

III. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

УДК 531.787

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЕФЕКТОСКОПИИ БЕТОНА**

В.А. Пивоваров

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
pivovarov@vniiftri.ru

Аннотация. Значительная часть объектов в строительной отрасли, для которых требуется проводить дефектоскопию, выполнена из бетона и железобетона (ж/б). К дефектоскопии бетонов относятся задачи поиска и измерения параметров различных дефектов структуры и технологических элементов в толще конструкций, измерения их размеров и глубины залегания. К технологическим элементам относятся арматурные стержни, пластиковые и металлические трубы, различные виды электрической проводки. Наиболее существенные дефекты инородные включения: воздушные полости, расслоения и трещины. Исследуемые дефекты и технологические элементы обладают большим разнообразием форм и размеров, что вместе с композитной структурой бетона усложняет задачи дефектоскопии. Цель настоящей статьи: оценка состояния метрологического обеспечения современных методов дефектоскопии бетона в РФ и обозначение направления его развития.

Ключевые слова: дефектоскопия, бетон, железобетон, геометрические методы, магнитные методы, сейсмоакустические методы, методы радиолокационного зондирования, ультразвуковые методы, меры бетонные с искусственными дефектами.

**METROLOGICAL SUPPORT OF CONCRETE
DEFECTOSCOPY**

V.A. Pivovarov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
pivovarov@vniiftri.ru

Abstract. A significant part of the objects in the construction industry, for which defect detection (defectoscopy) is required, is made of concrete and reinforced concrete. Concrete defectoscopy includes the tasks of searching for and measuring the parameters of various structural defects and technological elements in the thickness of structures, measuring their dimensions and depth. Technological elements include reinforcing bars, plastic and metal pipes, various types of electrical wiring. The most significant defects are different inclusions: air cavities, delaminations and cracks. The investigated defects and technological elements have a wide variety of shapes and sizes, which, together with the composite structure of concrete, complicates the problems of flaw detection. The purpose of this article is to assess the state of metrological support of modern methods of concrete flaw detection in the Russian Federation and designate the direction of its development.

Keywords: defectoscopy, concrete, reinforced concrete, geometric methods, magnetic methods, seismoacoustic methods, radar sounding methods, ultrasonic methods, concrete measures with artificial defects.

Старейшими методами дефектоскопии бетонов и ж/б являются *геометрические*, которые применяются для измерения параметров трещин, возникающих в толще бетонных конструкций, и динамики их развития. Ширину раскрытия трещин обычно определяют с помощью микроскопов и специальных луп с масштабным делением или других СИ (средств измерения), обеспечивающих точность измерений не ниже 0,1 мм. Глубину трещин устанавливают, применяя иглы и проволоочные щупы, а также при помощи ультразвуковых приборов определения прочности бетона. При применении ультразвукового метода глубина трещины устанавливается по изменению времени прохождения импульсов продольной и поперечной волны при условии, что плоскость трещинообразования перпендикулярна линии прозвучивания. Методы контроля и измерения параметров трещин в бетонных конструкциях описаны в [1], метрологическое и технологическое обеспечение этих методов в РФ развито и удовлетворяет потребностям строительной отрасли.

Другим давно используемым методом дефектоскопии бетонов и ж/б является *магнитный*. Магнитный метод основан на взаимодействии магнитного или электромагнитного поля прибора со стальной арматурой железобетонной конструкции. Строго говоря, этот метод условно может быть отнесён к методам дефектоскопии, т. к. обнаружение положения, толщины и глубины залегания стальной арматуры в большей степени технологический контроль соответствия исполнения конструкции проекту. Также метод может быть использован для разметки элементов конструкции для испытания прочности бетона с тем, чтобы учитывать расположение арматуры, оценки взаимного расположение арматуры и трещин, выходящих на поверхность конструкции. Метод позволяет установить величину защитного слоя, выявить расположения верхнего ряда стержневой арматуры и закладных, а также при неизвестном защитном слое примерно оценить диаметр арматуры.

Измерения «глубины защитного слоя бетона» магнитным методом регламентирует межгосударственный стандарт [2]. Он распространяется на сборные и монолитные железобетонные конструкции зданий и сооружений, изготовляемые из бетона различных видов, и устанавливает магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения стальной арматуры в указанных конструкциях.

Для определения толщины защитного слоя бетона и расположения стальной арматуры в железобетонной конструкции применяют магнитные, электромагнитные и вихретоковые приборы, включающие измерительный блок, измерительный преобразователь и блок питания. Приборы должны обеспечивать контроль расположения арматуры в конструкции и измерение толщины защитного слоя бетона в зависимости от номинального диаметра арматуры в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

Номинальный диаметр арматуры, мм	Диапазон толщины защитного слоя бетона, мм
От 4 до 10	5–30
От 12 до 32	10–60
Свыше 32	40–120

Предел допускаемой погрешности измерения при определении расположения одиночного арматурного стержня не должен быть более ± 10 мм. Предел допускаемой погрешности измерения толщины защитного слоя бетона (t_{pr}) не должен быть более $\pm(0,05 t_{pr} + 0,5)$ мм.

В настоящее время в РФ значительную долю парка приборов, реализующих магнитный метод измерения глубины залегания и диаметра стальной арматуры, составляют приборы, внесённые в Федеральный фонд СИ: ИПА-МГ4 (№ 29316-10), ПОИСК-2.5 (№ 26398-04), ПОИСК М (№ 74079-19), ИЗС-10Н (№ 8136-86). Отметим также прибор ПОИСК-2.6 (№ 26398-09), который реализует метод импульсной индукции. Метрологические характеристики приборов соответствуют требованиям таблицы 1.

Средствами поверки вышеупомянутых приборов служат немагнитные пластины разной толщины и образцы стальной арматуры различных размеров. С помощью этих средств имитируются различные комбинации залегания арматуры в диапазоне измерений. Однако при проведении измерений в условиях строительства поверенный прибор должен привязываться к конкретному типу бетона. При этом до проведения измерений сопоставляют технические характеристики применяемого прибора с соответствующими проектными (ожидаемыми) значениями геометрических параметров армирования контролируемой железобетонной конструкции. При несоответствии технических характеристик прибора параметрам армирования контролируемой конструкции необходимо установить индивидуальную градуировочную зависимость.

Магнитные методы до недавнего времени полностью обеспечивали основные потребности строительной отрасли в измерениях параметров расположения арматуры в толще бетона. Однако в последние 10 лет растёт производство и применение новых видов «немагнитной» арматуры, и для определения глубины защитного слоя этих видов арматуры магнитный метод неактуален. Также отметим, что приборы, реализующие магнитные методы, не позволяют проводить контроль через арматурную сетку, связанную небольшим шагом. Для устранения этих недостатков в последние годы в практику внедряются приборы, основанные на методах *радиолокации* и *УЗ (ультразвуковым) эхо-методе*.

Следующий метод дефектоскопии бетонов — *сейсмоакустический* — применяется при анализе актуального состояния бетонных свай. В результате измерений определяется длина части сваи в грунте, а также проводится анализ целостности сваи. Данный метод является неразрушающим, при применении бетон сваи не получает значимых повреждений.

В основе метода лежит принцип акустической дефектоскопии. Метод позволяет производить анализ движения акустической волны и её отражений в исследуемой свае. Ударом специальным молотком по торцу сваи в направлении, параллельном свайной оси, порождается зондирующее воздействие,

акустическая волна. Акустическая волна проходит по свае, порождая в случае дефектов и достижения конца сваи отражённые волны, которые движутся к источнику возбуждения. При этом, чем сильнее дефекты и больше их количество, тем будет выше значение коэффициента отражённой волны, которое и регистрирует прибор.

Точность определения длины сваи и глубины расположения дефектов составляет 5–10 %, что является достаточным для практики в большинстве случаев. Основное достоинство метода — высокая скорость проведения испытаний, которая позволяет проверить несколько десятков свай за один день. Важно также, что метод может применяться для проведения испытаний любого типа сваи вне зависимости от того, какая технология использовалась для её устройства. Повышение точности и надёжности результатов испытаний ограничено нестабильностью прохождения акустического сигнала в бетоне, и необходимые для практики цели обеспечиваются набором необходимой статистики.

Контроль целостности бетона и длины свай проводится в соответствии с требованиями следующих документов [3], [4].

Для обеспечения качественной регистрации волны предварительно производится зачистка поверхности бетона головы сваи для установки датчика. Для получения достоверной информации измерения выполняются не менее, чем в трёх различных точках подготовленной поверхности. Для возбуждения импульсов выполняются не менее 15–20 ударных воздействий в каждой точке с использованием тарированного пластмассового молотка с контролем качества каждого регистрируемого сигнала. Часть приборов, реализующих этот метод, внесена в Федеральный фонд СИ РФ, среди них выделим приборы ПДС-МГ4 (№ 81110-20), Пульсар-2.2 (№ 52901-13). Поверка этих средств измерений осуществляется с помощью имитации акустических и электрических сигналов поверочными виброустановками и специальными генераторами сигналов. Проблем с метрологическим обеспечением этих измерений нет, оно достаточно развито.

В последние годы растёт число приборов дефектоскопии бетонов на основе метода *радиолокационного зондирования*. Приборы, основанные на классическом принципе радиолокации и осуществляющие подповерхностное зондирование бетонных и ж/б конструкций, называются георадарами. Передающей антенной прибора излучаются сверхкороткие электромагнитные импульсы (единицы и доли наносекунды), имеющие 1,0–1,5 периода квазигармонического сигнала и достаточно широкий спектр излучения. Центральная частота сигнала определяется типом антенны.

Излучаемый в исследуемую среду импульс отражается от находящихся в ней предметов или неоднородностей среды, имеющих отличную от среды диэлектрическую проницаемость или проводимость, принимается приёмной

антенной, усиливается в широкополосном усилителе, преобразуется в цифровой вид при помощи аналого-цифрового преобразователя и запоминается для последующей обработки. После обработки полученная информация отображается на индикаторе. Георадары позволяют решать задачи дефектоскопии при одностороннем доступе к поверхности бетонной конструкции.

Выбор длительности импульса определяется необходимой глубиной зондирования и разрешающей способностью прибора. Для формирования зондирующих импульсов используется возбуждение широкополосной передающей антенны перепадом напряжения (ударный метод возбуждения). Как показано в [5], между глубиной зондирования и разрешающей способностью существует функциональная связь.

Большинство задач дефектоскопии бетона в строительной отрасли характеризуются диапазоном расположения дефекта на глубинах от 0,1 м до 1 м и достаточным разрешением глубины залегания дефекта $\pm 0,1 + 0,01 \times L$ м, где L толщина бетона.

Георадары для решения задач дефектоскопии бетона созданы в РФ и за её пределами. В Федеральный фонд СИ РФ внесены универсальные георадары линейки ОКО (№ 44278-10, 54026-13, 79173-20), специализированные для дефектоскопии бетонов: георадары PS1000 (№ 54564-13) фирмы “Hilti Corporation” (Лихтенштейн). Из не внесённых в федеральный фонд СИ приборов отметим георадары GP8000, GP8100 фирмы Proseq, Швейцария.

Георадары линейки ОКО выпускаются в разных модификациях, их метрологические характеристики: в диапазоне от 0,1 до 3 м погрешность измерения расстояния до изменения зоны диэлектрической проницаемости объекта — $\pm 0,1$ м, а в диапазоне от 1 до 10 м — $\pm 0,35$ м. Однако есть сомнения, что при решении задач дефектоскопии бетона георадары линейки ОКО обеспечат результат с заявленной точностью.

Для поверки [6] георадаров линейки ОКО используется установка на основе неподвижной диэлектрической пластины и подвижной металлической плоскости (рис. 1).

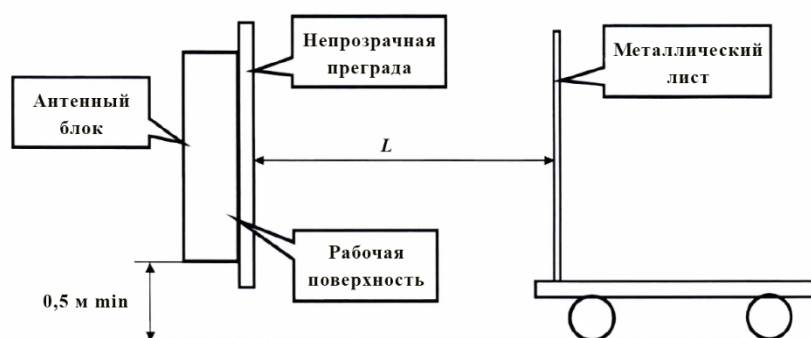


Рис. 1. Схема стенда и диапазона погрешности георадаров ОКО

То есть при поверке георадаров ОКО метрологические характеристики проверяются в условиях далёких от реальных задач дефектоскопии бетонов и ж/б. Например, для поверки георадаров PS1000 используются меры с искусственными дефектами РТ1000 (№53817-13). Меры толщины имеют вставки из металлической арматуры разных диаметров, проводки, пластиковых труб и позволяют набирать различные по толщине композиции из комплекта мер каждая толщиной 80 мм, при этом максимальная композиция может быть набрана толщиной 480 мм. Длина мер — 1000 мм, ширина — 250 мм. Меры изготавливаются из бетона одной прочности. В настоящее время поставка таких мер в Россию невозможна.

Для обеспечения поверки георадаров и других приборов для решения задач дефектоскопии бетона ФГУП «ВНИИФТРИ» был разработан набор мер бетонных УПТ1 (№ 72127-18). Набор состоит из четырёх мер, из которых две меры (МБ1, МБ3) — из бетона низкой прочности (класс В15), и две меры (МБ2, МБ4) — из бетона высокой прочности (класс В30). Каждая пара мер позволяет проводить поверку георадаров и других дефектоскопов бетона в диапазоне измерения толщины бетона от 40 до 600 мм, определения дефектов на глубинах от 100 до 500 мм. В качестве модели дефекта используется воздушный цилиндр диаметром 20 мм.

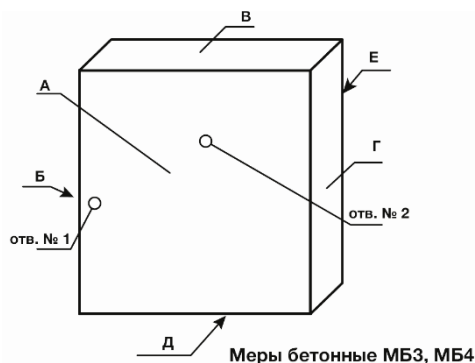


Рис. 2. Схема расположения дефектов (отв. № 1, отв. № 2) мер МБ3 и МБ4 из набора УПТ1

Прибор, который подтверждает свои метрологические характеристики при поверке на мерах УПТ1, с большей вероятностью достоверно решит задачу дефектоскопии в условиях практики строительства с соответствующей установленной в описании типа погрешностью.

Для решения задач дефектоскопии при обследовании зданий и сооружений, бетонных свай, а также неразрушающего определения прочности в строительной практике широко используется *ультразвуковой метод (УЗ)*. В настоящее время используют три способа УЗ-диагностики: сквозное, поверхностное прозвучивание, а также эхо-метод. Ультразвуковой метод основан на свойстве УЗ-волн по-разному отражаться от объектов различных плотностей.

УЗ-методы сквозного и поверхностного прозвучивания используются повсеместно в практике оценки прочности бетонных и ж/б конструкций [7]. Их использование для решения задач дефектоскопии аналогично их применению при определении прочности. Отличие состоит в том, что по регистрируемым измерениям в скорости прохождения УЗ-волн делается заключение не о прочности, а о наличии приповерхностных либо внутренних дефектов материала. Для того, чтобы проводить измерения приборы комплектуются выносными датчиками.

Необходимо отметить существенные ограничения методов и невысокую точность при решении задач дефектоскопии. Первое обусловлено ограничениями, накладываемыми необходимостью заводить датчики с разных сторон объекта и ограниченностью базы при поверхностном прозвучивании. Низкую точность измерения глубины залегания и геометрии дефекта определяет слабая направленность поля излучения-приёма УЗ преобразователей и, как следствие, низкая чувствительность и разрешающая способность аппаратуры. Технологически сложно также изготовить преобразователь с апертурой в несколько длин волн, малой длительностью импульсной характеристики и низким уровнем собственного шума [8]. Приборы, которые используются для реализации измерений по этим методам те же, что и для контроля прочности бетона — УК1401 (№ 21840-01, № 34625-07), УКС-МГ4 (38169-08) или Пульсар (№ 52901-13). При поверке УЗ-приборов используют образцы толщины и скорости распространения ультразвуковых волн СП001 (№ 38170-08), УСВ 002 (№ 51139-12) и др. аналогичные образцы, дополнительно применяется имитация УЗ-сигналов с помощью высокоточных генераторов сигналов.

Для анализа целостности и состояния свай и решения задач дефектоскопии также может использоваться ультразвуковой метод сквозного прозвучивания. При решении этих задач, согласно п. 12.7.3. [9], в состав работ по выборочному контролю качества бетона свай включают контроль длины свай и оценка сплошности их стволов с использованием акустических испытаний в количестве 20 % общего числа свай на объекте.

Для того, чтобы применять метод, необходимо на этапе строительства свай, заглублённых колонн, глубоких фундаментов и других критических объектов проделать предварительную работу. В теле конструкции необходимо организовывать каналы распространения УЗ-волн, диаметр которых составит около 50 мм. Каналы заполняют водой. Контроль выполняют по времени распространения ультразвукового сигнала между преобразователями, которые помещают в каналы. Таким образом, за точность и надёжность контроля приходится платить на этапе строительства. Точность этого метода существенно выше за счёт того, что глубина расположения преобразователей определяется очень точно, и преобразователи располагаются непосредственно в зоне контроля. В РФ для целей УЗ-анализа целостности свай и глубоко залегающих фундаментов распространён прибор Пульсар-2.2 «ДБС».

Существенные ограничения, которые накладывает классический УЗ-метод, привели к тому, что был разработан УЗ эхо-метод [10]. Метод был предложен в 80-х гг., но реализация его в виде приборов долгое время была мало пригодна для практики. Причина в том, что на грубой пористой поверхности бетона сложно организовать акустический контакт. После того, как учёными РФ были созданы низкочастотные УЗ-преобразователи с сухим точечным контактом [11], эхо-метод стал активно использоваться. Метод позволяет получить значительно больше дефектоскопической информации и требует лишь одностороннего доступа к поверхности обследуемой конструкции. Помимо задач дефектоскопии метод позволяет определять толщину бетона конструкции. Для уменьшения влияния неблагоприятных акустических свойств бетона для обнаружения внутренних дефектов синтезируют акустическую апертуру больших волновых размеров, которую с помощью компьютера фокусируют в различные точки внутри обследуемой конструкции. Конструктивно томограф состоит из электронного блока и антенного устройства с решёткой из 24 (4×6) УЗ-преобразователей. Подпружиненный подвес преобразователей решётки позволяет вести контроль объектов с шероховатостью поверхности бетона до 8 мм между впадинами и выступами.

Результаты контроля в такой аппаратуре представляются в виде томограммы внутренней структуры объекта контроля, где различными уровнями яркости или цветом отмечены области, отражающие ультразвуковые волны, то есть вероятные дефекты конструкции.

Приборы, реализующие эхо-метод — ультразвуковые низкочастотные томографы, в последние годы выпускают отечественные и зарубежные фирмы. В РФ это низкочастотный УЗ-томограф А1040 MIRA (№ 49972-12), отметим также низкочастотные Pundit 250 Array, Pundit Live Array, Pundit Live Array Pro фирмы «Proseq SA» (Швейцария). Сдерживающим фактором распространения этих приборов в строительных лабораториях является более высокая цена, но, несомненно, с течением времени их цена будет становиться более доступной и процент этих приборов будет расти.

Поскольку конечный результат измерений георадаров и УЗ-томографов низкочастотных формируется в результате сложной математической обработки многочисленных результатов измерений, которые происходят практически одновременно, поэлементная оценка метрологических характеристик объёмна и сложна для нормирования.

Единственным вариантом остаётся оценка метрологических характеристик приборов по основным характеристикам с применением мер бетонных с искусственными дефектами. В Федеральном фонде СИ в настоящее время для проверки томографов ультразвуковых могут применяться наборы мер УПТ1 и UCS 801 (№ 49722-12). Меры UCS 801 изготавливаются из бетона ненормированной прочности и поэтому меры набора УПТ1 из бетона низкой и высокой прочности позволяют проводить более достоверный контроль. Вместе с тем характеристики этих мер недостаточны для того, чтобы обеспечить метрологический контроль георадаров и томографов строительного назначения в практически значимых диапазонах толщины и глубины расположения дефектов.

Заключение

Современные более достоверные и высокопроизводительные методы дефектоскопии бетона неизбежно приходят на смену ранее используемым. Необходимо совершенствовать отечественную базу для метрологического обеспечения СИ, реализующих эти методы. Необходимо разработать, создать и обеспечить основные метрологические центры РФ наборами бетонных мер с искусственными дефектами в диапазоне измерений толщины бетона до 1 м с различными видами дефектов и технических вставок на разных глубинах залегания. При этом наборы мер должны содержать меры разных уровней прочности бетона.

Список литературы

1. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий. — М.: АО «ЦНИИПромзданий», 2004. — С. 55–64.
2. ГОСТ 22904-93. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры. — М.: Стандартинформ, 2010.
3. ГОСТ Р 57358-2016/EN 12699:2000. Сваи вытеснительные. Правила производства работ. — М.: Стандартинформ, 2017.
4. ASTM D 5882-96. Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles. — URL: <http://www.svai-test.ru/files/standarts/D5882.pdf>.
5. Германович О., Лиференко В., Кацан И., Тебуев М.Б. Георадар с повышенной разрешающей способностью. Структура и пути аппаратной реализации // Компоненты и технологии. — 2014. — № 6. — С. 166–168.
6. ГСИ. Приборы радиотехнические подповерхностного зондирования (георадары). Методика поверки — РТ-МП-6853-445-2020 — в Федеральном фонде РФ утверждённых типов СИ № 79173-20.
7. ГОСТ 17264-2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. — М.: Российский институт стандартизации, 2022.
8. Gaydecki P.A., Burdekin F.M. Nondestructive Testing of Reinforced and Prestressed Concrete Structures // Nondestructive Testing and Evaluation. — 1998. — V. 14. — С. 339–392.
9. СП 45.13330.2017. Земельные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87. М., 2017.
10. Ковалёв А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. — № 2. — 1990. — С. 29–41.
11. Пат. РФ. Ультразвуковой низкочастотный преобразователь / В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин; патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью фирма «АКС». — № 2082163; 1997, Бюлл., изобр. № 17.

Статья поступила в редакцию: 31.10.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 24.10.2022 г.

Статья принята в работу: 01.11.2022 г.