

Новые средства НК

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 автоматизированного УЗК 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 ультразву-

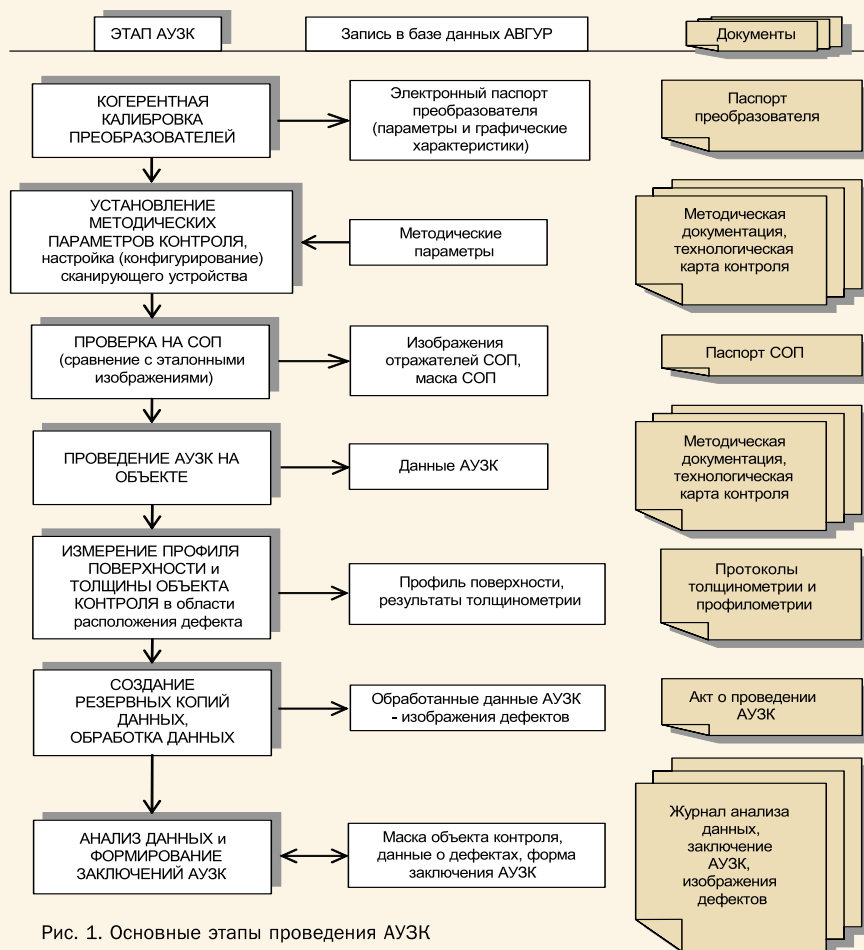


Рис. 1. Основные этапы проведения АУЗК системами серии «АВГУР»

Об авторе



Тихонов Дмитрий Сергеевич

Технический директор НПЦ «ЭХО+», г. Москва. Окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1987 г. Специалист в области разработки методического обеспечения автоматизированного УЗК и алгоритмов когерентной обработки данных с применением методов акустической голографии. Специалист II уровня по акустическим методам контроля.

ковых 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 слож-

ную 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], неровностей поверхности объекта контроля, точности настройки параметров аппаратуры и т. д. На преодоление этих особенностей, пре-

рой 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.

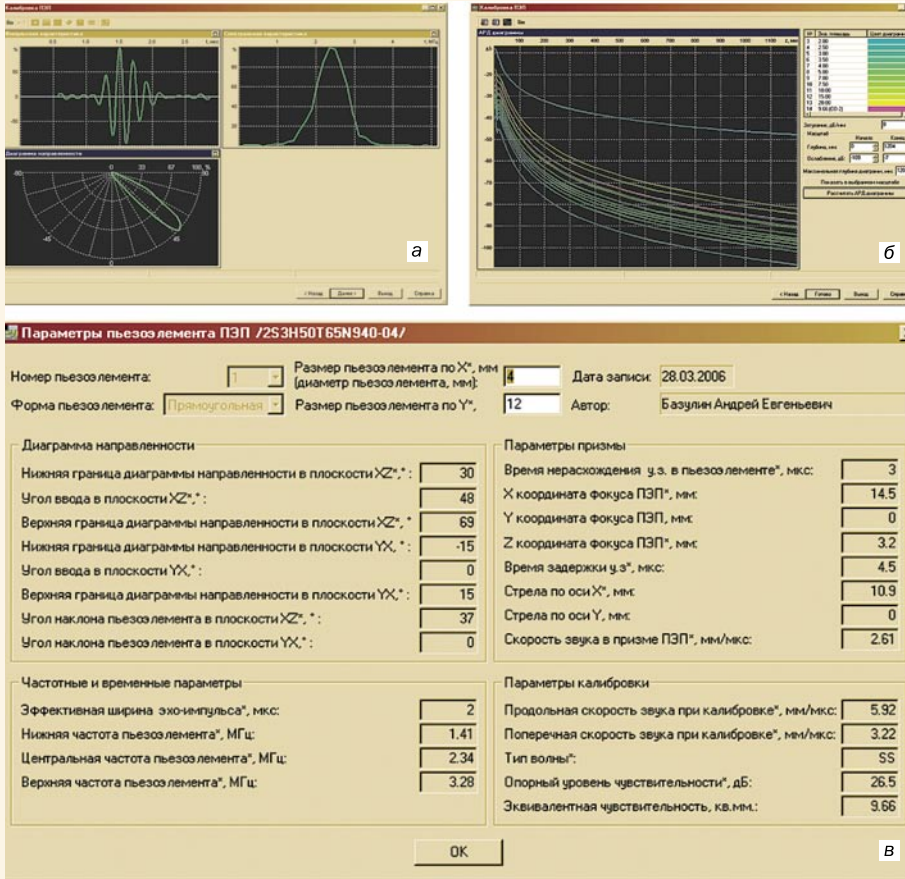


Рис. 2. Паспорт наклонного ПЭП: а – импульсная, спектральные характеристики ПЭП и диаграмма (импульсная) направленности; б – АРД-диаграммы ПЭП; в – числовые параметры ПЭП и калибровочного образца

небрежение 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 особенностями в сравнении с методами контроля, присутщими 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 (вто-

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 за-

ведомо известной областью пространственных частот (например, сигналов реверберационных шумов). Селекция выполняется для исключения сигналов 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 параметров 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 (f_c , f_L , f_U , f_0) определяются согласно [6]. Также в соответствии с [6] определяется относительная полоса частот (Δf_{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 формируется 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.

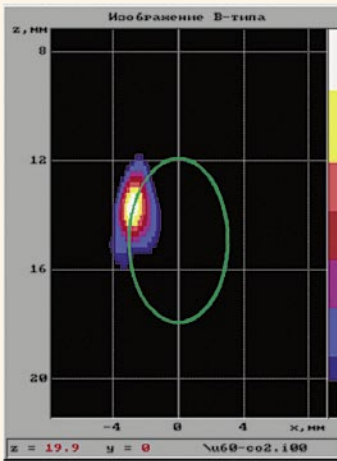


Рис. 3. Установка для автоматизированного УЗК листового проката «Север 6-08-2800» в ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

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, пропилов 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 типа и размера) производится по результатам измерительного контроля. На рис. 4 приведены изображения плоскостных дефектов в корне сварных соединений, полученные в поисковом режиме.

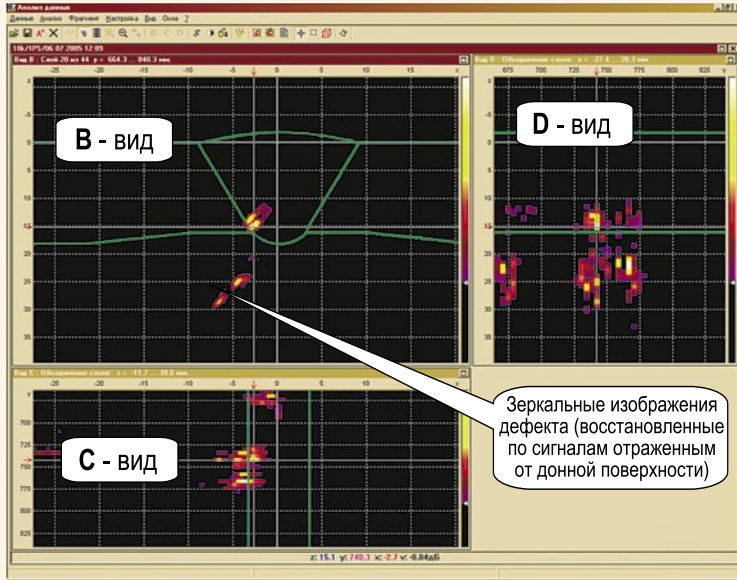


Рис. 4. Три сечения (вида) трехмерно изображения двух плоскостных дефектов, расположенных в корне сварных соединений: хорошо видны блики от трещины из корня шва и зеркальные блики от верхней части трещины (в нижней части В-вида); линиями обозначены контуры разделки сварного соединения

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

ны 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 парааксиальное приближение. Эти алгоритмы 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 «плохих» 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 визуализация исходных А-сканов, алгоритмы сверхразрешения, зеркальное отражение изображений, различные виды объединения изображений.

Для подтверждения факта контроля, фиксации отклонений от типовой формы

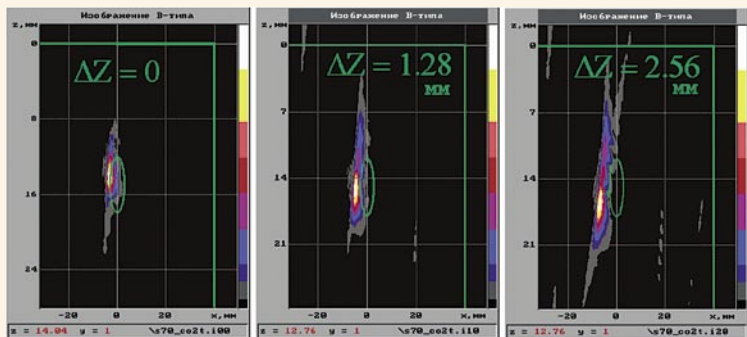


Рис. 5. Искажающее влияние неровностей поверхности: ΔZ – максимальная стрела выпуклости поверхности относительно исходной прямой линии

- 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.);

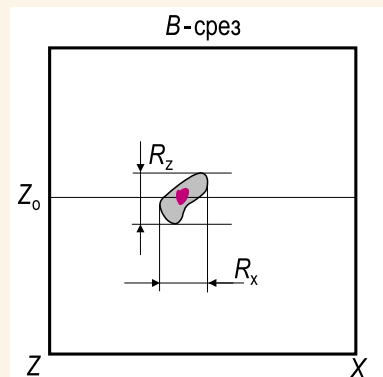


Рис. 7. Построение контура локализации несплошности

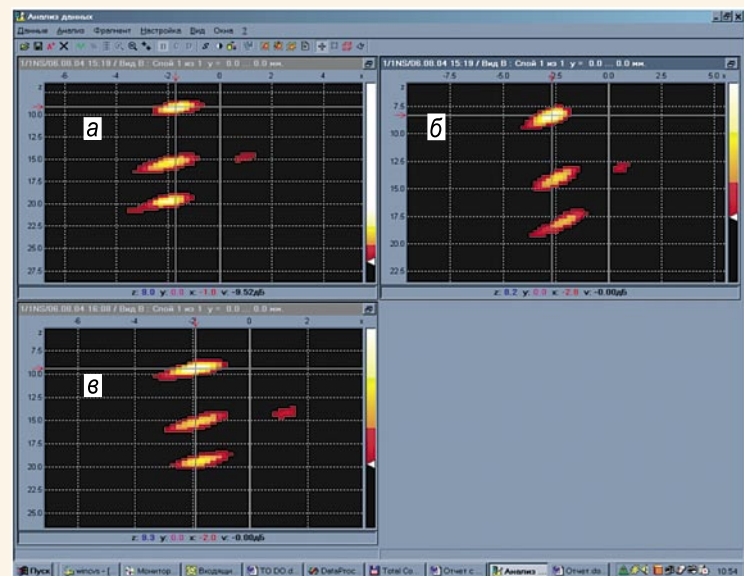


Рис. 6. Изображения отверстия бокового сверления для измерений с плоской поверхности (а) и с поверхности с прогибом (б); в – то же после коррекции

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 обрабо-

танные 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 контура локализации несплошности (или пятна на В-, С- и D-срезах), постро-

енные путем оконтуривания 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);

- многоэлементное изображение (коррозионные дефекты, трещины различного типа и т. д.);
- цепь, 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 ходу распространения ультразвуковых волн. На рис. 8 приведены данные поискового режима контроля с эффектом экранировки структурных шумов трещинами, расположенными в околошовной 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

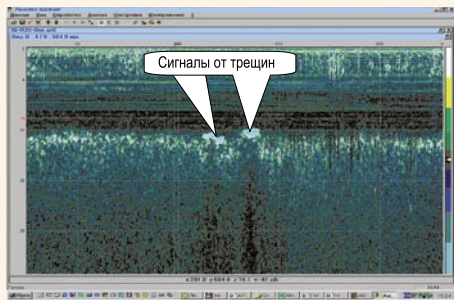


Рис. 8. Эффект экранировки структурных шумов в аустенитных сварных соединениях: видна полоса с пониженным уровнем шумовых сигналов из шва, расположенная ниже сигналов от трещин

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.

При анализе данных обзорного режима АУЗК, проведенного по всему периметру сварного соединения, хорошо заметен эффект перехода сигнала уголкового 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

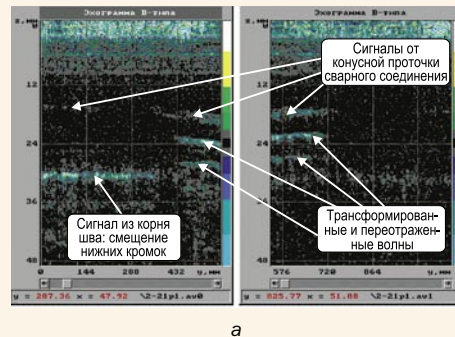
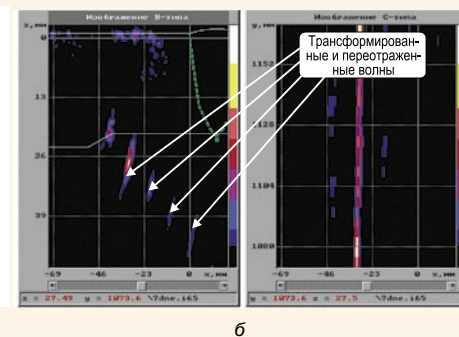


Рис. 9. Результаты поискового (а) и измерительного (б) режимов контроля при наличии трансформированных сигналов, образующихся на конусной проточке сварного соединения

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. «Неразрушаю-



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 большую 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.

щий 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 получена 19 июня 2006 г., в окончательной редакции – 26 июля