

---

## Применение дифракционно-временного метода для дефектометрии несплошностей в сварных швах объектов атомной энергетики

Сотрудники ООО «НПП  
«Промприбор»»,  
г. Москва:



**Мищенко  
Владимир Павлович**

Начальник отдела  
Методов НК,  
III уровень по акусти-  
ческому виду НК.



**Калинин  
Андрей Викторович**

Главный инженер.

### Введение

Среди задач эксплуатационного НК оборудования и трубопроводов атомных электростанций (АЭС) и других промышленных объектов повышенной опасности все более актуальной становится задача точного определения количественных характеристик несплошностей, обнаруженных различными методами. Потребность обоснованного продления ресурса оборудования требует получения достоверной информации не только о наличии или отсутствии дефектов, но и об их реальных размерах, точных координатах, ориентации и типе. Конструкция АЭС включает большое число трубопроводов различных диаметров и назначений. Затраты на проведение мероприятий по НК и связанных с ним работ во время эксплуатации АЭС составляют не менее 50% всех затрат, связанных с эксплуатацией станции [1]. Наиболее слабым местом во всей системе трубопроводов являются сварные швы, а точнее — зона термического влияния (ЗТВ). В основном именно здесь в результате длительного воздействия остаточных напряжений, агрессивной рабочей среды, циклических нагрузок и других факторов происходит образование дефектов на внутренней поверхности трубы (в корне шва) и их развитие к поверхности шва. Чаще всего трещины начинают развиваться от непроваров и других дефектов сварки. Эти дефекты снижают эксплуатационную надежность трубопровода и всего объекта в целом. Как правило, сварные швы с такими дефектами ремонтируют. Но, как показывает пра-

критический опыт, сварные соединения с наличием дефектов, превышающих нормы браковки по классическому методу УЗК, могут проработать еще долгие годы.

В некоторых случаях действующие нормы оценки допустимости дефектов по УЗК необоснованно ужесточены, что влечет за собой значительные объемы ремонтных работ, и, как следствие, предприятия несут завышенные финансовые расходы. Ужесточение норм контроля используется для обеспечения возможности выявления дефектов, имеющих различную ориентацию, для этого во многих методиках УЗК повышают чувствительность браковочного уровня в несколько раз. Схожая проблема имеется и с браковочными критериями, основанными на измерении условных размеров дефектов, ведь они зачастую в большей степени отражают ширину диаграммы направленности ПЭП, чем реальные размеры дефектов.

Для эффективного применения результатов прочностных расчетов необходима точная информация о типах, размерах и местоположении обнаруженных дефектов. С другой стороны, несмотря на жесткость норм браковки, классический УЗК не гарантирует выявление наиболее опасных дефектов типа трещин из-за их сложной конфигурации и, соответственно, их малой отражающей способности. Поэтому на сегодняшний день от служб НК требуется решение задач иного уровня — не выявление дефектов, а контроль их развития. Для этого необходимо определять размеры дефектов с высокой точностью ( $\pm 0,5$  мм). Определение размеров дефекта, особенно его реальной высоты, дает возможность более правильно оценить эксплуатационную надежность соединений, следить за развитием дефекта в процессе дальнейшей эксплуатации и впоследствии выбрать соответствующий тип ремонта (наплавка сварного шва, вырезка участка трубы).

Для решения поставленных задач необходимо использовать технологии, способные реализовать когерентные методы обработки и визуализации информации с программным инструментом измерения высоты трещин. Такой перспективной технологией НК, способной предоставить необходимую информацию о дефекте, является ДВМ — дифракционно-временной метод (TOFD — Time Of Flight Diffraction). Он основан на приеме волн, рассеянных на концах плоскостных дефектов, и предоставляет возможность решения задач дефектометрии, т. е. определение реальных размеров дефектов.

Оборудование, в котором реализован ДВМ, дает возможность измерять количественные характеристики выявленной несплошности. Именно на этих принципах построены приборы ультразвукового НК УД4-76 и УД3-71 производства ООО «НПП «Промприбор» с использованием специализированных сканирующих устройств TOFD 2.10 Pro, TOFD 1.10 Lite и СКТЦ-М.

### Основные принципы и преимущества применения метода TOFD

ДВМ основан на взаимодействии ультразвуковой волны с краями несплошности. Это взаимодействие приводит к излучению дифракционных волн в широком диапазоне углов, регистрация которых и позволяет установить наличие несплошностей, провести измерение их параметров (рис. 1).

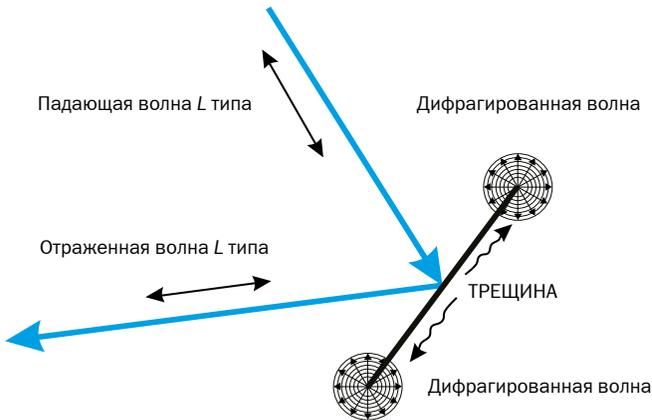


Рис. 1. Дифракция волн от краев плоскостного дефекта

Первое преимущество ДВМ касается его высокой достоверности по сравнению с классическим УЗК. Прекрасно известно, что при помощи эхо-метода УЗК плоские дефекты, такие как трещины, могут быть обнаружены, только если они перпендикулярны направлению прозвучивания или имеют незначительные отклонения от этого направления [2]. Таким образом, при контроле сварных швов могут быть обнаружены только продольные и близкие к ним по ориентации трещины, поскольку в противном случае эхо-сигнал не возвращается на датчик, а уходит в сторону (рис. 2а).

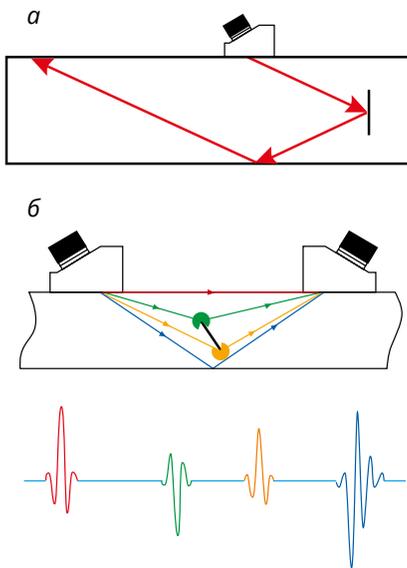


Рис. 2. Методы прозвучивания: *a* — классический метод; *б* — ДВМ

ДВМ, напротив, позволяет обнаружить трещины практически любой ориентации, поскольку дифрагированный сигнал переизлучается во всех направлениях и поэтому может быть принят вторым датчиком, независимо от ориентации трещины (рис. 2б).

Следующее преимущество ДВМ — это производительность проведения контроля. Используются специальные датчики с широкой диаграммой направленности, что позволяет проконтролировать все сечение сварного шва, не перемещая датчик перпендикулярно шву. Контроль сканером ДВМ сварного шва во много раз быстрее, чем его ручной контроль при проведении классического УЗК (рис. 3).

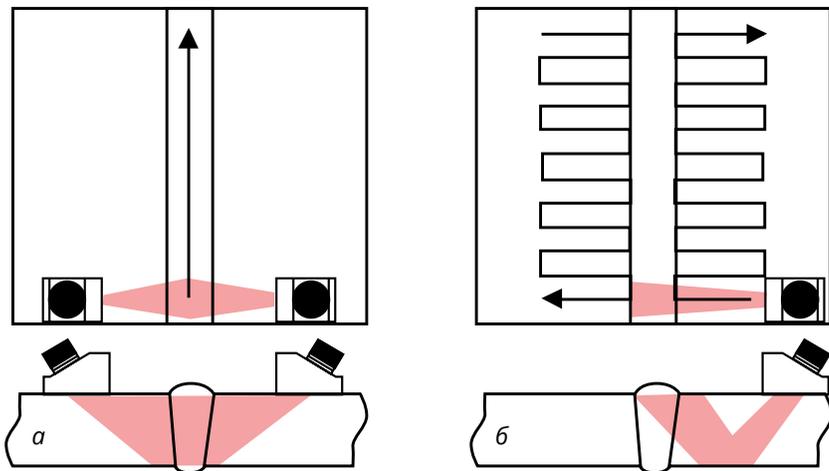


Рис. 3. Схемы сканирования: *a* — ДВМ; *б* — классический метод

Ниже приведены наиболее существенные преимущества ДВМ перед классическим эхо-импульсным методом:

1. Возможность достижения более высокой точности при проведении измерений, как правило,  $\pm 0,3$  мм.
2. Независимость обнаружения дефекта от его углового положения.
3. Измерение параметров дефекта основано на времени прохождения пути дифракционных сигналов и не зависит от амплитуды сигнала.
4. Высокая производительность контроля, так как сканирование проводится вдоль одной линии с прозвучиванием всего объема шва.
5. Высокая воспроизводимость результатов контроля.
6. Альтернатива радиационному методу НК.

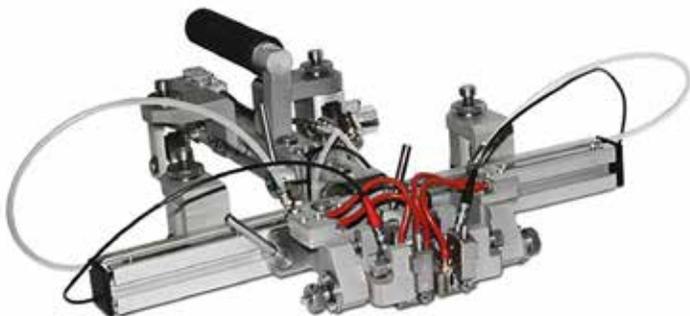
Использование метода ДВМ одобрено во многих нормативных документах, таких как:

- ASME Code Case 2235-6 «Стандарт по бойлерам и сосудам работающим под давлением»;
- BS 4515-1:2009 «Технические условия по сварке стальных наземных и морских трубопроводов. Трубопроводы из углеродистых и углеродо-марганцевых сортов стали»;
- BS 7706:1993 Руководство по калибровке и настройке приборов с применением дифракционно-временного метода для определения месторасположения и размеров дефектов»;
- EN 583-6 «Контроль неразрушающий — Ультразвуковой метод — Часть 6: Дифракционно-временной метод обнаружения и измерения несплошностей».

Для решения задач дефектometрии и реализации всех требований существующей нормативной документации ООО «НПП «Промприбор» был разработан комплект оборудования, необходимый для проведения TOFD-контроля, который в себя включает: универсальные ручные дефектоскопы УДЗ-71 и УД4-76 с программным приложением «TOFD», сканирующие устройства TOFD 1.10 Lite, TOFD 2.10 Pro и СКТЦ-М, специализированные TOFD-преобразователи. Представленные на рис. 4 сканирующие устройства TOFD 1.10 Lite, TOFD 2.10 Pro и СКТЦ-М предназначены для проведения УЗК по ДВМ как продольных, так и кольцевых сварных соединений плоских объектов, труб среднего и большого диаметра (от 600 мм) и толщиной стенки от 6 до 75 мм.

Сканер TOFD 1.10 Lite предназначен для проведения контроля ДВМ продольных сварных соединений плоских объектов; сканер

*а*



*б*



*в*

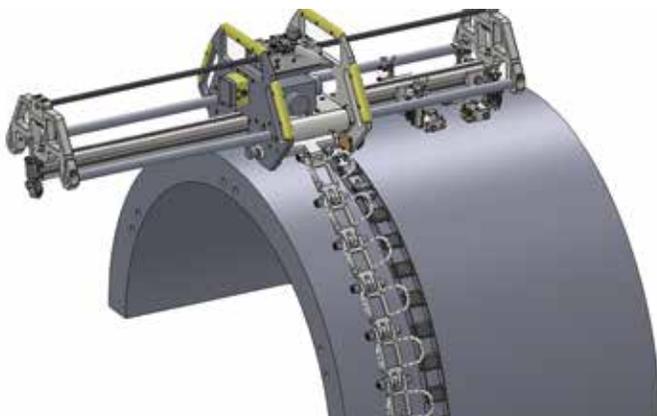


Рис. 4. Сканирующие устройства: *а* — сканер TOFD 1.10 Lite; *б* — сканер TOFD 2.10 Pro; *в* — сканер СКТЦ-М

TOFD 2.10 Pro — для контроля продольных сварных соединений плоских объектов и труб большого диаметра (от 600 мм); сканер СКТЦ-М — для контроля кольцевых сварных соединений труб диаметром от 320 до 1420 мм.

Сканирующие устройства позволяют располагать пару TOFD-преобразователей друг напротив друга на необходимом расстоянии и перемещать их вдоль и, при необходимости, поперек сварного шва. Сканер оснащен датчиком пути — для записи своего положения во время сканирования. Для подготовки сканирующих устройств к контролю необходимо установить расстояние между преобразователями для оптимального прозвучивания контролируемой области. Обычно предполагается, что пучки пары преобразователей пересекаются на глубине, равной  $2/3$  толщины объекта контроля. Поэтому расстояние между ПЭП может быть рассчитано по формуле  $L = 4/3 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \alpha$ , где  $H$  — толщина объекта контроля;  $\alpha$  — угол ввода ПЭП.

В ДВМ применяются специализированные ПЭП, отличительной особенностью которых по сравнению со стандартными наклонными преобразователями является возбуждение наклонной продольной волны. Это связано с ее скоростью распространения и свойствами затухания. Поэтому данный тип преобразователей может использоваться для контроля толстостенных сварных соединений (до 75 мм), а также для контроля трубопроводов из аустенитных сталей. Во-вторых, TOFD-преобразователи имеют короткий сигнал возбуждения (от 1,5 до 2 периодов) для обеспечения необходимого разрешения и определения трещин, развивающихся от корня и верха шва. И наконец, TOFD-преобразователи имеют широкую диаграмму направленности в вертикальной плоскости. Благодаря этому можно проконтролировать все сечение шва, не перемещая ПЭП в поперечном направлении, как это делается при обычном УЗК наклонными ПЭП.

TOFD-преобразователи, как правило, являются составными и собираются из резонатора и призмы. Обычно используются три типа призм: для обеспечения угла ввода  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $70^\circ$ .

Также неотъемлемой частью ДВМ является способ представления информации и программное обеспечение прибора. В ультразвуковых дефектоскопах УД4-76 и УД3-71 реализовано несколько режимов отображения результатов контроля. Основным и наиболее информативным является режим TOFD-скан (рис. 5), который позволяет визуально

определить наличие несплошности и ее расположение внутри контролируемого объекта.

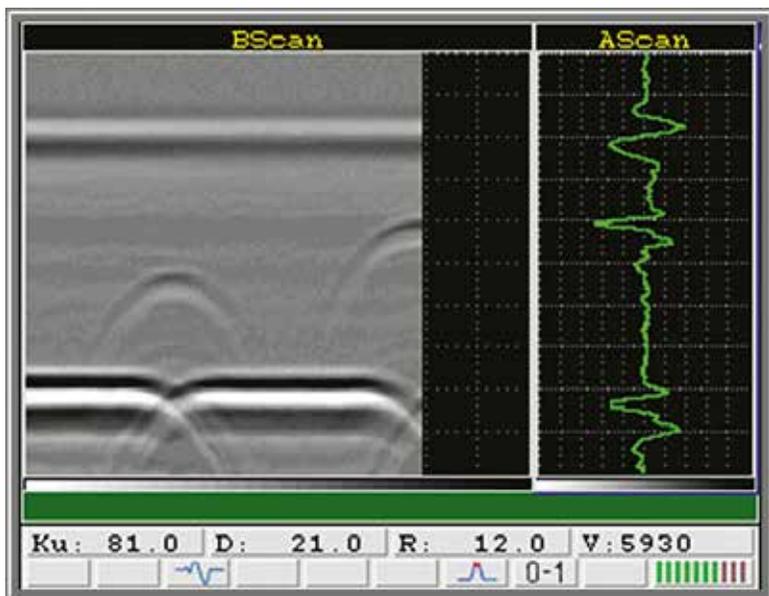


Рис. 5. Режим TOFD-скан

### Анализ данных: индикации и типы дефектов

При просмотре и анализе TOFD-скана всегда наблюдаются две линейные индикации, соответствующие головной волне и донному сигналу. Примеры возможных индикаций при отсутствии и наличии несплошностей приведены на рис. 6:

1. Индикации от головной волны и донного сигнала не прерываются по пути сканирования и дополнительные индикации между ними отсутствуют, что свидетельствует об отсутствии дефектов.
2. Наблюдается разрыв индикации головной волны и дополнительная индикация под этой точкой, это свидетельствует о наличии трещины, развивающейся с внешней поверхности (рис. 6а).
3. Наблюдается разрыв индикации донного сигнала и дополнительная индикация над этой точкой, это свидетельствует о наличии трещины, развивающейся с донной поверхности (рис. 6б).

4. Разрывов линейных индикаций не наблюдается, но при этом имеются две дополнительные индикации одна под другой, это свидетельствует о наличии внутренней трещины (рис. 6а).
5. Если наблюдаются непрерывные основные индикации и только одна индикация между ними, это свидетельствует о наличии некоторого объемного дефекта — непровара, шлакового включения и т. п. (рис. 6г).
6. Если наблюдается разрыв обеих основных индикаций в одной точке, то это означает, что в этот момент времени был нарушен акустический контакт по меньшей мере одного датчика. В таком случае необходимо провести повторный контроль этой зоны.

Таким образом, проанализировав весь полученный TOFD-скан, получаем список обнаруженных дефектов с указанием их положения и типа. После просмотра и анализа полученных индикаций, используя программный инструмент дефектоскопов, проводится дефектометрия обнаруженных несплошностей.

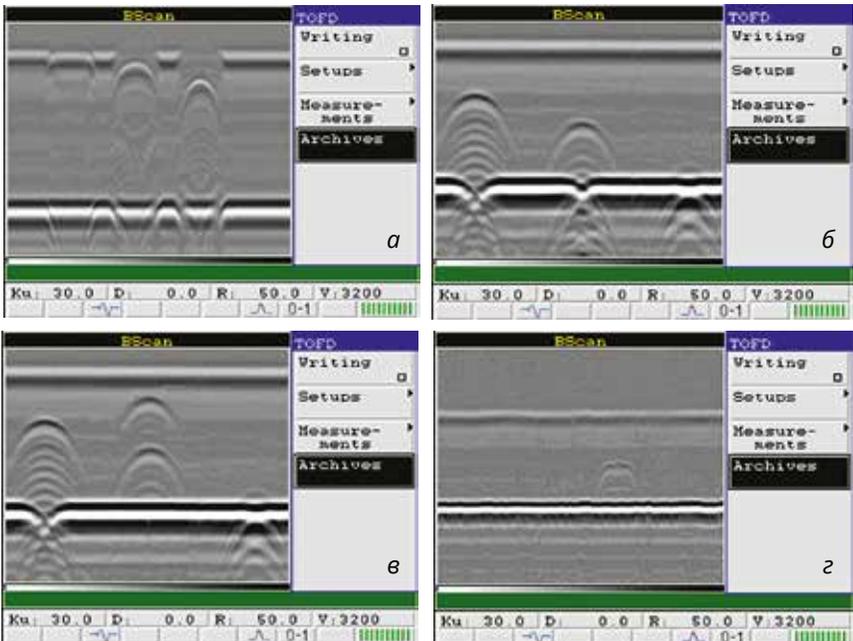


Рис. 6. Примеры TOFD-скана, характерные для выявления поверхностной (а), корневой (б), внутренней (в) трещин и объемного дефекта (г)

Приведем этапы проведения дефектометрии при использовании ультразвуковых дефектоскопов УД4–76 или УД3-71:

### **Измерение высоты трещин**

Первым шагом при дефектометрии является измерение высоты трещины. Чтобы выполнить данную операцию, следует установить курсор измерительного строба на главный полупериод индикации дифрагированного сигнала и провести измерение с помощью инструментов программного обеспечения (рис. 7).

При обнаружении внутренней трещины используются два измерительных строба, которые устанавливаются на главные полупериоды дифрагированных сигналов от верхнего и нижнего краев трещины.

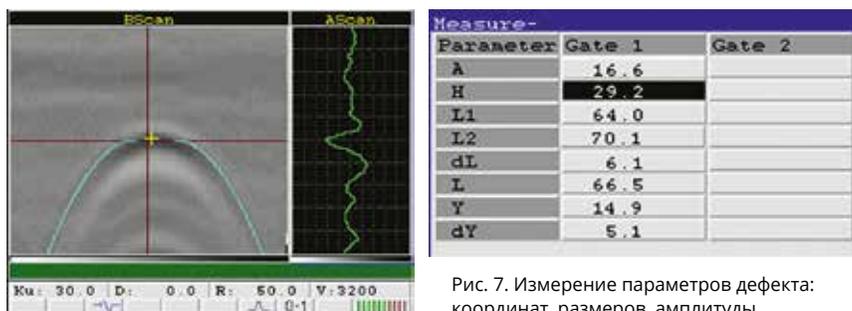


Рис. 7. Измерение параметров дефекта: координат, размеров, амплитуды

### **Измерение протяженности трещины**

Второй шаг в дефектометрии — это измерение длины трещины. Анализ индикации дефектов на TOFD-скане показывает, что ни одна из них не является точечной. Все индикации от дефектов имеют некоторую протяженность. Индикацию от протяженного дефекта можно разделить на три части: центральная соответствует длине дефекта, а два «крыла» «производит» диаграмма направленности ПЭП. И только одна из этих частей — центральная — является информативной. Каким образом определяется центральная часть индикации? Где она начинается и где заканчивается?

Для решения данной задачи в программном обеспечении дефектоскопов УД3–71 и УД4–76 предусмотрен гиперболический строб, состоящий из двух гиперболических курсоров. При измерении протяженности дефекта используется специальный программный алгоритм, позволяю-

щий накладывать левый и правый курсоры, соответственно, на левое и правое «крылья» индикации. Таким образом, они ограничивают центральную часть индикации, которая соответствует фактической длине дефекта. Вся описанная процедура измерения выполняется автоматически. При низком отношении сигнал/шум автоматический алгоритм может не совсем правильно определить позиции гиперболических курсоров. В таком случае предусмотрен режим ручного совмещения курсоров с «крыльями» индикации.

Таким образом, использование метода TOFD и специализированного оборудования позволит повысить качество проведения контроля сварных швов за счет прозвучивания всего сечения шва и проводить дефектometriю с точностью до  $\pm 0,3$  мм. Применение этого метода на объектах повышенной опасности (контроль кольцевых и продольных сварных швов трубопроводов) позволит существенно сэкономить время на контроль, определять истинные размеры несплошностей и тем самым оценивать степень опасности дефекта и принимать соответствующие меры по ремонту дефектного участка.

## Литература

1. Гетьман А. Ф., Козин Ю. Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. — М.: Энергоатомиздат, 1997.
2. Щербинский В. Г., Алешин Н. П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.