

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБДЕЛКЕ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ - УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ

*Кириленко А.М., Знайченко П.А  
ЗАО «Триада-Холдинг», Москва, Россия*

*Определение глубины трещины, выходящей на поверхность ультразвуковым методом – хорошо известная задача, широко описанная в литературе по неразрушающему контролю бетона. Однако, при кажущейся простоте, ее решение требует кропотливой работы и достаточно высокой квалификации специалистов для получения представительного результата. В статье рассматривается опыт комплексного решения подобной задачи на конкретных объектах.*

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД, ТРЕЩИНЫ, ВЫХОДЯЩИЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ,  
УПРУГИЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### **Determination of Crack Depth in the Reinforced Concrete Lining of Transport Tunnels by Ultrasonic Method**

*A. Kirilenko, P. Znajchenko  
ZAO "Triada-Holding", Moscow, Russia*

Ultrasonic method is well-known and described in professional literature. However, being seemingly simple, this method implies laborious work of highly qualified specialists to get relevant results. The article presents an experience-based approach of applying this method at several job sites.

Ultrasonic method; surface cracks; elastic and deformative properties

Последние годы в связи с бурным ростом строительства транспортных тоннелей на территории Российской Федерации возникли вопросы, связанные с трещинообразованием в блоках обделки этих сооружений. Дело в том, что при щитовой проходке современными тоннельными машинами используется обделка из железобетонных блоков высокой прочности, бетон в которых отличается высокими значениями модуля упругости.

В результате воздействия различных технологических факторов в такой обделке могут возникать трещины, которые обычно распространяются в пределах защитного слоя бетона с выходом на внутреннюю поверхность блока. В редких случаях возможно возникновение сквозных трещин.

Контроль глубины распространения, а следовательно и степени опасности, таких трещин может быть осуществлен ультразвуковым методом по известным и новым методикам.

Написанию статьи предшествовали ультразвуковые исследования трещин в обделке, проведенные в двух, построенных на данный момент, тоннелях: перегонном тоннеле метрополитена в г.Санкт-Петербурге и в Лефортовском транспортном тоннеле в г.Москве. В ноябре 2002 года лабораторией «Контроль качества и эксплуатации инженерных сооружений» ЗАО «Триада-Холдинг» было проведено обследование блоков обделки тоннеля Санкт-Петербургского метрополитена. А в 2003 г – проводились рабо-

ты на блоках Лефортовского тоннеля.

Проходку перегонного тоннеля петербургского метрополитена на участке восстановления движения между станциями «Лесная» и Площадь Мужества» вела итальянская фирма IMPREGILO. По свидетельству технических руководителей работ трещины в блоках носили технологический характер, и их появление было обусловлено влиянием концевой участка защитной рубашки проходческого комплекса на последнее смонтированное кольцо при выравнивании щита в вертикальной плоскости. Внутренний диаметр кольца обделки 6.4 м, при толщине блоков 0.35 м, количество блоков в кольце – 6.

ультразвуковые измерения на блоках выполнялись цифровым прибором TICO фирмы PROCEQ (Швейцария) и аналоговым прибором УКБ-1М (Россия).

Оценка глубины трещин, проводилась двумя методами: традиционным, подробно описанным в литературе, и альтернативным, использующим нестандартный подход.

Традиционная методика определения глубины трещин, выходящих на поверхность [1, 2] заключается в измерении разницы во времени прохождения упругой волны через трещину и при условии отсутствия трещин. Эта разница обусловлена увеличением пути пробега упругой волны, вследствие огибания краев трещины. Данная методика применима только для сухих трещин.

Для дополнения информации, полученной традиционным методом, выборочно были проведены исследования глубины методом, основанным на изучении характеристик прохождения акустического сигнала. Использовалась информация о амплитуде сигнала уже полученная основным методом.

Метод определения глубины трещин, используемый в качестве альтернативного подробно описан в работе [3] и заключается в следующем. Выборочно были измерены амплитуды сигнала для зоны с трещиной и для нетрещиноватой зоны. Далее определялась характеристика прохождения сигнала по формуле

$$d_{bc}(f) = \sqrt{\frac{V_{ac}V_{db}}{V_{ab}V_{dc}}} \quad (1)$$

$d_{bc}$  - характеристика прохождения сигнала,  $V_{ac}$ ,  $V_{db}$ ,  $V_{ab}$ ,  $V_{dc}$  - амплитуды сигнала на соответствующей базе измерения. Параметры принимались согласно рис.1. По полученным значениям  $d_{bc}$  по выбранной зависимости, приведенной на рис.2 оценивалась глубина трещин.

Рассчитанные значения  $d_{bc}$  лежат в диапазоне от 0,08 до 0,46, что соответствует диапазону глубин трещин от 1.0 до 4.0 см. Полученные результаты хорошо сочетаются с результатами, полученными традиционным методом.

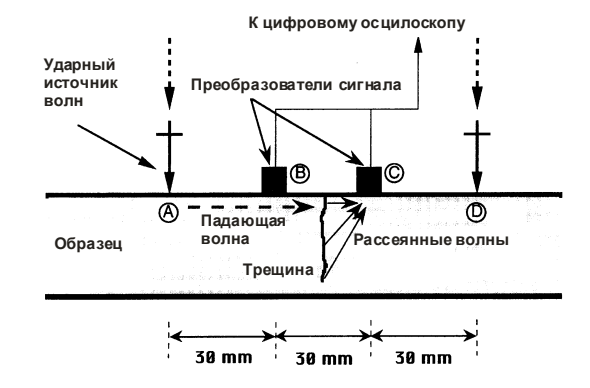


Рис.1 Методика измерения характеристик распространения упругих волн

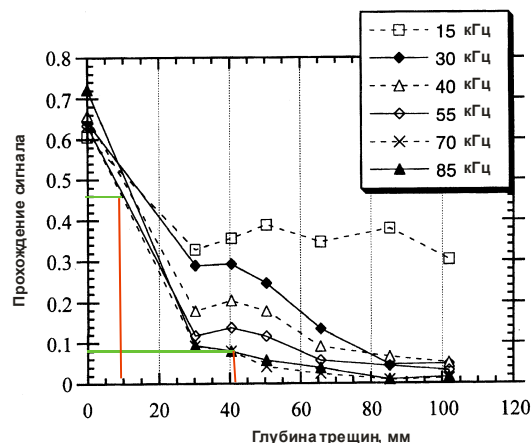


Рис.2 Прохождение сигнала, как функция глубины трещин на выбранных частотах

Проводилась также оценка упругих и деформационных характеристик бетона, знание которых необходимо в связи с возникновением воздействия на конструкцию нагрузок, естественных и искусственных колебаний (например вибрации от механизмов).

Значения динамических упругих параметров - модуля упругости  $E_d$  и коэффициента Пуассона  $\mu$  вычисляются на основании формул теории упругости по найденным в результате ультразвуковых наблюдений в блоках скоростям распространения продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  упругих волн. Полученные упругие характеристики могут быть использованы в расчетах нагрузки на обделку. Кроме того, вычисленные упругие показатели характеризуют способность материала блоков сопротивляться деформированию, т.е. определяют жесткость бетона и его прочность. Таким образом, полученные динамические и статические модули упругости можно сопоставить с нормативным модулем упругости.

В итоге сопоставления скоростей продольных и поперечных волн были определены динамические коэффициенты Пуассона, рассчитаны динамические и статические модули упругости по формулам [2, 5]:

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

$$E_d = \frac{V_p^2 \Delta (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (3)$$

$$E_c = 0.35 E_d^{1.141} \quad (4)$$

где  $\mu$  - динамический коэффициент Пуассона;  
 $V_p$  - скорости продольных волн в бетоне, м/с;  
 $V_s$  - скорости поперечных волн в бетоне, м/с;  
 $E_d$  - динамический модуль упругости, МПа;  
 $E_c$  - статический модуль упругости, МПа;  
 $\Delta$  - плотность бетона, кг/см<sup>3</sup>.

На основании проведенных работ по диагностике трещин в блоках были сделаны следующие выводы:

1. Трещины в блоках обделки имеют раскрытие от 0.1 до 0.3 мм, причем максимальное раскрытие наблюдается на блоках с большей глубиной трещин.

2. Характер расположения трещин повторяется. По свидетельству обслуживающего проходческий комплекс персонала, на момент снятия домкратной нагрузки с блоков, трещины имеют большее раскрытие и затем постепенно смыкаются. Трещины, проходящие вдоль всей внутренней поверхности блока, обычно наблюдаются и на его торцевой части.

3. Кроме визуально распознаваемых и задокументированных трещин, ультразвуковые наблюдения показали на некоторых блоках наличие невидимых волосных трещин. Такие трещины имеют настолько маленькое раскрытие, что при условии отсутствия изгибающих моментов в кольце обделки, их можно оставить без внимания.

4. Глубина трещин, выходящих на поверхность, в среднем колеблется от 0.60 до 6.10 см при толщине защитного слоя бетона от 2.5-3,0 до 4.0 см по проекту.

5. Трещины в бетоне, на которые воздействует давление воды, имеют тенденцию к samozакрытию (кольматации) с течением времени связанному в основном с осаждением кристаллов карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$ . Скорость их заполнения зависит от ширины трещин и давления воды, и мало зависит от состава бетона и типа воды.

6. Рассчитанные, по полученным в результате ультразвуковых исследований данным, значения статических модулей упругости лежат в диапазоне 34000 -60000 МПа. Причем эти значения получены для трещиноватой зоны, при отсутствии трещин они могут быть выше. Согласно СНиП 2.03.01-84 [4] начальный модуль упругости при классе бетона В 50 должен для тяжелого бетона естественного твердения соответствовать 39000 МПа. В предоставленном заказчиком документе по расчету блока обделки по образованию трещин фигурирует начальный модуль упругости бетона равный 24000 МПа, что соответствует модулю для бетона мелкозернистого автоклавного твердения. Таким образом, полученные в действительности значения модуля упругости, много выше значений принятых в расчете. Такие высокие значения говорят о завышенной прочности бетона блоков и следовательно о возникновении их избыточной хрупкости, что и может служить объяснением трещинообразования в блоках.

7. Проведенные на поверхности бетона склерометрические испытания показали, что бетон блоков обделки соответствует марке В 50 и в большинстве случаев превышает значения прочности соответствующие этой марке (средняя прочность бетона превышает 67.2 МПа).

8. Проведенные на блоках, не смонтированных в кольцо, сквозные ультразвуковые измерения показали более низкие скорости распространения упругой продольной волны ( $V_p = 5,36$  км/с среднее при сквозном прозвучивании) по сравнению с измерениями на смонтированном кольце, что вполне объяснимо условиями обжатия блоков.

9. Исследованные сухие трещины имеют тенденцию к закрытию и не представляют никакой опасности для проходки и дальнейшей эксплуатации тоннеля. Трещины во влажном состоянии, с большим раскрытием и, следовательно, не склонные к кольматации требуют лечения и дальнейших наблюдений за их состоянием.

10. Оценка кольцевой обделки на действующую нагрузку от горного давления показала, что изгибающие моменты в блоках имеют минимальные значения и следовательно, не могли привести к образованию трещин в шельге свода. К сожалению, мы не имеем данные о величинах монтажных нагрузок и характере их воздействия на обделку тоннеля. Но, учитывая результаты, полученные при выполнении ультразвуковых исследований (см.п.8 выводов), можно считать, что монтажные нагрузки в значительной мере влияют на процесс трещинообразования в блоках.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Р.Джонс, И.Фэкзоару Неразрушающие методы испытаний бетонов//. - М. Стройиздат, 1974.-296 с.
2. О.В.Лужин, В.А.Волохов, Г.Б.Шмаков, Г.Я.Почтовик, Э.Поль, З.Вебер Неразрушающие методы испытания бетона -М. Стройиздат, 1985.- 236 с.
3. J.S.Popovics, Won-Joon Song, M.Ghandehari, Kolluru V.Subramaniam, Jan D.Achenbach, and Surendra P.Shah Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete //ACI Material Journal/ march-april 2000
4. СНиП 2.03.01-84 Бетонные и железобетонные конструкции. – М., 2001
5. Никитин В.Н Основы инженерной сейсмологии. - М. : Издательство московского университета, 1981. – 176
6. Carola Edvardsen Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete //ACI Material Journal/ july-august 1999