

Выявление, идентификация и измерение размеров плоскостных дефектов с применением технологий TOFD

Сотрудники Украинского научно-исследовательского института неразрушающего контроля (УкрНИИНК), г. Киев



**Радько
Виталий
Игнатьевич**

Заместитель
директора, к. т. н.,
специалист
III уровня
по UT, MT, PT, VT



**Заплотинский
Игорь
Андреевич**

Главный
специалист по
технологии НК,
специалист
III уровня
по UT, MT



**Галаненко
Денис Валерьевич**

Начальник бюро
перспективных
разработок
НПФ «Промприбор»,
г. Москва
Специалист
III уровня по UT, AT

Проблема выявления, идентификации и измерения размеров плоскостных дефектов, в первую очередь трещин в различных деталях и изделиях, является одной из наиболее актуальных для НК. Эта проблема еще больше усложняется в том случае, когда проведение контроля возможно только с одной из поверхностей детали (например, при эксплуатационном контроле различных трубопроводов, сосудов, корпусного оборудования с ограниченным доступом к внутренней поверхности) с целью выявления трещин, расположенных в районе противоположной (внутренней) поверхности как в основном металле, так и в сварных швах.

Одним из наиболее характерных примеров таких деталей являются гнутые элементы труб (гибы, отводы) трубопроводов ТЭС и АЭС, работающие при высокой температуре и под внутренним давлением, т. е. в условиях высоких знакопеременных напряжений. По этой причине гибы склонны к разрушениям, и достоверный контроль их состояния — основное средство обеспечения надежности и безопасности эксплуатации оборудо-

дования. Зоны повреждения гибов, работающих в водной среде, — внутренняя поверхность преимущественно в зоне нейтралей, подверженных воздействию высокой температуры, — растянутая зона. Наиболее эффективно контроль этих зон осуществляется ультразвуковым методом НК.

В 1965–1970 гг. был разработан ряд нормативных документов, в которых рассматривался вопрос контроля гибов различных толщин и диаметров. Одной из первых в 1970 г. начала применяться инструкция по контролю гибов толщиной 7–12 мм из перлитной стали, предусматривающая применение пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) с рабочей поверхностью, притертой под наружный диаметр трубы. Однако критерии ориентации ПЭП по углу ввода в этой инструкции отсутствовали, из-за чего не обеспечивалось надежное выявление трещин в гихах: наблюдались повреждения гибов после проведения контроля.

В 1978 г. начались работы над новой инструкцией, которая была введена в действие в 1981 г. как широко известная и действующая до сих пор И № 23 СД-80 (РД 34.17.418). В этой инструкции впервые были сформулированы требования к метрологическому обеспечению УЗК гибов: нормированы требования к преобразователям, образцам и приведены нормированные комплексные характеристики акустического тракта, даны расчеты углов призмы преобразователей для обеспечения требуемого угла встречи с дефектом. При опробовании методики на реальных гихах она показала более высокую достоверность в сравнении с другими разработанными на то время методиками в части выявления трещин на внутренней поверхности гибов. Методика построена на применении схемы прозвучивания, обеспечивающей угол встречи 45° с дефектом типа трещины, расположенном на внутренней поверхности гиха. Контроль по схеме с углом встречи 45° предусматривался для гибов с отношением толщины стенки к наружному диаметру до 0,17. В связи с этим в 1987 г. было выпущено изменение к И № 23 СД-80, предписывающее УЗК гибов труб с отношением толщины стенки к наружному диаметру более 0,17. При этом угол встречи луча с дефектом должен быть 90° . Однако при практическом контроле в соответствии с этим изменением имели место пропуски дефектов, а также перебраковки, поэтому в вышедшем в 1985 г. «Положении об оценке ресурса, порядке контроля и замены гибов» РД 34.17.417 предусматривалась процедура корректировки чувствительности УЗК. В 1985 г. также вышел и начал применяться

на котельных заводах для входного контроля труб ОСТ 108.885.01, регламентирующий в том числе методику УЗК труб, который был разработан с учетом требований ГОСТ 17410 и инструкции И № 23 СД-80. Приемы контроля, предусмотренные в ОСТ 108.885.01, позволяли в гихах и трубах выявлять технологические дефекты трубного производства (прежде всего — закаты) за счет применения нормальных преобразователей.

В 1983 г. предприятием Уралтехэнерго была проведена работа по исследованию демонтированных при ремонтах дефектных гихов с целью определения достоверности контроля и выявляемости методом УЗК дефектов различной формы и ориентации. Установлено, что лучше выявляются дефекты типа углового отражателя, т. е. трещины и другие плоскостные дефекты, например, рисы, длинные задиры, закаты; объемные дефекты выявляются значительно хуже. Так, выявляемость язв, питтингов составляет до 40%, ножевой коррозии, борозд — от 60 до 75%, трещин — до 90%. Таким образом, выявляемость начального процесса растрескивания (стадия образования цепочек язв, являющихся местом зарождения и развития трещин) низкая, что не удовлетворяет идеологии контроля в соответствии с РД 34.17.417, где предусмотрены «контрольные группы» гихов, по состоянию которых оцениваются другие гихы на данном объекте. Для возможности выявления трещин в гихах на стадии их зарождения был ужесточен уровень браковки. Это привело к тому, что рисы на внутренней поверхности труб, допустимые по действующим в трубной промышленности ТУ, очень часто браковались при проведении входного контроля труб (гихов) на предприятиях Минэнерго. При этом еще и обострилась проблема идентификации рис и трещин на внутренней поверхности гихов.

Существенным недостатком рассмотренных выше нормативных документов по УЗК гихов является то, что оценка качества гихов труб производится только по амплитудному признаку (эхо-сигнал от дефекта больше или меньше эхо-сигнала от зарубки), без определения размеров дефектного поля и высоты трещин. Последнее имеет очень важное значение, так как в настоящее время на базе механики разрушений в практику вошли расчеты допустимости эксплуатации трубопроводов, а также другого оборудования с трещинами на внутренней поверхности в зависимости от измеренной высоты трещин. Естественно, что эксплуатация такого оборудования с трещинами на внутренней поверхности возможна только при наличии аппаратуры, позволяющей контролиро-

вать процесс развития трещин и при этом измерять их размеры (в первую очередь высоту) с точностью, достаточной для поверочных расчетов.

Еще одним ярким примером дефектов, расположенных в подповерхностных слоях изделий, являются поднаплавочные трещины в плакированных трубопроводах и корпусном оборудовании АЭС. Эти трещины зарождаются на границе раздела антикоррозионной наплавки с основным металлом оборудования или перлитной частью сварных швов и идут перпендикулярно к границе раздела в перлитный металл. Актуальна также проблема идентификации поднаплавочных трещин, т. к. в корне сварного шва могут находиться также и другие дефекты — непровары, несплавления, шлаковые включения (рис. 1). Измерение высоты поднаплавочных трещин является важнейшей задачей, позволяющей принимать обоснованные решения о ремонте оборудования или его дальнейшей эксплуатации при условии наблюдения за выявленной трещиной.

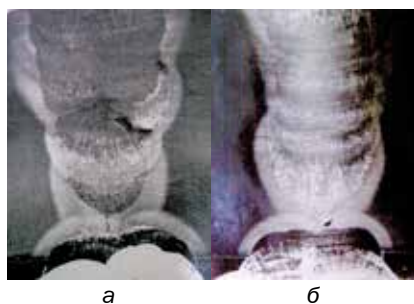


Рис. 1. Поднаплавочная трещина и непровар в корне перлитной части сварного шва плакированного трубопровода Ду 800 мм (макрошлифы)

Задачу измерения глубины трещин в сварных швах или основном металле можно решить путем применения волн дифракции, возникающих от краев трещины. Исследования [1–3] показали, что волны дифракции можно возбуждать, а затем и принимать, используя продольные и поперечные волны, а также их комбинацию. Попытки измерения высоты продольных трещин на внутренней поверхности труб ультразвуковым

методом в ручном варианте с применением выпускаемой в то время аппаратуры предпринимались еще в 1980–90-х гг. Место расположения дефекта определялось в соответствии с действующим в отрасли НД (например, в трубах — по инструкции И № 23 СД-80), затем место расположения дефекта прозвучивалось по так называемой «дельта-схеме» [3] с применением серийных ПЭП — двумя наклонными преобразователями либо наклонными и прямыми — и выявлялся максимум эхо-сигнала от дефекта за счет возбуждения и приема волн дифракции от

вершины трещины. Вначале выявлялся донный сигнал, затем вершина трещины. Для контроля и измерения использовались различные дефектоскопы, в т. ч. УД2–12. Для возбуждения и приема волн дифракции при применении дефектоскопов УД2–12 необходимо было устанавливать высокие уровни излучаемого сигнала и усиления, что, в свою очередь, предъявляло жесткие требования к преобразователям. Для настройки чувствительности и скорости развертки использовались образцы, изготовленные из трубы с такими же типоразмерами и той же маркой стали, что и контролируемая труба. В образце делались пропилы тонкой фрезой треугольного профиля. Для тарировки изготавливалось несколько образцов с пропилами разной глубины. Определение высоты трещины производится двумя путями: графическим — по построению схемы прозвучивания, или по графику, построенному по результатам прозвучивания образцов с пропилами различной глубины. Таким образом, измерение высоты трещин с помощью дефектоскопов общего назначения и серийных ПЭП имеет целый ряд ограничений, в частности, описанным способом можно более-менее достоверно измерять высоту трещин до 10 мм.

В настоящее время для решения задач поиска дефектов и измерения их размеров во многих отраслях промышленности широкое применение получила технология TOFD, представляющая собой группу дифракционно-временных методов, используемых для оценки дефектов, — в особенности трещин, расположенных как в приповерхностных слоях, так и в сечении изделий.

Рассмотрим принцип дифракционно-временного метода. На рис. 2 видно, что при обнаружении внутренней трещины принимаются четыре сигнала. Два из них (сигнал головной волны и донный эхо-сигнал) присутствуют даже без обнаружения дефектов и ограничивают зону контроля.

При обнаружении трещины мы можем наблюдать один или два дополнительных сигнала, дифрагированных от вершин трещины. Позиции этих сигналов по отношению к «базовой» паре сигналов, т. е. их время распространения (Time Of Flight), дает нам информацию о высоте трещины. Зависимость между высотой трещины и разностями времен прихода сигналов является нелинейной, и производить такие расчеты вручную крайне сложно, поэтому эта функция обычно реализуется в программном обеспечении TOFD-систем.

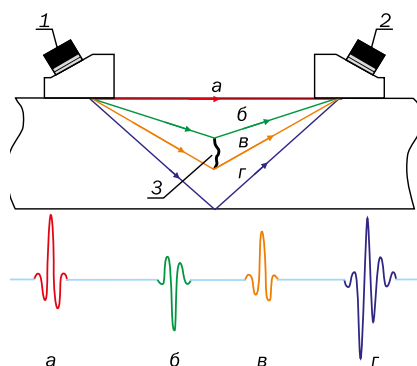


Рис. 2. Принцип TOFD: 1 — излучатель; 2 — приемник; 3 — трещина; а — головная волна; б — дифрагированный сигнал от верхнего края трещины; в — дифрагированный сигнал от нижнего края трещины; г — донный сигнал

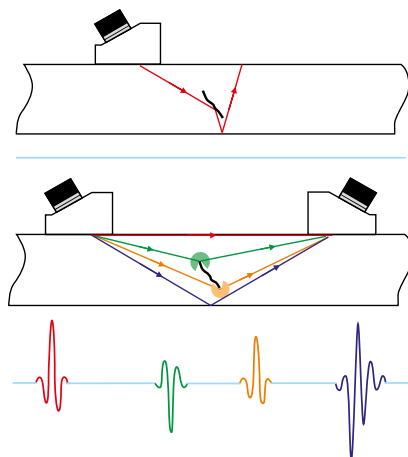


Рис. 3. Выявление наклонных трещин

Одним из существенных преимуществ TOFD является большая достоверность результатов по сравнению с результатами обычного УЗК и радиографии. При помощи обычного УЗК плоскостные дефекты типа трещин в сечении изделия могут быть надежно выявлены, только если они перпендикулярны направлению прозвучивания (или незначительно отклоняются от этого направления). Трещины, развивающиеся от поверхности изделия и образующие с ней угол 90° (угловой отражатель), выявляются несколько хуже, а в случае отклонения плоскости трещины от этого угла более, чем на 10° , практически не выявляются (кроме случаев, когда они перпендикулярны направлению прозвучивания). Таким образом, амплитуда эхо-сигнала от трещины имеет сложную угловую зависимость, что существенно снижает выявляемость трещин и их оценку только по амплитудному критерию.

TOFD позволяет обнаружить трещины практически любой ориентации, поскольку дифрагированный сигнал переизлучается во всех направлениях и может быть принят вторым датчиком независимо от ориентации трещины (рис. 3).

Еще одно преимущество TOFD — это производительность контроля. Дело в том, что для TOFD используются специализированные ПЭП с чрезвычайно широкой диаграммой направленности, что позволяет контролировать все сечение сварного шва, не перемещая ПЭП пер-

пендикулярно шву¹. Эти ПЭП используют продольные волны, потому что они обладают самой высокой скоростью распространения и самым низким затуханием, а большинство обычных наклонных ПЭП используют поперечные волны. При этом для обеспечения необходимого разрешения излучается очень короткий сигнал — в несколько раз короче, чем у обычных наклонных ПЭП. ПЭП, используемые в методе TOFD, как правило, являются составными и собираются из резонатора и призмы. Обычно используются 3 типа призм: для обеспечения угла ввода 45, 60 и 70 ° в зависимости от задач контроля [4–7]. Сканирование сварного шва сканером TOFD намного быстрее, чем ручной контроль при обычном УЗК (рис. 4). В результате сокращается время контроля, что особенно актуально в условиях эксплуатационного контроля оборудования и трубопроводов АЭС.

Все эти преимущества технологии TOFD реализованы в TOFD-версиях дефектоскопов для ручного контроля УДЗ-71 и УД4-76 в комплекте с TOFD сканером и ПЭП (разработка ООО «Промприлад», г. Киев, Украина).

Рассмотрим сканер, используемый с этими дефектоскопами (рис. 5). Он позволяет располагать пару ПЭП друг против друга на необходимом расстоянии, которое можно установить с помощью встроенной линейки, и перемещать их вдоль и, при необходимости, поперек сварного шва. Сканер оснащен датчиком пути — для записи своего положения во время сканирования. Чтобы подготовить сканер к контролю, нужно

¹ Все сечение шва одной парой ПЭП перекрывается при контроле изделий толщиной до 70 мм. Для контроля более толстолистовых объектов применяют две и более пар ПЭП.

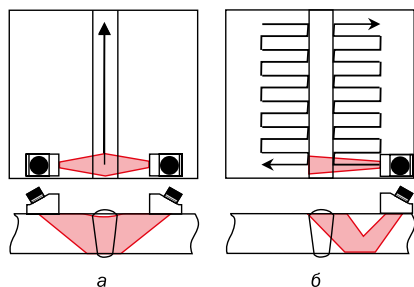


Рис. 4. Траектория сканирования: а — при контроле методом TOFD; б — при обычном методе УЗК



Рис. 5. Сканер для контроля методом TOFD

установить расстояние между ПЭП для оптимального прозвучивания контролируемой области. Обычно предполагается, что акустические оси пары ПЭП пересекаются на глубине, равной $2/3$ от толщины объекта контроля. Так что расстояние между ПЭП может быть рассчитано по формуле: $L = (4/3) H \operatorname{tg} \alpha$, где H — толщина объекта контроля, α — угол ввода ПЭП.

После подготовки сканера производится настройка дефектоскопа. Наиболее важным пунктом здесь является калибровка задержки в призме ПЭП и скорости звука в объекте контроля. В дефектоскопах УДЗ-71 и УД4-76 эта процедура полностью автоматизирована. Достаточно установить значение толщины изделия, далее установить сканер на бездефектную часть объекта контроля, застробировать сигнал головной волны и донный сигнал и активировать пункт меню «Измерить», т. е. для настройки дефектоскопа не требуется никаких специальных образцов.

После завершения калибровки можно приступить к сканированию объекта контроля и сбору данных. В процессе контроля получаемые данные визуализируются в реальном времени в одном из трех режимов:

- А-скан — привычный нам из обычного УЗК;
- TOFD Б-скан (иногда его называют TOFD-скан);
- комбинация — А+Б-скан.

В режиме А+Б-скан меню дефектоскопа скрыто, но его можно показать одним нажатием кнопки «Режим».

После окончания сканирования производится анализ собранных данных. Прежде всего, необходимо просмотреть их. Программное обеспечение дефектоскопов позволяет взглянуть на общую картину всех собранных данных в режиме Б-скан. Также имеется возможность увеличить некоторые интересные части или прокрутить все данные в увеличенном режиме. Также, перемещая курсор по данным Б-скана, можно просмотреть А-сканы, полученные во всех точках вдоль пути сканирования.

На TOFD-скане мы всегда будем видеть две линейных индикации, соответствующих головной волне и донному сигналу. На рис. 6 представлены характерные TOFD-сканы при выявлении различных типов дефектов.

Если линейные индикации, соответствующие головной волне и донному сигналу, не прерываются и дополнительные индикации между ними отсутствуют, то это значит, что никаких дефектов не обнаружено.

Если наблюдается разрыв индикации головной волны и дополнительная индикация под этой точкой, то это значит, что обнаружена трещина, начинающаяся с внешней поверхности.

Если наблюдается разрыв индикации донного сигнала и дополнительная индикация над этой точкой, то это значит, что обнаружена трещина, начинающаяся с донной поверхности.

Если разрывов линейных индикаций не наблюдается, зато имеются две дополнительных индикации одна под другой, то мы обнаружили внутреннюю трещину.

Если же мы видим непрерывные основные индикации и в дополнение видим только одну индикацию между ними, то мы обнаружили не трещину, а некий объемный дефект — непровар, шлаковое включение и т. п.

И, наконец, если наблюдается разрыв обеих основных индикаций в одной точке, то это означает, что в этот момент был нарушен акустический контакт, по меньшей мере, одного ПЭП. В таком случае необходимо провести повторный контроль этой зоны.

Таким образом, проанализировав весь полученный TOFD-скан для данного объекта контроля или его участка, мы получаем список обнаруженных дефектов с указанием их типов.

После этого следует провести дефектometriю. Для этого потребуется сделать еще одну калибровку — по записанному *Б*-скану. Нужно указать программе УДЗ-71 или УД4-76 главный полупериод головной волны. Он в дальнейшем будет использоваться как отправная точка при расчетах высоты трещины. Для этого следует установить курсор внутри индикации соответствующего полупериода и активировать пункт меню «Калибровка». После этого можно проводить измерение высоты трещины. Чтобы сделать это, следует установить курсор измерительного строба на главный полупериод индикации дифрагированного сигнала и активировать пункт меню «Измерить».

Если обнаружена трещина в сечении, то для измерения ее высоты используются два строба. Первый строб устанавливается на индикацию от верхнего края трещины, а второй — на индикацию от нижнего края.

Следующий шаг в дефектometriи — это измерение длины трещины (рис. 7). По индикациям дефектов на *Б*-скане видно, что ни одна из трещин не является точечной. Все они имеют некоторую протяженность, но длина индикации не совпадает с фактической длиной дефекта.

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, и ее необходимо отделить от крыльев. Для решения этой задачи в программном обеспечении дефектоскопов УДЗ-71 и УД4-76 предусмотрен гиперболический строб, состоящий из двух гиперболических курсоров. Здесь используется специальный программный алгоритм, позволяющий накладывать левый и правый курсоры на левое и правое крылья индикации соответственно. Таким образом, они ограничивают центральную часть индикации, которая соответствует фактической длине дефекта. Все это делается полностью автоматически. Но иногда при низком отношении сигнал/шум автоматический алгоритм может не совсем правильно определять позиции гиперболических курсоров. В таком случае нужно перейти на ручной режим и визуально совместить курсоры с «крыльями» индикации.

Иногда возникает необходимость сравнить два дефекта, их размеры и координаты. Для этого используются два строба — их размещают на индикациях обнаруженных дефектов, в результате чего дефектоскоп выдает сравнительную таблицу параметров этих дефектов.

Заключение

Использование TOFD-версий дефектоскопов УДЗ-71 и УД4-76 в комплексе с TOFD-сканером и ПЭП позволяет:

- сократить время простоя оборудования: для проведения контроля достаточно выполнить только продольное сканирование;
- повысить достоверность и информативность контроля, так как выявляются и измеряются трещины практически любой ориентации;
- выявлять и измерять размеры дефектов на труднодоступных участках оборудования, что обеспечивается небольшими размерами применяемого TOFD-сканера и дефектоскопов;
- принимать обоснованные решения о необходимости замены, ремонта или дальнейшей эксплуатации оборудования, зная тип и фактические размеры (следовательно, и степень опасности) дефектов, выявленных в процессе контроля;
- экономить средства на необоснованные ремонты и замены деталей;
- снизить дозовые нагрузки на персонал, выполняющий контроль, заменяя в ряде случаев рентгенографию на TOFD, а также уменьшая

время контроля оборудования, находящегося в зоне действия ионизирующего излучения;

- предоставить дефектоскописту богатый набор инструментов для анализа и визуализации данных контроля.

Литература

1. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. – Киев: Техника, 1972. — 460 с.
2. Krautkramer I., Krautkramer H. Werkstoffprüfung mit Ultraschall. — Berlin-New York: Springer Verlag, 1975. — 669 S.
3. Григорьев М. В., Гурвич А. К., Гребенников В. В., Семирханов С. В. Ультразвуковой способ определения размеров трещин. — Дефектоскопия. 1979. № 6. С. 50–56.
4. Стандарт ASME по бойлерам и сосудам давления. Раздел VIII. Code Case 2235–9.
5. Стандарт API 579. Recommended Practice for Fitness-for-Service.
6. Отчет CEN/TS 14751:2004. Применение дифракционно-временного метода (TOFD) для контроля сварных соединений.
7. Стандарт ENV 583–6:2000 Non-destructive testing — Ultrasonic examination. Part 6: Time-of-flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities.