

УДК 534.8+620

Погрешность измерения дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных.

Бадалян В.Г.

В последние годы на Российских АЭС при неразрушающем контроле трубопроводов широко применялись системы с когерентной обработкой данных серии Авгур, разработанной в НПЦ «Эхо+».

Приведены результаты анализа влияния практических параметров контроля (нестабильность акустического контакта, параметры ПЭП и др.) на качество изображения дефектов, погрешность и точность определения их параметров: координат залегания, высоты и длины дефектов. Различается погрешность определения параметров дефектов при первичном и повторном контроле. Показано, что при повторном контроле погрешность уменьшается. Приведены результаты сопоставления данных полученных при разрушающем контроле и при неразрушающем контроле аустенитных сварных швов трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325х 15 мм².

1. Введение.

Ультразвуковые (УЗ) методы нашли очень широкое применение при контроле оборудования АЭС.

НПЦ «ЭХО+» совместно со специалистами НИКИЭТ, РНЦ «Курчатовский институт», ВНИИАЭС предложил и реализовал комплексную технологию анализа качества сварных соединений с применением разработанных им систем с когерентной обработкой сигналов серии «Авгур» [1].

Суть ее состоит в следующем:

- На первом этапе производится традиционный ультразвуковой контроль по методикам и нормам, действующим в данной отрасли. Это может быть ручной контроль, но более предпочтительно использование системы «Авгур» в обзорном (поисковом) режиме.
На этом этапе решается задача обнаружения зон, подозрительных на присутствие дефектов. Здесь основными выходными параметрами контроля является амплитуда сигнала, рассеянного неоднородностью, условные параметры несплошности и определение годности сварного шва по действующим нормам.
- На втором этапе в зонах, где обнаружены дефекты выше поискового или контрольного уровня, проводится экспертный контроль системой Авгур. В этом режиме детально регистрируется поле дефекта. Затем, эти данные обрабатываются и анализируются экспертом. Основная задача – определение действительных параметров дефектов, высоты, длины, координат залегания.
Информация о параметрах дефектов передается специалистом по прочности.
- На третьем этапе специалисты по прочности выполняют расчеты по определению ресурса сварного соединения с использованием данных об

истинных параметрах дефектов, полученных при выполнении второго этапа.

По результатам прочностных расчетов принимается решение о целесообразности ремонта шва. В том случае, когда сварное соединение пропускается в эксплуатацию, оно подлежит обязательному повторному экспертному контролю.

- На четвертом этапе, после определенного специалистами по прочности срока, выполняется повторный экспертный контроль.

Как уже отмечалось, при выполнении второго этапа технологии используются системы с когерентной обработкой данных, в частности, системы Авгур, разработанные в НПЦ «Эхо+» [2]. В этих системах применяется когерентная обработка данных зарегистрированного импульсного УЗ поля, рассеянного дефектами [3]. Алгоритм обработки – многочастотная акустическая голография – аналогичен методу синтезированной фокусированной апертуры в частотной области (FT-SAFT).

Характерной особенностью таких систем является возможность с высокой точностью определять длину, высоту и профиль дефектов. Именно эти данные необходимы специалистам по прочности для проведения анализа ресурса конструкции.

Отметим, что в системах с когерентной обработкой, амплитуда УЗ эхо-сигнала не является определяющим измерительным параметром, так как характеристики изображений, по которым определяются параметры дефектов, слабо зависят от амплитуды зарегистрированных данных, вследствие того, что более 70% информации о дефекте содержится в их фазе [4]. Именно это свойство представляет особую ценность при использовании таких систем при количественном анализе сварных соединений.

Ниже будут рассмотрены источники погрешности определения параметров дефектов при практическом применении систем с когерентной обработкой данных и приведены результаты исследований погрешности определения параметров коррозионных дефектов в трубопроводах из нержавеющей стали диаметров 325x15 мм.

Отметим, что определение параметров дефектов другой природы представляет собой более легкую задачу и погрешность определения параметров таких дефектов будет, по крайней мере, не хуже.

2. Разрешающая способность систем с когерентной обработкой данных.

Точность и погрешность определения параметров дефектов является одним из важнейших параметров, характеризующих аппаратуру, используемую для реализации рассмотренной выше технологии контроля. Она определяется практической разрешающей способностью контрольной аппаратуры.

Как известно [5], разрешающая способность изображений дефектов для систем, применяющих когерентную обработку данных, составляет:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2A} \text{ - для фронтального разрешения.}$$

$$\Delta z = \lambda / 2A^2 \text{ - для лучевого разрешения.}$$

Здесь λ - длина УЗ волны, A – числовая апертура.

В системе, использующей когерентную обработку данных в некоторой полосе частот ΔF , фронтальное разрешение будет [6,7]:

$$\Delta x = \frac{\lambda \varphi(\Delta f)}{2 \cos(\alpha) L(\theta, \alpha)},$$

лучевое разрешение [7]:

$$\Delta z = \frac{\lambda f}{\Delta f}.$$

Здесь функция $\varphi(\Delta f)$ - слабо зависит от полосы рабочих частот, приемная апертура $L(\theta, \alpha)$ представляет собой свертку двух функций, описывающих характеристики направленности дефекта и используемого ПЭП:

$$L(\theta, \alpha) = D_{\text{деф}} \otimes D_{\text{ПЭП}}$$

Здесь $D_{\text{деф}}(\alpha)$ - характеристика направленности поля, исследуемого дефекта (для точечного дефекта эта величина постоянная); знак \otimes означает операцию свертки; $D_{\text{ПЭП}}(\alpha, \theta)$ - характеристика направленности используемого ПЭП.

В практически удобном виде $D_{\text{ПЭП}}(\alpha, \theta)$ зависит от полуширины основного лепестка характеристики направленности акустического преобразователя на заданном уровне отсечки θ и угла ввода акустических волн в направлении сканирования α [8]:

$$D_{\text{ПЭП}}(\alpha, \theta) = \frac{m(\operatorname{tg}(\alpha + \theta) - \operatorname{tg}(\alpha - \theta))}{2\sqrt{1 + [\operatorname{tg}\alpha + 0,5(\operatorname{tg}(\alpha + \theta) - \operatorname{tg}(\alpha - \theta))]^2}}.$$

Здесь m равно 1-при регистрации данных в раздельном режиме и 2 - при регистрации данных в совмещенном режиме.

В этом случае фронтальное разрешение можно записать в виде

$$\Delta x \approx \frac{\lambda \cdot \xi(\alpha, \theta)}{2}.$$

Здесь функция $\xi(\alpha, \theta)$ характеризует зависимость фронтального разрешения от характеристики направленности акустического преобразователя:

$$\xi(\alpha, \theta) \approx \frac{\sin(\theta) - \sin(2 \cdot \pi - \alpha)}{\sin(\sin(\theta) - \sin(2 \cdot \pi - \alpha))} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha)} \cdot \frac{1}{D_{\text{ПЭП}}(\alpha, \theta)}$$

Предельная разрешающая способность системы с когерентной обработкой данных, зарегистрированных в совмещенном режиме равна $\lambda/2$. В этом случае $\xi(\alpha, \theta) = 1$.

В реальных условиях разрешение изображений ниже и зависит от ширины диаграммы направленности, угла ввода применяемого ПЭП, типа используемой акустической волны, используемой полосы частот и вида поля рассеяния дефекта.

Кроме того, в реальных условиях имеются дополнительные ограничения, которые накладываются на область регистрации данных (неровность поверхности, существенная нестабильность акустического контакта).

3. Источники ошибок в определении параметров дефектов.

Общее разрешение системы определяет ошибку в определении параметров дефекта. Необходимо различать погрешность определения параметров дефектов при экспертном анализе дефектов, выполняемом в первый раз (при первичном экспертном контроле) и при выполнении последующих экспертных анализах, выполненных при повторных измерениях по прошествии некоторого времени (повторный контроль). Это могут быть экспертные измерения, выполненные через несколько месяцев, год и т.д.

3.1 Погрешность определения параметров при первичном экспертном контроле

Погрешность определения высоты дефектов при первичном их анализе имеет вид: $\Delta = \sum_i \delta_i$.

Здесь δ_1 - определяется разрешением реальной системы которая, определяется характеристиками системы регистрации: диаграммой направленности ПЭП, собственными шумами системы. $\delta_1 \geq \lambda/2$ - предельного разрешения системы визуализации.

На рис.1 приведен график зависимости $\xi(\alpha, \theta)$ фронтального разрешения от параметров применяемых ПЭП.

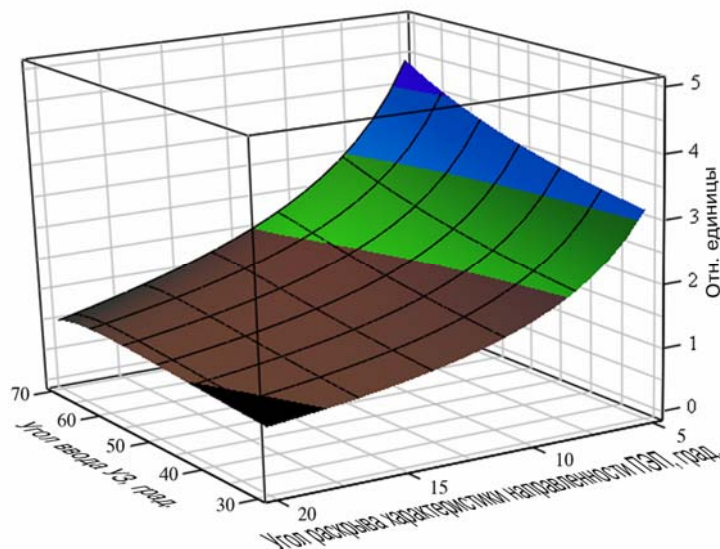


Рис. 1. Зависимость $\xi(\alpha, \theta)$ от угла ввода УЗ и ширины характеристики направленности ПЭП.

Ось ординат дана в относительных единицах, которые показывают во сколько раз фронтальное разрешение будет хуже по сравнению с предельным разрешением при применении ПЭП с ограниченными характеристиками направленности.

Из рис.1 хорошо видно, что с увеличением угла раскрыва характеристики направленности ПЭП фронтальное разрешение улучшается. Причем этот эффект немного ослабевает с уменьшением угла ввода УЗ.

Например, при использовании ПЭП с $\alpha = 70^\circ$ и $\theta = 15^\circ$, для точечного дефекта, фронтальное разрешение будет около $1,2 \lambda$.

δ_2 - погрешность, определяемая характером поверхности регистрации (волнистость поверхности около валика усиления, ширина валика усиления, качество акустического контакта). В том случае, когда эти факторы достаточно слабые (искажено не более 20% зарегистрированных данных) погрешность мала. Однако если более 20% зарегистрированных данных подверглось искажению, то ошибка δ_3 - резко возрастает.

На Рис.2 приведены графики влияния нарушения качества акустического контакта по длине сканирования. Считалось, что данные регистрируются по линии, перпендикулярной сварному шву в направлении к нему.

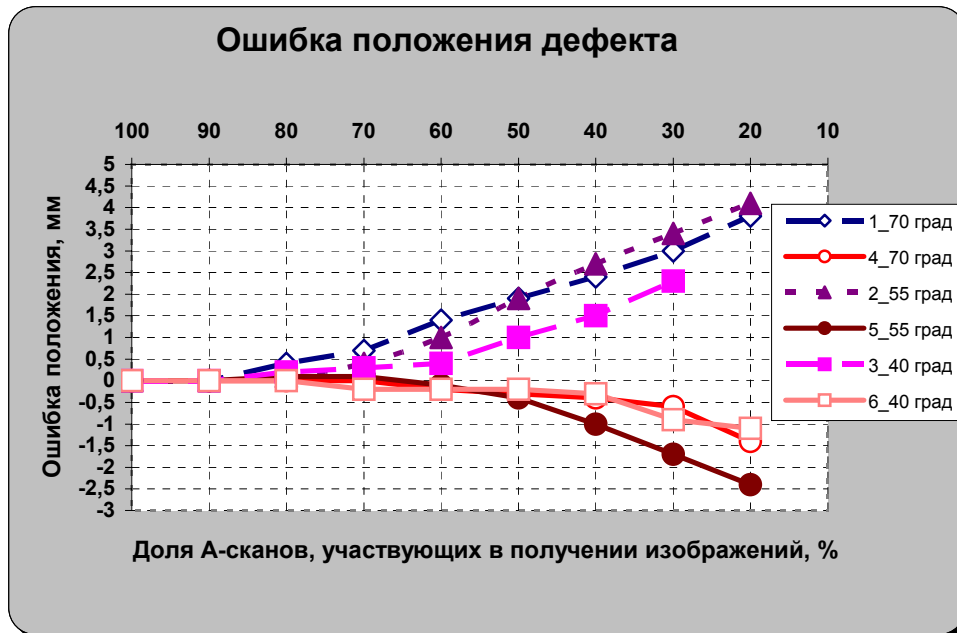


Рис. 2. Ошибка определения положения дефекта при потере части информации за счет нарушения акустического контакта:

- 1, 4 – при использовании ПЭП с углом ввода 70 градусов,
- 2, 5 – при использовании ПЭП с углом ввода 55 градусов,
- 3, 6 – при использовании ПЭП с углом ввода 40 градусов.

В том случае, когда зарегистрированы все данные по линии сканирования параметра восстановленного изображения дефекта считаются эталонными. В том случае, когда теряется часть исходной информации изображение дефекта «расплывается», указывая на уменьшение фронтального разрешения, а его максимум, характеризующий локализацию дефекта, может смещаться. Причем, когда теряется информация на максимальном удалении от области дефекта (начало сканирования) дефект восстанавливается на большей глубине, чем для эталонного положения дефекта. В том случае, когда теряется информация на ми-

нимальном удалении от области дефекта (конец сканирования) дефект восстанавливается на меньшей глубине.

В том случае, когда теряется до 80% информации изображение дефекта практически полностью «разваливается» и определить положение его максимума не представляется возможным.

На рис.2 цифрами 1 – 3 обозначены графики зависимости ошибки определения положения точечного дефекта от величины потери информации за счет нарушения акустического контакта в начале сканирования, для изображений, полученных ПЭП с различными углами ввода УЗ: 70°, 55° и 40°, соответственно; 4 – 6 – при потере акустического контакта в конце сканирования. Наиболее часто последняя ситуация встречается при существенной волнистости поверхности около валика усиления или большой ширине валика усиления сварного шва.

В том случае, если акустический контакт нарушается в центральной области регистрации данных – это может привести к фатальным последствиям. Например, при 20% области нарушении акустического контакта изображение дефекта практически «разваливается».

На рис. 3 приведены изображения точечного отражателя для последнего случая (справа – изображение отражателя при полном наборе данных, слева – при отсутствии 20% данных, в центральной области).

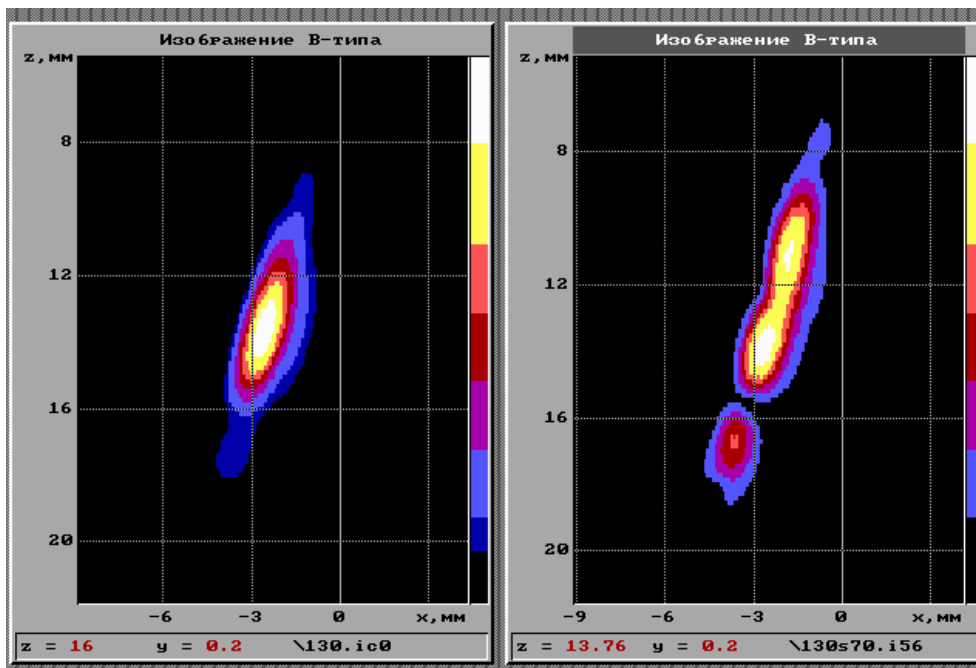


Рис. 3. Изображение точечного отражателя, восстановленное:
при полном наборе данных – слева,
при отсутствии 20% данных, в центральной области - справа.

Из рис. 3 видно, что изображение дефекта распадается на несколько точечных изображений и не представляется надежным выбор любого из них. При этом координаты дефекта все равно не удастся правильно определить.

δ_3 - погрешность, определяются неточным знанием параметров сварного шва и околшовной зоны. Эта погрешность может быть весьма велика в том случае, когда используются отраженные от дна изделия сигналы. Тогда, в част-

ности, ошибка в определении толщины в 0,5 мм может привести к ошибке определения высоты дефекта 1 мм.

δ_4 - погрешность экспертной оценки данных, которая уменьшается при совершенствовании методик регистрации и, главным образом оценки данных. Эта погрешность наиболее существенна в сложных, нестандартных случаях формы разделки сварного шва и околошовной зоны.

Длина дефекта определяется с погрешностью, связанной с разрешением системы Авгур вдоль длины дефекта. Обычно, это разрешение определяется размером пьезоэлемента ПЭП и составляет не менее половины его длины. При этом считается, что в направлении протяженности дефекта осуществляется некогерентная обработка данных.

Кроме рассмотренных выше погрешностей определения параметров дефектов есть еще одна, редко встречающаяся, но приводящая к большим ошибкам. Она связана с тем, что при очень малом раскрытии трещины – менее 0,01 мм рассеянная УЗ волна имеет очень малую амплитуду и соответствующее изображение имеет отношение сигнал/шум ≤ 1 [9].

3.2 Погрешность определения профиля дефектов при повторном экспертном контроле.

При определении профиля дефекта при повторном экспертном контроле погрешность определяется так же, как при первичном контроле $\Delta = \sum_i \delta'_i$. Однако, при повторном экспертном анализе дефекта, фактически, δ'_1 описывает идентичность изображений при многократном повторении измерений. При этом δ'_1 определяется качеством изготовления оборудования, погрешностью установки дискрета измерений, неточностью определения параметров ПЭП.

При повторном контроле такие факторы, как волнистость поверхности около валика усиления, ширина валика усиления, качество акустического контакта обычно мало меняются и $\delta'_2 \approx 0$.

δ'_3 и δ'_4 - погрешности, которая не сказывается при повторных измерениях, так как их учет произведен в первичных измерениях (при условии неизменности правил оценки параметров дефектов) и $\delta'_3 \cong 0$, $\delta'_4 \cong 0$.

В результате погрешность при повторном экспертном контроле определяется, в основном, $\delta'_1 < \delta_1$ и точность определения параметров дефектов выше.

4. Особенности определения профиля коррозионных дефектов.

Для получения профиля дефекта измеряется УЗ поле им рассеянное в двумерной плоскости XY, где ось X направлена перпендикулярно оси сварного шва, а ось Y - параллельно. При этом необходимо иметь в виду следующее:

- Расстояние между измеренными точками профиля (высоты) дефекта определяется шагом перемещения ПЭП в направлении оси Y и обычно составляет 4 мм.
- В большинстве случаев правомерна экстраполяция между точками измерений. Однако, при контроле коррозионных трещин такая экстраполяция весьма ненадежна.

На рис.4, для примера, приведена фотография коррозионной трещины в трубопроводе из нержавеющей стали, полученная при разрушающих испытаниях^{1,2}.

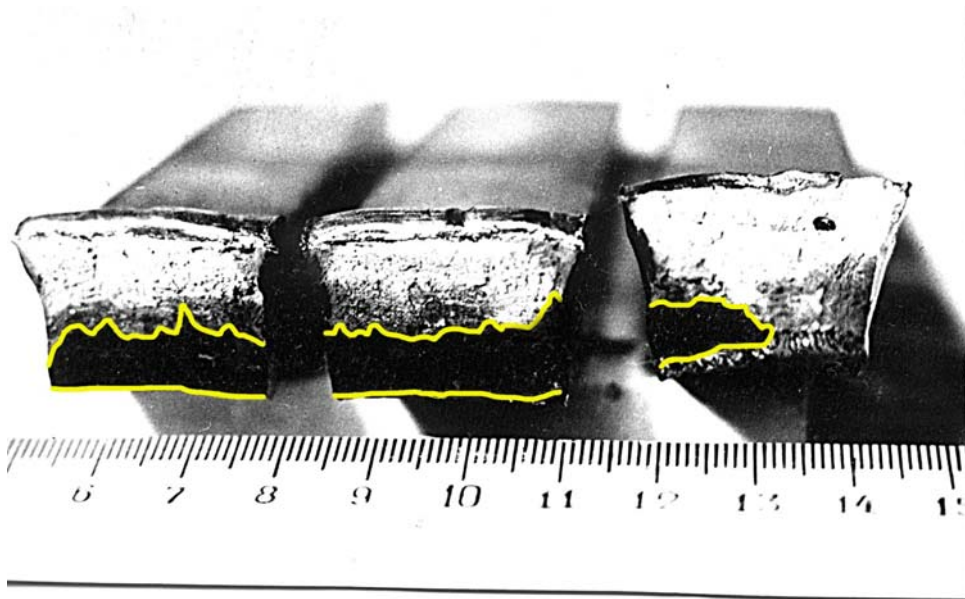


Рис. 4. Фотография коррозионной трещины в трубопроводе из нержавеющей стали $\varnothing 325 \times 15$ мм (контур дефекта выделен светлой линией), полученная при разрушающих испытаниях методом трех точечного изгиба.

Основной особенностью такого дефекта является то, что высота по его длине может изменяться очень резко. При регистрации эхосигналов направления оси Y (вдоль трещины) происходит их усреднение, на длине шага сканирования. Последнее приводит к тому, что высота дефекта в направлении оси Y также усредняется и если высота меняется по длине очень быстро (см. рис 4), то это приводит к дополнительным ошибкам.

- В том случае, если оценка высоты дефектов производится с использованием УЗ эхо- импульсов, зеркально отраженных от нижней поверхности сварного шва, необходимо знать профиль этой поверхности который может очень сильно отличаться от «идеального», предполагаемого конструктором.

¹ Данные получены Смоленской АЭС.

² При разрушающих исследованиях применялись две методики разрушающего контроля: **Метод трех точечного изгиба («доллом»)** в котором образец, содержащий дефект разрушался по поверхности дефекта и затем измерялась высота дефекта в определенном сечении. Погрешность определения высоты составляла $\pm 0,5$ мм.

Металлографический анализ, при котором в заданном сечении по микрошлифам измеряют высоту сечения дефекта до раскрытия $0,01$ мм. (При таком значении раскрытия дефекта, последний уверенно фиксируется при УЗК) [9].

- Еще одной особенностью определения профиля дефекта (коррозионного или любого другого) с помощью системы Авгур является то, что под «высотой» дефекта понимается значение проекции дефекта на ось глубин Z, совпадающую с радиусом трубопровода.

Все эти обстоятельства необходимо иметь в виду при сопоставлении данных, полученных при разрушающем контроле и системой Авгур.

5. Погрешность измерения параметров трещин в аустенитных сварных соединениях трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325x15 мм.

5.1 Определение длины дефекта

Всего было рассмотрено 18 дефектов в сварных швах, используя данные разрушающего контроля и результаты измерений системой Авгур. На Рис.5 представлены результаты измерений длины этих дефектов в графическом виде.

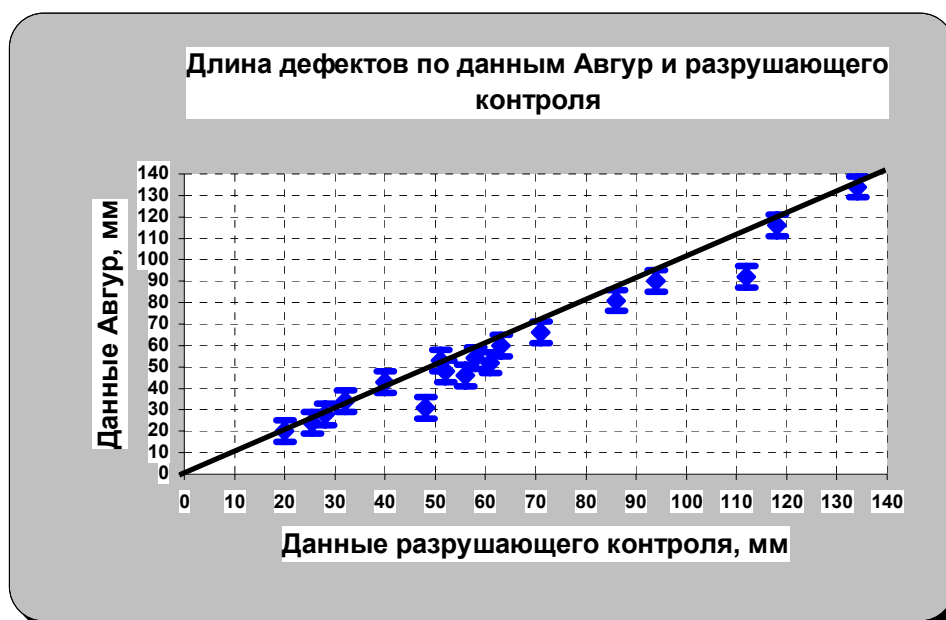


Рис.5. Результаты определения длины дефектов по данным Авгур и разрушающего контроля (металлография, трех точечный изгиб).

В соответствии с приведенными на Рис 5 данными, ошибка определения длины дефектов с использованием Авгур составляет ± 5 мм.

5.2 Определение профиля дефекта при первичном контроле.

Определение ошибки измерения высоты дефектов проводилось сопоставлением результатов неразрушающего контроля с применением системы Авгур и данных разрушающего контроля (металлография и «долом») 10 дефектов различной длины. За одно измерение бралось значение высоты дефекта в некотором сечении, полученное по данным Авгур. Это значение высоты сопоставлялось с высотой дефекта, полученной методами разрушающего контроля, при-

чем, высота выбиралась, по возможности, в том же сечении. Полученный массив данных из 120 измерений имеет среднеквадратичную ошибку определения высоты дефекта $\sigma = 0,86$ мм.

На Рис.6 приведены результаты измерений высоты дефектов в отдельных сечениях, полученных с помощью системы Авгур и при разрушающем контроле.

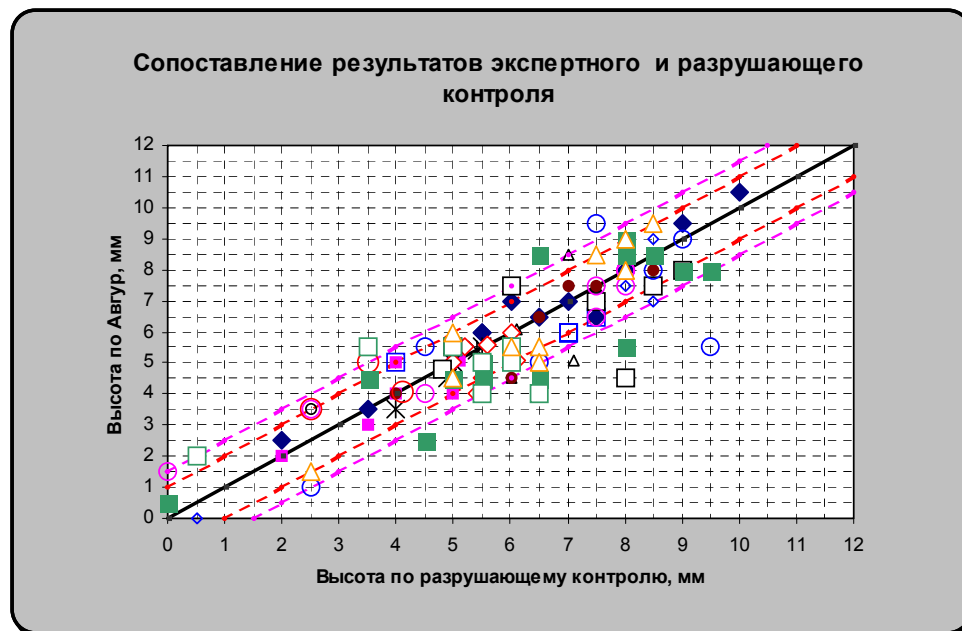


Рис.6. Высота дефектов в отдельных сечениях, полученная с помощью системы Авгур и при разрушающем контроле (металлография, трех точечный изгиб).

Из Рис.6 видно, что почти все измерения находятся между прямыми, соответствующими ошибке измерений ± 1 мм.

Анализ показывает, что в 85% доверительном интервале погрешность определения высоты дефекта с помощью системы Авгур составляет ± 1 мм, в 96% доверительном интервале - $\pm 1,5$ мм.

Из Рис.6 также видно, что результаты экспертного контроля имеют тенденцию к некоторому занижению высоты дефекта, составляющему около 0,5 мм.

Причина указанного эффекта состоит в следующем:

- Измерение высоты дефекта в некотором сечении связано с усреднением по оси Y на расстоянии не менее 5 мм, тогда как при металлографии указанным усреднением можно пренебречь. Поэтому, когда изменение высоты дефекта вдоль оси Y происходит наиболее быстро, возрастает величина отклонения данных, полученных металлографией и при экспертном контроле, что отражается на несимметричности данного распределения.
- Некоторый наклон дефекта относительно вертикальной оси Z также приводит к уменьшению измеряемой высоты дефекта сравнению с высотой, определяемой в металлографии: $\Delta L = L \cdot (1 - \cos \alpha)$, где α - угол разделки сварного шва. В рассматриваемом случае $\alpha = 20$ град, тогда $\Delta L = L \cdot 0,06$. Например, при высоте трещины 10 мм ошибка превышает 0,5 мм.

Отметим, что при этом считалось, что данные разрушающего контроля - точные и не учитывалась их ошибка определения размеров, составляющая около 0,5 мм.

5.3 Погрешность определения профиля дефекта при повторном контроле.

Как уже упоминалось, при повторном контроле погрешность определения высоты дефекта меньше, чем при первичном контроле (см. п. 3.2).

Всего было исследованы профили 32 дефектов в 29 сварных швах. При этом был получен массив данных по высоте дефектов в отдельных сечениях - всего 246 сечений. Все рассмотренные швы по результатам экспертных оценок считались «неразвивающимися» в пределах ошибки измерений.

На рис 7 приведены результаты измерений высоты дефектов в отдельных сечениях, полученных с помощью системы Авгур при повторных исследованиях в 1999 г. и 2000 г.

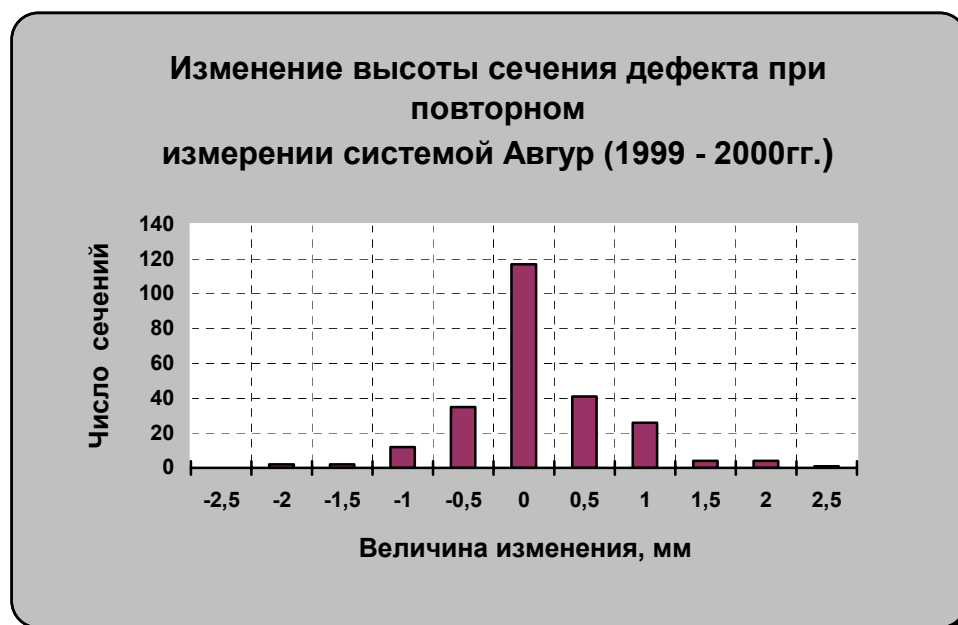


Рис.7. Распределение дефектов по величине изменений высоты в 1999- 2000гг (неразвивающиеся дефекты по данным экспертной оценки).

Из рис 7 следует, что в 80% доверительном интервале погрешность определения высоты дефекта при повторном контроле составляет $\pm 0,5$ мм, а в 95% доверительном интервале - ± 1 мм.

Распределение изменения величины сечения дефектов ясно выражено при анализе развивающихся дефектов (по результатам экспертной оценки) представленном на рис 8.

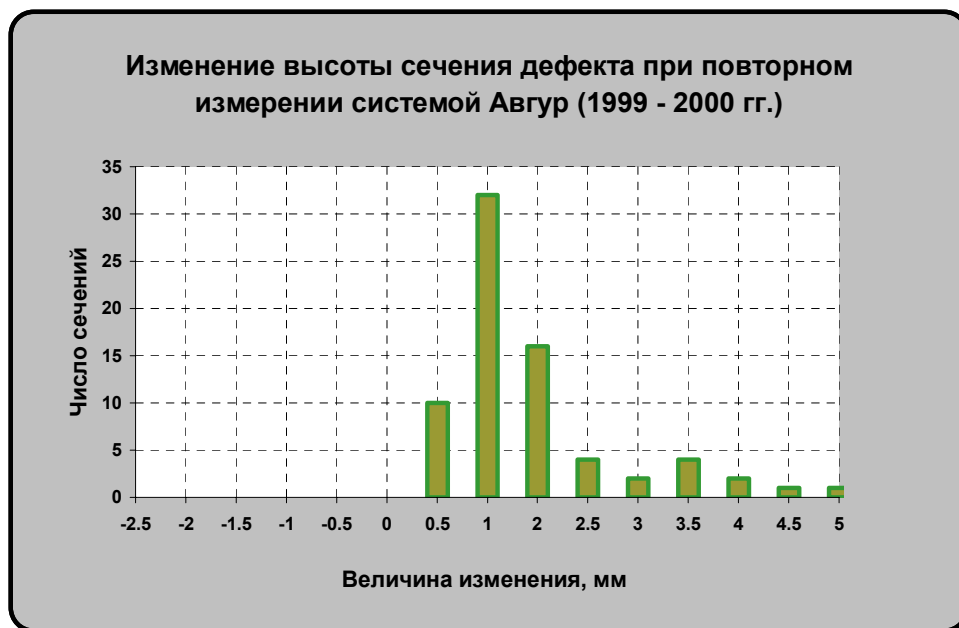


Рис.8. Распределение дефектов по величине изменений высоты их сечений в 1999- 2000 гг. (развивающиеся дефекты по данным экспертной оценки).

Характер распределения изменения высоты сечений дефектов представлен на рис. 8. Оно довольно широкое и имеет максимум при увеличении высоты на 1 мм. Видно, что в 80% доверительном интервале величина подрастания дефекта в каком либо сечении не превышает 1,5 мм.

В качестве примера на рис.9 приведен профиль коррозионного дефекта в аустенитном сварном шве трубопровода из нержавеющей стали диаметром 325x15 мм.

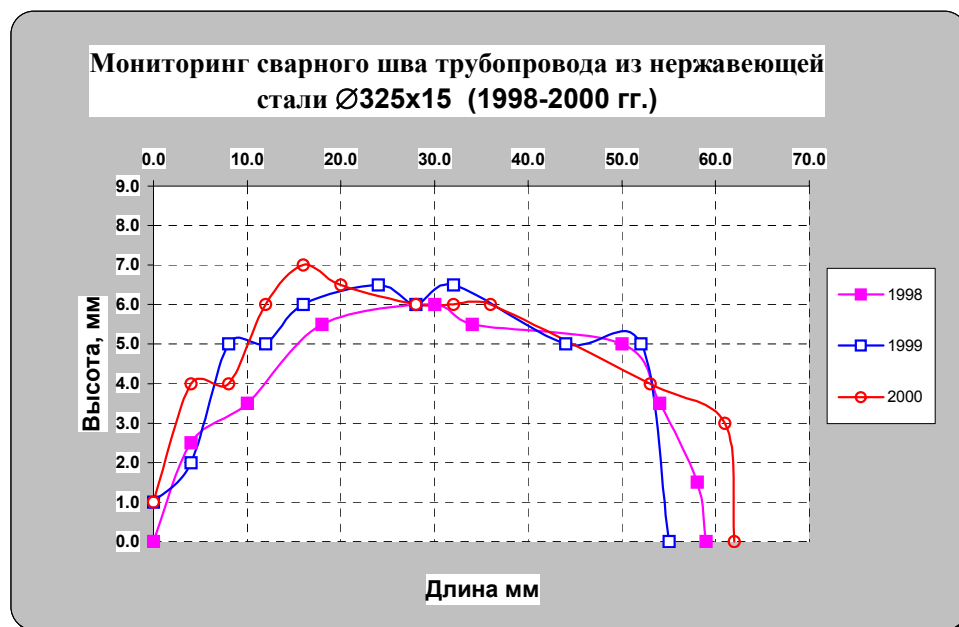


Рис.9. Мониторинг дефекта в аустенитном сварном шве за 1998- 2000гг.

Из рис.9 следует, что этот дефект за время наблюдения развивался очень незначительно: изменение его высоты и длины находится в пределах ошибки метода.

6. Выводы.

Таким образом,

- Проанализировано влияние на качество изображения дефектов характеристик ПЭП, качества акустического контакта.
 - Показано, что потеря 20% информации о дефекте в начале или конце области регистрации данных не приводит к существенной ошибке измерения параметров дефектов - большие потери приводят к ошибке определения координат дефекта и уменьшению разрешения изображения.
 - Потеря 20% информации о дефекте в середине области регистрации данных приводит к фатальному ухудшению качества изображения дефекта и не позволяет достоверно определить его параметры.
- Сопоставительный анализ данных по измерению параметров дефектов, измеренных с помощью экспертной системы Авгур и при разрушающих исследованиях, показал, что:
 - погрешность определения высоты дефектов при первичном контроле составляет:
 - ± 1 мм - в 85 % доверительном интервале и
 - ±1,5 мм – в 96 % доверительном интервале.
 - Величина погрешности определения профиля дефекта уменьшается при повторном контроле и составляет:
 - ± 0,5 мм - в 85 % доверительном интервале и
 - ±1,0 мм – в 96 % доверительном интервале.
 - Точность определения длины дефекта составляет ± 5 мм.
- Повторный анализ дефектов в аустенитных сварных швах трубопроводов из нержавеющей стали Ø 325x15 мм, показал, что:
 - В течение года эксплуатации дефект в отдельных сечениях может подрастать до 1,5 мм в 80% доверительном интервале,
- Анализ погрешностей определения параметров дефектов показывает существенное влияние конфигурации сварного шва, неровности поверхности околошовной зоны на точность определения параметров дефектов.

Научно- производственный центр «ЭХО+», Россия, 123183, площадь Курчатова, д.1 Тел. 196-76-15; Факс 196-71-19; E- mail: bvg@echoplus.ru

Бадалян Владимир Григорьевич
Россия, Москва, 117295, Профсоюзная ул., д. 8, корп. 2, кв. 477, 125-52-39 (д)

7. 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.** Компьютерные системы ультразвукового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 1993. № 5. С.7-13
3. **Бадалян В.Г., Базулин Е.Г.** Цифровое восстановление изображений рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве // Акустический журнал. Т.ХХХIV. № 2. 1988 С. 222-231
4. **N.C.Gallagher**, Optimum quantization and relative information content of holographic magnitude and phase // Acoustical imaging and holography. 1979, **V.1**, № 2, p. 119-132.
5. Борн М, Вольф Э. Основы оптики., М., Наука, 719 с.
6. **L.V. Bernus, M. Kroning, J. Regn, H. Ermert, G. Pokoph.** Detection And Imaging Of Defects Especially Materials With Small UT Transducers Using Broad- Band Holography // Rev. Of Progr. In Quant. Nondest. Eval.,1989,v. 8A, p.575-581
7. **H. Ermert, R. Karg.** Multifrequency acoustical holography // IEEE Trans. Sonics a. Ultras., 1979, SU-26, N 4, p. 279-286
8. Бадалян В.Г. Влияние стробирования на разрешающую способность систем акустической голографии // Дефектоскопия. 1987. № 4. С.56-63
9. В.Г.Щербинский, Н.П.Алешин- Ультразвуковой контроль сварных соединений. Стр.316-419, -Москва, Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000 ,с. 495.