

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФ БЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С БОКОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СИГНАЛА

© 2020 г. В.К. Качанов^{1*}, В.Г. Карташев^{1,**}, И.В. Соколов^{1,***}, Р.В. Концов¹, Э.И. Трунов¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

E-mail: *kachanovv@mail.ru; **KartashevVG@mpei.ru; ***sokoloff_igor@mail.ru

Поступила в редакцию 03.12.2019; после доработки 13.12.2019

Принята к публикации 23.12.2019

Рассматриваются проблемы ультразвуковой томографии бетонных строительных конструкций (СК), в которых дефекты расположены под большим углом к антенной решетке (АР). При наклонном зондировании таких СК из сложноструктурного бетона возрастает влияние структурного шума (СШ) из-за эффекта отрицательной взаимной корреляции сигналов СШ на соседних преобразователях АР. Показано, что при наклонном зондировании оптимальный шаг антенной решетки, обеспечивающий максимальное соотношение сигнал/структурный шум, должен составлять $(0,35—0,4)\lambda$. Показано, что при томографии внутреннего угла соединения двух стен для более эффективного выделения полезных сигналов из СШ, а также для повышения угловой разрешающей способности, целесообразно использовать или две отдельные антенные решетки, предназначенные для наклонного зондирования СК и расположенные на разных сторонах углового стенового соединения, или единую АР, состоящую из двух линейных АР, объединенных в одну антенну.

Ключевые слова: ультразвуковая томография, строительные конструкции из бетона, наклонное зондирование, шаг антенной решетки, отрицательная взаимная корреляция сигналов структурного шума.

DOI: 10.31857/S0130308220020025

ПРОБЛЕМЫ УЗ КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НЕСТАНДАРТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

Большинство строительных конструкций из бетона представляют собой плоскопараллельные изделия (стены, перекрытия, фундаменты зданий и др.). Ультразвуковой (УЗ) неразрушающий контроль таких изделий осуществляется с помощью низкочастотных (НЧ) томографов [1—4], у которых антенные решетки имеют плоскую конфигурацию. Алгоритмы обработки сигналов в УЗ НЧ томографах построены таким образом (рис. 1), что контролируется только область 1, расположенная непосредственно под антенной решеткой, а области 2, расположенные сбоку от АР, не контролируются. Вместе с тем существуют СК, в которых дефекты расположены под углом больше 45° к АР и которые не удается выявлять с помощью томографов с ограниченным углом обзора.

На рис. 2 показаны примеры таких изделий: контроль соединения двух стен (а) или контроль изделий, у которых выступ мешает расположить АР над предполагаемым дефектом (б). Очевидно, что для контроля таких СК следует разрабатывать АР с большим углом наклона УЗ луча, что требует решения целого комплекса проблем и специальных исследований.

Одной из проблем, ограничивающей чувствительность контроля изделий из сложноструктурного бетона, является проблема структурного шума. При наклонном зондировании эта проблема становится особенно острой по двум причинам.

Во-первых, зона объекта, расположенная сбоку от АР под углом θ к антенне, более удалена от элементов АР по сравнению с зоной, расположенной напротив антенной решетки (рис. 3). Вследствие значительного затухания УЗ волн в бетоне сигналы, отраженные от дефекта D_2 , находящегося сбоку от АР, ослабляются сильнее, чем эхосигналы от дефекта D_1 , приходящегося под АР, что

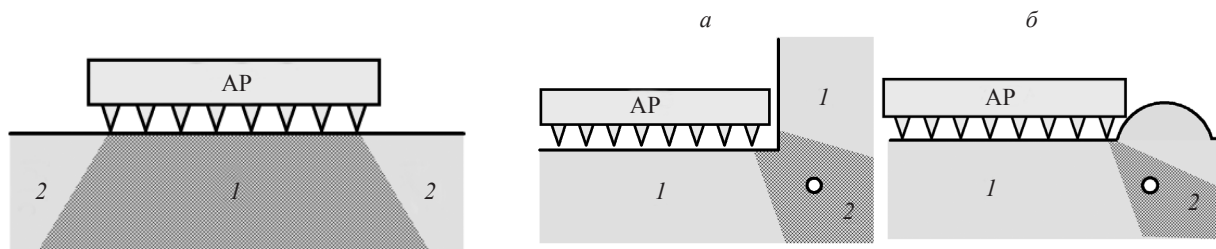


Рис. 1. УЗ контроль СК с плоской поверхностью.

Рис. 2. УЗ контроль СК, имеющих форму типа «внутренний угол» на стыке двух стен (а) и «выступ на стен» (б).

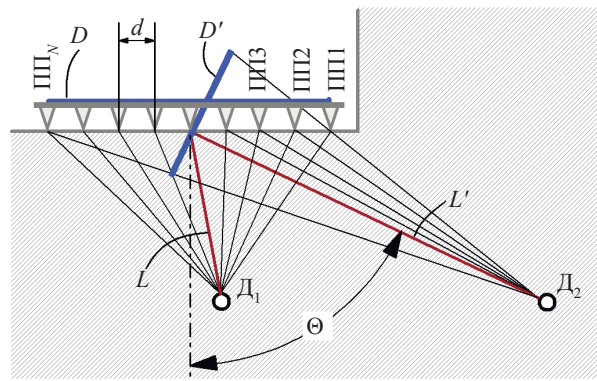


Рис. 3. Проблемы поиска дефектов, расположенных под большим углом к АР.

усложняет задачу выделения сигналов из СШ. Во-вторых, для того, чтобы можно было «увидеть» дефект D_2 при наклонном зондировании, необходимо использовать преобразователи с очень широкой диаграммой направленности (ДН). Этому требованию удовлетворяют УЗ широкополосные ПЭП с сухим точечным контактом (СТК), работающие на поперечных типах волн с центральной частотой 50 кГц, имеющие практически всенаправленную ДН [5]. Однако на такие приемные преобразователи с широкой ДН поступают эхосигналы, отраженные практически от всех окружающих АР неоднородностей, вследствие чего увеличивается амплитуда структурной помехи. Эти два обстоятельства усложняют проблему выделения слабых сигналов из СШ при УЗ контроле бетонных конструкций в зоне, находящейся сбоку от АР. Очевидно, что в этой ситуации вначале следует обеспечить выделение полезного сигнала из СШ, только после этого возможно решать проблему обнаружения дефектов изделия.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРНОГО ШУМА ПРИ НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ОБЪЕКТА

Наиболее эффективные алгоритмы выделения информационных сигналов на фоне СШ основаны на использовании пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС) [6—9]. Для построения оптимального алгоритма ПВОС необходимо знать корреляционные характеристики СШ: взаимно корреляционные функции (ВКФ) реализаций СШ на соседних приемных преобразователях. Эти характеристики были использованы нами при разработке алгоритмов ПВОС для УЗ контроля зоны объекта, расположенной напротив АР [8]. Однако, как показали последующие исследования [10], при наклонном зондировании корреляционные характеристики СШ отличаются от тех, что наблюдаются при зондировании объекта напротив АР, и это обстоятельство требует детального рассмотрения.

Корреляционная теория структурного шума наиболее подробно изложена в [6—8]. В монографии [8] описана методика определения взаимно корреляционной функции структурного шума, который формируется в среде, где структурные неоднородности распределены в пространстве по случайному равномерному закону. Как показали исследования, такая модель распределения неоднородностей удовлетворительно описывает процесс формирования СШ в бетоне. Согласно этой методике, для определения ВКФ нужно сначала найти плотность вероятности $p(\Delta t)$ разности задержек сигналов, отраженных от неоднородностей и приходящих на соседние приемные преобразователи. Плотность вероятности $p(\Delta t)$ определяется видом диаграммы направленности пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) $F(\varphi, \theta)$, а также зависит от расстояния d между соседними ПЭП. Затем вычисляется характеристическая функция $\Theta(u)$ как преобразование Фурье от плотности вероятности $p(\Delta t)$. Аргументом характеристической функции $\Theta(u)$ является безразмерная переменная u , пропорциональная частоте ω и расстоянию между преобразователями d : $u = \frac{2\pi d}{\lambda} = \frac{\omega d}{C}$, где C — фазовая скорость УЗ волны в среде. Характеристическая функция определяет степень взаимной корреляции реализаций СШ на конкретной частоте. Если зондирующий сигнал узкополосный, то значения характеристической функции соответствуют значениям коэффициента взаимной корреляции реализаций СШ на частоте зондирующего сигнала.

Характеристическая функция $\Theta(u)$, как и плотность вероятности $p(\Delta t)$, зависит от ДН ПЭП. На рис. 4а представлена характеристическая функция для низкочастотных широкополосных ПЭП поперечных волн с СТК, имеющих широкую (круговую) ДН, а на рис. 4б — характеристическая функция СШ при использовании ПЭП продольных волн с апертурой диаметром 2λ , имеющих узкую ДН. С помощью графиков, представленных на рис. 4, определяется зависимость характеристической функции (определяющей ВКФ реализаций СШ на соседних преобразователях) от аргумента u (от шага d): при небольших значениях аргумента u (при малом расстоянии d) характеристическая функция $\Theta(u)$ принимает большие положительные значения, что соответствует сильной взаимной корреляции реализаций СШ; при увеличении переменной u (при увеличении расстояния d) характеристическая функция убывает и уменьшается ВКФ реализаций СШ.

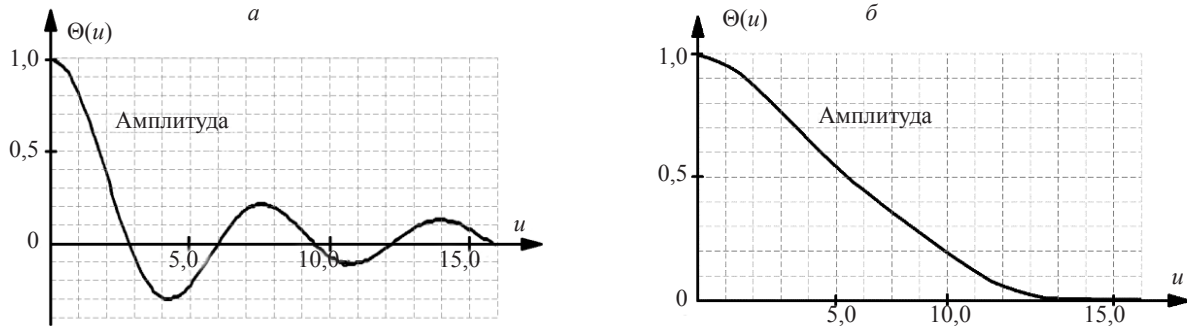


Рис. 4. Характеристические функции СШ: а — при использовании ПЭП поперечных акустических волн с широкой ДН; б — при использовании ПЭП продольных акустических волн с узкой ДН.

Если ДН ПЭП широкая, то характеристическая функция при некоторых значениях аргумента u принимает отрицательные значения (см. рис. 4а), что соответствует отрицательной взаимной корреляции (ОВК) реализаций СШ на соседних приемных преобразователях. Отрицательная взаимная корреляция означает, что при сложении двух случайных процессов суммарная дисперсия оказывается меньше суммы дисперсий этих процессов. Физический смысл ОВК реализаций СШ можно объяснить следующим образом. В случае широкой ДН в поле зрения ПЭП оказываются практически все неоднородности: как находящиеся напротив ПЭП, так и расположенные сбоку от них. Сигналы, отраженные от неоднородностей, расположенных напротив преобразователей, приходят на них с почти одинаковыми задержками и поэтому суммируются почти синфазно. Сигналы, отраженные от неоднородностей, расположенных сбоку от преобразователей, приходят на них с задержками, которые различаются существенно. Если разность хода составляет половину длины волны, то такие сигналы оказываются в противофазе и при сложении взаимно компенсируются. Если число противофазных сложений сигналов превышает число синфазных сложений, происходит заметное снижение суммарного уровня СШ, что можно интерпретировать как отрицательную взаимную корреляцию.

Если преобразователи имеют узкую ДН, которая не охватывает неоднородности, расположенные сбоку от преобразователей, то число противофазных сигналов незначительно и поэтому ОВК не наблюдается. Этой ситуации соответствует характеристическая функция, представленная на рис. 4б, которая не принимает отрицательных значений ни при каких значениях аргумента u (ни при каких значениях шага AP).

Если зондирующий сигнал широкополосный, то для определения ВКФ нужно сначала найти взаимный энергетический спектр реализаций СШ как произведение собственного энергетического спектра СШ $W_0(\omega)$ и характеристической функции $\Theta(\omega)$, а затем, применяя обратное преобразование Фурье к взаимному энергетическому спектру, найти искомую ВКФ реализаций СШ на соседних приемных преобразователях:

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} W_0(\omega) \cdot \Theta\left(\frac{\omega d}{N}\right) \cos(\omega\tau) d\omega. \quad (1)$$

Поскольку энергетический спектр СШ имеет конечную ширину, соответствующая ему ВКФ является знакопеременной функцией.

На рис. 5 показаны два варианта ВКФ реализаций СШ на соседних преобразователях поперечных акустических волн с сухим точечным контактом. В качестве зондирующего сигнала использо-

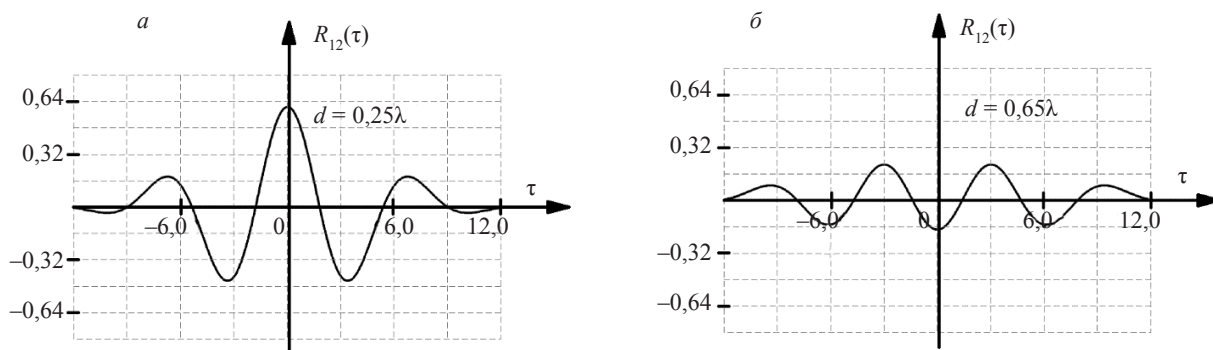


Рис. 5. ВКФ СШ при зондировании поперечными волнами и расстоянии между преобразователями: *a* — $0,25\lambda$; *б* — $0,65\lambda$.

вался короткий радиоимпульс в виде одного периода синусоиды. На рис. 5*a* показан вид ВКФ, нормированной на величину дисперсии СШ, при расстоянии между преобразователями $0,25\lambda$. Эта ВКФ при $\tau = 0$ принимает максимальное положительное значение, что означает положительную взаимную корреляцию реализаций СШ на соседних приемных преобразователях. ВКФ на рис. 5*б* построена для случая, когда расстояние между преобразователями $d = 0,65\lambda$. В отличие от предыдущего случая, эта ВКФ при $\tau = 0$ принимает отрицательное значение, что свидетельствует о наличии ОВК реализаций СШ при данном расстоянии между приемными преобразователями. Отрицательная взаимная корреляция реализаций СШ является желательным явлением, так как приводит к снижению уровня СШ и облегчает решение проблемы выделения полезного сигнала.

ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/СШ ПРИ НАКЛОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ СИГНАЛА. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ШАГА АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

При построении изображения внутренней структуры объекта принимаемые сигналы фокусируются последовательно в различные точки изделия. Чтобы обеспечить синхронное сложение сигналов, отраженных от точки фокусировки, для каждого сигнала вводится дополнительная задержка, которая определяется длиной пути от точки фокусировки до конкретного приемного ПЭП. Такие же задержки приобретают и реализации СШ, поступающие на соответствующие ПЭП. При обработке сигналов принимаемые сигналы суммируются, вместе с ними суммируются и реализации СШ. В соответствии с правилами теории вероятностей суммарная дисперсия СШ определяется выражением:

$$\sigma_{\text{сум}}^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R_{ij}(\Delta t_{ij}), \text{ причем } i \neq j. \quad (2)$$

Здесь N — количество приемных преобразователей; σ_i^2 — дисперсия СШ на i -м преобразователе; $R_{ij}(\Delta t_{ij})$ — ВКФ реализаций СШ на i -м и j -м преобразователях; Δt_{ij} — разность задержек сигналов, снимаемых с i -го и j -го преобразователей.

При наклонном зондировании объекта (когда точка фокусировки находится сбоку от АР, как это показано на рис. 3) разность хода сигналов может быть значительной, достигая иногда половины длины волны, а для удаленных преобразователей — еще больше. При этом характер взаимной корреляции реализаций СШ существенно изменяется.

Рассмотрим это явление на примере рис. 5*a*, где представлена ВКФ реализаций СШ при расстоянии между преобразователями $d = 0,25\lambda$. При угле наклона луча θ , близком к 90° , разность хода сигналов будет около $0,25\lambda$. Это соответствует разности задержек сигналов, равной четверти периода зондирующего сигнала. Соответственно, и аргумент ВКФ на рис. 5*a* тоже будет приблизительно равен четверти периода колебаний. При таком значении аргумента ВКФ оказывается приблизительно равной нулю, а это означает, что реализации СШ не коррелированы.

При расстоянии между преобразователями, равном $0,65\lambda$ (см. график ВКФ на рис. 5*б*), и угле наклона луча $\theta = 50^\circ$ разность хода сигналов будет равна половине длины волны, что соответствует аргументу ВКФ, равному половине периода колебаний. Как следует из графика ВКФ на рис. 5*б*, характер взаимной корреляции меняется на противоположный: отрицательная взаимная корреляция сменяется на положительную.

Изменение характера взаимной корреляции реализаций СШ из-за разности задержек сигналов, снимаемых с соседних преобразователей, приводит, в частности, к тому, что оптимальный шаг АР (расстояние между соседними преобразователями) зависит от направления зондирования. Влияние точки фокусировки сигналов на выбор шага АР было исследовано в [10]. Там было показано, что, если исходить из критерия достижения максимума отношения сигнал/СШ, то оптимальный шаг АР при наклонном зондировании должен быть около $0,4\lambda$, а при зондировании объекта, расположенного напротив АР, шаг АР должен составлять $(0,5—0,55)\lambda$.

Ниже приведены результаты дальнейших исследований по определению оптимального шага АР при наклонном зондировании изделий из сложноструктурного бетона.

Анализ проводился в предположении, что в качестве зондирующего сигнала используется короткий радиоимпульс в виде одного периода синусоиды, а ПЭП имеют полосу пропускания 100 %. В результате исследования было установлено, что характер зависимости отношения сигнал/СШ от шага АР и величина оптимального шага АР в сильной степени зависят от места предполагаемого расположения дефекта. Некоторые результаты исследования представлены на рис. 6б, где показаны графики зависимости отношения сигнал/СШ $Q(d/\lambda)$ от шага АР для двух противоположных ситуаций. График 1 соответствует дефекту D_1 , расположенному почти напротив крайнего элемента АР (рис. 6а). Максимальное значение отношения сигнал/СШ наблюдается здесь при шаге АР $d = (0,35—0,4)\lambda$, причем максимум очень пологий. График 2 соответствует дефекту D_2 , направление на который образует с нормалью к поверхности АР угол $\theta = 80^\circ$. При таком наклонном зондировании оптимальный шаг АР оказывается очень маленьким, всего лишь около $0,2\lambda$, причем из-за влияния отрицательной взаимной корреляции максимальное значение отношения сигнал/СШ оказывается в 1,5 раза больше отношения сигнал/СШ, которое получается при сложении некоррелированных реализаций СШ. При других, промежуточных положениях дефекта оптимальный шаг АР принимает промежуточные значения между $d = 0,2\lambda$ и $d = 0,4\lambda$.

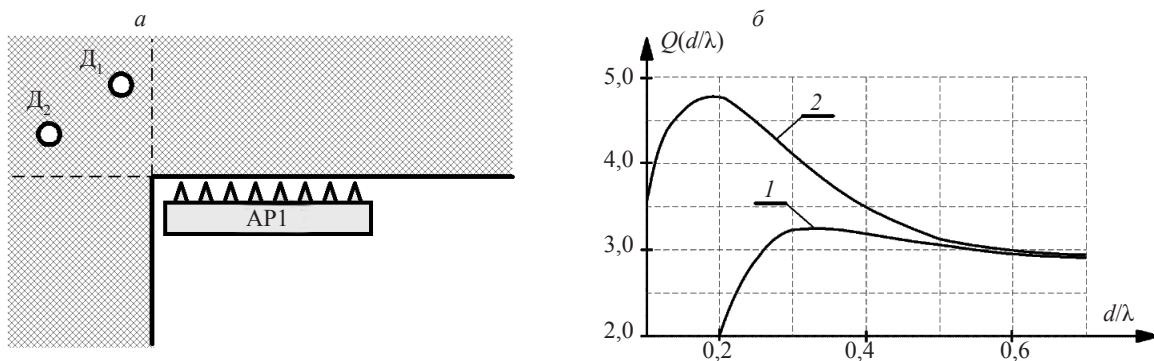


Рис. 6. Схема расположения дефектов в угловой зоне (а); графики зависимости отношения сигнал/СШ от отношения d/λ (б): 1 — для дефекта D_1 , 2 — для дефекта D_2 .

Следует заметить, что при использовании преобразователей с СТК оптимальный шаг АР не совпадает с радиусом корреляции СШ. Обычно под радиусом корреляции СШ понимают такое расстояние между преобразователями, при котором значение ВКФ реализаций СШ уменьшается в 10 раз по сравнению с максимальным значением [6]. О значениях ВКФ можно судить по характеристической функции. Для преобразователей с СТК характеристическая функция убывает в 10 раз при значении аргумента $u = \frac{2\pi d}{\lambda} = 14,35$ (см. рис. 4а). Это соответствует радиусу корреляции СШ $r_k = 2,284\lambda$, что в несколько раз больше оптимального шага АР. Это объясняется влиянием отрицательной взаимной корреляции реализаций СШ при небольших расстояниях между преобразователями, которая приводит к снижению уровня СШ. При использовании преобразователей с узкой ДН (для преобразователей продольных волн с апертурой более одной длины волны) ОВК не возникает (см. рис. 4б) и оптимальный шаг АР практически равен радиусу корреляции СШ [10].

ВЫБОР ШАГА АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕТОНА С НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СВОЙСТВ

Особенностью СК из бетона является неравномерное распределение свойств по объему изделия, в результате чего даже в одном изделии возможен существенный разброс скоростей ультразвуковых волн. В изделиях из бетона различных марок скорость поперечных УЗ волн может раз-

личаться от 1500 до 2500 м/с. Соответственно в такой же степени различается и длина УЗ волны. Вместе с тем в большинстве УЗ томографов антенные решетки имеют постоянный шаг, и если шаг АР является оптимальным при какой-то одной скорости УЗ волны, он будет неоптимальным при другой скорости УЗ волны. Поэтому возникает вопрос — в каком диапазоне скоростей УЗ волн может работать конкретная АР при условии, что во всем рабочем диапазоне должно обеспечиваться высокое отношение сигнал/СШ. Для решения этой проблемы воспользуемся результатами исследования, описанного в предыдущем разделе. Как следует из графиков на рис. 6б, достаточно высокое отношение сигнал/СШ при любом положении точки зондирования сбоку от АР обеспечивается в диапазоне значений шага АР от $0,3\lambda$ до $0,6\lambda$. Полученный результат означает, если руководствоваться критерием максимума отношения сигнал/СШ, то конкретная АР с фиксированным расстоянием между преобразователями (шагом АР) d может использоваться при наклонном зондировании бетонных СК, в которых скорость УЗ волн такова, что длина волны лежит в пределах от $\lambda = 1,67d$ до $\lambda = 3,33d$.

ВЛИЯНИЕ УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ПО УГЛУ

Еще одна особенность УЗ томографии при наклонном зондировании СК из сложноструктурного бетона состоит в том, что разрешающая способность по углу сильно зависит от угла зондирования

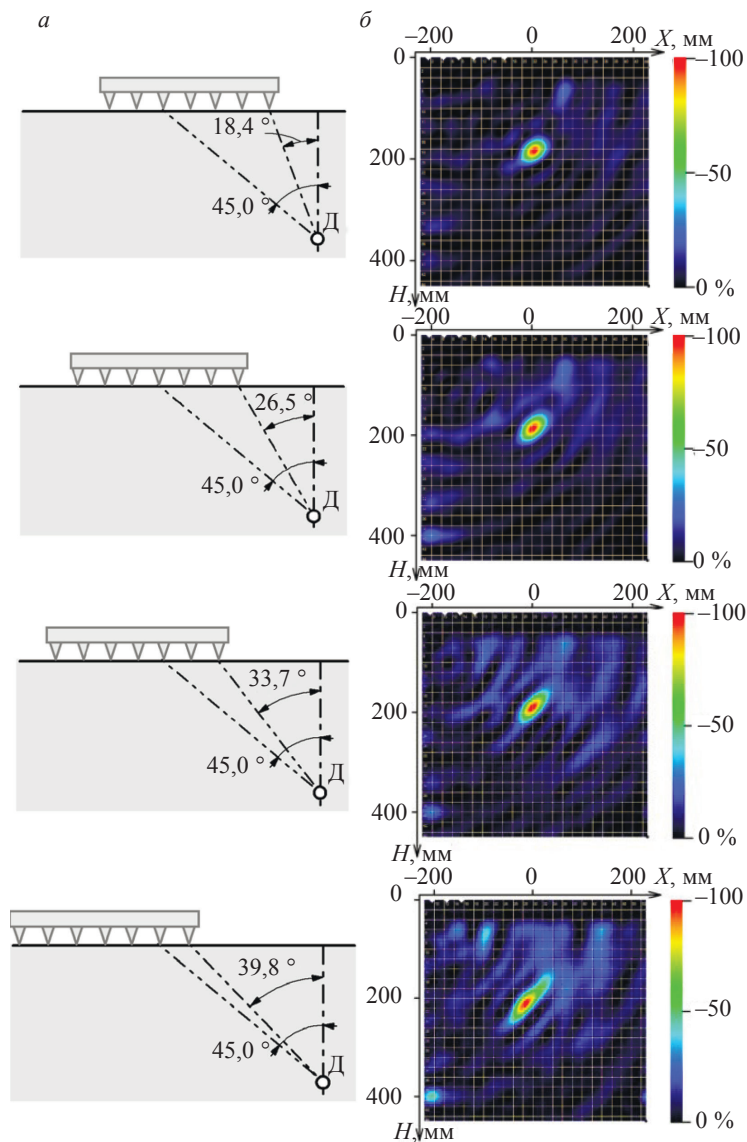


Рис. 7. Положение АР относительно дефекта (а) и томограмма изделия с дефектом (б), расположенным под углом к АР.

ния. Это объясняется тем, что при увеличении угла наклона θ уменьшается эквивалентный размер апертуры антенны ($D' < D$), что приводит к ухудшению разрешающей способности по углу (см. рис. 3). В то же время разрешающая способность по дальности остается высокой, так как она определяется точностью измерения временной задержки сигналов. Эффект ухудшения разрешающей способности по углу поясняется на рис. 7, где показана линейная УЗ АР, созданная для обнаружения расположенного под углом к АР дефекта (отверстия диаметром 50 мм). Шаг АР, в соответствии с рекомендациями, сделанными в [9], был уменьшен до величины $d \approx 0,4\lambda = 25$ мм.

Из томограмм на рис. 7б видно, что с помощью АР удается уверенно обнаруживать дефект, расположенный на глубине $h = 200$ мм и находящийся под углом к антенне $\theta \leq 40^\circ$. Однако при последующем увеличении угла зондирования θ изображение дефекта искажается — становится все более удлинненным. При расположении АР с другой стороны дефекта на томограмме он также деформируется, но при этом дефект получает наклон в противоположную сторону. Очевидно, что для улучшения качества изображения дефекта, расположенного под выступом на СК, следует использовать две антенны, расположенные симметрично по обеим сторонам выступа.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ УГЛОВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ ТОМОГРАФИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТИПА «ВНУТРЕННИЙ УГОЛ»

Для обнаружения дефекта СК, расположенного в области вблизи ребра двугранного угла, образованного плоскостями стен, нами было предложено использовать две АР на каждой из сторон двугранного угла (рис. 8). Совместная работа двух АР, расположенных в области ребра двугранного угла и совместная обработка эхосигналов позволили обеспечить высокую угловую разрешающую способность, а также позволили более эффективно выделять полезные сигналы из СШ.

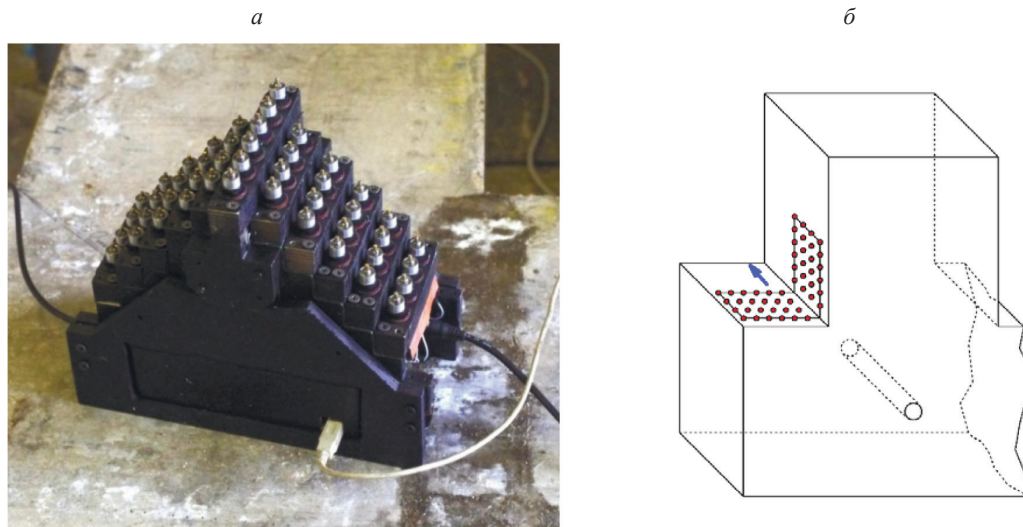


Рис. 8. Зондирование СК типа «внутренний угол» с помощью угловой АР (а): схема расположения угловой АР внутри угловой СК (б).

На следующем этапе исследований для контроля СК типа «двугранный угол» была разработана УЗ АР, состоящая из двух линейных антенн, расположенных под углом $\theta = 90^\circ$ друг к другу (рис. 8а). На рис. 8б показана схема расположения угловой АР в области угла СК. Разработанная угловая АР позволяет работать в нескольких режимах. На рис. 9а, б режим, при котором каждая «половинка» (АР1 и АР2) излучает и принимает сигналы. Так как излучение происходит под углом больше 45° , то на томограммах отметка дефекта (дефект — цилиндрическое отверстие диаметром 50 мм, расположенное вблизи ребра двугранного угла на расстоянии 200 мм от каждой из стен), не регистрируется.

Несколько лучший результат дает схема контроля, при которой излучает одна «половинка» (АР1), а принимает АР2 (рис. 9в). На рис. 9г показаны результаты томографии СК типа «внутренний угол» в режиме, при котором излучают и принимают эхосигналы обе «половинки» угловой

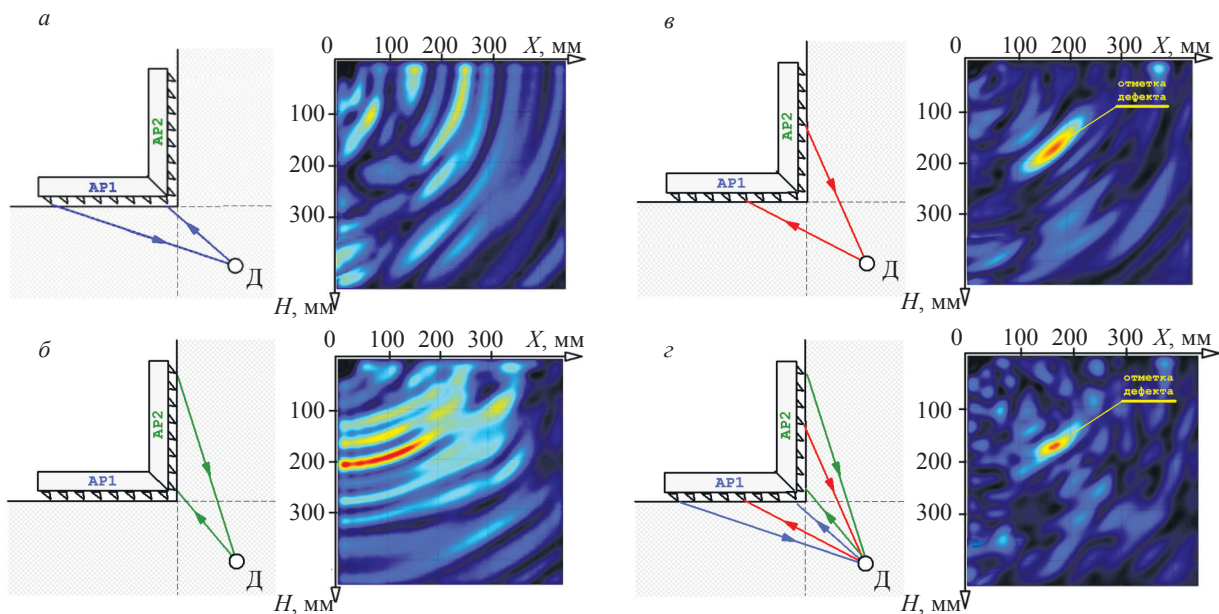


Рис. 9. Варианты работы угловой AP:

а, б — каждая «половинка» AP излучает и принимает сигнал; *в* — одна «половинка» AP излучает, а вторая — принимает сигнал; *з* — обе половинки AP излучают и принимают сигналы от дефекта.

антенны. Очевидно, что в этом случае производится своеобразная ПВОС, при которой дефект «рассматривается» с двух пространственно независимых положений.

В результате одновременного использования двух «половинок» угловой AP, каждая из которых создана для наклонного зондирования СК, повышается достоверность обнаружения дефекта, расположенного внутри стеновой конструкции типа «внутренний угол» и недоступного для обнаружения традиционными УЗ томографами с линейными антенными решетками.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что для УЗ томографии бетонных стеновых конструкций с наклонным излучением сигнала следует использовать антенные решетки, состоящие из низкочастотных преобразователей поперечных акустических волн с сухим точечным контактом. При этом шаг AP должен быть меньше обычно используемого и должен составлять $(0,35—0,4)\lambda$.

Для более эффективного выделения полезных сигналов, а также для повышения угловой разрешающей способности при контроле углового соединения двух стеновых конструкций, а также при контроле изделий, у которых выступ мешает расположить AP над предполагаемым дефектом, целесообразно использовать две отдельные AP, предназначенные для наклонного зондирования СК.

Для контроля углового соединения стен «изнутри угла» предлагается использовать единую антенну, состоящую из двух линейных AP, предназначенных для наклонного зондирования СК, объединенных в одну антенную решетку.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90223.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shevaldykin V.G., Kozlov V.N., Samokrutov A.A. «Inspection of Concrete by Ultrasonic Pulse-Echo Tomograph with Dry Contact» / 7th European conference on Non-Destructive Testing, Copengagen, 26—29 May. 1998.
2. Schickert M. Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of concrete / International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) September 26 28, 1995. P. 411—418.
3. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковой низкочастотный преобразователь. Патент РФ № 2082163 // Бюлл. изобр. 1997. № 17.
4. Карташев В.Г., Качанов В.К. Оптимальное выделение сигналов на фоне структурного шума в ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1992. № 7. С. 14—24.

5. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Туркин М.В. Проблемы выделения ультразвуковых сигналов из структурного шума при контроле изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2007. № 9. С. 71—86.

7. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Шалимова Е.В. Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 186 с.

8. Kartashev V.G., Kachanov V.K., Sokolov I.V. et al. Pattern-Noise in Ultrasonic Inspection of Articles Made of Complexly Structured Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 1. P. 17—30. [Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Концов Р.В. Структурный шум при ультразвуковом контроле изделий из материалов со сложной структурой // Дефектоскопия. 2018. № 1. С.19—32.]

9. Kartashev V.G., Kachanov V.K., Sokolov I.V. et al. Choosing Phased Array Pitch in Ultrasonic Tomography of Materials with Inhomogeneous Structure // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 1. P. 17—30. [Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Фадин А.С. Выбор шага антенной решетки при ультразвуковой томографии материалов с неоднородной структурой // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 3—11.]

10. Kartashev V.G., Kachanov V.K., Sokolov I.V. et al. Selecting the Pitch of a Double Crystal Transducer in Ultrasonic Testing of Products Made of Complex Structured Materials with a Nonplanar Surface // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 887—897. [Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Фадин А.С., Тимофеев Д.В. Выбор шага перемещения раздельно-совмещенного преобразователя при ультразвуковом контроле изделий из сложноструктурных материалов с неплоской поверхностью // Дефектоскопия. 2019. № 12. С.16—25.]