

Автоматизация оценки параметров дефектов в системах АУЗК с когерентной обработкой данных.

В.Г. Бадалян (*Научно Производственный Центр «ЭХО+»*)

Ультразвуковые методы контроля (УЗК) нашли широкое применение в промышленности. Одним из важнейших направлений развития УЗК являются автоматизированные системы. Использование таких систем дает хорошие результаты с точки зрения объективности обнаружения дефектов, определения их координат, условной протяженности и эквивалентных размеров [1,2]. Однако, этих данных недостаточно специалистам по прочности для надежного расчета рабочего ресурса контролируемого объекта [3]. Поэтому, в последнее время широкое распространение получили системы, использующие когерентную обработку данных [4 – 6]. Характерной их особенностью является возможность дополнительного определения реальной длины, высоты и, если это необходимо, профиля дефекта, осуществления мониторинга контролируемых объектов [7, 8]. Эта информация с учетом других характеристик, влияющих на прочность, используется при уточненном прочностном расчете ресурса работы сварного шва. Если по расчетам запас прочности таков, что имеется возможность дальнейшей эксплуатации – сварной шов допускается в работу оборудования. В противном случае – отправляется в ремонт.

При создании автоматизированных систем с когерентной обработкой данных необходимо решить две задачи: автоматизации сбора, регистрации и обработки данных и автоматизация оценки результатов контроля с определением реальных параметров дефектов.

Первая задача достаточно успешно решается, тогда, как решение второй задачи встречает ряд трудностей.

Оценка результатов контроля по изображениям состоит из нескольких ступеней:

- выделение в трехмерном изображении внутреннего объема контролируемого изделия отдельных элементов, относящихся к несплошности;
- определение координат несплошности;
- определение типа несплошности.

Необходимо отметить, что определение важности деталей изображения по особенностям поведения эхо – сигналов и изображений дефекта, их амплитуды, положения в шве и т.д., в значительной степени зависят от массы знаний, основанных на компетенции специалиста, осуществляющего контроль и оценивающего полученные резуль-

таты. Поэтому полная замена специалиста – эксперта, оценивающего результаты на основе некоторых правил и опыта, весьма сложна.

Вместе с тем, ряд признаков, характеризующих дефект, можно сформулировать, формализовать и использовать для определения параметров дефектов. Некоторые из них, характеризующие дефекты, весьма неопределенны, и их применение не представляется возможным. В настоящей работе это обстоятельство учитывалось использованием нечеткой логики. Весьма перспективным для автоматизации решения задачи классификации является применение нейросетевых алгоритмов [9].

Ниже будут рассмотрен метод, использующий основные, устойчивые признаки, характеризующие несплошность; для определения типа несплошности используется нечеткая логика.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НЕСПЛОШНОСТИ.

Определение параметров дефектов – типа, реальной длины и высоты дефектов выполняется при анализе акустического изображения внутреннего объема контролируемого объекта, полученного в результате когерентной обработки данных. При этом используются особенности таких изображений, являющиеся следствием принятой схемы регистрации данных контроля.

В системах Авгур регистрация эхосигналов при АУЗК осуществляется при двумерном сканировании ПЭП с целью получения трехмерного изображения с высоким разрешением в результате использования когерентных алгоритмов обработки данных с последующей оценкой параметров несплошности. По существу, только имея информацию о ее локализации в трехмерном пространстве, возможно надежное определение типа выявленной несплошности. При этом используется послойная регистрация данных (рис. 1), которая предполагает регистрацию эхосигналов в контролируемом объеме сварного шва (изделия) в виде набора слоев, каждый из которых представляет собой запись акустического поля в координатах X (перемещение преобразователя по координате X) – время. Здесь акустический преобразователь перемещается с малым шагом перпендикулярно сварному шву (ось X), перемещение вдоль сварного шва (ось Y) осуществляется с большим шагом Δh . Пространственное расстояние между слоями должно быть таково, чтобы слои можно было рассматривать как независимые. Однако, для увеличения достоверности контроля, обычно шаг Δh между слоями выбирается $\sim L/3$, где L – размер пьезоэлемента.

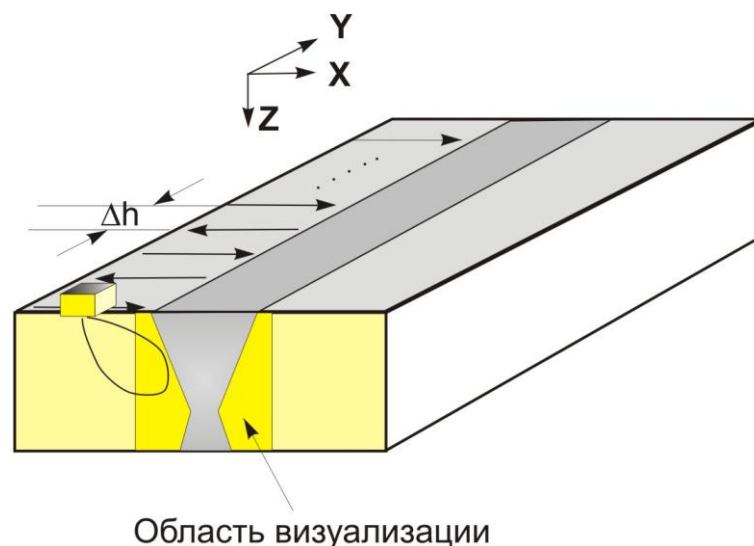


Рис. 1. Схема регистрации данных при контроле сварного шва в системе с когерентной обработкой данных Авгур.

В результате обработки данных формируется трехмерное изображение области сварного шва, состоящее из набора изображений В – типа с высоким разрешением порядка длины звуковой волны λ [7] по сечению шва (по осям X и Z), которое определяется когерентным восстановлением изображений. Изображения С – типа и D – типа, являясь комбинированными изображениями, имеют высокое разрешение по осям X, Z и низкое разрешение вдоль оси Y.

Для определения параметров несплошностей используются файлы трехмерных изображений, сформированных, как показано на рис. 1. В частности, такие изображения получают в результате когерентной обработки данных, зарегистрированных при измерительном режиме работы системы Авгур [7]; аналогичные изображения можно получить, используя приборы с фазированными антенными решетками.

Автоматизация оценки параметров дефектов по их изображениям разбивается на четыре этапа:

1 этап – предварительная обработка изображений.

Задачей этого этапа является минимизация описания анализируемого изображения набором признаков – повышение отношения сигнал/шум, подготовка данных для дальнейшего анализа.

2 этап – выделение совокупности элементов изображений, относящихся к несплошностям, на фоне помех.

Задачей этого этапа является выделение из совокупности «пятен», составляющих изображение, только группы «пятен», относящиеся к элементам несплошностей.

3 этап – оконтуривание несплошности и определение ее параметров.

4 этап – определение типа несплошности.

Задачей этого этапа является определение наиболее вероятного типа несплошности – непротяженная, протяженная, объемная, плоскостная, нитевидная; используя априорную информацию можно классифицировать дефекты более подробно.

Предварительная обработка изображений.

Эта обработка состоит в отсечке низкоамплитудного и высокоамплитудного шумов изображения, поиске локальных максимумов по всему изображению В - типа и построении контура равной интенсивности вокруг каждого локального максимума и их фильтрации.

Отсечка низкоамплитудного шума, связанного с акустическими шумами от структуры, выполняется за счет пороговой отсечки T на уровне

$$T=A+\sigma.$$

Здесь A – средняя интенсивность изображения, σ – его дисперсия.

Отсечка высокоамплитудного шума, связанного с наводками, импульсными помехами и другими артефактами, выполняется фильтрацией изображения с применением фильтра S , представляющего собой двумерную матрицу весов

$$S_k \equiv S_{xz},$$

определяющую изображение точечного источника, полученного соответствующим ПЭП, с отсечкой по уровню 0,7. Так как, размер фильтра несколько меньше, чем характерный размер элементов изображения, то применение данного фильтра позволяет сгладить детали изображения, с размерами существенно меньшими, характерного размера элемента изображения, а более крупные детали останутся.

При этом новое значение матрицы интенсивностей в точке j определяется выражением:

$$\tilde{A}_j = \frac{\sum_{k \in S} S_k A_k}{\sum_{k \in S} S_k},$$

где точка j соответствует геометрическому центру фильтра S . Результат этой операции присваивается центральной точке фильтра.

Таким образом, фильтрация заключается в последовательном перемещении фильтра по изображению на одну точку, взвешенном суммировании интенсивностей исходного изображения с весовыми коэффициентами фильтра и нормировании полученной суммы на сумму весовых коэффициентов.

На рис. 2 дан результат фильтрации изображения дефекта в сварном шве трубопровода из нержавеющей стали. Акустическая ситуация в таких изделиях характеризуется высоким уровнем структурных шумов как в самой области сварного шва, так и в околошовной зоне, где локализован рассматриваемый дефект. Белые контуры – разделка сварного шва.

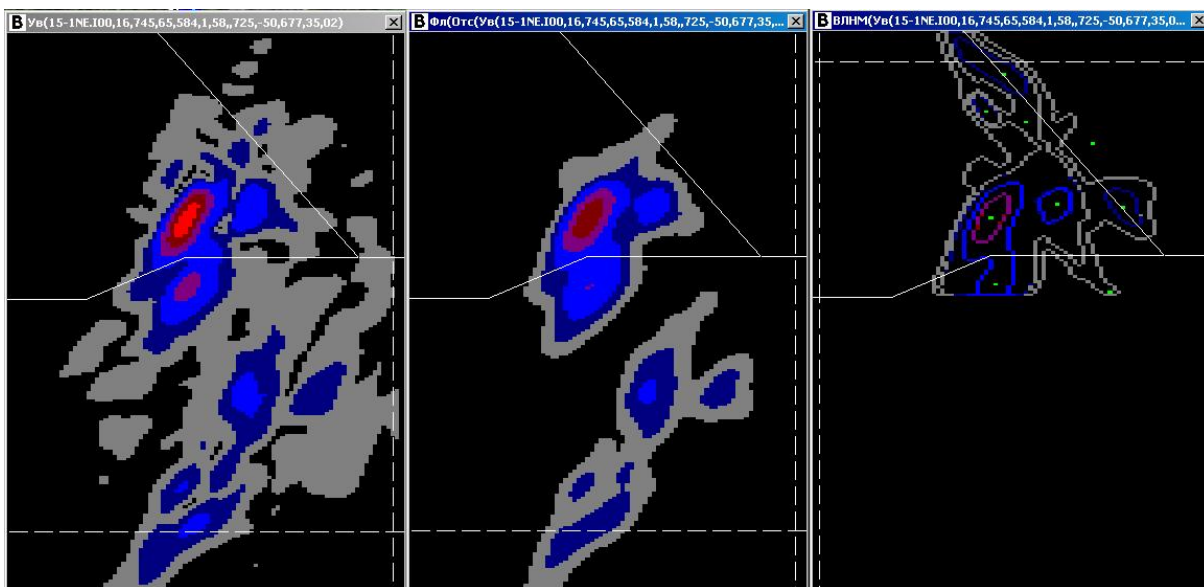


Рис. 2. Изображение дефекта в сварном шве до обработки – слева, после отсечки низкоамплитудного и высокоамплитудного шума – в центре, после учета отражения от внутренней поверхности сварного шва и нахождения локальных максимумов и двумерных контуров – справа. Белые сплошные линии – разделка сварного шва.

На рис. 2 (изображение в центре) хорошо видно, что полученное после такой обработки изображение в значительной степени «очищено» от шумов различной природы, что дает возможность иметь дело с относительно незначительным числом локальных максимумов, которые могут соответствовать локализации отражающей области, и соответствующих им двумерных контуров.

Поиск локальных максимумов.

Затем для каждой плоскости, формирующей фильтрованное изображение В-типа (плоскость XZ), выполняется поиск локальных максимумов. Для этого двумерная матрица весов фильтра S рассматривается как маска, определяющая, какие точки, попадающие в апертуру фильтра, участвуют в расчетах. Если расположить геометрический центр фильтра-маски в точке j , соседями данной точки j будут считаться те точки изображения, которым соответствуют ненулевые значения в матрице S . Когда интенсивность изображения в данной точке j больше или равна интенсивности изображения во всех её точках-соседях, считается, что такая точка является локальным максимумом

поля интенсивностей изображения. При этом интенсивность изображения в такой точке остается неизменной. Если же среди точек-соседей найдется хотя бы одна, в которой интенсивность больше, чем в точке j , то точка j не является максимумом в описанном выше смысле, и интенсивность в этой точке приравнивается нулю.

Построение двумерных контуров.

Для каждого максимума в данной плоскости строятся двумерные контура с интенсивностью, равной интенсивности изображения в точке с координатами локального максимума, умноженной на заданный относительный уровень.

Фильтрация двумерных контуров.

Из всей совокупности двумерных контуров оставляются контура, размеры которых по осям X и Z не превышают заданных размеров. Эта операция позволяет выделять только те изображения, которые хорошо сфокусированы в рассматриваемом объеме объекта, исключая тем самым, изображения, формируемые трансформированными волнами.

Результат работы алгоритма по поиску локальных максимумов, построению и фильтрации двумерных контуров приведен на рис. 2 (правое изображение). Здесь же учтено, что часть элементов изображения рис. 2 (левое изображение) и рис. 2 (центральное изображение) сформированы эхо-сигналами, отраженными от внутренней поверхности трубопровода.

Выделение совокупности элементов изображений, относящихся к несплошностям.

Дальнейшая обработка реализует набор логических правил, определяющих совокупность элементов изображений, относящихся к несплошности.

При этом считается, что если двумерные контура удовлетворяют изложенным ниже правилам, то они могут относиться к несплошностям:

- Размер каждого контура должен быть не менее 50% размера элемента разрешения (по X и по Z).

Заметим, что это правило выполняется почти всегда, но когда контура не удовлетворяют этому условию, они считаются «подозрительными» и в дальнейшем должны оцениваться экспертом.

- Контура, лежащие в соседних плоскостях (вдоль оси Y), координаты максимумов для которых отличаются меньше, чем на половину элемента разрешения по X и по Z , объединяются. При этом допускается возможность пропуска контуров в соседних 1-2 слоях (в каждую сторону), что связано с учетом возможного нарушения акустического контакта при регистрации данных.

В результате формируются трехмерные контура, элементы, которых принадлежат одной и той же несплошности. По существу, определение трехмерных контуров решает задачу выделения элементов несплошности из объема области сварного шва, подвергнутого УЗК.

На рис. 3 показан пример работы алгоритма выделения элементов несплошности для дефекта аустенитного сварного шва трубопровода диаметром 325 мм. Здесь приведены проекционные изображения, в которых все элементы трехмерного изображения отображены на плоскости XZ (проекционное изображение В-типа), на плоскости YZ (проекционное изображение D-типа) и на плоскости XY (проекционное изображение С-типа) – рис. 3а, рис. 3б и рис. 3в соответственно. Элементы изображения, относящиеся к различным трехмерным контурам, выделены различными цветами. Здесь же, на изображении В-типа, красными линиями схематично изображен дефект в виде ветвящейся трещины.

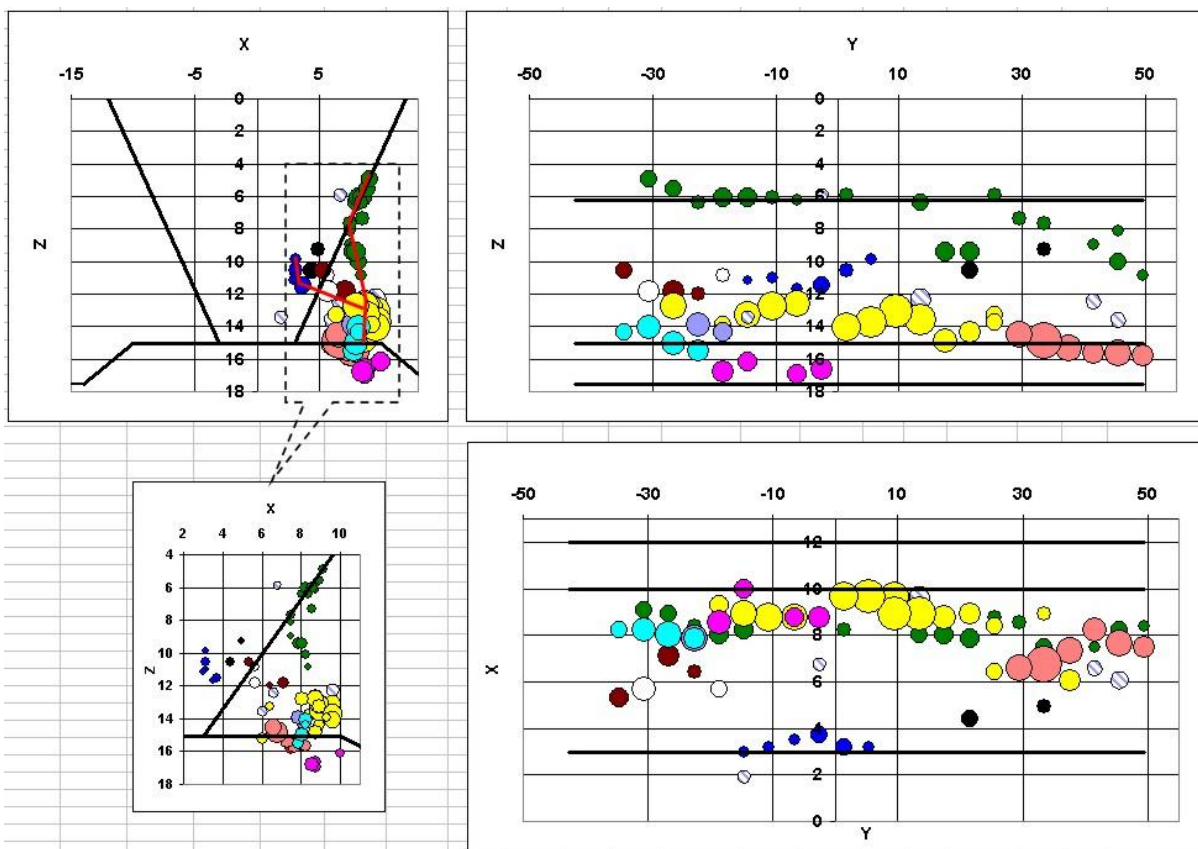


Рис. 3. Элементы несплошностей, выявленные после выполнения 2 этапа алгоритма: а – соответствует проекции максимумов всех контуров выделенной несплошности на плоскость XZ – плоскость поперечного сечения сварного шва; б – соответствует проекции максимумов всех контуров выделенных несплошностей на плоскость YZ – плоскость сечения вдоль сварного шва; в – соответствует проекции максимумов всех контуров выделенных несплошностей на плоскость XY. Здесь же приведена идеализированная разделка сварного шва (чёрные линии) и схематическое изображение дефекта (красные линии) на изображении В-типа.

Оконтуривание несплошности и определение ее параметров.

Когда определены трехмерные контура, достаточно просто выделить параметры. Однако здесь имеется проблема, связанная с тем, что среди всех контуров, выделенных программой, не все могут относиться к несплошности.

Во-первых, наличие геометрических отражателей, связанных с конструктивными особенностями контролируемого объема, дает высокоамплитудные отраженные сигналы и приводит к появлению трехмерных контуров после выполнения 2 этапа алгоритма автоматизации оценки параметров дефектов по изображению. Автоматическая фильтрация таких контуров возможна, когда имеется точная информация о геометрии контролируемого сварного шва. Однако реальный профиль сварного шва очень неточно соответствует конструкторской документации.

Во-вторых, на границе раздела двух сред с различным волновым сопротивлением всегда имеется отраженный сигнал, который часто наблюдается на изображении контролируемого сечения и выделяется программой в виде трехмерного контура. Поэтому очень полезным для определения параметров дефекта и выделения его контура в контролируемом объеме является наличие априорной информации о преимущественном характере дефектов (поверхностные или подповерхностные и т.д.). Это позволяет сформулировать ряд логических правил, позволяющих выполнить оконтуривание дефекта и определение его параметров.

Нами эти правила были сформулированы для коррозионных дефектов аустенитных сварных швов трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325 мм. В этих изделиях в подавляющем большинстве встречаются плоскостные поверхностные дефекты, которые растут от внутренней поверхности трубопровода и ориентированы вдоль границы сварной шов – основной металл. Кроме того, характерной особенностью таких дефектов является резкое изменение высоты дефекта по его длине.

Для получения контура несплошности необходимо определить верхнюю и нижнюю границы несплошности. Для этого используются реальные параметры H и h контролируемого сварного соединения (см. рис. 4), которые априорно известны по данным УЗ толщинометрии. При этом считается, что:

- Если все точки трехмерного контура имеют координату Z , удовлетворяющую неравенству $h - 1 \text{ мм} \leq Z \leq H$, то контур считается относящимся к "низу" несплошности;
- Если все точки трёхмерного контура имеют координату Z , удовлетворяющую неравенству $Z < h - 1 \text{ мм}$, контур считается относящимся к "верху" несплошности;

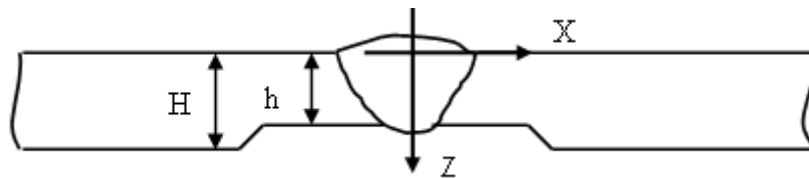


Рис. 4. Схема сварного шва, параметры которого h и H используются в рассматриваемом логическом алгоритме.

Результат работы рассмотренного алгоритма для плоскостной несплошности, изображенной на рис.3, представлен на рис. 5. Здесь приведено проективное изображение продольного сечения сварного шва. На сечение сварного шва спроецированы все точки, выделенные программой в области сварного шва длиной 120 мм (координаты Y развертки шва -60 мм – 60 мм). Точки, соединенные замкнутой линией, определяют контур плоскостного дефекта, выделенного алгоритмом определения параметров дефекта; точки, соединенные пунктирной линией являются проекцией на плоскость рисунка вершин ветви этого плоскостного дефекта (на рис.3 эти вершины отмечены синим цветом); отдельными точками отмечены «подозрительные» точки, которые удовлетворяют лишь части логических правил. Принадлежность этих точек к несплошности оценивает эксперт. В данном случае ни одна из них не принадлежит рассматриваемой несплошности. Число таких «подозрительных» точек обычно невелико, однако их необходимо оценить эксперту, потому что среди них могут встречаться точки, принадлежащие дефекту.

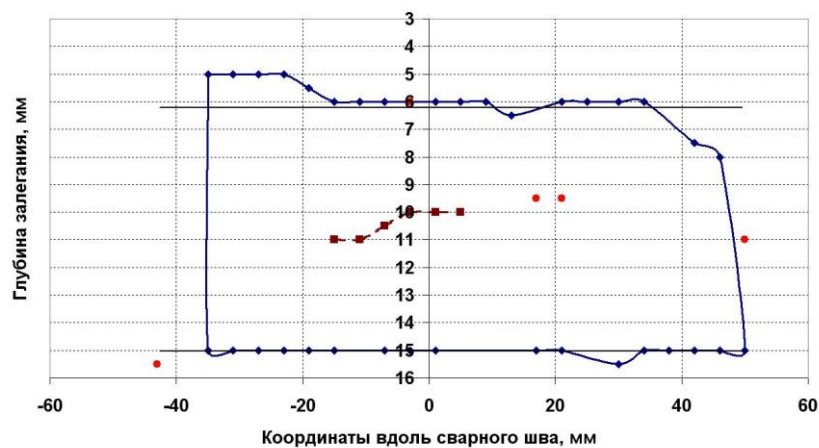


Рис. 5. Результаты автоматизированного определения профиля плоскостной несплошности, представленной на рис.3.

Сопоставление результатов расчетов, выполненных с применением описываемой программы и измерений профиля дефекта после разрушающих испытаний методом трехточечного изгиба, показало неплохое согласие. В частности, на рис. 6 даны результаты измерения профиля плоскостного дефекта в сварном шве, полученные по результатам разрушающего контроля и по данным АУЗК системой Авгур и обработанным с использованием рассмотренного алгоритма.

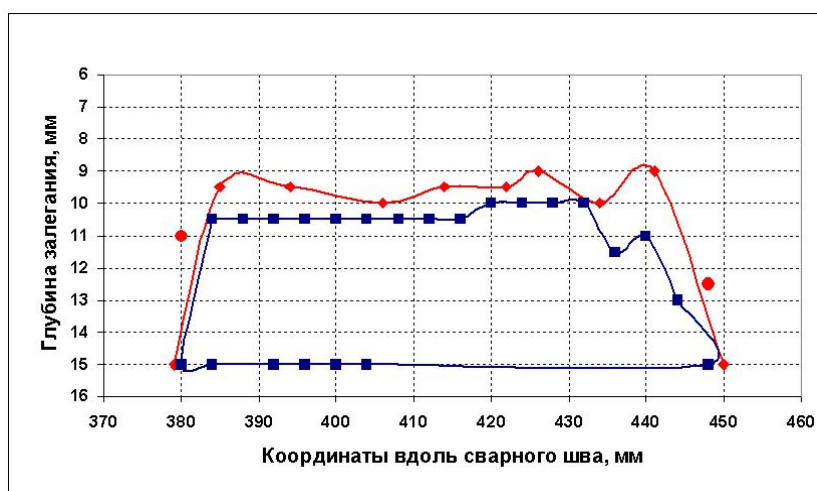


Рис. 6. Профиль дефекта в сварном шве, полученный программно по данным, полученным системой Авгур (■—■) и при разрушающем контроле (метод трехточечного изгиба) — (◆—◆).

Применение автоматизации оценки данных контроля позволяет повысить объективизацию контроля за счет уменьшения влияния субъективного фактора и значительно сократить время анализа. Это обстоятельство особенно важно при выполнении повторного контроля — для наблюдения за развитием выявленного дефекта, так как при этом необходимо сопоставление данных контроля за предыдущие годы. Для примера на рис. 7 даны результаты оконтуривания дефекта в виде трещины в сварном шве трубопровода из нержавеющей стали диаметром 325 мм с использованием автоматической обработки по данным, полученным с применением системы Авгур в 1999 г. и в 2001 г.



Рис. 7. Профиль дефекта в сварном шве, полученный программно по данным, измеренным с использованием системы Авгур в 1999 г. (—) и в 2001 г. (—).

Трещина образовалась по механизму межкристаллитной коррозии под напряжением. Анализ рис. 7 показывает, что длина и высота дефекта не изменились в пределах погрешности измерений [7]. Вместе с тем обращает внимание то, что хотя длина и максимальная высота дефекта не изменились, имеется тенденция увеличения высоты в целом по профилю дефекта.

Определение типа несплошности

Акустические изображения дефектов мало похожи на их оптический образ, что связано с большой длиной используемых акустических волн, условиями дифракции и отражения акустических волн на неоднородностях, ограничениями алгоритмов восстановления изображений, методикой регистрации данных. Обычно размеры неоднородностей составляют величину порядка длины используемого ультразвука, однако, если размеры несплошностей значительно больше длины звуковой волны и расположены благоприятно с точки зрения регистрации рассеянного ими акустического поля, изображения дефектов могут быть весьма близки к своему оптическому образу [10]. Вместе с тем, каждый тип несплошности имеет свои специфические черты, которые проявляются при анализе их трехмерного изображения. Достаточно просто различаются непротяженные и протяженные несплошности; сложнее уверенно различить объемные и плоскостные; еще более тонкие различия имеются между различными типами плоскостных дефектов.

Для определения типа несплошности в трехмерном изображении анализируется:

- Взаимное расположение двумерных контуров и, в первую очередь возможность локализации контуров в плоскостях YZ и XY ;
- Наличие тени за несплошностью, выражающееся в отсутствии контуров за совокупностью контуров, относящихся к несплошности;
- Локализация контуров, относящихся к несплошности в области сварного соединения;
- Величина отношения изображение несплошности / шумовое изображение;
- При использовании отраженных от дна сигналов, если они имеются, - присутствие трехмерного контуров от прямых и отраженных сигналов на одной координате X и др.

Каждый тип несплошности описывается несколькими признаками. При этом учитываются особенности схемы формирования изображений. Например, в таблице 1 такие признаки сформулированы для трещин и объемных объектов.

Таблица 1.

Тип несплошности	Признак
Трещина	Наблюдаются контуры, принадлежащие плоскости несплошности, но не являющиеся его верхом или низом
	Для высокого дефекта (0,5 толщины трубы), по линии облучения, отсутствуют контуры, связанные с геометрическими отражателями или другими несплошностями (эффект тени)
	Наблюдается контуры на прямом и отраженных лучах на одной координате X (с точностью до 0,5 элемента разрешения)
	Имеет трёхмерные контуры, соответствующие верхнему и нижнему концам с перекрытием не менее $[m]+1$ слоев
	Контуры имеют размеры 1-3 элемента разрешения (хорошо сфокусированы)
	Во всех изображениях В-типа угол между прямой, соединяющей точки рассматриваемых контуров (верхних и нижних) и осью Z не превышает 30 град.
	Амплитуда сигнал/шум > 3
Объемный дефект	Контуры не расположены в одной плоскости, в проекционном В-сечении занимают область по X и Z размерами большими N [размеры пятна $N > 2$], образуя кластер
	Часто имеет дополнительные «трансформированные» изображения, расположенные на большей глубине, обычно хуже сфокусированные, чем основное изображение.
	Локализация дефекта – везде в области сварного шва
	Не образуется тени изображения геометрических отражателей или других несплошностей, расположенных дальше за ним в направлении акустического пучка.
	Амплитуда сигнал/шум $> 3-5$.

В большинстве случаев признаки, характеризующие тип дефекта не являются безусловными, однозначно определяющими тип несплошности. Поэтому для определения типа несплошностей была использована вероятностная оценка наличия несплошности данного типа на основе нечеткой логики. Для каждого типа несплошности, для каждого из признаков i был установлен свой весовой коэффициент w_i . Для каждого типа несплошностей k оценка вероятности его наличия будет:

$$\eta_k = \sum \eta_i = \sum w_i F_i$$

Здесь F_i - функция принадлежности i -го признака множеству состоявшихся, η_i - вклад i -го признака.

Были рассмотрены 5 типов несплошностей: трещина, несплавление, непровар корня, вогнутость корня, выпуклость корня. Для каждого из этих типов был задан весовой коэффициент каждого из признаков. Оценка уверенности алгоритма в принадлежности данного дефекта (несплошности) к тому или иному типу формируется путём взвешенного суммирования степеней выполнения соответствующих этому типу несплошности признаков. В настоящей версии алгоритма такая оценка производится отдельно для каждой пары трехмерных контуров. В случае, если оценка степени уверенности алгоритма в принадлежности данного дефекта к данному типу несплошности $\eta_k \geq 0,7$, информация отмечается в протоколе. Для получения адекватной окончательной оценки уверенности алгоритма в принадлежности несплошности к тому или иному типу выбирается наибольшая из оценок.

Вместе с тем для определения типа несплошности по их протяженности достаточным является применение «четкой» (бинарной) логики, так как связано только с длиной трехмерного контура, которая определяется числом слоев, занимаемых этим контуром. Несплошность считается непротяженной, когда длина трехмерного контура не превышает m слоев, где $m \approx \frac{H}{\Delta h} + 1$, H – ширина УЗ пучка в направлении оси Y .

Возможно наличие цепочки отдельных непротяженных несплошностей. В этом случае отдельные несплошности должны находиться на расстоянии большем, чем $[m]$ слоев.

Несплошность считается протяженной, когда длина трехмерного контура превышает $[m]$ слоев. При этом рассматриваются все возможные пары трехмерных контуров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрен алгоритм автоматизации оценки параметров несплошности, полученной с применением системы АУЗК с когерентной обработкой данных и получением акустических изображений высокого разрешения. Этот алгоритм особенно эффективен для автоматической обработки результатов контроля изделий с высоким уровнем структурных шумов. При контроле таких материалов, как, например, стали перлитного класса с обычным соотношением сигнал /структурный шум, рассмотренный алгоритм будет работать еще надежнее.
2. Испытания алгоритма показали, что он позволяет определять тип несплошности (протяженная, непротяженная, объемная, плоскостная), ее координаты, реальную длину и высоту. Наличие априорной информации о преимущественном характере дефектов в изделии, их локализации упрощает определение профиля и типа дефекта.
3. Использование алгоритма автоматизации оценки данных контроля позволяет повысить объективизацию контроля за счет уменьшения влияния субъективного фактора и значительно сократить время анализа.
4. Алгоритм определения параметров несплошностей не заменяет специалиста-эксперта; он предназначен для помощи при выполнении количественной оценки параметров несплошностей и может исполнять роль «советчика» при оценке данных – решение о наличии несплошности и ее количественных характеристиках принимает эксперт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сыркин М.М.** Повышение достоверности автоматизированного ультразвукового контроля. – Дефектоскопия, 2003, №3, с. 11 – 23.
2. **Moreno R. M.** Automatic Ultrasonic System - Nuclear and Conventional Applications. – NDTnet, 2003, v.8, N 3.
3. **Григорьев В.А., Пиминов В.А., Юременко С.П. и др.** Развитие подхода к оценке допускаемых периодов и объемов контроля металла оборудования и трубопроводов РУ ВВЭР – 5-я международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 29.06 – 01.07 2007, г. Подольск, Россия.
4. **Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х.** Компьютерные системы для ультразвукового неразрушающего контроля. – Дефектоскопия, 1993, №5, с.7-13.
5. **Schlengermann U.** Determination of crack depth using ultrasonics - An overlook/ - NDTnet, 1997, v.2, N 5.
6. **Lawson Sh.** Recent developments for automatic on-line TOFD inspection. - NDTnet, 1997, v.2, N 9.
7. **Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др.** Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов. М.: Машиностроение, 2008.- 368 с.
8. **Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Доленко С.А., Орлов Ю.В., Персианцев И.Г.** Алгоритмы обработки данных для автоматизации работы ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных. - Дефектоскопия, 2004, №12, с. 3 – 15.
9. **Hassoun M.H.** Fundamentals of artificial neural networks. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts; London, 1995.
10. **Бадалян В.Г.** Оценка результатов контроля по акустическим изображениям. – Дефектоскопия, 2007, №4, с. 39-58.

Бадалян Владимир Григорьевич

Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия, 123458, Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк Строгино.

Тел / Факс: (495) 780-92-50

E-mail: bvg@echoplus.ru, Web: www.echoplus.ru