

П.А. Знайченко, инж.;  
С.А. Немков, инж.;  
Н.М. Степанова, инж.;  
А.Ю. Бауков.  
(МГГУ, ЗАО "Триада-Холдинг")

**Трецинообразование в высокопрочных железобетонных блоках  
обделки перегонного тоннеля санкт-петербургского  
метрополитена на участке «Размыв» при проходке в сложных  
горно-геологических условиях**

В настоящий момент в России ведется сооружение нескольких крупных транспортных тоннелей по самым современным технологиям: Лефортовского тоннеля в Москве, перегонных тоннелей метрополитена в гг. Санкт-Петербурге и Казани. Обделка таких тоннелей состоит из железобетонных блоков высокой марки бетона по прочности и водонепроницаемости. При монтаже таких блоков обделки в них возникают напряжения иногда приводящие к образованию трещин.

Целью данной статьи является рассмотрение вопроса безопасности рассматриваемого класса трещин с точки зрения технологии проходки горных выработок, анализ результатов определения глубины трещин, выходящих на поверхность блоков и обоснование использования рассматриваемой методики в дальнейшем. Настоящей публикации предшествовали работы проведенные в перегонном тоннеле метрополитена в г. Санкт-Петербурге на участке «Размыв» и анализ публикаций, посвященных производству колец в городе Казани [7].

В ноябре 2002 года лабораторией «Контроль качества и эксплуатации инженерных сооружений» (лицензия ФЛЦ 004642-1(I) от 20.12.00) предприятия по диагностике, лечению и проектированию строительных конструкций инженерных сооружений ЗАО «ТРИАДА-ХОЛДИНГ» было проведено обследование блоков обделки тоннеля санкт-петербургского метрополитена на участке восстановления движения между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества». Целью работ было определение глубины трещин, выходящих на поверхность блоков. Заказчиком работ являлась совместная итalo-шведская компания «IMPREGILO S.p.A»

Обделка тоннеля имеет следующие геометрические размеры: внутренний диаметр кольца - 6.4 м, при толщине блоков 0.35 м, количество блоков в кольце – 6. Проходка ведется через плывун в крайне сложных условиях.

Трецины стали появляться еще в начале работ по проходке, они наблюдаются, в основном, в шелыге свода. По свидетельству технических руководителей работ они носят технологический характер и их появление обусловлено влиянием хвостовой оболочки проходческого комплекса на кольцо обделки при выравнивание щита в вертикальной плоскости.

На момент обследования все указанные заказчиком блоки находились в месте расположения проходческого комплекса. Все трещины (за исключением трещин, фильтрующих воду) находились в сухом состоянии, что создавало идеальные условия для определения их глубины. Глубина трещин определялась ультразвуковым методом.

Работы начинались с определения ширины раскрытия трещин при помощи увеличительного стекла с 8-ми кратным увеличением. Основную часть обследования составляли ультразвуковые измерения на блоках, которые выполнялись цифровым прибором TICO фирмы PROCEQ (Швейцария) и аналоговым прибором УКБ-1М (Россия). Расстояние между источником и приемником упругой волны было равно 150 мм. Для создания лучших контактных условий датчиков с поверхностью бетона применялась глицериновая смазка.

Оценка глубины трещин, проводилась двумя вариантами ультразвукового метода: традиционным, подробно описанным в литературе [1, 2], и альтернативным, использующим нестандартный подход [3].

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, в следствии 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 изучались характеристики прохождения акустического сигнала и производилось их определение по формуле

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

где  $d_{bc}$  - характеристика прохождения волны,

$V_{ac}$ ,  $V_{db}$ ,  $V_{ab}$ ,  $V_{dc}$  - амплитуды сигнала на соответствующих участках прозвучивания.

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.

Схема измерений приведена на рис.1

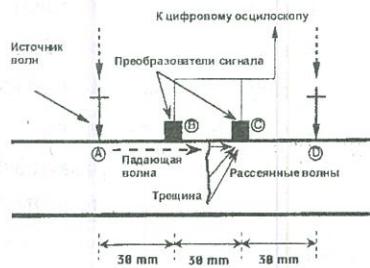


Рис. 1. Методика измерения характеристик распространения упругих волн

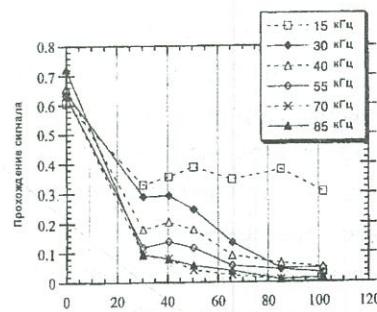


Рис. 2. Проживание сигнала, как функция глубины трещин на выбранных частотах

Были также проведены работы по оценке проницаемости бетона блоков прибором TORRENT (Швейцария). Кроме того, ультразвуковые измерения дали возможность оценить сплошность, дефектность блоков, вычислить упругие и деформационные характеристики бетона.

Необходимость знания упругих и деформационных характеристик бетона возникает в связи с воздействием на конструкцию нагрузок, естественных и искусственных колебаний (например вибрации от механизмов). По найденным в результате ультразвуковых наблюдений в блоках скоростям распространения продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  упругих волн на основании формул теории упругости значения рассчитываются динамических параметров - модуляя

упругости  $E_d$  и коэффициента Пуассона  $\mu$ . 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 обделки было установлено, что их глубина лежит в интервале от 0.60 до 6.10 см при ширине раскрытия от 0.1 до 0.3 мм. Глубина трещин, определенная альтернативным методом, составила 1.0 - 4.0 см. Сочетание традиционного и альтернативного методов, использующих разные подходы к рассмотрению процесса распространения упругих волн в среде, позволило повысить достоверность полученных результатов.

Проницаемость бетона блоков соответствует классу качества бетона не ниже нормального. Трещинообразование в бетоне блоков не сопровождается значительным увеличением проницаемости прилегающего к трещине бетона.

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. Однако, полученные значения скорости являются высокими и соответствуют бетону проектной марки. Это подтверждают и проведенные на поверхности бетона склерометрические испытания. Бетон блоков обделки соответствует марке В 50 и в большинстве случаев превышает значения прочности соответствующие этой марке (средняя прочность бетона превышает 67.2 МПа).

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. Это приводит к возникновению избыточной хрупкости бетона блоков, что и может служить объяснением трещинообразования в них.

В тоже время, получение водонепроницаемого и морозостойкого бетона требует создания плотной его структуры с ограничением величины капиллярной пористости цементного камня [7]. Для обеспечения заданных свойств бетона при снижении водоцементного соотношения и при сохранении удобоукладываемости в состав смеси вводятся добавки с суперпластификаторами. С целью уменьшения внутренних напряжений в бетоне, возникающих в процессе его твердения, а также трещинообразования и проницаемости его структуры, проводится оптимизация режимов тепловлажностной обработки и дозревания бетонов. Таким образом, процесс изготовления блоков требует очень тщательного соблюдения технологии и причина трещинообразования в блоках может быть следствием ее нарушения.

Таким образом, трещинообразование в высокопрочных блоках тоннельной обделки может быть связано со множеством причин, но 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 шелыге 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, можно считать, что монтажные нагрузки в значительной мере влияют на процесс трещинообразования в блоках.

В результате проведенного комплекса диагностических работ можно сделать следующие выводы:

- Трещины в блоках обделки имеют глубину в пределах защитного слоя бетона, либо, в отдельных случаях, превышают его величину на 1.5-2.0 см.
- Максимальное раскрытие наблюдается на блоках с большой глубиной трещин.
- Характер расположения трещин повторяется. Причем на момент снятия домкратной нагрузки с блоков, трещины имеют большое раскрытие и затем постепенно смыкаются.
- Трещины, проходящие вдоль всей внутренней поверхности блока, обычно наблюдаются и на его торцевой части (рис.3).
- Кроме визуально распознаваемых и задокументированных трещин, ультразвуковые наблюдения показали на некоторых блоках наличие не видимых волосных трещин. Такие трещины имеют настолько маленькое раскрытие, что при условии отсутствия изгибающих моментов в кольце обделки, их можно оставить без внимания.
- Трещины в бетоне, на которые действует давление воды, имеют тенденцию к самозакрытию (кольматации) с течением времени связанному в основном с осаждением кристаллов карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$ . Скорость самозакрытия зависит от ширины трещин и давления воды, и мало зависит от состава бетона и типа воды. Дополнительное пленочное упрочнение оказывается высокоэффективным средством для поддержания процесса кольматации трещин [6].
- 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 (рис.4) требуют лечения и дальнейших наблюдений за их состоянием.

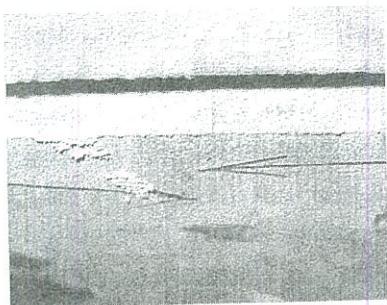


Рис.3 Трешины на торцевой части блоков

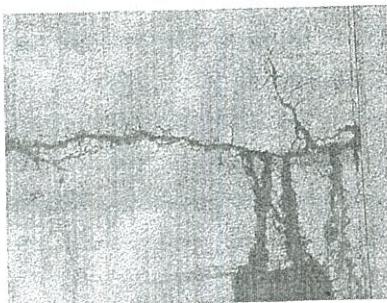


Рис.4 Трешины, фильтрующие воду

Проведенный комплекс работ позволил объективно оценить ситуацию с трещинообразованием в блоках обделки. Образование трещин в блоках, с учетом всех проанализированных в статье факторов, является нормальной ситуацией, которая может повторяться и других тоннелях. Поэтому ультразвуковое определение глубины трещин, выходящих на поверхность блоков может быть использовано и в дальнейшем.

#### Список литературы

1. Р.Джонс, И.Фэксауар 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, James 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 сейсмики. - М. : Издательство московского университета, 1981. - 176 с.
6. Carola Edvardsen Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete //ACI Material Journal/ july-august 1999

7. Р.З.Рахимов, М.М.Рахимов, М.Г.Габидуллин Комплексное решение задач организации производства колец обделки тоннелей Казанского метрополитена. //Метро и тоннели/ №4 2002.