

---

## Диагностика железобетонных стен туннеля с помощью ультразвукового томографа



**Де Ла Хаза  
Алдо**

Ведущий NDT менеджер, Dynasty Group, Inc., Чикаго, США. 25-летний опыт контроля бетона.

Сотрудники ООО «Акустические Контрольные Системы», Москва



**Самокрутов  
Андрей  
Анатолевич**

Генеральный директор, д. т. н., III уровень по акустическому и магнитному видам НК.



**Шевалдыкин  
Виктор  
Гаврилович**

Заместитель директора по научной работе, д. т. н.

В Медицинском центре Университета Монреалья (Centre hospitalier de l'Université de Montréal, CHUM) в Канаде в настоящее время анализируется возможность реконструкции туннеля Сангине, соединяющего главное здание госпиталя с корпусом материально-технического обеспечения. Номинальная толщина железобетонных стен туннеля 700 мм.

На северной и, особенно, на южной стенах имеются участки бетона с раковинами и открытой арматурой. Предполагаемая причина возникновения указанных дефектов — заливка бетона в опалубку, на дне которой находилось некоторое количество льда, в результате чего в отдельных бетонных секциях образовались области неудовлетворительной плотности затвердевания, в том числе пустоты и раковины. Часть из них можно выявить визуальным контролем. Владельцы сооружения планируют выполнить реконструкцию туннеля с последующей проверкой качества работ по реконструкции бетонных стен методами НК.

Компания Dynasty Group, Inc. (Dynasty) провела диагностику северной и южной стен туннеля до начала реконструкции. На рис. 1 представлен



Рис. 1. Общий вид туннеля в Медицинском центре Университета в Монреале

общий вид туннеля. Целью исследования было оценить состояние бетона нижней части стен туннеля до высоты 30 см от пола и определить степень его деградации. Исследование позволило оценить объём восстановительного ремонта, в результате которого стены должны будут принять исходное по проекту состояние.

Предварительный визуальный контроль стен позволил выявить:

- участки неудовлетворительного затвердевания бетона с типичной ячеистой структурой (рис. 2а, г);
- пустоты в основании южной стены (рис. 2б, в);
- открытую арматуру (рис. 2в).

Для диагностики состояния бетонных стен в грунте использовался метод ультразвуковой томографии, реализованный с помощью эхо-импульсного дефектоскопа А1040 MIRA для контроля бетона от ООО «Акустические Контрольные Системы», г. Москва [1].



Рис. 2. Результаты визуального контроля стен: а — участки неудовлетворительного затвердевания бетона (с раковинами); б — пустоты в основании южной стены; в — обнаженная арматура; г — раковинчатая структура бетона в основании южной стены

Томограф A1040 MIRA реконструирует двумерные и трёхмерные изображения внутренней структуры бетонных изделий путём цифровой пространственно-временной обработки принятых эхо-сигналов. В основе его работы используется метод комбинационно-синтезированной фокусируемой апертуры (SAFT-C) [2].

Основной частью дефектоскопа является антенная решётка, состоящая из 12 приёмно-излучающих модулей. Каждый модуль содержит четыре ультразвуковых преобразователя поперечных волн номинальной частотой 50 кГц с технологией сухого точечного контакта (СТК) (dry point contact, DPC). Преобразователи модуля выстроены в ряд с шагом 25 мм вдоль узкой стороны решётки. Они включены синфазно, и образуют, по сути, элемент решётки, имеющий широкую диаграмму направленности в плоскости, ориентированной вдоль длинной стороны решётки, и более узкую диаграмму направленности в плоскости, проходящей через все преобразователи модуля. Расстояние между модулями равно 30 мм. Это расстояние — шаг антенной решётки.

Контакт преобразователей реализуется через керамический наконечник. Каждый преобразователь установлен в подпружиненный подвес, что делает возможным контроль объектов с шероховатой и неровной поверхностями при одностороннем доступе.

Реконструируемые изображения выводятся на экран, встроенный в корпус антенной решётки, т. е. прибор представляет собой моноблок. Собранные ультразвуковые данные могут быть в дальнейшем переданы на компьютер и обработаны соответствующим программным обеспечением. На экране полученное изображение может быть представлено как вид сверху, в виде поперечного сечения или в изометрии. На рис. 3 представлено оборудование MIRA для контроля бетона.



Рис. 3. Ультразвуковой томограф A1040 MIRA

Контроль проводили в двух режимах: «точечным методом» — при одиночных положениях антенной решётки в выбранных зонах бетонных стен и в режиме «карта» — сбора ультразвуковых данных при сканировании решёткой по размеченной на стене сетке с ячейками

100 × 100 мм. Сканирование — это установка решётки центром её апертуры в узлы сетки (для этого есть световые направляющие) с сохранением ориентации, например, горизонтально. Затем в неподвижном состоянии по нажатию кнопки происходит зондирование и приём ультразвуковых сигналов (порядка 3 с). В одиночных положениях решётки на экране генерируется двумерное изображение поперечного сечения стены под решёткой. Данные, снятые в режиме «карта», позволяют построить трёхмерное изображение внутреннего объёма стены под всем размеченным полем.

Для получения наибольшего количества данных контроль точечным методом провели на протяжении первых 18 м с востока на южной и северной стенах. Прибор устанавливали горизонтально так, чтобы вертикальная линия разметки проходила через центр антенной решётки. На южной стене тестирование проводилось с шагом 30 см на высоте 30 и 60 см от бетонного пола. На северной стене, менее подверженной разрушению, такой контроль проводили с шагом 60 см с визуализацией структуры бетона на высоте 30 см от пола.

С помощью режима «карта» контроль провели в четырех областях южной стены, вызывающих особое беспокойство, вблизи её основания до уровня 60 см от пола.

На рис. 4а представлена разметка зон точечного контроля и на рис. 4б — опорная сетка для получения трёхмерного изображения в режиме «карта».



Рис. 4. Разметка поверхности стен для проведения контроля: а — «точечным методом»; б — в режиме «карта» (типичная сетка с ячейками 100 × 100 мм)

Результатом контроля в каждом отдельном положении прибора является изображение сечения объекта, плоскость которого перпендикулярна поверхности объекта и проходит вдоль длинной стороны апертуры антенной решётки через её центр (рис. 3). Это изображение

(томограмма) по координатным осям аналогично изображению типа *B* (*B*-скану), с той разницей, что каждая его точка является результатом цифровой фокусировки всей апертуры решётки в соответствующую точку объекта контроля. Типичный вид такого изображения показан на рис. 5.

Поскольку длина поперечной ультразвуковой волны в бетоне  $\approx 25\text{--}30\text{ мм}$ , то пространственная селекция отражателей в нём получается только в результате совместной когерентной пространственно-временной обработки сигналов, принятых всеми элементами решётки (модулями) после всех 12 посылок зондирующих сигналов. Т. е. в течение 3 с сбора ультразвуковых данных поочерёдно каждый элемент решётки посылает зондирующий сигнал, а все 12 элементов параллельно независимо принимают сигналы из бетона. Полное количество принятых сигналов, подвергаемых совместной обработке с реконструкцией изображения, равно 78 [3]. Реконструкция изображения происходит с шагом, много меньшим, чем шаг антенной решётки и средний размер крупного заполнителя бетона. Это позволяет не пропустить воздушную полость, по крайней мере, вдвое превышающую средний размер заполнителя. Этим размером, в основном, и определяется чувствительность томографа, т. е. возможность обнаружить малую несплошность на фоне шума от зёрен крупного заполнителя.

Горизонтальная ось томограммы (ось *X* на рис. 5) совпадает с линией на поверхности объекта, лежащей в плоскости визуализируемого сечения. Вертикальная ось — ось глубин *Z*. Цветовая радужная палитра томограммы соответствует уровню отражённых сигналов от внутренних неоднородностей бетона. Минимальный уровень соответствует синему цвету, максимальный — красному. Отсутствие отражений представлено чёрным. Красная вертикальная линия на томограмме является курсором, который можно перемещать по горизонтали. Распределение амплитуд образов томограммы по глубине вдоль линии этого курсора отображается на экране слева от томограммы в виде, подобном

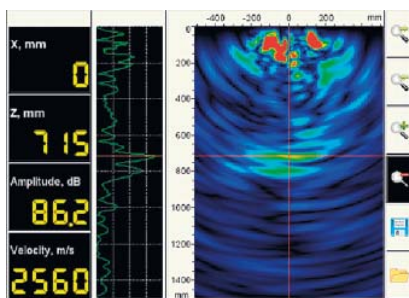


Рис. 5. Вид экрана томографа в режиме контроля «точечным методом». На томограмме виден образ донной поверхности стены на глубине 715 мм

А-развёртке. Образ — это цветное пятно, полоса, точка изображения, которые вызваны отражательными свойствами неоднородностей бетона, его арматуры, крупного заполнителя. Горизонтальная красная линия — курсор, перемещаемый по вертикали. Значение амплитуды образа томограммы в точке пересечения этих курсоров индицируется слева в поле «Амплитуда, дБ». Так же слева индицируются координаты этой точки  $x, z$ .

Оценку изображения оператор проводит, ориентируясь на средний уровень структурного шума. Любой образ, превышающий по амплитуде этот уровень, является вероятной несплошностью или металлическим включением. Чем больше это превышение, тем выше вероятность правильной оценки. Крупные несплошности или трещины дают протяжённые образы. В частности, образ донной поверхности, как правило, протяжённый и параллелен поверхности доступа. Но не всегда, особенно при больших толщинах объекта и его неровной донной поверхности. В нашем случае стен в грунте донная поверхность, скорее всего неровная.

Изображение на рис. 5 получено при точечном контроле северной стены на расстоянии 30 см от её восточного края и на высоте 30 см от бетонного основания. На этой томограмме видны яркие красные образы от приповерхностной арматуры. На глубине 715 мм виден не очень яркий образ донной поверхности стены. Голубые и зелёные пятна на томограмме могут быть вызваны небольшими зонами рыхлого, недоуплотнённого бетона, а также шумом структуры бетона. Поскольку донная поверхность видна, а на меньших глубинах нет ярких образов, то

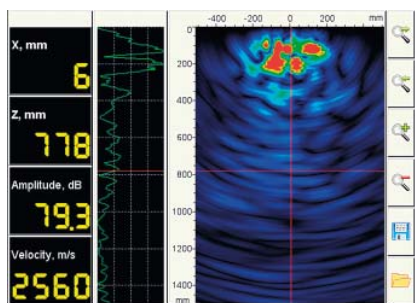


Рис. 6. Изображение, полученное в дефектной области южной стены. Образа донной поверхности нет. На глубинах до 250 мм видны образы от несплошностей бетона и арматуры

можно сделать вывод, что крупных пустот, которые бы рассеяли ультразвуковые волны или преградили им путь, в стене нет.

На рис. 6 представлено изображение, аналогичное томограмме рис. 5, но полученное на южной стене на расстоянии 2 м от её восточного края на высоте 12 см от бетонного пола. Здесь в области глубин, соответствующих номинальной толщине стен туннеля, нет сколько-нибудь существенных

по уровню образцов. Только хаотично расположенные синие пятна, вызванные структурным шумом. Но на глубинах до 250 мм присутствуют очень яркие и большие по размерам образы, заметно превышающие образы от арматуры на рис. 5. Это значит, что в зоне арматуры есть незаполненные бетоном воздушные полости. Кроме того, на глубине порядка 350 мм есть ещё один образ голубого цвета с максимумом уровня зелёного цвета. Уровень зелёного примерно на 6–8 дБ ниже красного. Этот образ указывает на ещё одну неоднородность бетона в стене, которая затеняет сигналы от донной поверхности. Таким образом, участок стены, где получено это изображение, следует считать дефектным.

Рис. 7 иллюстрирует типичное трёхмерное изометрическое изображение, полученное при контроле в режиме «карта». Оно состоит из множества параллельных томограмм, снятых в точках узлов размеченной сетки на стене. Этот массив изображений хранится в памяти дефектоскопа. И из него можно вызвать на экран компьютера любую исходную томограмму, любую *B*-томограмму, составленную из нескольких, лежащих в одной плоскости исходных томограмм, а также вырезанные из массива изображения типа *C* и *D* (рис. 3). *C*-изображением является изображение сечения объекта, параллельного его внешней поверхности на выбранной оператором глубине. Изображение типа *D* ортогонально изображениям типов *B* и *C*.

Трёхмерный массив изображений представлен на рис. 7 так, что верхняя по рисунку грань массива отображает *B*-томограмму, составленную из 5 «сшитых» (взаимно обработанных) исходных томограмм, снятых на одной линии по оси *X*. Всего в массиве 6 слоёв изображений в направлении оси *Y*. Правая по рисунку грань, обращённая к наблюдателю, соответствует поверхности стены, по которой производили сканирование. Левая грань является крайним в массиве изображением типа *D*, отображающим сечение стены от внешней поверхности до максимальных глубин.

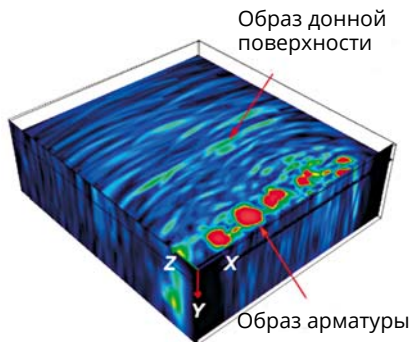


Рис. 7. Трёхмерный массив изображений внутренней структуры бетона южной стены, полученный в режиме «карта» в области качественного бетона



Массив изображений на рис. 7 получен на южной стене на расстоянии примерно 10 м от восточного края стены при положении верхнего ряда разметки на высоте 1,7 м от пола. На верхней грани массива хорошо видны образы первого приповерхностного ряда арматуры. Стержни арматуры отображены почти круглыми пятнами, т. к. плоскость сечения этой томограммы перпендикулярна стержням. На глубине порядка 700 мм видны образы донной поверхности в виде полосок голубого цвета. Причём их протяжённость в направлении оси  $X$  свидетельствует, что отражения ультразвука от донной поверхности проявились почти во всех исходных  $B$ -томограммах. Просмотр всех «слоёв»  $B$ -томограмм позволяет оценить пространственное расположение возможных несплошностей бетона в стене и более точно определить её толщину. Дополнительную информацию о состоянии бетона, о его пористости или трещиноватости может дать общий уровень структурного шума, точнее, его повышенный уровень в некоторой зоне по отношению к обычному уровню в других зонах данного обследуемого объекта. Так в зоне, где были сняты данные, представленные на рис. 7, средний уровень шума выше примерно на 2 дБ, чем в зонах, где получены изображения рис. 5 и 6. Однако это превышение незначительно, и качество бетона здесь можно считать таким же, как и в других местах стен. Поскольку массив изображений, снятый в режиме «карта» состоит из многих соединённых томограмм, то в результате качество любого результирующего изображения здесь выше, чем в одиночной томограмме, полученной из одного положения прибора на объекте.

В отличие от массива на рис. 7 такой же массив изображений был получен при контроле южной стены на расстоянии 6 м от восточного края в нижней части стены. Нижний ряд разметки проходил на высоте 12 см от бетонного пола. Изображение массива представлено на рис. 8. На томограмме его верхней грани хорошо видны множественные слившиеся вместе образы от неоднородностей бетона вблизи внешней

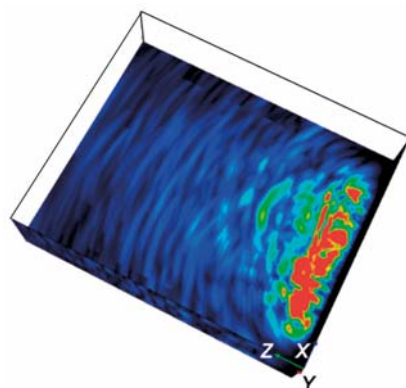


Рис. 8. Массив изображений, полученный в дефектной области южной стены



поверхности стены. При этом образ донной поверхности отсутствует. Последовательный просмотр других *B*-томограмм массива, параллельных видимой на рис. 8 томограмме, показал, что значительные приповерхностные неоднородности бетона присутствуют почти во всех сечениях этой части стены.

Все данные ультразвуковой томографии, полученные при контроле южной и северной стен, были проанализированы аналогичным образом. Результаты контроля показали, что полости в бетоне сосредоточены в южной стене в области между 0,6 м и 7 м от восточного края и на высоте от 15 до 20 см от бетонного пола. Исследование северной стены не показало образцов, характерных для внутренних пустот.

В бетоне южной стены на уровне выше 20 см от пола полости не зарегистрированы. Для проверки этого из южной стены были извлечены три пробных керны длиной 75 мм на высоте 30 см от пола на расстояниях 1,8, 6 и 10 м от восточного края стены. Во всех кернах бетон оказался плотным с равномерно распределённым крупным заполнителем.

## **Выводы**

1. Для обнаружения различных нарушений сплошности бетона в монолитных железобетонных объектах при одностороннем доступе и определения глубины их залегания, а также общей толщины конструкции можно использовать ультразвуковой томограф A1040 MIRA.

2. Применение этого прибора для диагностики состояния железобетонных стен тоннеля в Монреале показало, что контроль с его помощью позволил выявить области внутренних нарушений бетона в зонах расположения первого ряда силовой арматуры в южной стене туннеля. В то же время в северной стене таких нарушений не оказалось. Дефекты бетона южной стены располагаются на протяжении почти 6,5 метров от восточного края стены и на высоте до 20 см от пола туннеля.

3. Контроль с помощью прибора A1040 MIRA можно проводить в двух режимах: выборочном, в отдельных зонах объекта с получением одиночных *B*-томограмм и в режиме «карта» — режиме сбора ультразвуковых данных с некоторой площади поверхности объекта по заранее выполненной разметке.

Первый режим позволяет оперативно оценить состояние объекта с минимумом затрат времени. На получение одного изображения требуется около 3 с.

Режим «карта» требует времени на разметку и сканирование. Но качество изображений и поэтому достоверность обнаружения несплошностей получается существенно выше. Этот режим целесообразно применять в случаях низкого качества бетона для сплошного контроля его структуры на значительной площади поверхности.

## Литература

1. Низкочастотный ультразвуковой томограф A1040 MIRA. Доступно на: <http://www.acsys.ru/production/detail/a1040-mira/>
2. Ковалёв А. В., Козлов В. Н., Самокрутов А. А. и др. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция. — Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29–41.
3. Козлов В. Н., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом: состояние и перспективы. — В мире НК. 2002. № 2 (16). С. 6–10.

## References

1. *Nizkochastotny ultrazvukovoy tomograf* [Low frequency ultrasonic tomography scanner A1040 MIRA]. Available at: <http://www.acsys.ru/production/detail/a1040-mira/> (accessed 2 June, 2015) (in Russ.)
2. Kovalev A. V., Kozlov V. N., Samokrutov A. A. et al. *Soviet J. Nondestructive Testing*, 1990, v. 26, no. 2, pp. 110–118.
3. Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. *V mire NK* [NDT World]. 2002, no. 2 (16), pp. 6–10.