

*А.А. Ткаченко (Молдова)*

(IC NDT "Introscoп S.A.", г. Кишинев; e-mail: nercont@mail.ru)

## **ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ШВОВ В ПОТОКЕ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

*Проведён анализ факторов, влияющих на достоверность ультразвукового контроля сварных швов труб большого диаметра. Исследованы и предложены эффективные способы повышения достоверности контроля сварных швов труб с валиком усиления, реализованные в автоматизированных комплексах.*

*Ключевые слова: разрушение газопровода, достоверность ультразвукового контроля.*

*A.A. Tkachenko (Moldova)*

## **IMPROVING OF THE ACCURACY OF AUTOMATED ULTRASONIC TESTING OF WELDS IN THE FLOW OF LARGE DIAMETER PIPES PRODUCTION**

*The analysis of factors affecting the accuracy of the ultrasonic testing of welds of the large diameter pipes was prepared. The effective ways to improve the reliability of the pipe welds testing with reinforcing bead implemented in automated lines were described.*

*Key words: the destruction of the pipeline, the reliability of ultrasonic testing.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 9 декабря 2013 г.

Анализ разрушений магистральных газопроводов и нефтепроводов показывает, что основными причинами отказов являются дефекты материалов и строительства, которые занимают до 39 % от общего состава причин аварий [1]. Значительную долю в данной категории занимают дефекты в сварных швах труб при их производстве на заводе-изготовителе. Технологии обеспечения техносферной безопасности диктуют жёсткие требования к обеспечению эффективного и достоверного автоматизированного **ультразвукового (УЗ)** контроля сварных швов труб, производимых для магистральных трубопроводов.

При контроле сварных швов ультразвуковые волны вводятся в шов через основной металл с использованием наклонных акустических **пьезопреобразователей (ПЭП)**. Различают способы прозвучивания шва прямым, однажды-, дважды- и многократно- отраженными лучами от поверхностей стенки трубы [2]. При этом ультразвуковой пучок сдвиговых волн распространяется в стенке трубы зигзагообразно, зависимость амплитуды эхосигнала от дефекта  $A_{\delta}$  от расстояния  $L$  от дефекта до точки ввода УЗ-колебаний – функция  $A_{\delta}(L)$  имеет осциллирующий характер [3].

На результаты УЗ-контроля сварного шва существенное влияние оказывают такие параметры, как качество поверхности трубы, постоянство акустических и геометрических характеристик сварного шва труб и др. Существенными мешающими факторами при обнаружении несплошностей металла сварного

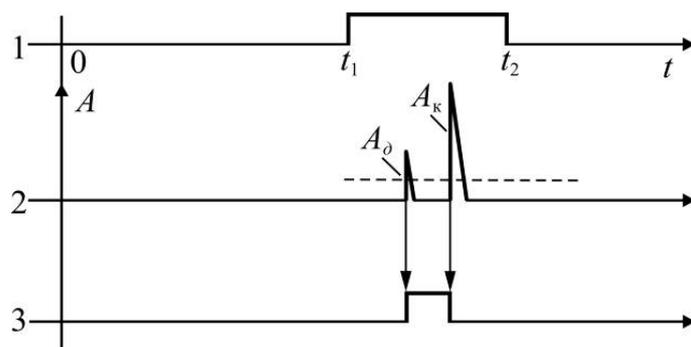
шва являются сигналы от кромок валика усиления, которые можно считать синхронными помехами. Кроме синхронных, существенное влияние на достоверность контроля оказывают случайные помехи, например, внешние электромагнитные наводки, являющиеся несинхронными помехами. От них, в отдельных случаях, отстраиваются с использованием специальных экранов в приборной и акустической частях установок, но это далеко не всегда приводит к желаемому результату.

### Способы регистрации эхосигналов от дефектов при воздействии помех

Наиболее простым способом защиты от синхронных и несинхронных помех является применяемое при УЗ контроле временное стробирование. При этом во многих случаях используют строб-импульс малой длительности для уменьшения вероятности попадания в него промышленных помех. Если  $T_{з.с.}$  – период повторения зондирующих сигналов, а  $t_0$  – длительность строб-импульса, то вероятность попадания в него импульса-помехи  $P$  равна  $mt_0/T_{з.с.}$ , где  $m$  – средняя плотность импульсов-помех за промежуток времени  $T_{з.с.}$ . Величина  $m$  зависит от цеховых условий и может быть определена экспериментально. Однако при использовании строб-импульса возможно попадание в него и эхосигнала от дальней кромки валика усиления сварного шва  $A_k$ , то есть возможна перебраковка труб по ложным эхосигналам от валика усиления.

Кроме наличия поперечных смещений шва относительно неподвижных ПЭП важно учитывать нестабильность ширины валика усиления. Плавное изменение ширины валика усиления шва в процессе его движения относительно ПЭП приводит к плавному изменению расстояния от дальней кромки валика до точки ввода ПЭП, номинальное значение которого обозначим как  $L_0$ . Некоторые устройства слежения ПЭП за сварным швом могут частично компенсировать эти изменения. Однако с использованием предлагаемых способов [4, 5] задача временной селекции сигналов  $A_\delta$  решается более рационально. Эти способы основаны на использовании одиночного сигнала  $A_k$ , задачу формирования которого необходимо рассмотреть отдельно.

На рис. 1 диаграмме 1 показан строб-импульс, на диаграмме 2 показан сигнал  $A_\delta$  и сигнал  $A_k$ , которые попадают в строб-импульс, то есть, нет временной селекции  $A_\delta$  и  $A_k$ . Представляет интерес временной интервал между передними фронтами  $A_\delta$  и  $A_k$  на определенном уровне (пунктирная линия на диаграмме 2). Используя известные электронные устройства этот интервал можно сформировать в виде измерительного импульса ИИ $_\delta$  (диаграмма 3) и измерить его длительность. Кроме ИИ $_\delta$ , в некоторых тактах зондирующего импульса будут формироваться ложные измерительные импульсы (ИИ $_{л}$ ), обусловленные наличием промышленных импульсных помех. Для решения задачи помехозащиты используем признак синхронности сигналов  $A_\delta$  и несинхронности импульсов помех, то есть сигнал  $A_\delta$  появляется в каждом последующем такте зондирующего импульса, а импульс-помеха этому условию не удовлетворяет [4].



**Рис. 1.** Временные диаграммы канала дефектоскопа

Если в некотором такте появился  $ИИ_{\partial}$  или  $ИИ_{л}$ , этот такт примем за первый. Измеренное значение  $ИИ_{\partial}$  или  $ИИ_{л}$  запоминается в первой ячейке памяти дефектоскопа. В следующем такте измеренное значение  $ИИ_{\partial}$  или  $ИИ_{л}$  сравнивается с предыдущим значением и, если они не равны, то первая и вторая ячейки очищаются и новый такт, если в нём появился  $ИИ_{\partial}$  или  $ИИ_{л}$ , вновь принимается за первый. Если же имеется равенство значений  $ИИ_{\partial}$  первого и второго тактов, то аналогичная операция выполняется в третьем такте.

Если полученное значение  $ИИ_{\partial}$  в третьем такте равно значению второго такта, то дефектоскоп регистрирует сигнал  $A_{\partial}$ , то есть первый эхосигнал, имеющийся в строб-импульсе (диаграмма 2), как сигнал от дефекта. При отсутствии равенства значений  $ИИ_{\partial}$  третьего и второго тактов ячейки памяти очищаются, а четвертый такт вновь принимается за первый (если в нём имеется  $ИИ_{\partial}$  или  $ИИ_{л}$ , то цикл повторяется). С использованием счётчика можно задать число последовательных тактов  $N$ , в которых должно быть одно и то же значение  $ИИ_{\partial}$ , то есть можно увеличить надёжность помехозащиты регистрируемых сигналов  $A_{\partial}$ . Число  $N$  на практике выбирают равным 3-6. Заметим, что увеличение числа  $N$  приводит к необходимости иметь большую плотность сигналов  $A_{\partial}$  на каждый миллиметр движущегося шва, то есть необходимо увеличивать частоту повторения зондирующих импульсов.

Таким образом, если в строб-импульс попадают несинхронные импульсы промышленных помех, то они не регистрируются дефектоскопом. Следовательно, в каналах дефектоскопа, использующих данный способ регистрации сигналов от дефектов, можно использовать строб-импульсы, длительность которых определяется размером зоны контроля металла шва, включая и дальнюю кромку валика усиления. По максимальной амплитуде сигнала  $A_k$  можно отрегулировать параметр  $L_0$  и осуществить выбор длительности строб-импульса канала дефектоскопа. Требование к точности слежения за поперечными смещениями шва в этом случае существенно снижается. На рис. 1 показаны диаграммы для одного канала дефектоскопа, но они справедливы и для другого преобразователя, расположенного симметрично с противоположной стороны шва. Два канала дефектоскопа работают попеременно и независимо друг от друга.

Следует отметить, что при использовании этого способа число отражений зондирующего импульса от внутренних поверхностей стенок трубы не может быть большим (не более трёх). Это требование обусловлено тем, что необходимо получить одиночный сигнал  $A_k$  и недопустимы другие отражения от поверхностей валика усиления шва, что является существенным недостатком данного способа. Другой недостаток состоит в том, что при появлении в сварном шве протяженных дефектов, которые маскируют сигнал  $A_k$  (сквозной непровар и др.), рассмотренный алгоритм регистрации не работает и дефектоскоп может не регистрировать протяженные крупные дефекты.

Отмеченные недостатки частично устраняются при использовании способа [5] контроля шва с использованием двух наклонных ПЭП, расположенных по обе стороны шва и жестко закрепленных между собой. Этот способ основан на измерении временных интервалов попеременно для канала с ПЭП1 и канала с ПЭП2. В двух соседних тактах определяется сумма временных интервалов, сформированных импульсом запуска генератора дефектоскопа и эхосигналом от дальней кромки валика усиления при отсутствии дефекта в металле движущегося шва, которая изменяется во времени медленно из-за возможных изменений ширины шва. При появлении дефекта в металле шва сумма временных интервалов уменьшается, что и служит признаком дефектной ситуации, регистрируемой дефектоскопом.

Пусть в момент  $t = 0$  (рис. 2, диаграмма 1) ПЭП1 излучает зондирующий импульс и принимает сигнал  $A_{k1}$ , отраженный от дальней кромки валика при отсутствии дефекта в металле шва. Временная селекция  $A_{k1}$  осуществляется с использованием строб-импульса  $C_1$ , длительность которого устанавливается так же, как было описано выше. Момент  $t = 0$  и момент приема сигнала  $A_{k1}$  определяют длительность измерительного импульса ИИ<sub>к1</sub> (диаграмма 2), который измеряется и запоминается в ячейке памяти дефектоскопа.

В следующем такте возбуждается ПЭП2, который принимает сигнал  $A_{k2}$  (диаграмма 1') от другой кромки валика и формируется измерительный импульс ИИ<sub>к2</sub> (диаграмма 2'). Значение ИИ<sub>к2</sub> запоминается в другой ячейке памяти. Селекция  $A_{k2}$  осуществляется с использованием строб-импульса  $C_2$ . Сумма значений интервалов ИИ<sub>к1</sub> и ИИ<sub>к2</sub> хранится в отдельной ячейке памяти дефектоскопа. ПЭП1 и ПЭП2 могут быть установлены на разных расстояниях от оси шва, но ориентированы в плоскости, перпендикулярной оси шва, и жестко связаны.

При движении трубы сумма ИИ<sub>к1</sub> и ИИ<sub>к2</sub> остается постоянной при некоторых поперечных смещениях шва и медленно изменяется при медленном изменении ширины шва. Для выявления дефектов шва необходимо определить минимально возможное значение суммы ИИ<sub>к1</sub> и ИИ<sub>к2</sub>, что соответствует минимально возможной ширине шва на некотором участке трубы, например, 1 м. Уменьшение ИИ<sub>к1</sub> и ИИ<sub>к2</sub> при уменьшении ширины шва на диаграмме 2 и 2' условно показано пунктирной линией. Это минимальное значение суммы ИИ<sub>к1</sub> и ИИ<sub>к2</sub> запоминается в отдельной ячейке памяти и используется в качестве порога для временной селекции эхосигналов от дефекта шва.

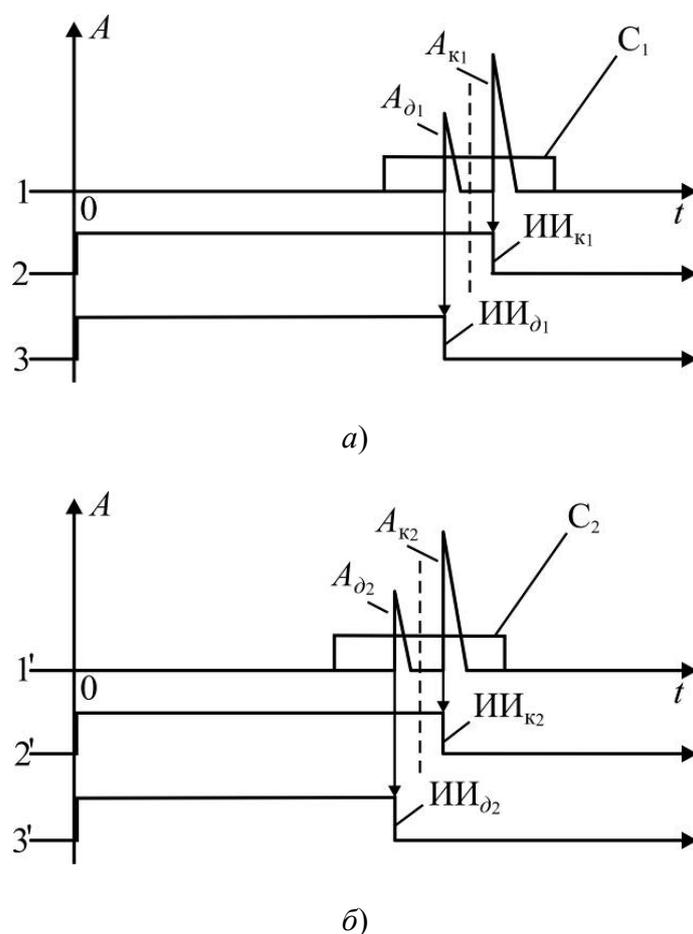


Рис. 2. Временные диаграммы двух каналов дефектоскопа

При появлении дефекта в сварном шве в строб-импульсе  $C_1$  появляется сигнал  $A_{\delta 1}$ , а в строб-импульсе  $C_2$  – сигнал  $A_{\delta 2}$ . Соответственно формируются измерительный импульс  $ИИ_{\delta 1}$  (диаграмма 3) и измерительный импульс  $ИИ_{\delta 2}$  (диаграмма 3'). Если сумма значений интервалов  $ИИ_{\delta 1}$  и  $ИИ_{\delta 2}$  меньше установленного порога селекции, то дефектоскоп регистрирует амплитуду сигнала  $A_{\delta 1}$  и отдельно амплитуду сигнала  $A_{\delta 2}$ .

Из изложенного видно, что в способе [5] дефектоскоп регистрирует короткие и протяженные дефекты, так как формирование измерительных импульсов  $ИИ_{\kappa 1}$  и  $ИИ_{\kappa 2}$  осуществляется без постоянного использования сигналов  $A_{\kappa 1}$  и  $A_{\kappa 2}$ . Допустимое поперечное смещение шва относительно средней осевой линии так же, как и в первом способе, определяется длительностью строб-импульса в каждом канале дефектоскопа, то есть зависит от ширины рабочего пика осциллирующей функции  $A_{\delta}(L)$  в зоне контроля и определяется экспериментально при настройке системы. В этом случае сигналы  $A_{\delta 1}$  и  $A_{\delta 2}$  могут иметь вид совокупности нескольких эхосигналов. Измерительный импульс  $ИИ_{\delta 1}$  или  $ИИ_{\delta 2}$  формируется по первому эхосигналу совокупности.

Задача помехозащиты от несинхронных помех может быть решена аналогично решению по способу [4]. При появлении в строб-импульсах  $C_1$  и  $C_2$  импульса помехи, формируются ложные измерительные импульсы  $ИИ_{\delta 1}$  и  $ИИ_{\delta 2}$ , сумма значений интервалов которых запоминается. В следующих двух тактах

зондирующего импульса суммарное значение  $ИИ_{л1}$  и  $ИИ_{л2}$  оказывается существенно другим, а при наличии  $ИИ_{д1}$  и  $ИИ_{д2}$  суммарное значение не изменяется. Этот признак используется для определения наличия дефекта в металле шва и регистрации сигналов  $A_{д1}$  и  $A_{д2}$ .

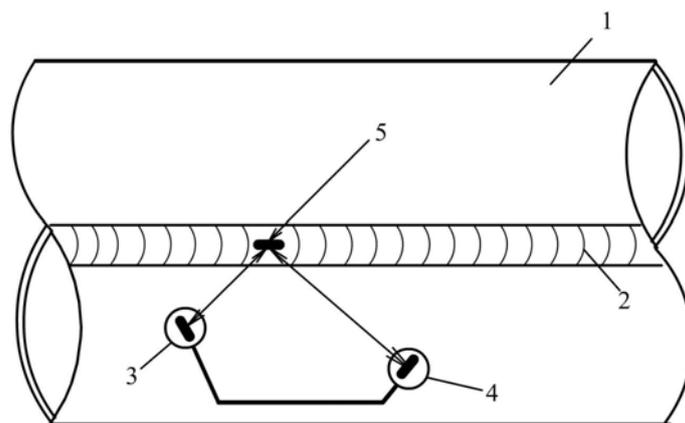
При возможном появлении других отражений от поверхностей шва, кроме  $A_{к1}$  и  $A_{к2}$ , также возможно ложное срабатывание регистрирующего устройства дефектоскопа. С целью уменьшения вероятности попадания других ложных сигналов в строб-импульс приемника дефектоскопа, за счёт уменьшения амплитуды возможных эхосигналов от передней кромки валика усиления, применим способ контроля с демпфированием переходного участка поверхности шва с использованием пары соосно закрепленных эластичных роликов [6]. Известно, что зондирующий импульс сдвиговых волн в основном поляризован в плоскости преломления [7]. При отражении от стенки трубы под углом, большим третьего критического угла ( $\alpha > 33^\circ$ ), тип сдвиговой волны сохраняется неизменным. Но при отражении от переходного участка поверхность трубы – поверхность передней кромки валика возможно возникновение волн другого типа, например, поверхностной волны. Следовательно, возможно появление эхоимпульсов от передней кромки валика, что нежелательно, так как они маскируют полезные сигналы  $A_{д}$ .

Ролики-демпферы с усилием прижаты к поверхности движущегося шва и существенно уменьшают уровень эхосигналов от передней кромки валика усиления. Сигнал  $A_{к}$  при этом сохраняется практически неизменным, так как мала компонента вектора смещений, направленная перпендикулярно отражающей поверхности. Таким образом, данный способ обеспечивает демпфирование поверхностей валиков усиления сварного шва, включая их кромки, в динамике, что позволяет повысить достоверность контроля. При этом уровень мешающих эхосигналов от передней кромки и неровностей поверхностей валиков усиления шва снижается на 6 дБ и более, в результате чего ложные сигналы становятся меньше установленного порога автоматического сигнализатора дефекта и не приводят к его срабатыванию и, соответственно, к перебраковке контролируемого шва.

### **Способы формирования зоны контроля сварного шва**

Не менее важным фактором, влияющим на достоверность регистрации эхосигналов от дефектов, является правильный выбор и формирование строб-импульса зоны контроля. Наиболее оптимальным является формирование строб-импульса, который бы следил за зоной металла шва, подлежащей контролю.

Рассмотрим способ формирования следящего строб-импульса [8] при УЗ контроле сварного шва трубы с использованием X-схемы прозвучивания шва. Совмещённый ПЭП (рис. 3, п. 3) и приёмный ПЭП (рис. 3, п. 4) жёстко связаны между собой и их диаграммы направленности пересекаются в центре металла шва, при этом расстояние от приёмного ПЭП 4 до оси шва существенно больше расстояния от совмещённого ПЭП 3 до оси шва.



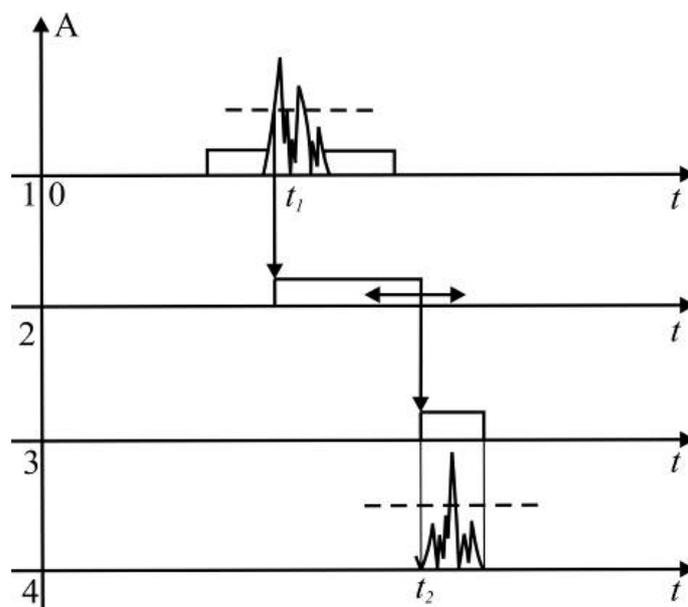
**Рис. 3.** Схема прозвучивания сварного шва:

1 – фрагмент контролируемой трубы; 2 – сварной шов; 3 – совмещенный ПЭП;  
4 – приемный ПЭП; 5 – плоскостной дефект в сварном шве

С использованием ультразвукового дефектоскопа в момент времени  $t = 0$  (рис. 4, диаграмма 1) совмещенный ПЭП 3 вводит в металл стенки трубы зондирующий импульс, который отражается от передней кромки валика усиления шва и от плоскостного продольного дефекта шва (рис. 3, п. 5). Эхосигнал от дефекта, вследствие зеркального отражения зондирующего импульса от поверхности дефекта, может быть принят только приемным ПЭП 4, азимутальный угол разворота которого к оси шва выбирается из условия оптимизации приёма эхосигналов от плоскостных продольных дефектов. Передняя кромка валика не обладает свойством зеркального отражения и часть энергии отраженного от неё сигнала попадает обратно на совмещенный ПЭП 3 в виде диффузного эхосигнала. Этот эхосигнал усиливается и селективируется с использованием строб-импульса канала совмещенного ПЭП (рис. 4, диаграмма 1). Передний фронт диффузного эхосигнала (момент времени  $t_1$ ) используется для запуска импульса-задержки (диаграмма 2).

Расстояние от совмещенного ПЭП 3 до оси шва существенно меньше расстояния приемного ПЭП 4 до оси шва, поэтому эхосигналы из зоны металла шва поступают на приемный ПЭП позже момента  $t_1$ . Задний фронт импульса задержки используется для запуска строб-импульса канала приемного ПЭП (диаграмма 3). Длительность строб-импульса (диаграмма 4,  $t_2 - t_3$ ) выбирается из условия селектирования только эхосигналов от дефектов шва и не захватывает зоны кромок валика усиления.

При случайном изменении расстояния между движущимся в процессе контроля швом и парой преобразователей временной промежуток  $t_0 - t_1$  синхронно отслеживает это изменение расстояния, то есть строб-импульс (диаграмма 3) оказывается следящим за случайными поперечными смещениями передней кромки сварного шва.



**Рис. 4.** Временные диаграммы эхосигналов и строб-импульсов  
 1 – эхосигналы на выходе селектора канала ИПЗ; 2 – импульс-задержка;  
 3 – строб-импульс; 4 – эхосигналы на выходе селектора канала ПЗ;  
 пунктир – порог амплитуды  $A_{\partial}$

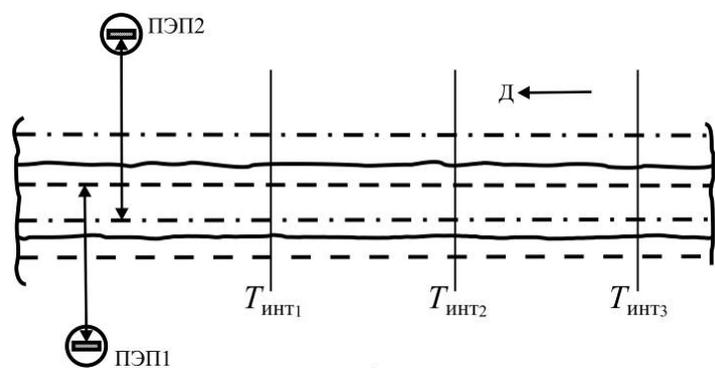
Таким образом, передний фронт строб-импульса привязан к передней кромке валика усиления, что существенно повышает достоверность контроля сварного шва вследствие того, что ложные эхосигналы от кромок валика постоянно оказываются вне строб-импульса канала приёмного ПЭП и не регистрируются им.

При использовании других схем прозвучивания, отличных от вышерассмотренной схемы, целесообразно применение другого способа формирования следящего строб-импульса. Рассмотрим особенности формирования зоны контроля для дефектоскопии сварного шва, имеющего валики усиления [9]. В каждом периоде зондирующего импульса ( $T_{з.с.}$ ) имеется сигнал  $A_k$  и можно определить измерительный импульс  $ИИ_k$ . Последовательность значений  $ИИ_k$  представляет случайную дискретную функцию  $ИИ_k [n T_{з.с.}]$ , где  $n = 1, 2, \dots, \infty$ . Нас интересует среднее значение некоторого множества значений функции  $ИИ_k [n T_{з.с.}]$ . Для интегрирования (усреднения) можно выбрать интервал  $T_{инт}$ , на котором имеется, например, 5000 значений этой функции (рис. 5, б). В первом периоде счета ( $T_{инт1}$ ) получим 5000 значений  $ИИ_k$  и вычислим среднее значение, которое обозначим  $ИИ_k^*$ :

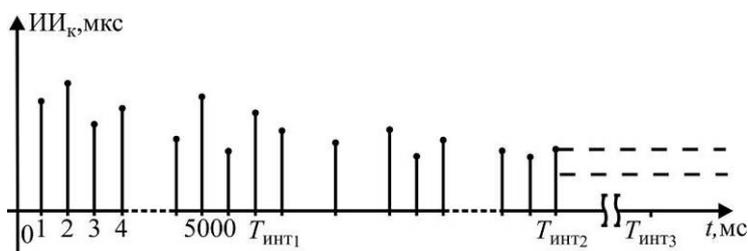
$$ИИ_k^* = \frac{1}{5000} \sum_1^{5000} ИИ_k [n T_{з.с.}].$$

Во втором периоде ( $T_{инт2}$ ) необходимо осуществить выборку значений  $ИИ_k [n T_{з.с.}]$ , которые меньше  $ИИ_{k1}^*$  (число этих значений приблизительно равно 2500). Усредняя это новое множество в конце  $T_{инт2}$ , получим второе значение  $ИИ_{k2}^*$ , которое меньше  $ИИ_{k1}^*$ . Для определения минимального  $ИИ_k^*$  можно

продолжить процедуру выборки усреднения, но для упрощения вычислений примем, что  $ИИ_{к\ min}^* = 0,8ИИ_{к2}^*$ . Теперь можем сформировать строб-импульс и использовать его для селекции дефектов шва, начиная с  $T_{инт3}$ . Значение  $ИИ_{к\ min}^*$  на рис. 5 условно показано пунктирной линией в пределах зоны шва, и эта линия соответствует заднему фронту строб-импульса. Интервал от ПЭП до этой линии в микросекундах равен  $ИИ_{к\ min}^*$ . Примем, что по периметру трубы этому интервалу соответствует расстояние 100 мм. Ширину зоны контроля для шва и околошовной зоны примем равной 20 мм, то есть длительность строб-импульса равна  $0,2ИИ_{к\ min}^*$ . Следовательно, задержка строб-импульса относительно момента возбуждения ПЭП равна  $0,8ИИ_{к\ min}^*$ . Зоны контроля (рис. 5, а) показаны пунктирной и штрих-пунктирной линиями. Так как для контроля шва используются ПЭП1 и ПЭП2 (рис. 5, а), то весь металл шва находится в пределах общей зоны контроля.



а)



б)

**Рис. 5.** Способ формирования строб-импульса:  
 а) пунктирные линии – зона контроля для ПЭП1,  
 штрих-пунктирные линии – зона контроля для ПЭП2;  
 б) отображение последовательности  $ИИ_к$  и формирования оптимальной длительности строб-импульса

Предложенный алгоритм расчёта значения  $ИИ_{к\ min}^*$  и длительности строб-импульса составлен из условия минимизации вероятности попадания случайного сигнала  $A_k$  в строб-импульс, но некоторая вероятность ложного срабатывания канала дефектоскопа сохраняется. Однако одновременное ложное срабатывание двух каналов дефектоскопа – почти невозможное событие. При наличии в металле шва плоскостного дефекта (непровар, продольная трещина и др.), расположенного в средней части сечения шва, он, как правило, регистрируется обоими каналами дефектоскопа.

### Заключительные положения

В представленном материале описаны способы автоматизированного УЗ контроля сварных швов труб с валиком усиления, которые при современном уровне построения автоматизированных установок НК-361 на базе управляющих ультразвуковых комплексов Интроскоп-02 успешно вписываются в структуру алгоритмов управления работой комплекса и обработки полученной информации. Для реализации заданных алгоритмов созданы пакеты программ, позволяющие включить в работу системы контроля каждый из приведенных способов по отдельности либо совместимые варианты комбинаций способов в зависимости от используемой схемы прозвучивания сварного шва, параметров контролируемого шва, толщины стенки трубы, скорости контроля и других факторов.

Разработанные и внедренные способы повышения достоверности контроля сварных швов обеспечивают высокую эффективность производства сварных труб большого диаметра до 1420 мм и толщиной стенки до 48 мм, выпускаемых ОАО "ВМЗ" (Россия). Благодаря внедрению современных методов неразрушающего контроля, металлургический завод постоянно повышает качество выпускаемых труб, обеспечивая соответствие труб требованиям международных стандартов API 5L и DIN EN 10246-15 и их востребованность для важных проектов государственного и международного значения, таких как Сахалин-1, Сахалин-2, Nord Stream, Узбекистан-Китай и др.

### Литература

1. Будзуляк Б.В. О планах работ ПК8 технического комитета 23 "Магистральный трубопроводный транспорт". <http://www.myshared.ru/slide/84155>. 10.09.09 г., г. Казань.
2. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 496 с.
3. Ткаченко А.А., Бобров В.Т., Кирияков В.Ф. и др. Способы повышения достоверности УЗК сварных швов труб с валиком усиления // В мире НК. 2004. № 3. С. 28-31.
4. Коряченко В.Д., Ткаченко А.А., Фак И.И. А. с. СССР № 1098393. Способ ультразвукового контроля сварных швов. Опубл. БИ, 1984, № 32.
5. Коряченко В.Д., Фак И.И., Ткаченко А.А., Бобров В.Т. А. с. СССР № 826831. Способ УЗ контроля качества сварных соединений с валиком усиления. Заявл. 07.12.79. Зарег. в Гос. реестре 04.01.1981 г.
6. Ткаченко А.А., Гаврев В.С. Способ ультразвукового контроля сварных швов с валиком усиления. Патент РМ № 2534. Бюллетень ВОПИ № 8/2004.
7. Ушаков В.М., Щербинский В.Г., Первалов С.П. Отражение и трансформация линейно-поляризованных сдвиговых волн на плоскости (свободной границе полупространства) и дефектах // Дефектоскопия. 1983. № 7. С. 70-75.
8. Ткаченко А.А., Гаврев В.С., Кирияков В.Ф. Способ ультразвукового контроля сварных швов с валиком усиления. Патент РМ № 3131. Бюллетень ВОПИ № 5/2006.
9. Ткаченко А.А., Гаврев В.С., Кирияков В.Ф. Способ ультразвуковой дефектоскопии сварных швов с валиком усиления. Патент РМ № 3132. Бюллетень ВОПИ № 5/2006.