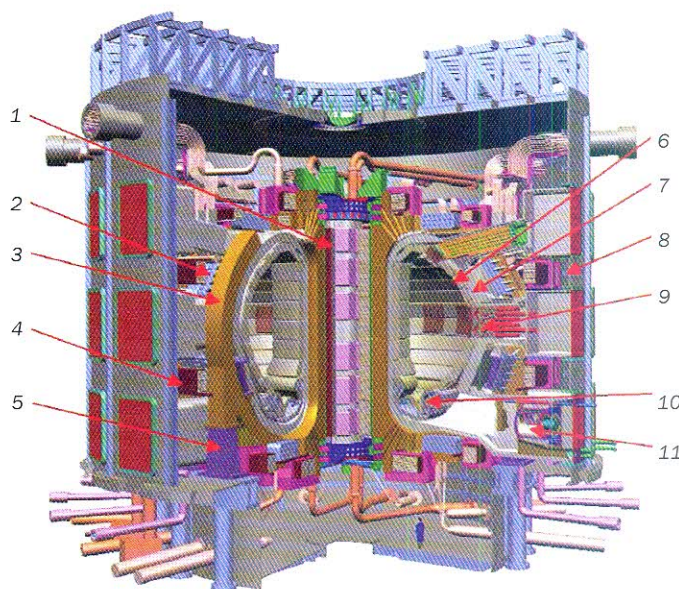


Рис. 1. Схема реактора ИТЭР (использовано изображение с официального сайта проекта ИТЭР): 1 – центральный соленоид; 2 – корпус внутренней катушки; 3 – катушка тороидального поля; 4 – катушка полоидального поля; 5 – гравитационная опора; 6 – бланкет; 7 – вакуумная камера; 8 – криостат; 9 – заглушка; 10 – дивертор; 11 – криогенный насос

заложены фирмой TRUEFLAW. Основная задача проводимых работ заключалась в том, чтобы показать пределы надежной выявляемости небольших дефектов в различных частях аустенитного шва, а также возможность выявления и классификации вертикально ориентированных плоскостных дефектов в шве и околошовной зоне. Также определялась реальная погрешность измерения размеров дефектов.

Испытания проводились по схеме круговых испытаний (round-robin test): для каждой из трех команд (Россия, Франция, Великобритания) по два образца были «открыты» (с предоставлением схемы расположения и размерами

заложённых дефектов), и по два «слепы» (информация о размерах и расположении дефектов не известна данному участнику). На каждом образце каждому участнику нужно было провести измерения по собственной методике и выдать заключение с указанием координат и типа заложённого дефекта, его высоты, протяженности, амплитуды сигнала и отношения сигнал/шум. Затем на совместной встрече результаты АУЗК были представлены и сопоставлены с паспортными данными.

Ниже приведено краткое описание методики АУЗК разработанной в ООО «НПЦ «ЭХО+», описание особенностей тест-образцов ИТЭР, приведены некото-

рые результаты контроля и выводы по завершённой работе.

Описание методики

Методика АУЗК аустенитных сварных соединений толщиной 60 мм разрабатывалась в НПЦ «ЭХО+» с 1996 года в рамках проекта ИТЭР [2]. Используются схемы контроля совмещенными пьезопреобразователями (ПЭП) с углами ввода 45° и 60° на частоте 2,5 МГц двумя типами волн (два элемента объединены в одном корпусе) – продольной (далее по тексту обозначается L) и поперечной (далее по тексту обозначается S). При этом ПЭП с углом ввода 45° в первую очередь предназначены для контроля нижней части шва, а с углом ввода 60° – верхней. Кроме того, при снятом валике усиления выполняется контроль прямым ПЭП на частоту 1,8 МГц. Схема сканирования ПЭП с углом ввода 45° приведена на рис. 2, где показан только ПЭП с одной стороны от шва. Шаги сканирования составляют $2 \div 4$ мм вдоль шва и 0,3 мм поперек шва, что позволяет получать изображение несплошностей в сварном шве и околошовной зоне методом акустической голографии, реализованном в системах серии «Авгур» [5] как метод проекции в спектральном пространстве (FT-SAFT, ПСП [6]) и метод синтезированной фокусированной апертуры (SAFT).

В рамках этой работы проводились эксперименты с новыми для данной методики схемами контроля:

– раздельно-совмещенный ПЭП головной волны на частоте 1,8 МГц;

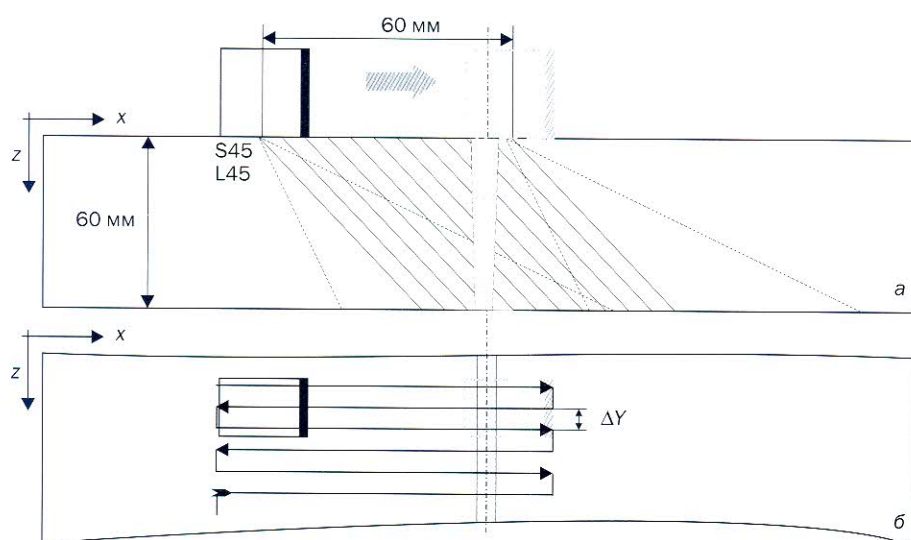


Рис. 2. Схема контроля нижней части шва по L45 и S45: перемещение ПЭП поперек (а) и вдоль шва (б); схематично обозначена контролируемая часть шва; $\Delta У$ – шаг продольного сканирования

Табл. 1 Обобщенные результаты АУЗК образцов сварных швов ИТЭР

Деятельность	Система, с помощью которой проводились измерения	Наименьшие размеры обнаруживаемых дефектов	Точность определения размеров дефектов	Заключение
1997 – 2001 НПЦ «ЭХО+» АУЗК шести аустенитных образцов толщиной 40 – 55 мм	«Авгур 4.2 ИТЭР»	Плоскостные дефекты в шве 5×2 мм; Отверстия бокового сверления $\varnothing 3$ мм; Пропилы в корне шва 20×1 мм	Точность измерения высоты (сдвиговые волны) $\pm 1,8$ мм; Точность измерения высоты (продольные волны) $\pm 2 - 3$ мм	Разработана и апробирована двухмодовая методика контроля с когерентной обработкой данных
2000 Япония, г. Токай АУЗК сварных соединений (толщиной 40-45 мм) модели одного сегмента вакуумной камеры	«Авгур 4.2 ИТЭР» с манипулятором фирмы Boeing	Непровары и шлаковые включения высотой $\leq 2,5$ мм, длиной 5 мм	Точность измерения высоты не хуже ± 2 мм	В корневой части шва обнаружено значительное количество непроваров и некоторое количество точечных дефектов
2004 – 2005 НПЦ «ЭХО+» АУЗК образца с двумя швами (стыковая накладка)	«Авгур 4.2 ИТЭР», «Авгур 5»	Шлаковые включения, непровары и пропилы в корне шва 10×3 мм	Точность измерения протяженности ± 10 мм; точность измерения высоты $\pm 1,8$ мм	Предложена методика контроля стыковой накладки (splice plate). Показана возможность УЗК одного сварного соединения при прохождении ультразвука сквозь другое
2006 – 2007 НПЦ «ЭХО+» АУЗК пяти тест-образцов	«Авгур 5»	Плоскостные дефекты в шве 5×5 мм; отверстия бокового сверления $\varnothing 2$ мм; пропилы в корне шва 25×1 мм	Точность измерения протяженности ± 6 мм; точность измерения высоты $\pm 1,9$ мм	Предложены дополнения к методике контроля аустенитных сварных соединений с узкой разделкой (TIG NG). Методика контроля дополнена схемами TOFD, ТАНДЕМ и ПЭП головной волны

- 45 и 60° двухмодовые ПЭП с узким импульсом (относительная полоса частот > 100 %) на частоте 2,5 МГц;
- схема ТАНДЕМ45 с когерентным восстановлением изображений;
- схема TOFD60 с когерентным восстановлением изображений.

Все применяемые схемы контроля представлены в табл. 2.

На рис. 3 показаны схемы, введенные в методику АУЗК в дополнение к уже применяемому двухмодовым ПЭП. Схема TOFD60 реализует дифракционно-

временной и зеркально-теневой методы с использованием пары преобразователей, расположенных по разные стороны от оси сварного соединения. Используются те же ПЭП, что и при проведении АУЗК по совмещенной схеме. Выполняется когерентная обработка полученных данных методом SAFT.

Схема TANDEM45 – это разновидность эхо-зеркального метода, когда выполняется анализ акустических импульсов, зеркально отраженных от донной поверхности и границы дефекта. Метод

основан на применении двух наклонных преобразователей, синхронно перемещающихся вдоль приемной апертуры. Один из преобразователей используется для излучения, другой – для приема ультразвуковых колебаний. В сочетании с восстановлением изображений методом SAFT такая схема контроля позволяет выявлять вертикально ориентированные дефекты [7].

Методика заключается в выполнении АУЗК системой «Авгур 5» по указанным схемам контроля с двух сторон шва, когерентной обработке данных с получением высококачественного изображения, размеривании дефектов и определении их типа при совместном анализе данных, полученных по всем схемам.

Описание образцов ИТЭР

Образцы из аустенитной стали SS316L(N) ITER-IG представляют собой две пластины толщиной 60 мм, сваренные аргодуговой сваркой при помощи шва с узкой разделкой (наклон разделки менее 10°, ширина разделки в верхней части шва 10 мм; рис. 7). Каждый образец обладает своими особенностями, влияющими на проведение контроля (рис. 4 – 6), в частности:

- образец имеет провисание корня шва высотой до 3 мм;
- образец сварен из двух пластин под наклоном друг к другу (5° от горизонтали), что моделирует реальное сварное соединение Splice Plate (стыковая накладка) и изменяет угол падения ультразвука на разделку шва;
- в образце имеется заложенный частичный недовар шва (от корня наварено 17 мм при высоте шва 60 мм) по длине 80 ÷ 90 мм;
- в нижней части образца имеется провисание корня усиления высотой 1 ÷ 2 мм и шириной около 6 мм;
- образец был сварен с нарушением технологии сварки, что вызвало недопустимое состояние корня шва и привело к необходимости переваривать

Табл. 2. Схемы контроля аустенитных сварных соединений толщиной до 60 мм

ПЭП	Эффективная частота, МГц	Угол ввода в аустенитную сталь, град	Тип волны	Обозначение схемы контроля
LS2.5D45	2,5	43	L	L45
			S	S45
LS2.5D60	2,5	56	L	L45
			S	S45
L1.8D0	1,8	0	L	ПРЯМОЙ
2Н1.8R	1,8	Головная волна	L	HEADWAVE
LS2.5D45/LS2.5D45	2,5	43	L	ТАНДЕМ45
LS2.5D60/LS2.5D60	2,5	56	L	TOFD60

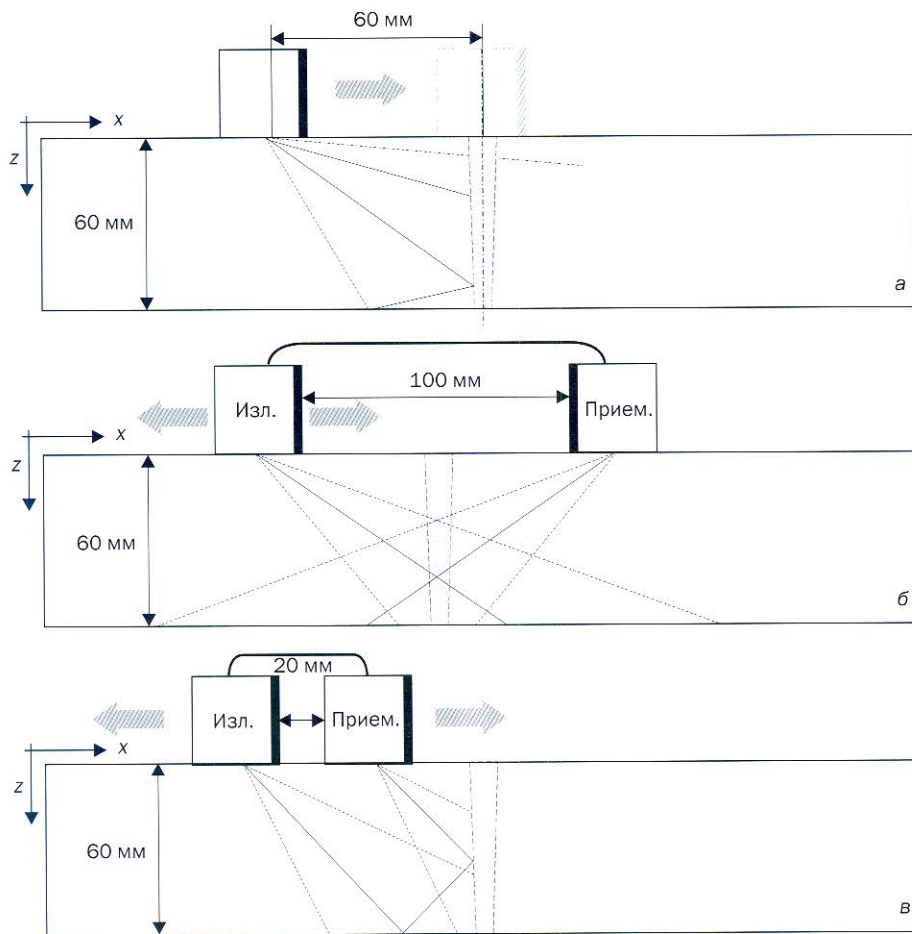


Рис. 3. Схемы контроля: а – головными волнами (HEADWAVE); б – TOFD60 на продольных волнах (показаны излучатель и приемник в одном из положений при сканировании поперек шва); в – ТАНДЕМ45 на продольных волнах (показаны излучатель и приемник в одном из положений при сканировании поперек шва). Схематично обозначена контролируемая часть шва по каждой из схем контроля

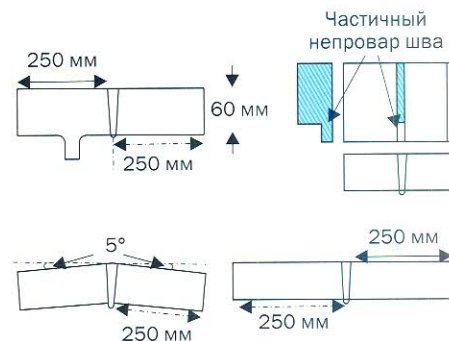


Рис. 4. Образцы ИТЭР для программы кругового обмена. Показаны особенности конструкции образцов

зону корня шва, таким образом, образец имеет два валика: с внешней и с внутренней стороны;

- образец имеет симуляцию ребра жесткости с одной стороны;
- в образце отсутствует металл в верхней части шва на протяженности около 20 мм.

В образцах заложены следующие типы дефектов:

- отверстия бокового сверления диаметром 2 мм для настройки чувствительности;
- электроэрозионные пропилы (придонные и приповерхностные) размерами от 10 × 1,5 до 20 × 10 мм;
- внутренние дефекты:
 - электроэрозионные пропилы;
 - трещины затвердевания;
 - термические усталостные трещины;
 - объемные дефекты (типа непроваров).

В целом АУЗК указанных сварных соединений осложняется несколькими факторами:

- аустенитный шов обладает сложной кристаллитной структурой, что вызывает повышенное затухание ультразвука, высокий уровень структурных помех и возникновение рефракции ультразвукового пучка;
- геометрические отражатели в корне и валике шва зачастую маскируют сигналы от дефектов;
- узкая разделка шва затрудняет выявление самых опасных дефектов – вертикально ориентированных продольных трещин;
- конструкция вакуумной камеры предполагает ограничение в размещении ПЭП до пределов ± 90 мм от центра шва.

Результаты контроля

На основании анализа обобщенных результатов АУЗК четырех образцов по программе round-robin test (круговой обмен) было определено следующее.

- В четырех образцах по программе кругового обмена выявляемость со-

ставила 95 % от общего количества заложенных дефектов (выявлено 47 из 50 дефектов), при этом:

- термическая трещина размерами 5 × 2 мм, расположенная у поверхности на кромке шва, не была выявлена из-за низкого отношения сигнал/шум, однако, индикации от этого дефекта хорошо различимы на растровом изображении при анализе трехмерной картины распределения амплитуд;
- дефект, расположенный непосредственно под областью частичного провара шва, не описан в заключении, так как эта область не принималась во внимание при написании заключения; однако, дефект выявляется с отношением сигнал/шум около 10 дБ;
- объемный дефект высотой 3 мм не был выявлен из-за низкого отношения сигнал/шум по причине малого размера дефекта.
- Среднее значение абсолютной ошибки измерения высоты дефекта составило 1,9 мм (рис. 9)*.



Рис. 5. Образец с пластинами, сваренными под углом 5°

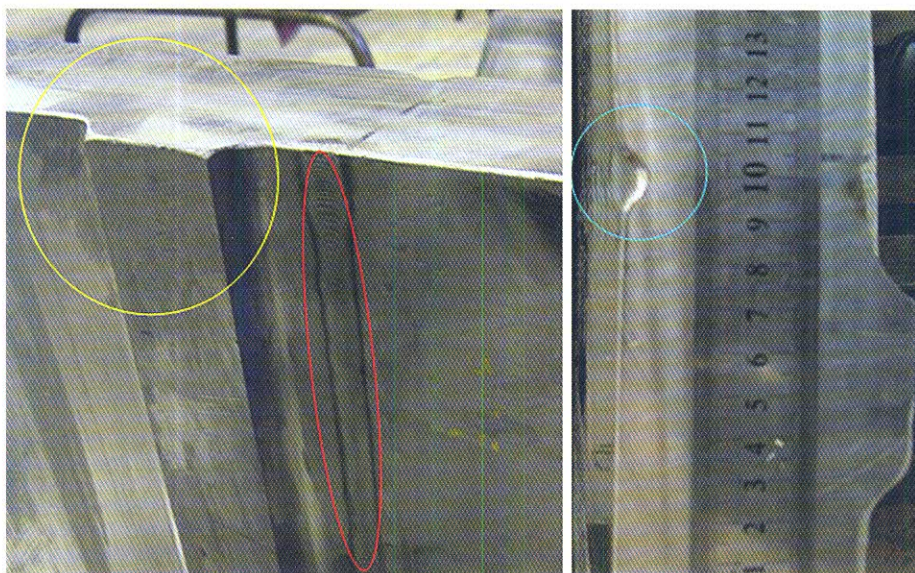


Рис. 6. Один из образцов: красный овал – дополнительный валик шва в нижней части; голубой овал – отсутствие металла в области шва; желтый овал – фрагмент ребра жесткости

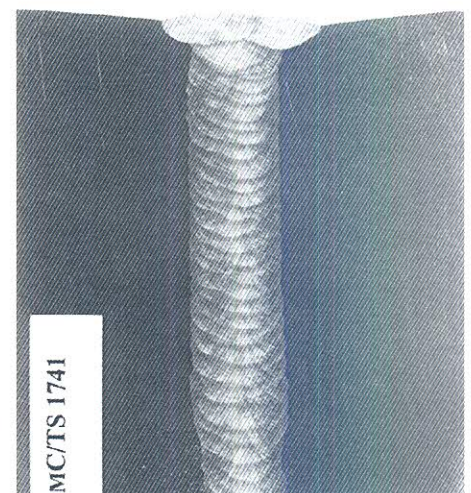


Рис. 7. Фотография шлифа шва открытого для всех участников образца после сварки и до зачистки поверхности (по данным TRUEFLAW). Показана форма разделки шва и структура многопроходного заполнения шва

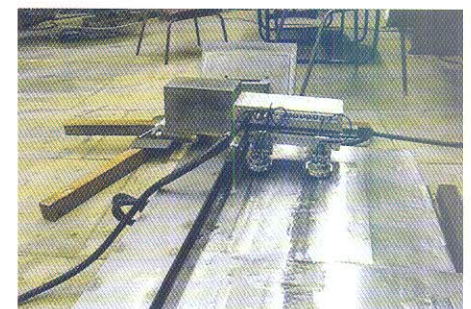


Рис. 8. Сканер системы «Авгур 5» при выполнении АУЗК образцов ИТЭР

- Среднее значение абсолютной ошибки измерения протяженности дефекта составило 6 мм.
- Отношение сигнал/помеха для выявленных дефектов составило в среднем около 12 дБ.
- Наименьшие по размерам обнаруженные дефекты (из заложённых изготовителем):
 - приповерхностный пропил 20 × 1,5 мм;
 - приповерхностный пропил 5 × 3 мм;
 - внутренний плоскостной дефект 5 × 5 мм;
 - внутренний дефект 10 × 3 мм.
- Наименьшие по размерам дефекты, обнаруженные при прозвучивании сквозь шов (при воссоздании ситуации с односторонним доступом ко шву):
 - внутренний плоскостной дефект 5 × 5 мм;
 - приповерхностный пропил 15 × 2 мм;
 - приповерхностный пропил 15 × 3 мм.
- Выявление дефектов сквозь шов возможно, но дефекты высотой менее 4 мм, расположенные с противоположной стороны от шва, могут быть пропущены.
- Конструктивное ограничение зоны сканирования ± 90 мм вдоль оси X может быть удовлетворено без ухудшения результатов АУЗК.
- Для контроля сварных швов в пластинах, сваренных под углом, не требуется дополнительных технических решений или новых схем контроля.
- Возможен контроль частично проваренного шва, выявляются внутренние и выходящие на поверхность дефекты под недоваренной областью.

- Области с повышенным структурным шумом в основном металле могут сделать контроль затруднительным или невозможным. Описание таких областей должно быть внесено в заключение.
- Валик усиления шва на нижней поверхности препятствует выявлению пропилов высотой, равной высоте валика усиления, если пропил находится в самом валике.
- Сигналы, полученные по схеме «САМОТАНДЕМ» [8] (с отражением от дна и вертикального дефекта с трансформацией типа волны) полезны для выявления дефектов и определения их типа на ровной донной поверхности.
- Схема TOFD60 облегчает решение задачи выявления и классификации дефектов и позволяет уточнять высоту дефекта по его тени.
- Выявлено значительное число дефектов, не описанных в паспортах

изготовителя. Необходимы металлографические исследования для выявления причин обнаружения этих дефектов.

Примеры изображений дефектов

Далее приведены некоторые характерные изображения дефектов, полученные по различным схемам прозвучивания в проконтролированных образцах. На рис. 10 показаны изображения отверстий бокового сверления в центре и по кромке сварного шва, полученные по схеме L60. На рис. 11 показано трехмерное изображение приповерхностных пропилов по схеме L60, показан пример измерения высоты дефекта. На рис. 12 показано трехмерное изображение, на котором визуализируются изображения отверстий бокового сверления в торце образца и незаполненный по паспорту дефект сложной формы.

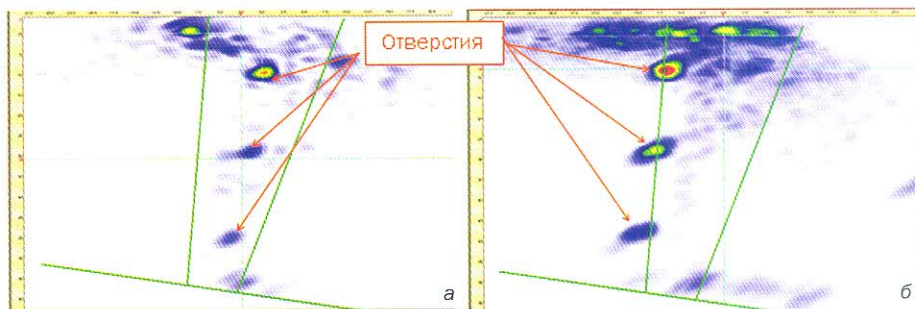


Рис. 10. Схема контроля L60: а – три отверстия бокового сверления Ø2 мм в центре сварного шва; б – три отверстия бокового сверления Ø2 мм на кромке сварного шва (наложена маска сварного шва)

* К сожалению, высокая стоимость образцов не позволила выполнить разрезку образцов и провести металлографические исследования. В результате некоторые спорные результаты, представленные в заключениях, невозможно точно проверить, сравнение выполнялось только с априорными паспортными данными.

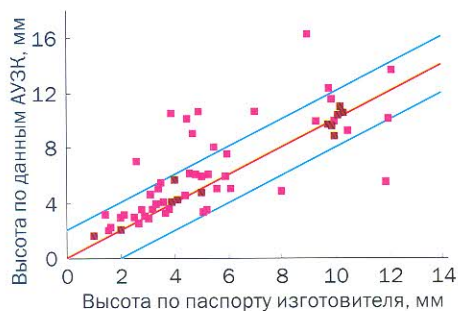


Рис. 9. Точность определения высоты дефектов по данным АУЗК: красная прямая – паспортные данные; ■ и □ – высота по результатам контроля образцов ground-robin test и «открытого» образца соответственно; голубыми прямыми показан «коридор» точности ± 2 мм

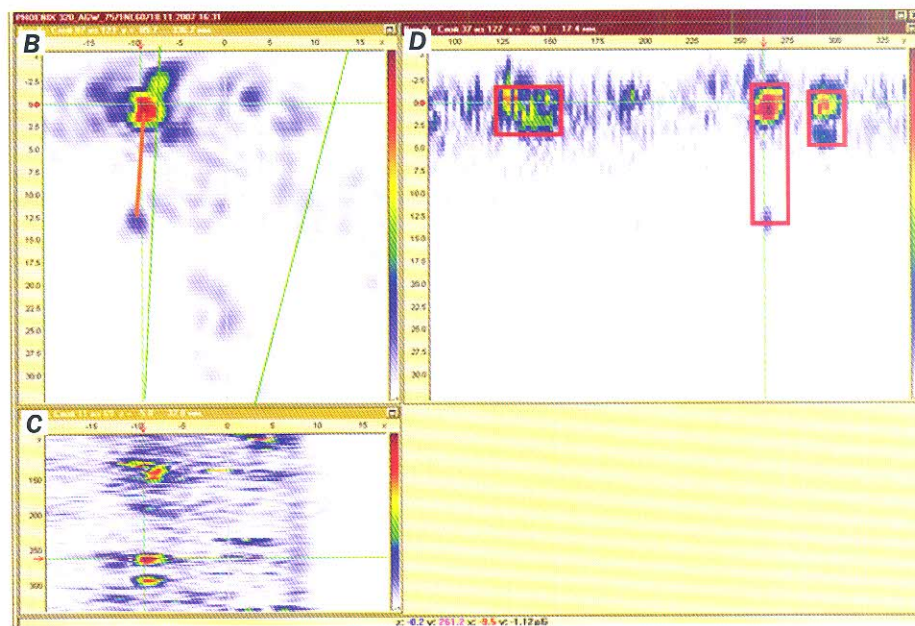


Рис. 11. Схема контроля L60: B-, C- и D-виды трехмерного изображения. Показаны результаты измерения размеров приповерхностных пропилов у кромки шва. У среднего пропила хорошо различимы сигналы от корня и вершины

Выводы

Выполнен АУЗК тест-образцов аустенитных сварных соединений вакуумной камеры в рамках проекта ИТЭР. Составлена сводная таблица по всем выявленным дефектам со сравнением с паспортными данными, проведен анализ особенностей схем контроля.

Проанализированы результаты АУЗК по ранее используемым схемам и новым, внедряемым в методику:

- ПЭП головной волны показывает наилучшие результаты по количеству выявляемых дефектов за счет стопроцентного прозвучивания всей толщины шва, однако, обеспечивает недостаточную точность определения высоты дефектов;

- схема ТАНДЕМ45 дает возможность определить тип дефекта и визуализировать тело плоских вертикально ориентированных дефектов [7];

- схема TOFD60 с когерентной обработкой полученных данных позволяет отличать внутренний придонный дефект от придонного дефекта, выходящего на поверхность, и оценивать высоту подобных дефектов по длине тени;

- ПЭП с узким импульсом показывают наилучшие результаты среди всех схем контроля по отношению сигнал/шум, что ожидаемо, поскольку это отношение в материале со структурным шумом обратно пропорционально длительности импульса [8].

Показана возможность выявления и определения размеров дефектов по типам в аустенитных сварных соединениях с узкой разделкой. Сформулирован ряд признаков, позволяющих выполнить классификацию дефектов по типам (местонахождение относительно шва, относительно поверхности, плоскостной или объемный характер дефекта).

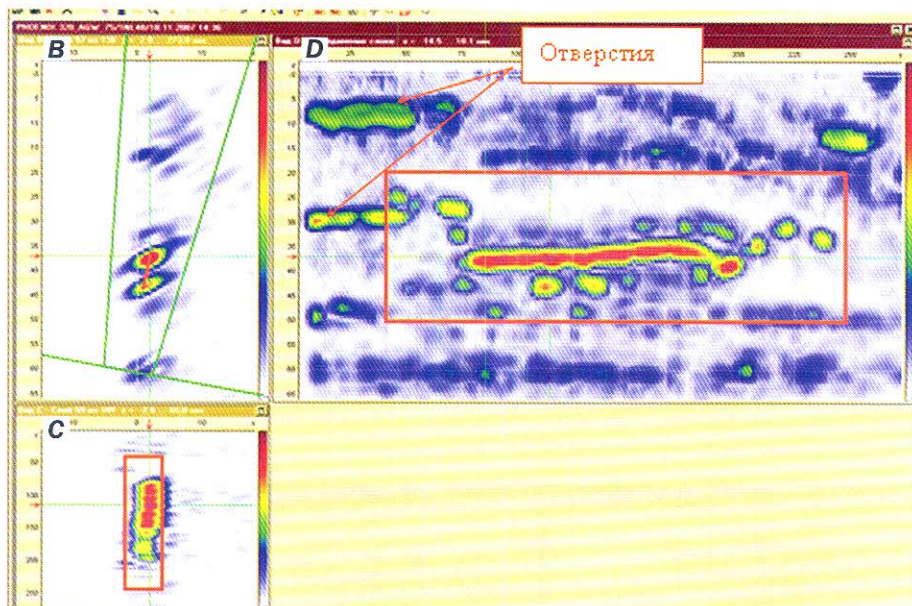


Рис. 12. Схема контроля L45: B-, C- и D-виды трехмерного изображения, режим сложения всех слоев на D-виде. Оранжевым прямоугольником отмечен незаложенный по паспорту дефект сложной формы. Показано измерение высоты в одном B-слое

Система «Авгур 5» с применением реализованной методики АУЗК позволяет проводить НК деталей вакуумной камеры ИТЭР в процессе изготовления деталей и монтажа.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП НИИЭФА Ю. Л. Утину и Е. Г. Кузьмину за оказанную помощь в подготовке публикации.

Литература

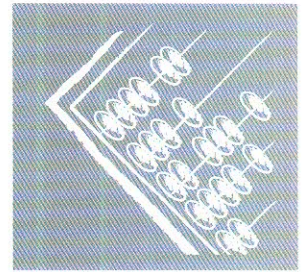
1. Grebennikov V., Badalyan V., Grebennikov D., Vopilkin A. Comparative Analysis of the Ways to Increase Signal to Noise Ratio at NDT Inspection of Austenitic Welds. – In: Proceedings of 15th WCNDT. – Rome: 2000.
2. Grebennikov V., Vopilkin A., Grebennikov D., Krylov V. Ultrasonic two-mode testing of austenitic welded joints of vacuum vessel of thermonuclear reactor ITER. – In: 8th ECNDT/Technical Papers (on CD, 448.pdf). – Barcelona: 2002.
3. Гребенников В. В., Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х., Гребенников Д. В. Голографические методы УЗК аустенитных сварных швов. – В мире НК. 2001. № 4(14)ю С. 36–38.
4. Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х., Тихонов Д. С. Новый подход к ультразвуковому автоматизированному неразрушающему контролю ответственных сварных соединений. – Контроль. Диагностика. 1999. № 10. С. 23–31.
5. Тихонов Д. С., Штерн А. М., Ромашкин С. В. и др. Пятое поколение систем автоматизированного ультразвукового контроля «Авгур». – В кн.: XVII Российская науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика» / Тезисы докладов. – Екатеринбург: ИМАШ Уро РАН, 2005. с. 92.
6. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. – Акустический журнал. 1988. Т. 34. № 2. С. 222–231.
7. Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Коваль Д. А. Применение схемы ТАНДЕМ для восстановления вертикально ориентированных трещин методом SAFT. – Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 13–26.
8. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Ультразвуковой контроль. – В кн.: Неразрушающий контроль/Справочник / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2009. № 4(46). С. 30–35

Economic Efficiency of Holographic Automated Complex Application

A. Kh. Vopilkin

High economic efficiency of new technology and holographic equipment realized in Augur systems are shown by several examples. An economic benefit is added up by shortening of expensive and responsible equipment idle time and reduction of the equipment repair cost. The benefit can amount to scores of millions of rubles per one object, whereas its operational reliability is not only decreases but in some cases essentially rises.



ПРИМЕРЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Как отмечалось в предыдущих статьях этого сборника, автоматизированные комплексы серии «Авгур» обладают двумя важными для практики технической диагностики функциональными особенностями, позволяя осуществлять как традиционный автоматизированный контроль с определением эквивалентных и условных размеров дефектов, так и измерительный контроль с определением типов дефектов и их реальных размеров.

Позитивные свойства традиционного автоматизированного контроля хорошо известны. Это и высокая производительность, и объективность, и достоверность контроля, и получение документа о результатах, возможность реализовать многочисленные методики контроля и многое другое. Основная область применения традиционного контроля – это процессы изготовления и монтажа оборудования. Экономическая эффективность применения традиционных автоматизированных комплексов хорошо известна и в данной статье не рассматривается.

Измерительный контроль, основанный на голографических алгоритмах обработки сигналов, чаще всего применяется при периодическом эксплуатационном

контроле ответственного оборудования. Дело в том, что в процессе эксплуатации неизбежно образуются новые дефекты. Эквивалентные и условные размеры не дают представления о степени их опасности и об остаточном ресурсе оборудования. Именно эксплуатационный измерительный контроль позволяет получить наибольший технико-экономический эффект за счет:

- уменьшения объема необоснованного ремонта (как правило, не менее, чем в 10 раз);
- уменьшения экономических потерь, связанных с простоем дорогостоящего оборудования;
- создания новых технологий контроля ранее не контролируемых объектов, например, аустенитных и композитных сварных соединений, каких множество в атомной энергетике;
- возможности оценивать остаточный ресурс и управлять этим ресурсом, обосновывая эксплуатационные нормы на контроль.

Приведем несколько примеров экономической целесообразности применения измерительного голографического контроля.

Положительный экономический эффект, при прочих равных условиях, возникает в двух случаях: во-первых, при сокращении затрат (экономии ресурсов) и, во-вторых, при росте объема производства. В приведенных ниже примерах для упрощения расчета экономии по затратам мы пренебрегли величиной затрат на проведение обследования и ремонта, необходимого по итогам обследования, как несоизмеримо малой по сравнению с величиной экономического эффекта.

Сварные соединения ДУ300 реакторов РБМК-1000

На реакторах РБМК-1000 имеется большое количество аустенитных сварных соединений диаметром 325 мм (около 1700 шт. на блок). В процессе эксплуатации блока в них неизбежно развиваются трещины. По традиционной методике, основанной на определении эквивалентных размеров дефектов, большая часть этих сварных соединений должна быть забракована и отремонтирована. При этом энергоблок должен находиться в ремонте многие месяцы. Именно так это было на одном из блоков Ленинградской АЭС. Отсюда – огромные убытки вследствие недовыработки электроэнергии. На основе данных о реальных размерах, полученных с использованием системы «Авгур 4.2», специалистами по прочности разработаны эксплуатационные нормы на дефекты, которые позволили проводить мониторинг развития трещин и в плановом порядке осуществлять ремонт. Время простоя энергоблока многократно сократилось. Самое главное – без снижения эксплуатационной надежности данных сварных соединений.

Экономический эффект складывается из:

- экономии на ремонте сварного шва, который оценивается в 300 тыс. руб. на одно сварное соединение. Ранее ремонту подвергалось около 1000 швов, т. е. затраты составляли $\mathcal{E}_1 = 300$ млн. руб. Многолетний опыт применения систем «Авгур» показал, что в год подвергается ремонту всего приблизительно 50 швов, а ремонт остальных растягивается на многие

Вопилкин Алексей Харитонович

Генеральный директор ООО «НПЦ «ЭХО+», д. т. н., профессор. Научные интересы: методы и средства определения параметров дефектов, разработка ультразвуковых автоматизированных систем с когерентной обработкой данных.

годы и осуществляется в пределах ежегодного планового ремонта. С момента применения измерительного контроля все станции перешли на плановый выборочный ремонт сварных соединений.

– сокращения потерь, связанных с простоем энергоблока вследствие ремонта сварных соединений. Энергоблок мощностью 1 млн. кВт/ч в результате простоя в течение не менее 6 месяцев недопроизводит электроэнергии примерно на $\mathcal{E}_2 = 1 \text{ млн. кВт} \times 24 \text{ ч} \times 180 \text{ дней} \times 0,4 \text{ руб./кВт} = 1728 \text{ млн. руб.}$

Таким образом, суммарный экономический эффект складывается из экономии на затратах на ремонт и увеличения выработки электроэнергии за счет сокращения времени простоя энергоблока и составляет $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 2028 \text{ млн. руб.}$ Еще раз оговоримся, что данный расчет не является точным, но показывает высокую эффективность применения голографических измерительных комплексов.

Входной контроль сварных соединений первого и второго контуров первого блока Волгодонской АЭС

В 1998 – 2000 гг. был выполнен обширный цикл работ по предпусковому УЗК сварных соединений трубопроводов первого и второго контуров I блока Волгодонской АЭС. В этих работах была наиболее полно реализована технология автоматизированного голографического контроля состояния сварных швов трубопроводов различных диаметров. По этой технологии было проконтролировано в общей сложности 1345 швов. По данным штатного контроля обнаружены несплошности в 264 сварных соединениях. При этом 173 из них были забракованы по результатам традиционного контроля (по нормам ПК 1514-72) и должны были подвергнуться ремонту. В результате измерительного голографического контроля и прочностных расчетов из 173 швов в ремонт было выведено всего 7, а остальные 166 – допущены в эксплуатацию на весь срок службы энергоблока. Ремонт 166 сварных соединений задержал бы пуск энергоблока на 4,5 месяца. Поэтому основной экономический эффект получен от предотвращения потерь, связанных с недопроизработкой электроэнергии в течение срока, пока длился бы ремонт, и составил 1341 млн. руб.

Десятилетний мониторинг допущенных в эксплуатацию сварных соединений показал правильность применения новой технологии. Ни один дефект за эти годы не развился и не увеличился в размерах.

Сварные соединения трубопроводов компрессорных станций ООО «Кавказтрансгаз»

В 2003 г. на трех компрессорных станциях ООО «Кавказтрансгаз» был выполнен АУЗК кольцевых сварных соединений на трубопроводах ГПА, ГМК, ПУ, абсорберов и выходных коллекторов с использованием системы «Авгур 4.2». Всего было проконтролировано 380 кольцевых сварных соединений, ранее забракованных по результатам штатного контроля. Все швы, содержащие недопустимые дефекты, были подвергнуты расчету на прочность. На основании этих расчетов даны рекомендации по дальнейшей эксплуатации проконтролированных сварных соединений.

В результате из 380 швов, подлежащих (при традиционном подходе) немедленному ремонту, по результатам измерительного контроля было выведено в ремонт всего 22 шва, а остальные сварные соединения требовали периодического АУЗК с различной периодичностью (от года до 4 лет). При этом у руководства компрессорных станций появилась обоснованная возможность планировать ремонт этих швов на длительный период.

Экономический эффект, также как и в предыдущих примерах, связан с сокращением расходов на ремонт сварных соединений и сокращением времени простоя экспортных газопроводов в течение достаточно длительных сроков. Данных по экономическому эффекту от сокращения простоя газопровода у нас отсутствуют, но даже на одном ремонте он составляет 200 – 250 млн. руб.

Контроль тройников магистральных газопроводов

На магистральных газопроводах на всем их протяжении имеются перемычки между нитками примерно через каждые 20 км. Перемычки ввариваются в магистральный трубопровод через тройники сварные с накладками (ТСН). В масштабах России таких ТСН насчитывается более 20 тыс. Опыт их эксплуатации показал, что для них характерна повышенная вероятность появления трещин и разрывов трубопроводов.

Оказалось, что, из-за сложной конфигурации шва вварки перемычки в тройник, нет методов контроля этого шва в магистральной трубе. Поэтому на сегодняшний день принята следующая технология контроля: участок газопровода с ТСН перекрывается, весь газ на нем стравливается в атмосферу (а это в среднем 20 млн. кубометров), ТСН вырезается и контролируется всеми доступными методами. Если ТСН годен для дальнейшей

эксплуатации, его снова вваривают в магистраль. Если он признан не годным для эксплуатации, то его либо ремонтируют, либо заменяют на новый.

Предложенная специализированная автоматизированная голографическая система «Авгур-Т» обеспечила надежный контроль как самого шва, как и ТСН в целом. Поэтому сегодня отпадает необходимость в рассмотренной технологии. Экономический эффект складывается из нескольких составляющих:

- затраты на контроль одного тройника составляют в среднем 300 тыс. руб.;
- потери от необоснованной вырезки ТСН составляют только вследствие потери 20 млн. кубометров газа – 30 млн. руб. Все остальные потери, связанные с вырезкой ТСН, его диагностикой, ввариванием его снова в магистраль или заменой на новый составляют примерно 1,5 – 3,0 млн. руб. Опыт контроля по старой технологии показывает, что каждый второй тройник забракован ошибочно, и затрат на его ремонт можно избежать.

Таким образом, на один тройник суммарный экономический эффект с учетом потери газа составляет 16 – 18 млн. руб., а без учета стоимости газа – 1,2 – 2,7 млн. руб.

Заключение

Как показано на примерах, только на предприятиях двух отраслей (атомной энергетики и трубопроводного транспорта) самый значительный экономический эффект от внедрения новой технологии АУЗК получен за счет сокращения простоя технологического оборудования вследствие обоснованного уменьшения объема ремонта.

Немаловажным технико-экономическим показателем является то, что новая технология АУЗК позволила решить проблемы контроля ранее не контролируемых ответственных сварных соединений, предотвращая возможные аварийные ситуации и, как следствие, экономические затраты на ремонт и потери из-за простоя оборудования. В книге «Методы ультразвуковой дефектометрии металлов» – М.: Машиностроение, 2008 приведен ряд примеров ее реализации.

Статья опубликована в журнале «В мире НК». 2010. № 1(47)

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к юбилейному сборнику	3
А. Х. Вopilкин. Почему ультразвуковая автоматизированная голография?	5
В. Г. Бадалян, А. Х. Вopilкин. Оценка состояния и продление ресурса объектов с использованием АУЗК	8
В. Г. Бадалян, А. Х. Вopilкин. Мониторинг сварных соединений трубопроводов с использованием систем АУЗК с когерентной обработкой данных	12
В. Г. Бадалян, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов. Методология выбора структуры АУЗК для конкретной задачи	17
Д. С. Тихонов. Основные этапы АУЗК с определением размеров дефектов системами серии «Авгур»	20
С. В. Ромашкин, Д. С. Тихонов. Опыт применения системы «Авгур-Т» на объектах нефтегазовой отрасли промышленности	25
А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, Ю. Л. Гордеев, А. Г. Костылов, Д. С. Тихонов, А. М. Штерн. Мобильные измерительные системы АУЗК серии «Авгур»	30
В. Г. Бадалян, П. Ф. Самарин, Д. С. Тихонов. АУЗК сварных соединений оборудования АЭС с применением систем «Авгур 5.2»	38
Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов, О. О. Шнель Новая технология применения антенных решеток для АУЗК сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300	42
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	46
А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин, Д. С. Тихонов. Автоматизированная система для измерения параметров ультразвуковых пьезопреобразователей	50
А. Е. Базулин, Е. Г. Базулин, Д. А. Коваль, Д. С. Тихонов. Ультразвуковой контроль толстостенных аустенитных сварных соединений с узкой разделкой в рамках проекта ИТЭР	55
А. Х. Вopilкин. Примеры экономической эффективности применения голографических автоматизированных комплексов	61



ООО «НПЦ «ЭХО+»

УСЛУГИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ДИАГНОСТИКЕ



- † **Комплексный автоматизированный ультразвуковой контроль сварных соединений трубопроводов** с измерением реальных размеров дефектов и последующей оценкой остаточного ресурса объекта (с привлечением специалистов по прочности)
- † **Мониторинг развития эксплуатационных дефектов** в процессе эксплуатации объектов
- † **Ультразвуковой автоматизированный контроль сварных швов трубопроводов в процессе строительства** по действующим методикам и нормам оценки
- † **Ультразвуковой автоматизированный экспресс-контроль основного металла и продольных сварных швов трубопроводов**, например, в процессе переизоляции и ремонта газопроводов
- † **Разработка методик и технологии проведения АУЗК**

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

ВСЯ ПРОДУКЦИЯ СЕРТИФИЦИРОВАНА

**ПОЛНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОДУКЦИИ
И ПРИМЕРЫ РАБОТ ПРЕДСТАВЛЕНЫ
НА САЙТЕ КОМПАНИИ**



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ «ЭХО+»

20 ЛЕТ

В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ

АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ

ДЕФЕКТОМЕТРИИ

123458, Россия, г. Москва
ул. Твардовского, д. 8 стр. 1

ТЕХНОПАРК «Строгино»
ООО «НПЦ «ЭХО+»

Тел./факс: (495)780-92-50
Web-site: www.echoplus.ru

E-mail: echo@echoplus.ru