Эволюция приборов для дефектоскопии бетона

Фарукшин Р.М. - заместитель директора филиала - главный инженер;
Ионина И.М.- ведущий эксперт;
Галиев Ф.И. - руководитель группы;
Самигуллин А. Ф. - ведущий специалист
Салимова Л.И. – ведущий специалист
Казанский филиал ФГУП ВО «Безопасность»
420073, РТ, г. Казань, ул. Гвардейская, 15

В статье рассмотрены ультразвуковые методы дефектоскопии бетона. Описано развитие приборов для неразрушающего контроля бетонных конструкций в том числе и при одностороннем доступе. Представлены ультразвуковые датчики с сухим точечным контактом. Описан опыт применения ультразвукового томографа бетона.

Ключевые слова: *обследование, контроль бетона, датчики с сухим точечным контактом, томограмма.*

Для дефектоскопии железобетонных конструкций широко применяют ультразвуковые методы. Наиболее распространены импульсные методы сквозного и поверхностного прозвучивания. В последние 10 - 15 лет всё больше используют эхо-метод, который даёт значительно больше информации и требует лишь одностороннего доступа к обследуемой конструкции.

Однако эхо-импульсная аппаратура для дефектоскопии бетона существенно сложнее приборов для прозвучивания бетонных конструкций. Из-за 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. Этот метод синтеза, заимствованный из радиолокации, сокращённо называют "САФТ" (по-английски "SAFT" - "Synthetic Aperture Focusing Technique") [1 - 3]. 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.

Апертуры - часть поверхности сложных антенн, излучающая или принимающая электромагнитные колебания в данных конкретных условиях.

Грубая и пористая поверхность бетона плохо смачивается контактными жидкостями и надёжный акустический контакт с ней создать очень трудно. Поэтому эхо-импульсная аппаратура с жидкостным акустическим контактом не нашла широкого практического применения и осталась, в основном, на стадии лабораторных исследований [4].

Преодолеть проблему акустического контакта позволили низкочастотные ультразвуковые преобразователи с сухим точечным контактом (СТК) [6]. С их помощью стало возможным вести контроль бетона как продольными, так и поперечными акустическими волнами. Преобразователи обладают малой длительностью рабочих сигналов (относительная полоса частот более 70 %) и низким уровнем собственных реверберационных шумов.

Исследования структурной реверберации ультразвуковых волн в бетоне и других акустических помех, мешающих приёму эхо-сигналов, показали, что для дефектоскопии бетона лучше использовать поперечные волны, чем продольные [7].

Результаты этих исследований позволили создать приборы, используемые в настоящее время для дефектоскопии железобетонных конструкций при строительстве и обследовании эксплуатирующихся сооружений [8 - 10]. Эти приборы основаны на эхо-

методе. В них используются решётки ультразвуковых преобразователей с сухим точечным контактом. Работают приборы на поперечных ультразвуковых волнах.

В практике неразрушающего контроля железобетонных объектов значительное место занимают сооружения с односторонним доступом. Например колонны, стенки железобетонных подземных резервуаров, градирни, мосты, туннели, взлётно-посадочные полосы, гидротехнические сооружения, подземные конструкции метрополитена. Применение традиционных ультразвуковых методов низкочастотной дефектоскопии, основанных на сквозном прозвучивании, на таких объектах невозможно. Поэтому на протяжении многих лет в разных странах проводятся исследования с целью применения эхо-метода для ультразвуковой дефектоскопии бетонных конструкций и сооружений [3].

Повысить разрешающую способность аппаратуры позволил метод САФТ, на основе которого разрабатываются теперь, практически, все приборы и системы для эхо-импульсной дефектоскопии бетона [2, 4]. Апертуру набирают обычно из нескольких прямых контактных ультразвуковых преобразователей с рабочей поверхностью порядка длины волны. Их механически соединяют между собой в блок (антенную решётку), который последовательно переставляют по поверхности исследуемой конструкции, записывая в память компьютера эхо-сигналы от всех преобразователей решётки. Обрабатывая полученный массив данных от нескольких соседних положений антенной решётки, синтезируют большую апертуру [4].

Модифицированный метод САФТ с комбинационным зондированием объекта контроля (САФТ-К) [1] позволил существенно увеличить и чувствительность эхо-импульсных систем, по сравнению с классическим дефектоскопом и простым методом САФТ. Сущность САФТ-К в том, что каждый ультразвуковой преобразователь синтезируемой апертуры принимает из объекта контроля акустические колебания, вызванные не только посылкой зондирующего импульса самим преобразователем (как при обычном методе САФТ), но и поочерёдно от всех остальных преобразователей апертуры. То есть апертура синтезируется всеми возможными парными комбинациями преобразователей (излучатель - приёмник). Практически для этого используется матричная решётка ультразвуковых преобразователей, так как комбинационно сканировать поверхность объекта контроля парой преобразователей очень неудобно и долго.

В последние годы развитие эхо-метода для дефектоскопии бетона шло по пути совершенствования алгоритмов обработки ультразвуковых сигналов. Способ же излучения и приёма этих сигналов: с помощью апертурных преобразователей продольных волн с жидкостным контактом, оставался неизменным [3, 4]. В то же время, надёжную акустическую связь ультразвукового преобразователя с твёрдым телом можно обеспечить и без жидкой промежуточной среды, если площадь контакта сделать много меньше длины волны. Такие конструктивные решения известны. В них ультразвуковые колебания рабочей поверхности обычного низкочастотного пьезопреобразователя передаются к объекту контроля с помощью концентратора, плавно сужающегося в точку акустического контакта. Общий недостаток таких концентраторов в том, что они, являясь резонансными элементами, существенно искажают и затягивают передаваемый сигнал. Поэтому такой способ акустического контакта нашёл пока достаточно ограниченное применение, главным образом в приборах для измерения времени прохождения ультразвуковых сигналов через материал.

Основываясь на этих принципах, разработаны ультразвуковые преобразователи с сухим точечным контактом, генерирующие на поверхности твёрдого тела нормальную или касательную к ней колебательную силу [6]. Эти преобразователи можно использовать не только как элементы антенных решёток, но и как выносные преобразователи для контроля бетона, композитов и пластмасс (рисунок 1). Протекторы преобразователей выполнены из титана. Точкой их акустического контакта с объектом контроля служит вершина конуса или выпуклая поверхность керамической вставки, стойкой к абразивному износу.

При точечном акустическом контакте ультразвукового преобразователя с поверхностью твёрдого полупространства при любом направлении смещений точки контакта (нормальном или касательном к поверхности) в объём полупространства и вдоль его поверхности излучаются все основные типы объёмных и поверхностных акустических волн. Ориентация вектора смещений точки контакта влияет на преимущественные направления излучения этих волн. Это относится и к режиму приёма. Поэтому преобразователи с точечным контактом можно называть преобразователями продольных или поперечных волн лишь условно, подразумевая под этими названиями то, что они способны излучать (и принимать) по нормали к поверхности полупространства, соответственно, продольные или поперечные ультразвуковые волны. Более точно их следует называть преобразователями с продольными или поперечными колебаниями протектора или, что, то же самое, точки акустического контакта. При продольных колебаниях протектора в объём полупространства излучаются продольные волны с максимумом излучения в направлении продольной оси преобразователя, при поперечных колебаниях - поперечные волны в том же направлении.

Рисунок 1 - Ультразвуковые низкочастотные преобразователи с сухим точечным контактом

В результате созданы простые в эксплуатации приборы для эхо-импульсной дефектоскопии железобетонных конструкций. Они работают на поперечных ультразуковых волнах, излучение и приём которых выполняется с помощью матричных решёток преобразователей с сухим точечным контактом.

Устройство и результаты применения одного из этих приборов - ультразвукового томографа А1230 - изложены в [8, 10]. Он был разработан в 1994 году. А1230 представляет собой электронный блок с 36-элементной (6г6) антенной решёткой, подключённый к персональному компьютеру. При ручном сканировании антенным блоком поверхности исследуемого объекта синтезируется УЗ апертура размером до 1 метра в направлении сканирования. Это позволяет визуализировать внутреннюю структуру бетонной конструкции на такую же глубину. Чувствительность А1230 достаточна для обнаружения в бетонах марки 400 с наибольшей крупностью заполнителя 20 мм пустот объёмом порядка 30 см3 на глубинах до 300 мм или протяжённых пустотных дефектов диаметром 15 - 20 мм на глубинах до 500 мм.

Пример изображения с экрана А1230 приведён на рисунке 2. Это томограмма типа В получена при обследовании фундамента здания, построенного методом скользящей опалубки. Она иллюстрирует характерный вид образов плоских отражателей: полки стальной двутавровой балки и донной поверхности бетонного массива. Балка замоноличена в бетон так, что плоскость её полки параллельна внешней поверхности бетона и находится на глубине Z около 230 - 240 мм. Толщина бетона фундамента 450 мм. Сканирование фундамента

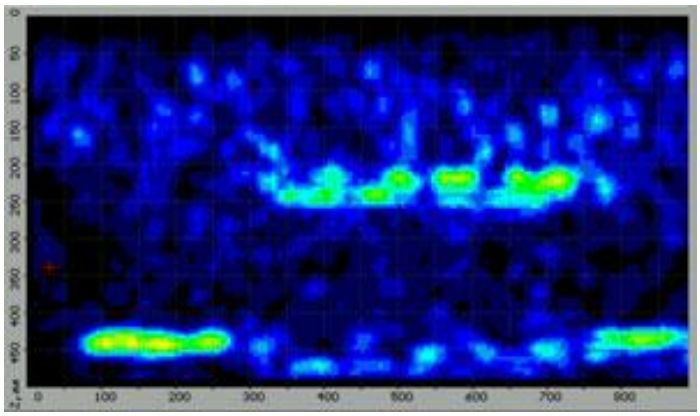

Рисунок 2 - Томограмма типа В фундамента здания с замоноличенной балкой. Получена с помощью томографа А1230.

антенным блоком было выполнено перпендикулярно продольной оси балки. На томограмме (рис. 6) образ балки в виде прерывистой широкой полосы, располагается в интервале от 300 до 750 мм по горизонтальной оси X. Поскольку балка затеняет собой донную поверхность бетона, образ донной поверхности виден лишь в левой и правой нижних частях томограммы в интервале 70 - 270 и 760 - 900 мм по оси X. Под образом балки на удвоенной глубине можно различить более слабое второе отражение от балки.

Другой прибор - ультразвуковой дефектоскоп А1220 - разработан в 1998 году. Его внешний вид приведён на рис. 7. А1220 состоит из антенного устройства с решёткой из 24 (4г6) ультразвуковых преобразователей с сухим точечным контактом и электронного блока с графическим экраном. Кроме того, к прибору можно подключать выносные ультразвуковые преобразователи с сухим точечным контактом для сквозного и поверхностного прозвучивания бетонных изделий продольными и поперечными ультразвуковыми волнами.

Контроль конструкций эхо-методом выполняют путём сканирования поверхности объекта антенным устройством вдоль прямой. На встроенном экране возможны 2 варианта представления информации:

- А-развёртка эхо-сигналов при каждом положении антенного устройства;
- В-развёртка сигналов, превышающих некоторый выбранный уровень.

Анализ записанных данных возможен на компьютере, связанном с прибором инфракрасным каналом. Компьютер отображает данные в виде полутоновых томограмм и в виде трёхмерного изображения структуры объекта контроля.

Минимальные диаметры дефектов, обнаруживаемых дефектоскопом А1220 в бетоне марки 400 с отношением сигнал/шум более 6 дБ, равны:

- 50 мм до глубины 400 мм, если дефект протяжённый;
- 80 мм до глубины 250 мм, если дефект сосредоточенный.

Перспективными представляются следующие усовершенствования аппаратуры, визуализирующей внутреннюю структуру бетона:

- изменение фокусировки апертуры на разные типы дефектов: точечные, объёмные, плоские, протяжённые и т. д.;
- возможность обнаружения дефектов минимальные диаметры которых достигают 10 мм;
- усовершенствование программного обеспечения и аппаратного исполнения для увеличения производительности;

Литература:

1. А. В. Ковалёв, В. Н. Козлов, А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин, Н. Н. Яковлев, "Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция", Дефектоскопия, № 2, 1990, с. 29 - 41.

2. M. Schickert, "Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of concrete", International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), September 26 - 28, 1995, pp. 411 - 418.

3. P. A. Gaydecki, F. M. Burdekin, "Nondestructive Testing of Reinforced and Pre-stressed Concrete Structures", Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 14, 1998, pp. 339 - 392.

4. M. Krause, F. Mielentz, B. Milman, H. Wiggenhauser, W. Muller, V. Schmitz, "Ultrasonic imaging of concrete members using an array system", Insight, Vol. 42, No. 7, 2000, pp. 447 - 450.

5. A.V. Kovalev, A.A. Samokrutov, V.G. Shevaldykin, V.N. Kozlov, I.Yu. Pushkina, S. Hubbard, "Instruments and Means for Reinforced Concrete Structures Inspection", 15th World Conference on Nondestructive Testing, Roma (Italy) 15-21 October, 2000.

6. В. Н. Козлов, А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин, "Ультразвуковой низкочастотный преобразователь", Патент РФ № 2082163, Бюлл., изобр., № 17, 1997.

7. В. Г. Шевалдыкин, А. А. Самокрутов, В. Н. Козлов, "Поперечные ультразвуковые волны в эхо-импульсной дефектоскопии опор трубопроводов", 3-я Международная кон-

ференция Диагностика трубопроводов, Москва, 21 - 26 мая 2001 г. Тезисы докладов. М.: 2001. С. 182.