© Ю.Н. Бауков, Д.А. Нарышкин, А.А. Звонкина, 2007

УДК 534.246:658.5:535

Ю.Н. Бауков, Д.А. Нарышкин, А.А. Звонкина

О ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССАХ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СКРЫТЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРЕЩИН СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Семинар № 3

При решении целого ряда технических проблем в самых различных областях народного хозяйства приходится сталкиваться с необходимостью определения глубины вертикальных трещин или раскрывшихся швов в конструкциях разнообразного типа. В особенности данная задача является актуальной при неразрушающем контроле строительных железобетонных конструкций.

Как правило, глубина вертикальных трещин определяется с помощью ультразвукового метода путем измерения скорости продольных волн по методике симметричного (относительно трещины) поверхностного прозвучивания. При этом измеряется время распространения наикратчайшего звукового дифракционного луча, огибающего плоскость трещины (рис.1). В этом случае глубина вертикальной трещины h определяется следующим образом [1]:

$$h = \frac{L}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{t_{\text{тр}}}{t_0}\right)^2 - 1}\,, \qquad (1)$$

где L – расстояние между излучателем и приемником; $t_{\text{тр}}$ – время распространения p-волны в зоне трещины; t_0 – среднее время распространения p-волны на расстояние L в бетоне на участке, в котором трещина отсутствует.

Однако при таком подходе не учитывается ряд особенностей волновых явлений, что может привести к значительным ошибкам при оценке глубины исследуемой трещины. Это связанно с тем, что упомянутый наикротчайший звуковой луч, огибающий трещину, является одним из элементов дифракционного поля, возникающего в процессе дифракции падающей волны на нижнем краю трещины.

Даже в случае рассмотрения процесса дифракции акустических волн на краю трещины в рамках простейшей теории дифракции Кирхгофа поля рассеянных на краю трещины волн имеет весьма сложных характер. Так согласно дифракционного интеграла Рубиновича [2] волновое поле в зоне тени (в данной зоне располагается приемный преобразователь) при дифракции волны, создаваемой излучающим преобразователем, на краю плоского экрана имеет следующую структуру:

$$\varphi_{\text{диф}} = -\frac{1}{4\pi} \oint_L \frac{e^{-jk\rho_s}}{\rho_s} \cdot \frac{e^{-jkr_s}}{r_s} \cdot \frac{\cos\alpha}{1+\cos\varphi} \cdot \sin\beta \;\; ds =$$

$$= \frac{1}{4\pi} \oint_L \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot \frac{e^{-jk\rho_s}}{\rho_s} \cdot \sin\beta \cdot \Phi\left(\alpha,\ \varphi\right) \qquad (2)$$

где ρ_s – расстояние от точечного источника до элемента ds края экрана; r_s – расстояние от элемента ds края экрана до точки наблюдения; α – угол между направлением r_s и нормалью к элементу ds края экрана; φ – угол между направлением r_s и вектором $\vec{\rho}_s$; β – угол между вектором $\vec{\rho}_s$ и элементом ds; Φ(α, φ) –

диаграмма рассеяния падающей волны на элементе края экрана ds:

$$\Phi\left(\alpha,\ \varphi\right)=\frac{\cos\alpha}{1+\cos\varphi}, \qquad (3)$$

k – волновое число; L – длина контура экрана.

Из выражения (2) видно, что дифракционная составляющая в зоне тени состоит из сомножителя, определяющего ту часть излучения от источника, которая падает на элемент плоского экрана ds, и диаграммы рассеяния Ф(α, φ) этой части излучения элементом ds. Анализ дифрак-ционного поля показывает, что если длина дифрагирующего края больше, чем две длины волны, падающая волна дифрагирует только под определенными углами и дифракцион-ные (рассеянные) лучи образующиеся на элементе ds края экрана, составляют некий конус дифракции – так называемую краевую волну.

В результате процессов суперпозиции отдельных дифракционных конусов поле в зоне тени имеет сложную структуру с осциллирующим характе-ром изменения интенсивности как в направлении вдоль оси наблюдения, так и в перпендикулярном. Кроме того общая амплитуда рассеянных в направ-лении зоны тени дифракционных волн значительно меньше амплитуды прямых волн, распространяющихся в освещен-ной области пространства.

В связи с этим при проведении измерений величины h согласно указанной выше методики могут возникать следующие неблагоприятные условия, которые существенным образом способны повлиять на получение качественных результатов исследований. Во-первых, при произвольно выбранном расстоянии между преобразователями и проекцией трещины на плоскость наблюдения L/2 возможен случай попадания приемника в зону минимальных амплитуд дифракционной волны, вследствие чего возможен пропуск пер-вого вступления данной волны и допущения значительной погрешности при измерении величины ttp в выражении (1). Во-вторых, при измерении глубины трещины в железобетонных плитах или колоннах, толщина которых H соизмерима с глубиной трещины h, приемный преобразователь будет регистрировать также отраженную от второй границы данного объекта волну, которую при указанных выше обстоятельствах можно принять за дифракционную волну.

В-третьих, при заранее неизвестном порядке глубины трещины h большое значение имеет вопрос выбора частоты излучающего преобразователя f0, определяющей длину падающей на трещину волны λ. Так если λ будет соотноситься с h или превышать ее, то возможно сильное “засвечивание” зоны тени за трещиной и совершение серьезных ошибок при измерении h.

Кроме того, к условиям возможного применения рассматриваемой методики, основанной на выражении (1), относятся: открытый характер трещины или раскрывшегося шва без соединительного акустического “мостика”, отсутствие внутри трещины или шва воды или другого жидкого флюида или какой-либо мелкодисперсной фракции. Несоблюдение этих условий может привести к нежелательному эффекту прохождения через трещину прямой волны и к совершению грубых методических погрешностей.

С целью увеличения надежности при измерении глубины вертикальных трещин и раскрывшихся швов в железобетонных конструкциях нами предлагается применение при неразрушающем контроле таких объектов метода линейного профилирования с построением временных годографов различных фаз регистрируемого уль-тразвукового импульса.

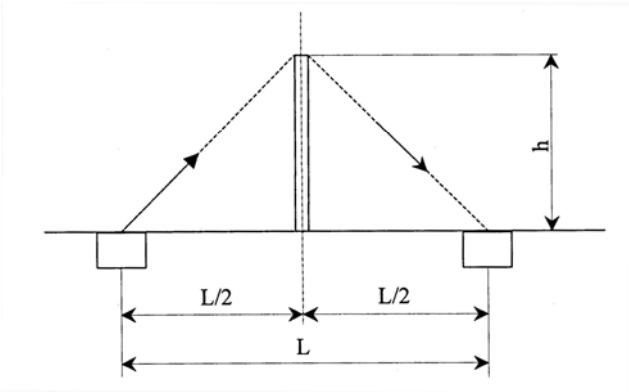

Рис. 1. Схема к определению глубины трещины по методике симметричного поверхностного прозвучивания

Данные методики широко используются при сейсмических исследованиях геологических структур с острыми кромками типа сбросов, выклинивающихся пластов, погребенных контактов и т.п. В этом случае уравнение годографа дифрагированной на острой кромке волны имеет вид гиперболы [3]:

$$t^{диф}(x) = t_Д + \frac{1}{C_p} \cdot \sqrt{(x - x_d)^2 + h^2}$$

(4)

где x_d – расстояние от источника до точки выхода трещины на поверхность наблюдения; C_p – скорость продольных волн в конструкции; $t_Д$ – постоянное время распространения падающей волны до края трещины.

$$t_Д = \frac{1}{C_p} \cdot \sqrt{x_d^2 + h^2} \ . \qquad (5)$$

Графическое изображение годографа дифракционной волны представлено на рис. 2 и имеет вид гиперболы с минимумом t_{min}, расположенном в точке выхода трещины на поверхность, т.е. с абсциссой $x = x_d$:

$$t_{min}^{диф} = \frac{2 \cdot h}{C_p} + \frac{\sqrt{1 + (x_d / h)^2}}{C_p} \ . \qquad (6)$$

В то же время годограф отраженной от второй границы железобетонной плиты H также имеет формулу гиперболы:

$$t^{отр}(x) = \frac{\sqrt{x^2 + 4 \cdot H^2}}{C_p} \ . \qquad (7)$$

Однако данные годографы резко различаются по двум признакам. Так минимальные точки обоих годографов будут смещены как по горизонтальной оси на величину $\Delta x = x_Д$, так и по вертикальной оси на величину $\Delta t = t_0^{отр} - t_{min}^{диф}$:

$$\Delta t = \frac{2\left[(H - h) - \sqrt{1 + (x_d / h)^2}\right]}{C_p} \ . \qquad (8)$$

В случае же регистрации при профильных измерениях прямой, просачивающейся через поверхность трещины, продольной волны ее годограф будет иметь прямолинейную форму:

$$t^{прям}(x) = \frac{x}{C_p} , \qquad (9)$$

вследствие чего его можно четко отличить от годографов дифрагированой и отраженной волн.

Выделив таким образом годограф дифракционной волны, можно на основании выражения (4) получить значение глубины трещины h, например, способом трансформированного годографа [3], который строится на основании зависимости:

$$y(x) = t^{диф}(x) - t = \frac{\sqrt{(x - x_d)^2 + h^2}}{C_p} \ . \qquad (10)$$

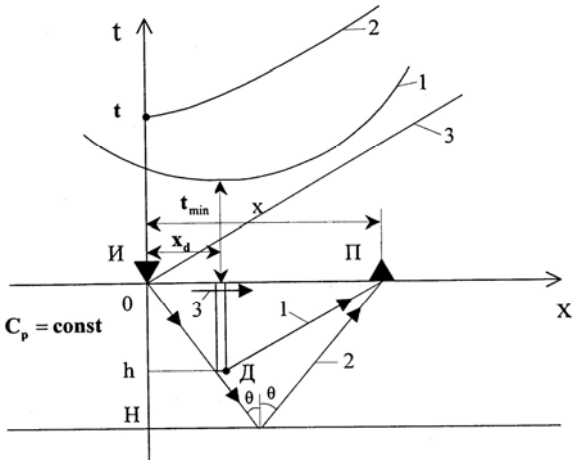

Рис. 2. Годографы дифрагированной волны (1), отраженной от противоположной поверхности конструкции волны (2) и прямой волны (3)

С целью исключения ошибки при измерении h, связанной с величиной соотношения h/λ_p, необходимо проводить линейное профилирование с преобразователями, имеющими различные собственные частоты f_{01} и f_{02}. Наилучший эффект будет наблюдаться в том случае, когда на годографе дифрагированой волны в наибольшей степени проявится минимум кривой $t_{min}^{диф}$, а также имеет место максимальное различие величины Δx.

Методическая реализация рассмотренных выше положений заключается в следующем. Нормально относительно контура трещины на поверхности конструкции разбивается линейный профиль. В каждой точке профиля на его противоположной стороне относительно расположения излучателя в точках регистрации, шаг между которыми составляет 1-2 см, измеряются времена распространения первых 5-6 положительных фаз ультразвукового импульса. Такие измерения, по возможности, выполняют для нескольких координат расположения излучающего преобразователя x_d, а также с помощью преобразователей с различными собственными частотами. По результатам измерений строят годографы для каждой из зарегистрированных 5-6 фаз импульса.

Анализируя данные годографы, выбирают из них тот, который соответствует дифрагированой волне. Далее по этому годографу определяют глубину трещины h.

Выбор наиболее оптимальных величин параметров профильных измерений представляет самостоятельную теоретическую и экспериментальную задачу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джонс Р., Фэкэоару И.* Неразрушающие методы испытаний бетонов. – М.: Стройиздат, 1974.

2. *Скучик Е.* Основы акустики. т.2. – М.: Мир, 1976.

3. *Гурвич И.И., Боганник Г.Н.* Сейсмическая разведка. – М.: Недра, 1980. ГИАБ

Коротко об авторах

Бауков Юрий Николаевич – доцент кафедры “Физико-технический контроль производства” (ФТ),
Нарышкин Данила Андреевич – студент VI курса факультета ФТ,
Звонкина Ася Анатольевна – студентка IV курса факультета ФТ,
Московский государственный горный университет.