

УДК 620.179.1

**Неразрушающий контроль в промышленности.  
Акустический контроль**  
*Nondestructive Testing in Industry. Acoustic Testing*

Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н.  
*Gorbash V.G., Delendick M.N, Pavlenko P.N.*

В статье приводится информация об использовании акустического метода для решения различных задач в области неразрушающего контроля.

*The article provides information on the application of acoustic method for solving various problems in the field of nondestructive testing.*

Методы неразрушающего контроля основываются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры контролируемого объекта и т.п. Все методы неразрушающего контроля являются косвенными методами.

Настройка, калибровка должны осуществляться по контрольным образцам, имитирующим измеряемый физический параметр. Метода, который бы мог обнаружить самые разнообразные по характеру дефекты, нет. Каждый отдельно взятый метод НК решает ограниченный круг задач технического контроля.

Выбор оптимального метода неразрушающего контроля следует осуществлять исходя из его:

- реальных особенностей;
- физических основ;
- степени разработки;
- области применения;
- чувствительности;
- разрешающей способности;
- технических условий отбраковки;
- технических характеристик аппаратуры.

Измерительная система средств неразрушающего контроля, как правило, должна состоять из прибора, преобразователя и контрольного образца.

Важной характеристикой любых методов неразрушающего контроля является их чувствительность.

Чувствительность – выявление наименьшего по размерам дефекта; зависит от особенностей метода неразрушающего контроля, условий проведения контроля, материала изделий. Удовлетворительная чувствительность для выявления одних дефектов может быть совершенно непригодной для выявления дефектов другого характера.

Чувствительность методов неразрушающего контроля к выявлению одного и того же по характеру дефекта различна. При определении предельно допустимой погрешности выбранного метода неразрушающего контроля следует обязательно учитывать дополнительные погрешности, возникающие от влияющих факторов:

минимального радиуса кривизны вогнутой и выпуклой поверхностей;

шероховатости контролируемой поверхности;

структуры материала;

геометрических размеров зоны контроля;

других влияющих факторов, указанных в инструкциях для конкретных приборов.

В зависимости от физических явлений, положенных в основу методов неразрушающего контроля, они подразделяются на девять основных видов: акустический, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами, радиоволновый, радиационный, оптический, тепловой и электрический.

Возможности и основы магнитного контроля мы рассмотрели в [1]. Начали мы с него, поскольку это один из первых методов неразрушающего контроля, который нашел широкое применение в промышленности. В настоящей работе мы рассмотрим наиболее распространенный вид контроля – акустический.

К акустическим методам неразрушающего контроля относят обширную область испытания материалов и изделий, основанную на применении упругих колебаний и волн, точнее, на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в объекте неразрушающего контроля.

Для акустического метода неразрушающего контроля применяют колебания ультразвукового и звукового диапазонов частотой от 20 Гц до 30 МГц. Интенсивность колебаний обычно невелика, не превышает 1 кВт/м<sup>2</sup>. Такие колебания происходят в области упругих деформаций среды, где напряжения и деформации связаны пропорциональной зависимостью (область линейной акустики).

Методы неразрушающего акустического контроля широко применяют благодаря ряду их преимуществ: волны легко вводятся в объект контроля, хорошо распространяются в металлах, бетоне и других

материалах; эффективны при выявлении дефектов с малым раскрытием, чувствительны к изменению структуры и физико-механических свойств материалов, не представляют опасности для персонала. Использование различных типов волн (продольных, поперечных, поверхностных, нормальных и других) расширяет возможности акустических методов неразрушающего контроля.

Главная отличительная особенность данного метода состоит в том, что в нем применяют и регистрируют не электромагнитные, а упругие волны, параметры которых тесно связаны с такими свойствами материалов, как упругость, плотность, анизотропия (неравномерность свойств по различным направлениям) и др.

Акустические свойства твердых материалов и воздуха настолько сильно отличаются, что акустические волны отражаются от тончайших зазоров (трещин, непроваров) шириной  $10^{-6} \dots 10^{-4}$  мм. Этот вид контроля применим ко всем материалам, достаточно хорошо проводящим акустические волны. Колебания в исследуемый объект вводятся в импульсном или непрерывном режимах с помощью пьезоэлектрического преобразователя сухим контактным, контактным через жидкую среду или бесконтактным способом через воздушный зазор с помощью электромагнитно-акустического преобразователя. Эти методы имеют следующие недостатки: необходимость акустического контакта преобразователя с объектом контроля, повышенные требования к чистоте поверхности изделия, влияние сторонних шумов на результаты измерений, воздействие температуры изделия и др. Все эти недостатки приводят к возрастанию погрешностей измерения.

Акустические методы неразрушающего контроля решают следующие контрольно-измерительные задачи:

метод прошедшего излучения выявляет глубинные дефекты типа нарушения сплошности, расслоения, непроклёп, непропаи;

метод отраженного излучения обнаруживает дефекты типа нарушения сплошности, определяет их координаты, размеры, ориентацию путем прозвучивания изделия и приема отраженного от дефекта эхо-сигнала;

резонансный метод применяется в основном для измерения толщины изделия (иногда применяют для обнаружения зоны коррозионного поражения, непропаев, расслоений в тонких местах из металлов);

акустико-эмиссионный метод обнаруживает и регистрирует только развивающиеся трещины или способные к развитию под действием механической нагрузки (квалифицирует дефекты не по размерам, а по степени их опасности во время эксплуатации). Метод имеет

высокую чувствительность к росту дефектов – обнаруживает увеличение трещины на (1...10) мкм, причём измерения, как правило, проходят в рабочих условиях при наличии механических и электрических шумов;

импедансный метод предназначен для контроля клеевых, сварных и паяных соединений, имеющих тонкую обшивку, приклеенную или припаянную к элементам жесткости. Дефекты клеевых и паяных соединений выявляются только со стороны ввода упругих колебаний;

метод свободных колебаний применяется для обнаружения глобальных дефектов.

Среди разнообразных акустических методов можно выделить следующие:

топографический метод, который основан на возбуждении в исследуемом изделии мощных изгибных колебаний заданной или меняющейся частоты с одновременной визуализацией картины колебаний контролируемой поверхности путем нанесения на нее тонкодисперсного порошка;

импульсный эхо-метод, основанный на посылке коротких ультразвуковых импульсов и отражении их от поверхности дефекта;

теневой метод, связанный с появлением области “звуковой тени” за дефектом, поперечные размеры которого превышают длину упругой волны;

резонансный метод, в основе реализации которого положено явление возникновения в исследуемом материале стоячих продольных или сдвиговых волн;

импедансный метод, основанный на установлении зависимости силы реакции изделия на контактирующий с ним колеблющийся стержень (преобразователь);

метод акустической эмиссии, основанный на регистрации упругих волн ультразвукового диапазона, скачкообразно появляющихся при перестройке структуры материала, возникновении трещин, аллотропических превращениях в кристаллической решетке;

электромагнитно-акустический метод, основанный на возбуждении ультразвуковых колебаний в результате взаимодействия переменного и постоянного магнитных полей с металлом или ферромагнетиком.

Мировой опыт показывает, что использование средств ультразвукового неразрушающего контроля в машиностроении, металлургии, энергетике, строительстве, транспортной промышленности способствует улучшению качества продукции, обеспечению безаварийной эксплуатации энергетических установок и транспортных средств,

повышению производительности труда, снижению материалоемкости конструкций и сооружений, улучшению качества выпускаемой продукции, экономии сырьевых и трудовых ресурсов.

Акустический метод неразрушающего контроля находит свое применение в различных областях: котлонадзор, системы газоснабжения, подъемные сооружения, объекты горнорудной промышленности, объекты угольной промышленности, нефтяная и газовая промышленность, металлургическая промышленность, оборудование взрывопожароопасных и химически опасных производств, объекты железнодорожного транспорта, объекты хранения и переработки зерна.

Подробную информацию об акустических методах контроля можно найти в [3]. В этом справочнике рассмотрены физические основы высокочастотных и низкочастотных акустических методов, их классификация, области применения, эксплуатационные возможности и особенности. Даны сведения об аппаратуре и методиках контроля типовых изделий. Приведены рекомендации по выбору метода для решения конкретных задач, а также рекомендации ICNDT WN 16-85 изм. 01 и Европейские стандарты по ультразвуковому контролю.

Из используемых акустических методов неразрушающего контроля наибольшее практическое применение находит эхо-метод. Около 90% объектов, контролируемых акустическими методами неразрушающего контроля, проверяют эхо-методом, применяя различные типы волн. С его помощью решают задачи дефектоскопии поковок, отливок, сварных соединений, многих неметаллических материалов. Эхо-метод используют также для измерения размеров изделий.

Зеркально-теневой метод акустического контроля используют вместо или в дополнение к эхо-методу для выявления дефектов, дающих слабое отражение ультразвуковых волн в направлении раздельно-совмещенного преобразователя (например, вертикальные трещины).

Эхо-зеркальный метод акустического контроля также применяют для выявления дефектов, ориентированных перпендикулярно поверхности ввода. При этом он обеспечивает более высокую чувствительность к таким дефектам, но требует, чтобы в зоне расположения дефектов был достаточно большой участок ровной поверхности. В рельсах, например, это требование не выполняется, поэтому там возможно применение только зеркально-теневого метода. Эхо-зеркальный метод в варианте "тандем" используют для выявления вертикальных трещин и непроваров при неразрушающем контроле сварных соединений. Дефекты некоторых видов сварки, например,

непровар при электронно-лучевой сварке, имеют гладкую отражающую поверхность, очень слабо рассеивающую ультразвуковые волны, но такие дефекты хорошо выявляются эхо-зеркальным методом.

Вариант "косой тандем" применяют, когда расположение преобразователей в одной плоскости затруднительно. Его используют, например, для выявления поперечных трещин в сварных швах.

Дельта и дифракционно-временной методы также используют для получения дополнительной информации о дефектах при неразрушающем контроле сварных соединений.

Теневой и эхо-сквозной методы используют только при двустороннем доступе к изделию, для автоматического контроля изделий простой формы, например, листов в иммерсионной ванне.

Теневой метод применяют также для контроля изделий с большим уровнем структурной реверберации, т.е. шумов, связанных с отражением ультразвука от неоднородностей, крупных зерен, дефектоскопии многослойных конструкций и изделий из слоистых пластиков.

Локальный метод вынужденных колебаний применяют для измерения малых трещин при одностороннем доступе.

Интегральный метод вынужденных колебаний применяют для определения модулей упругости материала по резонансным частотам продольных, изгибных или крутильных колебаний образцов простой формы, вырезанных из материала изделия, т.е. при разрушающих испытаниях. В последнее время этот метод используют также для неразрушающего контроля небольших изделий: абразивных кругов, турбинных лопаток.

Интегральный метод свободных колебаний используют для проверки бандажей вагонных колес или стеклянной посуды "по чистоте звона" с субъективной оценкой результатов на слух.

Реверберационный, импедансный, велосимметрический, акустико-топографический методы и локальный метод свободных колебаний используют в основном для контроля многослойных конструкций. Реверберационным методом обнаруживают, в основном, нарушения соединений металлических слоев (обшивок) с металлическими или неметаллическими силовыми элементами или наполнителями. Импедансным методом выявляют дефекты соединений в многослойных конструкциях из композиционных полимерных материалов и металлов, применяемых в различных сочетаниях. Велосимметрическим методом и локальным методом свободных колебаний контролируют, в основном, изделия из полимерных композиционных материалов. Акустико-топографический метод применяют для обнаружения де-

фектов преимущественно в металлических многослойных конструкциях (сотовые панели, биметаллы и т.п.).

Вибрационно-диагностический и шумо-диагностический методы служат для диагностики работающих механизмов. Метод акустической эмиссии применяют в качестве средства исследования материалов, конструкций, контроля изделий (например, при гидроиспытаниях) и диагностики во время эксплуатации. Его важными преимуществами перед другими методами контроля является то, что он реагирует только на развивающиеся, действительно опасные дефекты, а также возможность проверки больших участков или даже всего изделия без сканирования его преобразователем. Основной его недостаток как средства контроля – трудность выделения сигналов от развивающихся дефектов на фоне помех (кавитационных пузырьков в жидкости, подаваемой в объект при гидроиспытаниях, трения в разъемных соединениях и т.д.).

Для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний чаще всего используют пьезоэлектрический эффект: некоторые материалы (кварц, титанат бария, титанат-цирконат свинца и др.) под действием переменного электрического поля меняют свои размеры с частотой изменения поля. Пьезоэлектрическую пластину размещают в специальном устройстве – пьезопреобразователе. Пьезопреобразователи, предназначенные для ввода волны в направлении, перпендикулярном поверхности, называют прямыми, а для ввода под некоторым углом – наклонными. Пьезопреобразователи включаются по отдельной, совмещенной или отдельно-совмещенной схемам. В последнем случае в одном корпусе размещаются два пьезопреобразователя, разделенных между собой экраном. При падении ультразвуковой волны на поверхность раздела двух сред, в частности на границу дефекта, часть энергии отражается, что и используется при контроле. Для анализа распространения ультразвуковых колебаний в контролируемом изделии распространение получили три основных метода: теневой, зеркально-теневой и эхо-метод.

По характеру регистрации первичного информативного параметра акустические методы подразделяются на амплитудный, частотный, спектральный.

**Традиционные характеристики, измеряемые при использовании ультразвукового метода контроля:**

1. Скорость волны при прохождении ультразвука в объекте контроля. Это наиболее часто измеряемый параметр. В однородной среде она непосредственно зависит от плотности и соотносится с модулем

упругости. Таким образом, изменения скорости волны характеризует однородность материалов, изменения упругости или плотности.

2. Ослабление ультразвука. Энергия ультразвука поглощается или ослабляется с различной степенью в различных материалах под влиянием плотности, твердости, вязкости, структуры материала.

3. Рассеяние ультразвука. Ультразвуковые волны отражаются от границы между различными материалами. Изменения структуры зернистости, ориентации частиц и волокон, пористости оказывают влияние на амплитуду, направление и частотную составляющую.

4. Частотная составляющая – спектр сигнала. Все материалы могут быть рассмотрены как низкочастотные фильтры, ослабляя или снижая высокочастотную составляющую широкополосной ультразвуковой волны.

В некоторых случаях данные ультразвукового контроля, например о скорости ультразвука, могут непосредственно использоваться для расчета свойств материала, в частности модуля упругости. В других случаях ультразвуковой контроль используется для сопоставительного анализа свойств материалов, при необходимости экспериментальной оценки стандартных образцов из материала объекта контроля. У таких стандартных образцов при их акустическом зондировании можно зафиксировать соответствие изменений значений параметра ультразвука конкретным свойствам материала, после чего, опираясь на эти данные, можно определять или предсказывать аналогичные изменения в реальных объектах контроля.

Для анализа свойств материалов могут быть использованы различные ультразвуковые приборы с аналоговой или цифровой обработкой сигналов. Измерение скорости ультразвука используется для определения толщины с помощью ультразвуковых толщиномеров. Величина изменения скорости ультразвука, степень его ослабления или рассеяния измеряются современными цифровыми дефектоскопами. Генераторы приемники с соответствующим дополнительным оборудованием, а также системы формирования акустических изображений и программное обеспечение могут быть использованы для проведения спектрального анализа (частотной составляющей) ультразвуковых эхосигналов.

Примеры некоторых свойств материалов, для анализа которых может быть использован ультразвук:

- модули упругости: модуль Юнга и модуль сдвига могут быть рассчитаны на основании измерений скорости продольных и поперечных ультразвуковых волн (наряду с плотностью материала). Содержание графита в чугуне. На основании измерений скорости ульт-



тразвука могут быть определены как концентрация включений графита в чугуне, так и их форма;

- степень отверждения, например, смол, бетона, пластмасс (скорость ультразвука в этих материалах изменяется по мере их отверждения);

- концентрация жидкостей, плотность гидросмесей (коэффициент смешивания может быть соотнесен со скоростью ультразвука);

- размеры и распределение частиц, пористость (изменения размеров или распределения частиц и пористости) в твердых или жидких средах влияют на амплитуду и частоту рассеиваемого ультразвука, что используется для определения однородности обожженной керамики, изменений размеров зерен или их ориентации в стали, чугуне и других металлах при контроле качества сварных швов, глубины термообработки сталей);

- измерение очень высоких температур (свыше 3000 °С на основании данных об изменении скорости ультразвука в материале).

**Ультразвуковая дефектоскопия.** Наибольшее распространение ультразвуковой контроль получил в промышленности для контроля качества сварных соединений. Детальный обзор развития этого метода можно посмотреть в [2]. Основным технологическим процессом, применяющимся при изготовлении металлоконструкций, является сварка, от которой во многом зависят качество и надежность конструкций в целом. Несмотря на прогресс в развитии сварочной техники и технологии, в сварных соединениях по ряду причин возникают дефекты различного вида и размеров, приводящие к снижению их работоспособности и долговечности, а иногда к аварийным ситуациям. Для того чтобы исключить поступление в эксплуатацию сварных соединений с недопустимыми дефектами, необходимо применять эффективные методы неразрушающего контроля такие как ультразвуковая дефектоскопия. До появления ультразвуковой дефектоскопии основными методами контроля сварных соединений металлических конструкций были радиография и магнитография. Широко распространенный в некоторых отраслях промышленности радиографический контроль достаточно эффективен, но неприемлем для контроля сварных соединений арматуры железобетонных конструкций и малоэффективен при контроле сварных швов металлических конструкций большой толщины. Сложный профиль арматурных соединений практически не позволяет обнаруживать трещины и несплавления и затрудняет выявление объемных дефектов (вероятность выявления 50 %). В стыковых соединениях металлических конструкций этим методом уверенно обнаруживаются лишь объемные дефекты (поры и

шлаковые включения), а трещиноподобные дефекты, по данным многочисленных исследований, обнаруживаются с вероятностью 35...40%. Из-за низкой оперативности радиографического контроля невозможно своевременно предупредить брак. Кроме того, радиографический метод не лишен субъективности в оценке результатов контроля. Отмечается, что из 5600 заключений, выданных радиографами, в отличие от ультразвуковой дефектоскопии, верная оценка дана только в 3696 случаях (66 %), а при оценке качества сварных стыков газопроводов в пяти из девяти случаев ни один опытный радиограф не обнаружил трещины, которые были подтверждены металлографическим анализом. Вследствие этого в лабораториях разрабатывались другие методы неразрушающего контроля, одним из них и является ультразвуковая дефектоскопия.

Успешный опыт применения ультразвуковой дефектоскопии в некоторых других отраслях промышленности показал, что она может также эффективно использоваться для контроля практически всех типов сварных соединений, имеющих толщину основного материала более 4 мм. Кроме того, в таких случаях, как, например, при контроле сварных швов большой толщины, выполненных электрошлаковой сваркой, сварных соединений арматуры железобетонных конструкций ультразвуковая дефектоскопия является единственно приемлемым методом контроля.

Объем применения ультразвукового контроля как в ряде отраслей промышленности нашей страны (энергетическое машиностроение, железнодорожный транспорт, химическое машиностроение), так и за рубежом за последние годы достиг 70–80 %. Это объясняется более высокой чувствительностью и достоверностью (в 2–2,5 раза) к обнаружению трещиноподобных дефектов, более высокой оперативностью (15–20 раз) и производительностью (2–4 раза), меньшей стоимостью (2–6 раз) и безопасностью в работе по сравнению с традиционными методами радиографического контроля.

Информацию об ультразвуковых дефектоскопах можно найти на сайтах: <http://www.ndt.by/> (Ультразвуковые дефектоскопы: USM Vision, GE Phasor XS, USM35, Портативный дефектоскоп Spotchecker, A1220 АНКЕР, АКР1224М, А1214 ЭКСПЕРТ, А1212 МАСТЕР ПРОФИ, А1212 МАСТЕР ЛАЙТ, Дефектоскоп ультразвуковой USM GO, УД4-Т Томографик, УД3-103, УД2В-П46, УД2-70, УД4-76, УД3-71, УД4-94-ОКО-01 (02), USN60, USN58, USLT 2000);

<http://www.stroygeo.ru/catalog/group/ultrazvuk/> (дефектоскоп А1212, дефектоскоп УД2 102, дефектоскоп УД2 70, дефектоскоп УД4 Т, дефектоскоп УД3 71, дефектоскоп УД2 12);

---

<http://www.constantaru/> (Приборы комплексного контроля качества покрытий, ультразвуковые толщиномеры металлов, ультразвуковые дефектоскопы и преобразователи к ним, твердомеры и другие приборы неразрушающего контроля...);

<http://www.panatest.ru/categorie?id=87> (ультразвуковые дефектоскопы фирм SONATEST, HARFANG). Дефектоскопы позволяют: обнаруживать дефекты, измерять координаты залегания дефектов и толщину с выводом информации на дисплей, измерять эквивалентную площадь и условные размеры дефектов. Они нашли широкое применение в энергетике, нефтегазовом комплексе, машиностроении, на транспорте и в других отраслях промышленности для контроля трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, котлов, элементов транспортных и грузоподъемных механизмов.

**Технология ультразвуковой фазированной решетки.** Она основана на генерировании ультразвуковых волн и их интерференции. Преобразователь решетки представляет собой множество пьезоэлектрических элементов, собранных в один блок. Наиболее распространенное количество 32, 64 и 128 элементов в блоке. Программируемый генератор контролирует все элементы для формирования лучей. В результате интерференции волн, исходящих от всех элементов, формируется результирующая волна под требуемым углом ввода, и производится сканирование. Затем генератор меняет угол ввода результирующей волны, и процесс сканирования повторяется.

При использовании метода контроля фазированными решетками генерируется ультразвуковой луч с настраиваемыми углом ввода, фокусным расстоянием и размером фокусного пятна. При этом также можно настроить генерирование луча в разных секторах фазированной решетки. Эти функции открывают целый ряд новых возможностей. Например, можно быстро изменить параметры угла и изменить направление сканирования, не передвигая датчик. Таким образом, эта технология заменяет собой целую гамму датчиков. При контроле лучом с переменным углом коэффициент обнаружения дефектов, как правило, выше вне зависимости от их ориентации. При этом соотношение сигнал-шум остается оптимальным.

Метод фазированной решетки более совершенен по сравнению с традиционным ультразвуковым контролем, в котором используется одноэлементный преобразователь. Многие прикладные задачи дефектоскопии при техническом диагностировании используют фазированные решетки, благодаря которым контроль осуществляется гораздо быстрее, качественнее и проще. Метод фазированных решеток имеет неоспоримые преимущества: высокая скорость контроля, высо-

кая вероятность обнаружения дефектов, расширенные возможности по составлению отчетов, улучшенная визуализация процесса контроля, повторяемость результатов и использование одного датчика для всех углов.

Это указывает на то, что возможности ультразвукового контроля постоянно возрастают. Совершенствуется теоретическая база, развивается аппаратура, улучшается интерфейс приборов. Визуализация контроля также идет в ногу со временем: для облегчения работы оператора в дефектоскопах применяются цветные LCD мониторы с подробной детализацией. Развитие методик документирования и архивирования результатов контроля выводит ультразвуковой контроль на принципиально новый уровень. Если раньше протокол контроля составлялся непосредственно со слов дефектоскописта, то сейчас оборудование позволяет производить автоматическую запись результатов контроля в файл и составлять трехмерное изображение обнаруженных дефектов.

Современная аппаратура и технологии ультразвукового контроля являются актуальным и удобным инструментом для решения экспертных задач. Возможность документирования результатов контроля при техническом диагностировании оборудования позволяет эксперту при необходимости воссоздать процесс контроля, более детально изучить структуру сварного шва или металла в нужной зоне, проанализировать обнаруженные специалистом дефекты для принятия того или иного решения по оценке технического состояния конструкции.

**Ультразвуковая толщинометрия.** Ультразвуковой толщиномер – это электронный прибор, который используется при проведении контрольно-измерительных работ по определению толщины деталей или их элементов. Причем, исследуемые объекты могут быть изготовлены из различных металлов, керамики, пластмасс, алюминиевых и титановых конструкционных сплавов, стекла. Толщиномеры предназначены для контроля толщины стенок, будь то измерение толщины точных изделий или измерение остаточной толщины стенок, стенок труб и сосудов всех видов, подверженных износу изнутри. Они портативны, удобны в эксплуатации, имеют автономное питание.

Характеристики некоторые типы толщиномеров можно найти на сайтах: <http://www.usps.ru/ndt/top112/> (A1207, A1208, A1209, A1210, 37DL, 38DL, MG2, 26MG, ТУЗ-2, ТУЗ-3, УТ-80М, УТ-82 и др.) и <http://ruscontrol.com/ultrazvukovye-tolschinomery>.

Результатом толщинометрии является протокол замеров в указанных точках и схема расположения этих точек на чертеже оборудо-

вания. Особое распространение метод получил при техническом диагностировании нефте- газопроводов, сосудов, работающих под давлением, резервуаров, хранящих разнообразные химические вещества. Использование толщинометрии повышает качество диагностирования обследуемого объекта.

Инструкции по проведению ультразвукового контроля различных объектов можно найти на сайте [http://fpribor.ru/use\\_inform/ndt\\_instructions/](http://fpribor.ru/use_inform/ndt_instructions/).

**Ультразвуковые течеискатели.** Для контроля герметичности систем, заполненных газом или жидкостью, могут быть использованы течеискатели, являющиеся приборами, которые обнаруживают места утечек. В качестве примера можно указать на прибор УТ-2А, который предназначен для контроля герметичности пневматических систем в процессе эксплуатации, поиска утечек в газовых сетях и наземных участках газопроводов, обнаружения утечки и определения места течи в протяженных и разветвленных системах при опрессовке и вакуумировании, а также для решения других важных технических задач. Прибор преобразовывает в электрический сигнал ультразвуковые волны, генерируемые вытекающей струей газа, работой неисправного подшипника, дуговым или коронным разрядом в трансформаторе. Затем фильтрует сигнал с целью исключения посторонних шумов и преобразовывает его для индикации. Течеискатель содержит направленный ультразвуковой микрофон, усилитель, фильтр верхних частот, преобразователь высокочастотного сигнала в слышимый, низкочастотный усилитель. Эти устройства вместе с питающим аккумулятором размещены в пластмассовом цилиндре с габаритами карманного фонаря; к разъему на его торце подключаются при работе головные телефоны. Прибор наиболее эффективен при контроле герметичности наземных газопроводов, сетей технологического газоснабжения в цехах и на заводских территориях, топливных систем газобаллонных автомобилей, при обследовании газовых сетей городского хозяйства. Целесообразно применение прибора для технического обслуживания поездов и линий метрополитена и железнодорожного транспорта, где широко применена пневматика. Менее чем за 10 минут прибор позволяет находить течь в системе трубопроводов технологического газоснабжения, распределенной на площади 2000 кв. м, на шумовом фоне работающих компрессоров, насосов и вентиляторов. Утечка гелия через отверстия сечением менее 0,02 кв. мм при давлении 0,2 атм. обнаруживается на расстоянии более 10 м. Для более "тяжелых" газов эффективность прибора выше.

**Структуроскопия материалов.** Одним из наиболее перспективных методов структуроскопии материалов является лазерно-ультразвуковая цифровая дефектоскопия. В данном методе используется лазерное возбуждение мощных апериодических ультразвуковых импульсов управляемой формы, облучение исследуемой среды этими импульсами, регистрации прошедших или рассеянных ультразвуковых возмущений с высоким временным разрешением и цифровая обработка временной формы получаемых сигналов, включающая спектральный и корреляционный анализ, цифровую фильтрацию, оптимальную фильтрацию и деконволюцию, wave-let анализ и др. Многопараметрический анализ данных позволяет не только увеличить чувствительность контроля, но и обеспечить его объективность и диагностические возможности.

Для контроля структуры материалов в большинстве случаев используют влияние структуры и фазового состава на затухание или скорость распространения ультразвуковых колебаний в металлах и сплавах. Например, для компании ОАО "Рославльский вагоноремонтный завод" была изготовлена установка по ультразвуковому контролю структуры металла черновой оси по РД 32.144-2003. Ось прозвучивается с торцов с обеих сторон и оценивается поглощение звуковых импульсов на неоднородностях структуры металла оси. Для этого амплитуду донного импульса от торца оси сравнивают со значением амплитуды донного импульса на стандартном образце СО-2, если амплитуда отличается больше чем на 46 дБ, то ось считается "непрозвучиваемой".

Для жидкостей важной характеристикой является их плотность. Например, она считается универсальным и наиболее доступным для измерения качественных показателей нефти и нефтепродуктов. Ее автоматизированное измерение позволяет контролировать процесс переработки нефти, отслеживать выпуск некондиционной продукции, сортировать выпускаемые нефтепродукты, контролировать качество принимаемых и отпускаемых нефтепродуктов, вести массовый учет нефтепродуктов. Постоянно разрабатываются новые автоматизированные средства измерения плотности, обеспечивающие регламентированную точность, способные работать в сильно изменяющихся климатических условиях, удовлетворяющие требованиям взрывобезопасности и доступные по цене.

Наиболее перспективным методом измерения плотности нефтепродуктов, удовлетворяющим вышеизложенным требованиям, считается ультразвуковой метод. Широкое распространение получили ультразвуковые плотномеры, основанные на измерении затухания ульт-

тразвуковых волн при прохождении через нефтепродукт. Метод измерения плотности, использующий непосредственное измерение скорости распространения ультразвуковых волн в нефтепродукте, до настоящего момента не нашел широкого применения из-за посредственных метрологических характеристик. Тем не менее, с учетом предварительного установления вида контролируемого нефтепродукта и пересчетных зависимостей, применение данного метода позволяет существенно упростить конструкцию первичных преобразователей и электронной схемы, обеспечить регламентируемую точность измерения плотности, существенно повысить его чувствительность и выполнить требования взрывозащиты.

**Метод акустической эмиссии (АЭ).** Этот метод основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и разрушения (роста трещин) контролируемых объектов. Это позволяет формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. Другим источником АЭ контроля является истечение рабочего тела (жидкости или газа) через сквозные отверстия в контролируемом объекте. Особенности метода АЭ контроля, являются то, что он:

обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;

обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам (предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по теоретическим оценкам составляет порядка  $10^{-6}$  мм<sup>2</sup>, что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм);

обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ контроля, неподвижно установленных на поверхности объекта;

позволяет проводить контроль различных технологических процессов.

Целью АЭ контроля является обнаружение, определение координат, мониторинг источников акустической эмиссии, а также для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного предотвращения разрушения изделия. Регистрация АЭ позволяет определить образование свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках и фланцевых соединениях.

АЭ контроль технического состояния обследуемых объектов проводится только при создании в конструкции напряженного состо-

яния. Для этого объект подвергается нагружению силой, давлением, температурным полем и т.д.

Основные положения, порядок применения акустико-эмиссионного метода контроля сосудов, котлов, аппаратов и технологических трубопроводов и рекомендации по оценке результатов контроля, представлены на сайте <http://www.avek.ru/pages/23/>.

Классификацию источников АЭ выполняют с использованием следующих параметров сигналов: суммарного счета, числа импульсов, амплитуды (амплитудного распределения), энергии (либо энергетического параметра), скорости счета, активности, концентрации источников АЭ. В систему классификации также входят параметры нагружения контролируемого объекта и время.

Выявленные и идентифицированные источники АЭ рекомендуется разделять на четыре класса:

Источник I класса – пассивный источник.

Источник II класса – активный источник.

Источник III класса – критически активный источник.

Источник IV класса – катастрофически активный источник.

Выбор системы классификации источников АЭ и допустимого уровня (класса) источников рекомендуется осуществлять каждый раз при АЭ контроле конкретного объекта. Примеры систем для акустико-эмиссионного контроля представлены на сайте <http://www.ncontrol.ru/catalog/Akustiko-emiscionnyj-kontrol>.

**Ультразвуковые датчики и контрольно-измерительные приборы.** В промышленности широкое распространение получили ультразвуковые измерительные приборы, предназначенные для контроля различных рабочих параметров систем и процессов. Ультразвуковые датчики уровня жидкостей, уровня сыпучих материалов, расстояния служат для того, чтобы бесконтактно контролировать положение и габариты объектов самой разной природы и свойств. Такие датчики применяются в технологическом оборудовании с целью решения массы задач, среди которых и измерение уровней заполнения емкостей жидкостями и сыпучими материалами. Ультразвуковые датчики позволяют проводить контроль диаметра намотки материалов листового типа. Имеются специализированные ультразвуковые датчики для упаковочного и полиграфического оборудования. Специализированные ультразвуковые датчики, которые применяют в полиграфии или при упаковке продукта, дают возможность определять толщину полимерных пленок, бумаги и тканей, а также определяют положение кромки на материале.



Принцип работы ультразвуковых уровнемеров основан на том, что звуковые волны отражаются от препятствия, которыми являются объекты измерения. Излучатель ультразвукового уровнемера, расположенный в корпусе датчика, посылает ультразвуковые волны, часть которых отражается от объекта измерения и возвращается назад в приемник. В датчике принятый отраженный сигнал преобразуется встроенной электроникой в напряжение и обрабатывается ею. Преимущества ультразвуковых датчиков уровня очевидны, ведь отсутствует контакт с продуктом, а поэтому на уровнемере не образуются отложения. Приборы очень компактны, имеют надежную конструкцию, не имеют подвижных частей и практически не нуждаются в обслуживании.

Ультразвуковой расходомер существует для того, чтобы контролировать расход воды или тепла, вести учет расходования среды. В промышленности ультразвуковой расходомер применяется довольно давно. Ультразвуковой расходомер имеет массу достоинств: он надежен, потому что не имеет в составе подвижных механических элементов, к тому же он обладает малым гидравлическим сопротивлением. Ультразвуковой расходомер обеспечивает высокую точность измерения в короткий срок.

В этой статье мы остановились лишь на наиболее важных применениях ультразвукового метода контроля для решения технических задач. Каждый год количество задач, решаемых этим методом, возрастает, и даже просто перечислить в одной статье не представляется возможным.

### Литература

1. Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль. Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. "Неразрушающий контроль и диагностика", №2, 2011.
2. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений. Бархатов В.А.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.: ил.

*Статья поступила в редакцию 19.12.11*