



The methods of the non destructive testing of pipes during manufacture are considered. It is shown, that the ultrasonic method provides revealing all types of defects peculiar to seamless pipes. The ways of pipes automated testing realization of are determined.

А. Л. МАЙОРОВ, П. П. ПРОХОРЕНКО, ГНУ «ИПФ НАН Беларуси»

УДК 621.179

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ БЕСШОВНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

Производственные дефекты труб определяют технологию их изготовления. Наибольшее распространение получило несколько технологий. В первую очередь это производство электросварных труб. В этом случае основное внимание уделяется продольному сварному шву и дефектам листа, из которого труба формируется. Горяче- и холоднодеформированным бесшовным трубам присущи в первую очередь дефекты металлургического происхождения, образовавшиеся еще в заготовке, из которой изготавливается труба. Кроме того, могут возникать и дополнительные дефекты, связанные, например, с недостаточным или неравномерным нагревом во время прокатки или протяжки. Особняком стоят чугунные трубы, полученные центробежным литьем. В любом случае в условиях производства существует возможность осуществления 100%-ного автоматизированного контроля труб. Потребитель труб имеет, как правило, возможность выборочного контроля в ручном и механизированном режиме для проверки труб в состоянии поставки. Методика контроля и в том и в другом случае одинакова. При исследовании труб в процессе эксплуатации возникают дополнительные дефекты, связанные с коррозионным поражением и дефектами поперечных сварных швов. Для их выявления используются другие методики и первичные преобразователи.

Рассмотрим основные подходы к разработке средств неразрушающего контроля бесшовных труб в условиях их производства. Условно для целей контроля трубы можно разделить на особо толстостенные, если толщина их стенки S составляет больше 10% от диаметра D : $S > 0,1D$; толстостенные с толщиной стенки $S = (0,05 - 0,1)D$; тонкостенные трубы с толщиной стенки $S = (0,025 - 0,05)D$ и особо тонкостенные с толщиной стенки $S < 0,025D$.

Магнитные методы контроля могут быть использованы для контроля поверхностных дефек-

тов или дефектов тонкостенных труб из магнитных материалов. Токовихревой контроль также может быть применен для поверхностных дефектов или особо тонкостенных труб. Кроме того, в этих случаях дефекты могут быть выявлены визуальными методами. При контроле труб с толстыми стенками наибольший интерес представляют ультразвуковые методы. С их помощью можно определять дефекты как на внутренней и внешней поверхностях, так и внутри стенки трубы [1].

С позиций ультразвукового контроля необходимо различать трубы большого диаметра, т.е. диаметра, при котором нельзя провести контроль по всей окружности трубы с одной установки преобразователя. Это диаметр примерно от 400 мм. Далее следуют трубы диаметром примерно от 20 до 400 мм. В этом случае можно уверенно принимать импульс, оббегающий весь периметр трубы. При контроле труб диаметром менее 20 мм, т.е. с внешним периметром менее 60–65 мм, более эффективным становится контроль лучом, который распространяется вдоль трубы по спирали. В этом случае появляется возможность одновременно контролировать поперечные дефекты (конечно, в тех случаях, когда технологически возможно их появление, например, при центробежном литье). Причем волны могут возбуждаться под несколькими углами одновременно, что повышает надежность контроля и позволяет выявлять дефекты с отклонением от продольной или поперечной ориентации.

Итак, на наш взгляд, контроль при производстве бесшовных труб необходимо начинать на стадии изготовления заготовки. Как правило, внутренние дефекты – это дефекты, возникшие при отливке. Затем после прокатки или волочения они приобретают форму продольных расслоений. Внутренние дефекты могут возникнуть и из-за недостаточного прогрева заготовки перед прокаткой. В любом случае эти дефекты имеют осевую ориен-

тацию и могут быть обнаружены путем прозвучивания в направлении, перпендикулярном оси. Кроме того, на поверхности могут появляться надрывы и отслоения. Они ориентированы под малыми углами к оси, поэтому также могут выявляться при поперечном прозвучивании.

Схема контроля и количество преобразователей определяется диаметром заготовки. На рис. 1 показана схема для выявления внутренних дефектов заготовки. Обычным, традиционным методом является использование прямых преобразователей 2. Для того чтобы избежать вращения заготовки, можно расположить несколько преобразователей под углами 90° и напротив друг друга. Прямые преобразователи в эхо-режиме обеспечивают высокую чувствительность контроля, обеспечивая выявление дефектов с раскрытием в единицы квадратных миллиметров. Учитывая, что дефекты в виде пор в прокатанной заготовке отсутствуют, данная чувствительность является достаточной. Следует учитывать, что на границе раздела жидкость – заготовка (в иммерсионном варианте контроля) происходит расфокусирование акустического луча. Поэтому путем выбора размера излучателя можно всегда обеспечить контроль определенной области заготовки. При диаметрах заготовки менее ~ 25 мм контроль прямым преобразователем в иммерсионном варианте становится малоэффективным. Это вызвано тем, что часть полезного сигнала маскируется за счет преобразования на границе раздела. В этом случае удобно использовать раздельно-совмещенный преобразователь (3 на рис. 1). Граница между излучателями должна быть ориентирована параллельно оси заготовки. Дефекты выявляются в области пересечения диаграмм направленности (область 5 на рис. 1). Схема с раздельно-совмещенным преобразователем эффективно работает до диаметров ~ 200 мм. В случае прямого и раздельно-совмещенного преобразователей имеется возможность следить за акустическим контактом, например, по донному сигналу. Частота следования импульсов определяется скоростью движения заготовки в зависимости от ширины диаграммы направленности преобразователя и требуемой чувствительности контроля.

Дефекты, которые возникают вблизи поверхности, могут быть выявлены с помощью наклонного ввода акустических колебаний с преобразованием продольных волн в поперечные, т.е. под углами между первым и вторым критическим. Схема контроля показана на рис. 2. Обычно отражения даже от небольших дефектов на поверхности при распространении поверхностной волны значительно превышают эхо-сигналы от внутренних дефектов для поперечных волн. В случае иммерсионного контроля возникающая поверхностная волна быстро затухает за счет излучения части энергии в иммерсионную среду. Угол ввода

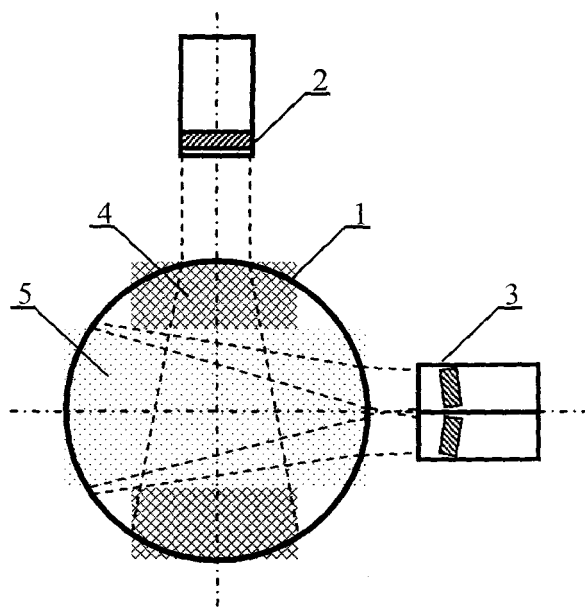


Рис. 1. Схема проведения ультразвукового контроля внутренних дефектов цилиндрической заготовки: 1 – контролируемое изделие; 2 – прямой преобразователь; 3 – раздельно-совмещенный преобразователь; 4 – область контроля прямым преобразователем; 5 – область контроля раздельно-совмещенным преобразователем

α определяется техническими требованиями к контролируемому изделию. Чем ближе угол ко второму критическому, тем больше переотражений испытывает сигнал при распространении и тем ближе траектория распространения к внешней образующей заготовки. Следует учитывать, что при каждом отражении часть энергии рассеивается, поэтому при больших диаметрах заготовки (более ~ 100 мм) необходимо использовать несколько преобразователей, расположенных по периметру образующей. Ширина диаграммы направленности зависит от размера излучателя. В случае широкой диаграммы получается, что ультразвуковой сигнал падает на поверхность заготовки под разными углами и одновременно возникает несколько типов волн, которые распространяются с разной скоростью. Поэтому в том случае, когда необходимо определить локализацию дефектов, следует использовать преобразователи с узкой диаграммой. Для того чтобы охватить контролем большую часть диаметра заготовки, надо использовать несколько преобразователей под разными углами (в случае узконаправленных преобразователей).

При контроле приповерхностных дефектов в заготовках диаметром менее ~ 20 мм целесообразным является контроль ультразвуковым лучом, распространяющемся по спирали [1]. Возбуждение и прием сигнала в этом случае осуществляются преобразователем, наклоненным по отношению к осевой линии под углом θ (рис. 3). Угол наклона преобразователя θ и соответственно шаг спирали зависят от ширины диаграммы направленности.

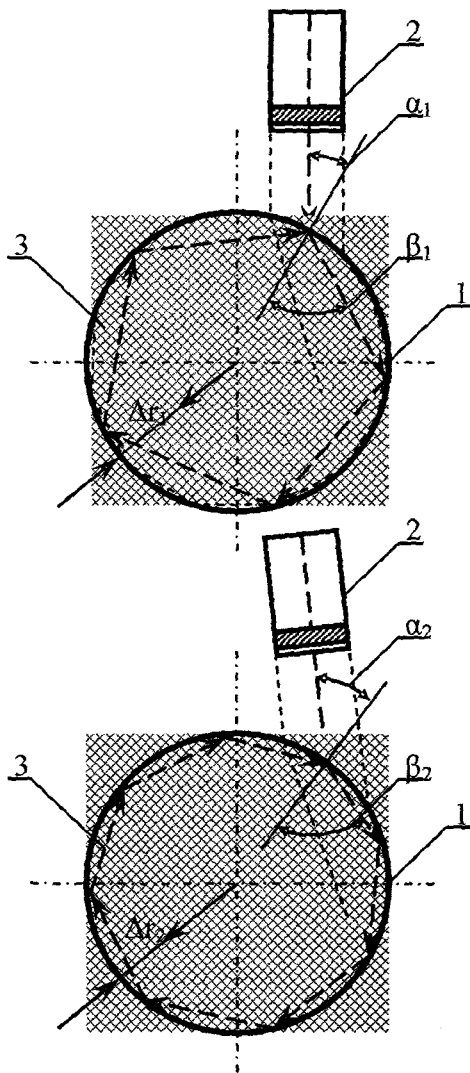


Рис. 2. Схема проведения ультразвукового контроля приповерхностных дефектов цилиндрической заготовки: 1 – контролируемое изделие; 2 – преобразователь; 3 – область контроля; $\alpha_{1,2}$ – углы падения акустического луча; $\beta_{1,2}$ – углы ввода акустического луча; $\Delta r_{1,2}$ – толщина контролируемой зоны

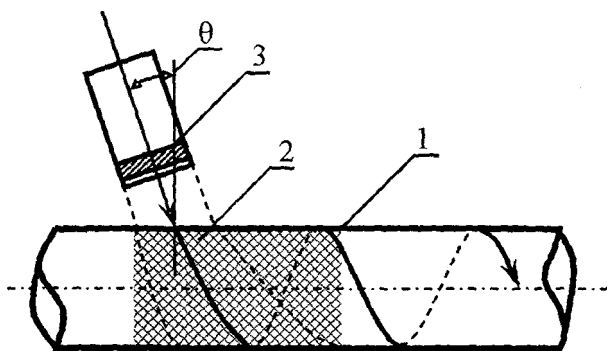


Рис. 3. Схема контроля заготовок малого диаметра с использованием ультразвукового сигнала, распространяющегося по спирали: 1 – контролируемое изделие; 2 – зона контроля; 3 – первичный преобразователь; θ – угол наклона падающего ультразвукового луча

Контроль труб на наиболее распространенные продольные дефекты осуществляется по аналогии с заготовкой, как это показано на рис. 2. В отличие от заготовки для поперечной волны в трубе создается своеобразный волновод. При своем распространении она испытывает ряд последовательных отражений. В этом случае достаточно эффективно выявляются все протяженные дефекты. Кроме того, на внутренней поверхности трубы создаются условия для возбуждения поверхностной волны, которая может давать значительные отражения от рисок на этой поверхности, не являющихся дефектами. Для устранения регистрации данных дефектов нами разработан специальный алгоритм обработки сигналов с использованием нескольких преобразователей. Схема контролера приведена на рис. 4. Каждый из преобразователей работает в режиме излучения – приема. Располагаются преобразователи таким образом, чтобы обеспечить разделение во времени сигнала поперечной волны, распространяющейся внутри стенки трубы от сигналов инициируемой поверхностной волны. Угол ввода и количество преобразователей определяются диаметром трубы и толщиной стенки. При использовании такой многоканальной системы отпадает необходимость во вращении трубы, так как весь объем контролируется за один проход. Контроль за наличием акустического контакта осуществляется либо по теневому сигналу, оббежавшему всю трубу, либо в случае большого диаметра трубы за счет сигнала с преобразователя на преобразователь. Регистрация импульсов проводится в заданном временном интервале по амплитудному признаку. Обычно при таком способе контроля один дефект дает два или более отражений. Принятие решения о дефектности проводится программно на основе анализа времени прихода сигналов от дефектов на преобразователи. Как видно из рис. 4, сигналы от дефекта располагаются симметрично относительно сигнала, оббежавшего весь периметр трубы по кругу. Причем разница во времени прихода сигналов от дефекта для разных преобразователей $\Delta t_{i,i+1}$ остается постоянной и зависит от шага расположения преобразователей по периметру трубы. Здесь i – порядковый номер преобразователя. При контроле проводится измерение времени распространения сигнала от дефекта $t_{i,k}$ (k – номер, присваиваемый дефекту), вычисляются разности $\Delta t_{i,i+1} = t_{i,k} - t_{i+1,k}$, проводится сравнение разностей и принимается решение о наличии дефекта. Для последовательного переключения преобразователей используются два способа. Выбор способа определяется несколькими факторами. Во-первых, соотношением между чувствительностью и скоростью контроля, во-вторых, размером контролируемой трубы, а значит, количеством преобразователей. Один способ – это использование нескольких блоков генерации – приема

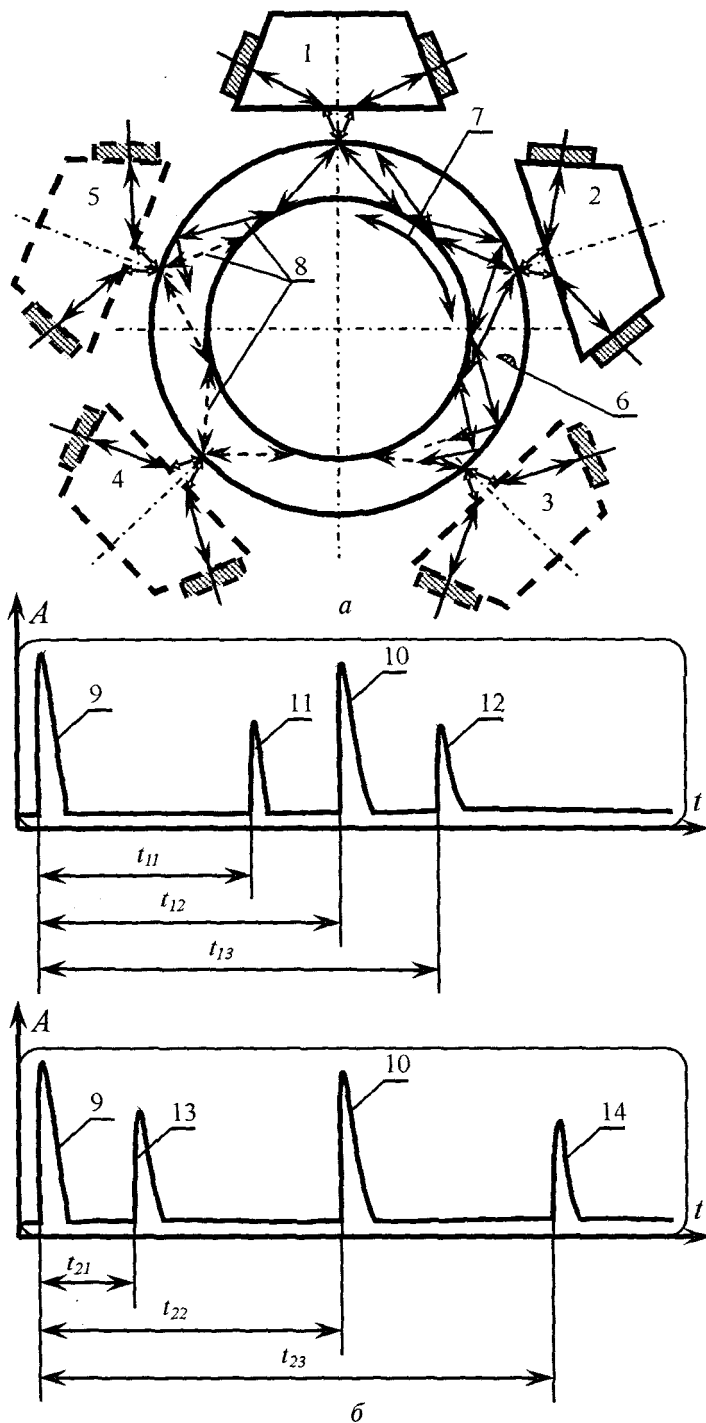


Рис. 4. Схема контроля трубы поперечными волнами с использованием нескольких преобразователей (а); вид результатов контроля на экране дефектоскопа (развертка типа А) (б): 1–5 – первичные преобразователи; 6 – дефект; 7 – поверхностная волна; 8 – поперечные волны; 9 – задающий импульс; 10 – теневой сигнал при прохождении волны по всему периметру; 11, 12 – сигналы от дефекта для преобразователя 1; 13, 14 – сигналы от дефекта для преобразователя 2

обработкой информации, второй – это разделение частоты следования импульсов управления, т.е. в этом случае, например при частоте следования импульсов с генератора 1 кГц, они направляются по циклу на разные преобразователи. Если преобразователей (излучателей – приемников) два, то каждый работает с частотой 500 Гц, если четыре,

то 250 Гц и т.д. Современная электронная элементная база позволяет реализовать этот процесс.

В ряде случаев, когда браковочный уровень дефектов составляет десятки квадратных миллиметров, процесс контроля и принятия решения может быть значительно упрощен. В этом случае анализируется теневой сигнал поперечной волны, распространяющейся в стенке трубы. Энергия, которая уходит на формирование поверхностной волны, остается постоянной и на величину теневого сигнала не оказывает влияния. При обнаружении дефекта и установлении места его локализации при необходимости может быть проведен дополнительный анализ его размеров эхо-методом. Кроме того, теневой метод является более чувствительным к дефектам типа расслоение, т.е. дефектам, которые возникли после прокатки и дают незначительный эхо-сигнал из-за своей ориентации. Дефекты расслоения могут быть выявлены прямым или раздельно-совмещенным преобразователем при вводе колебаний со стороны наружной поверхности, при толщинах стенки трубы, превышающей ~10 мм. Эта процедура может быть совмещена с измерением толщины стенки трубы.

Контроль тонкостенных труб эффективно осуществлять не поперечными, а нормальными волнами (волны Лэмба). Это волны в пластинах, которые являются комбинацией продольных и поперечных волн [2]. Для их возбуждения необходимо осуществить ввод упругих колебаний под определенным углом к поверхности. Для каждой толщины пластины, или в нашем случае стенки трубы, существует угол ввода, при котором на данной частоте возбуждается определенная мода нормальной волны с соответствующей скоростью распространения. Существуют симметричные и несимметричные моды с соответствующими номерами. При распространении симметричной моды происходит изменение профиля стенки, несимметричной – изгиб. Трудность метода при использовании для контроля труб состоит в том, чтобы возбудить волну заданной моды, а не целый спектр колебаний, в котором трудно разобраться. Связано это с конечностью размеров ультразвукового пучка. Получается, что он падает на поверхность трубы под разными углами и чем меньше диаметр трубы, тем разброс углов больше. Поэтому необходимым условием успешного контроля является фокусировка акустического луча [3].

Отдельно следует остановиться на особо толстостенных трубах, особенно когда толщина стенки превышает 20% диаметра. Связано это с тем,

что минимальный угол, под которым может быть возбуждена поперечная волна, находится в диапазоне 27–33°. Это зависит от материала трубы, точнее от скорости распространения звука в этом материале. Соответственно наступает момент (т.е. толщина стенки достигает определенного предела), при котором становится невозможно организовать внутреннее переотражение поперечных волн, для того чтобы они могли распространяться, как в волноводе. В этом случае возможно использование продольных волн при вводе до первого критического угла. Конечно, чувствительность уменьшается, но и технические требования к таким трубам тоже другие. В этом случае контроль организуется по тем же принципам, как показано на рис. 4, только с использованием преобразователей, возбуждающих продольные волны.

В любом случае при организации контроля труб в автоматизированном режиме, для достижения определенной техническими требованиями чувствительности и необходимой производительности общая концепция контроля должна привязываться к конкретному производству [4]. Для этого должны быть исследованы условия возможного дефектообразования для данного процесса производства, в соответствии с этим определены схемы контроля. Проведена привязка к оборудованию, на котором производятся трубы и определена стадия процесса, на которой возможно проводить контроль исходя из технической и эконо-

мической целесообразности, т.е. каждая установка для контроля труб, несмотря на общие подходы, изготавливается индивидуально для данного производства. Во всех случаях в качестве иммерсионной среды для ввода акустических колебаний может быть использована СОЖ. Контроль может проводиться с полным и неполным погружением или струйным акустическим контактом, может быть совмещен с охлаждением. Измерение толщины стенки трубы совмещается с контролем дефектов или может быть выполнено в виде отдельного блока. При описанной организации контроля возможны разные способы представления результатов, начиная с красной лампочки или сирены в случае брака, до записи результатов в компьютер с привязкой к локализации дефектов по длине трубы и подачи сигнала на исполнительные устройства.

Литература

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. М.: Металлургия, 1991.
2. Приборы для неразрушающего контроля качества материалов и изделий: Справ. / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1976.
3. Гурвич А.К., Кузьмина Л.И. Справочные диаграммы направленности ультразвуковых дефектоскопов. Киев: Техника, 1980.
4. Konovalov G., Mayorov A., Prohorenko P. The Systems for Automated Ultrasonic Testing // 7th European Conference on NDT. Copenhagen, 1998.