

05

## Исследование влияния концентрации поверхностных трещин в бетоне и их ориентации на параметры электрического сигнала при импульсном механическом воздействии

© Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, А.А. Демихова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: fursa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 22 апреля 2014 г.)

Проведены исследования связи параметров электрического отклика на упругое ударное возбуждение цементно-песчаных образцов с концентрацией поверхностных трещин. Установлено, что увеличение концентрации трещин приводит к линейному возрастанию коэффициента затухания спектральной энергии электрических сигналов при любой ориентации трещин относительно друг друга.

Поверхностные трещины являются наиболее распространенным видом дефектов бетонных конструкций. Причинами возникновения и развития трещин являются статические и динамические нагрузки, процессы выветривания, усадка при высыхании, влияние климатических условий и другие процессы деградации. Методы, которые могут обнаруживать и определять характеристики трещин, используя методы неразрушающей оценки, представляют большой интерес для практики. Задача определения процессов трещинообразования в бетонной конструкции в процессе эксплуатации может быть решена двумя способами. С одной стороны, может осуществляться непрерывный мониторинг бетонной конструкции с использованием акустической и электромагнитной эмиссий. В настоящее время за рубежом ведутся разработки, в которых с помощью акустической эмиссии определяют время начала образования трещины и ее расположение внутри материала путем определения координат источников акустического возбуждения [1,2]. Исследованиям электромагнитной эмиссии в процессе возникновения и прорастания трещин в различных материалах (таких как горные породы, цементный раствор, некоторые композиционные материалы, лед и др.) посвящены работы [3–5]. Однако с практической точки зрения акустическая и электромагнитная эмиссия могут быть использованы при проведении непрерывного мониторинга конструкции, что связано со значительными финансовыми и техническими затратами. С другой стороны, может быть использован периодический контроль состояния конструкции с использованием метода, основанного на использовании явления механоэлектрических преобразований при слабом импульсном механическом воздействии [6–11].

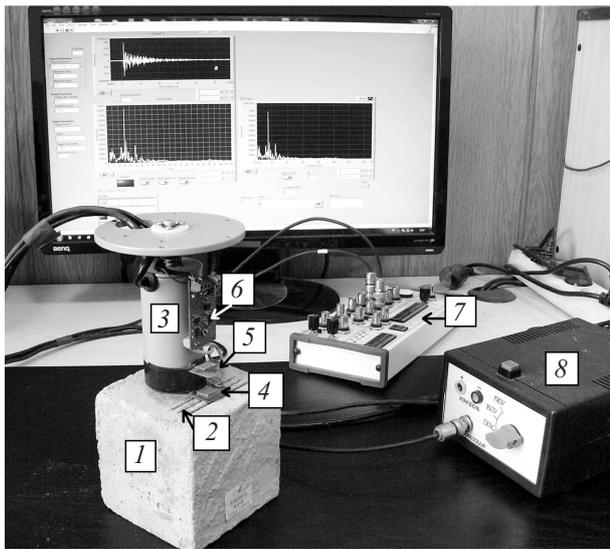
В рамках настоящей работы проведены исследования влияния концентрации трещин и их ориентации на параметры электрического отклика при импульсном механическом возбуждении образцов.

Экспериментальные исследования проводились с помощью лабораторного программно-аппаратного ком-

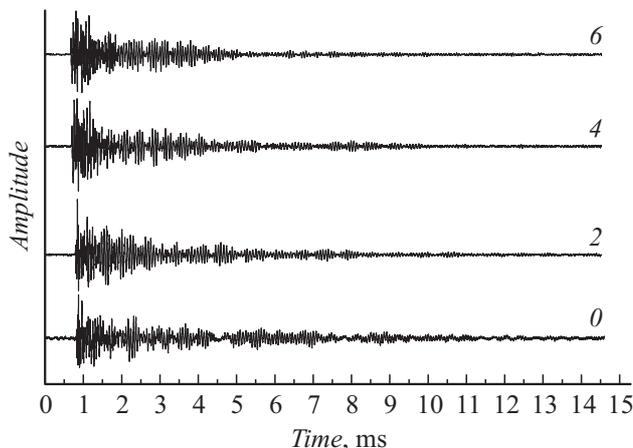
плекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение образцов и регистрацию электрического отклика на произведенное воздействие. Импульсное механическое возбуждение образцов производится с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой удара. Для регистрации электрического отклика, возникающего при упругом ударном возбуждении образцов, используется дифференциальный электрический датчик. Электрический измерительный приемник расположен на расстоянии 2 мм от поверхности образца, тем самым созданы условия для бесконтактного приема. Компенсационный приемник идентичен измерительному и расположен на высоте 30 мм от него. Измерительный приемник воспринимает как полезный сигнал из образца, так и сигнал внешней помехи. Компенсационный приемник удален от источника полезного сигнала и практически воспринимает только помеховый сигнал. Такая схема измерения позволяет значительно повысить соотношение сигнал–помеха. Приемники через акустическую развязку закреплены на корпусе ударного устройства. В результате этого расстояние от точки удара до электрического приемника всегда одинаково (20 мм). Сигналы с электрического датчика регистрируются с помощью многофункциональной платы ввода–вывода „NI PCI-6251“, совмещенной с ЭВМ, позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала.

Для проведения исследований были использованы цементно-песчаные образцы размером 100 × 100 × 100 мм. Цементно-песчаные образцы были использованы потому, что тяжелый бетон разрушается в основном по цементно-песчаной матрице.

На первом этапе исследований, чтобы исключить влияние структурных неоднородностей на параметры электрического отклика, были проведены модельные исследования на одном и том же образце. В образце последовательно создавались 1, 2, 3, 4, 5, 6 искусственных трещин и производилось измерение электрического сигнала. Моделью поверхностной трещины служил



**Рис. 1.** Схема проведения эксперимента. 1 — образец, 2 — искусственные трещины, 3 — электромеханическое ударное устройство, 4 — измерительный электрод, 5 — компенсационный электрод, 6 — дифференциальный усилитель, 7 — терминальный блок платы ввода-вывода, 8 — источник питания.



**Рис. 2.** Изменение электрических сигналов из цементно-песчаного образца в зависимости от количества одинаково ориентированных искусственных трещин. Цифрами на графике обозначено количество пропилов.

пропил, созданный с помощью отрезного станка диском диаметром 150 мм и толщиной 1 мм. Пропилы производились на глубину 10 мм. В результате были созданы искусственные трещины длиной 70 мм и закруглением вглубь образца. Первый пропил был расположен на расстоянии 15 мм от центра образца параллельно боковой грани. Последующие пропилы были расположены параллельно первому на расстояниях 20, 25, 30, 35 и 40 мм от центра. Такая геометрия расположения искусственных трещин позволяла во всех случаях производить ударное возбуждение по бездефектной централь-

ной части образца. Электрический датчик в процессе эксперимента располагался над дефектной областью. На рис. 1 приведена фотография, иллюстрирующая данный эксперимент.

На рис. 2 приведены электрические сигналы, зарегистрированные из цементно-песчаного образца в процессе увеличения концентрации трещин. Чтобы не загромождать график, на нем приведены сигналы не для всех пропилов, а через один.

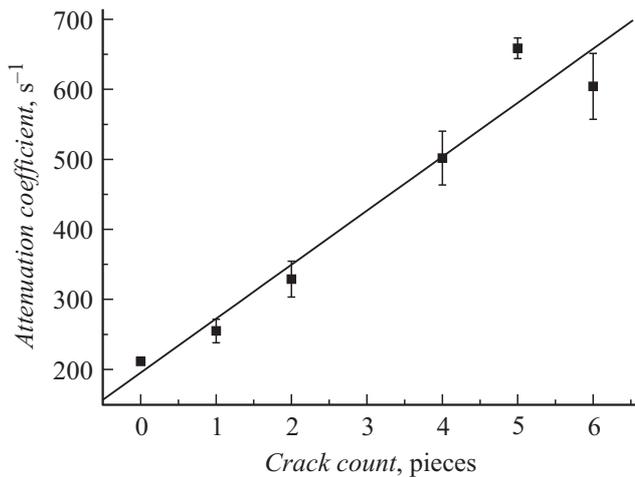
Как видно из рис. 2, при увеличении концентрации трещин практически не происходит изменение максимальной величины электрического сигнала, но наблюдается изменение характера его затухания.

Электрический отклик является следствием деформации и смещения упругой волной, созданной ударным возбуждением, источников сигнала в материале. Проведенными ранее исследованиями установлено, что определяющую роль в механоэлектрических преобразованиях в бетоне играют пьезоэлектрические включения [6,7]. Пьезокварц содержится в песке, который был использован для изготовления цементно-песчаных образцов. Рентгеноструктурный анализ песка показал, что содержание в нем пьезокварца составляет 80–90%. Под действием механических напряжений, обусловленных акустическими волнами, происходит образование заряда на гранях пьезокварца за счет прямого пьезоэффекта. Следствием этого является возникновение внешнего электрического поля, которое регистрируется приемником сигнала, расположенным вблизи исследуемого объекта. Поэтому параметры электрического отклика связаны с характеристиками упругих волн внутри материала и могут быть использованы для их бесконтактного измерения.

При взаимодействии с дефектами происходит рассеяние упругих волн, что отражается на процессе их затухания от времени.

Для определения динамики изменения коэффициента затухания энергии электрического сигнала из цементно-песчаного образца в зависимости от концентрации искусственных трещин использован частотно-временной анализ, как это описано в работах [12,13]. Суть данного подхода заключается в отслеживании характера изменения спектральной энергии электрического отклика на воздействие, создаваемое упругими волнами как функции времени.

Обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась с помощью специальной программы в среде программирования LabView. Подробно методика определения коэффициента затухания энергии электрического сигнала изложена в работе [14]. Такая методика позволяет отслеживать затухание спектральной энергии электрического отклика как функцию времени в области любого выбранного диапазона частот. В данном случае для анализа был выбран частотный диапазон от 12 до 25 kHz, в котором находится основная доля энергии электрических сигналов, возникающих в цементно-песчаном образце при упругом ударном возбуждении. Раз-



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента затухания спектральной энергии электрических откликов от количества одинаково ориентированных искусственных трещин в цементно-песчаном образце.

мер скользящего окна составил 4096 точек (при частоте оцифровки 2.5 MHz) и последовательное смещение этого окна по временной реализации производилось с шагом 16  $\mu$ s.

На рис. 3 приведен график изменения коэффициента затухания энергии электрических откликов в зависимости от количества пропилов.

Как видно из рис. 3, увеличение концентрации ( $C$ ) одинаково ориентированных трещин приводит к возрастанию коэффициента корреляции ( $\beta$ ) по линейной зависимости вида  $\beta = 195.33 + 77.1C$ . С коэффициентом корреляции 0.97.

В реальных условиях образующиеся трещины имеют различную ориентацию относительно друг друга. С помощью отрезного станка невозможно создание модельных трещин, ориентированных в различных направлениях. Для определения влияния ориентации трещин на параметры электрического сигнала были изготовлены специальные модели. Искусственные трещины различной концентрации и ориентации были созданы путем введения в форму с жидким цементно-песчаным раствором полиэтиленовых пластин размером  $20 \times 20 \times 1$  mm. Через 3 h после затвердения пластины удалялись и в образцах оставались полости, моделирующие трещины соответствующего размера, локализованные с одной стороны образца. Из одного и того же цементно-песчаного раствора были изготовлены модели с 5, 15 и 30 трещинами и контрольный бездефектный образец.

На рис. 4 для иллюстрации расположения искусственных трещин приведена фотография образца с 15 трещинами.

После полного формирования структуры цементно-песчаных образцов размером  $100 \times 100 \times 100$  mm были проведены измерения электрического отклика этих мо-

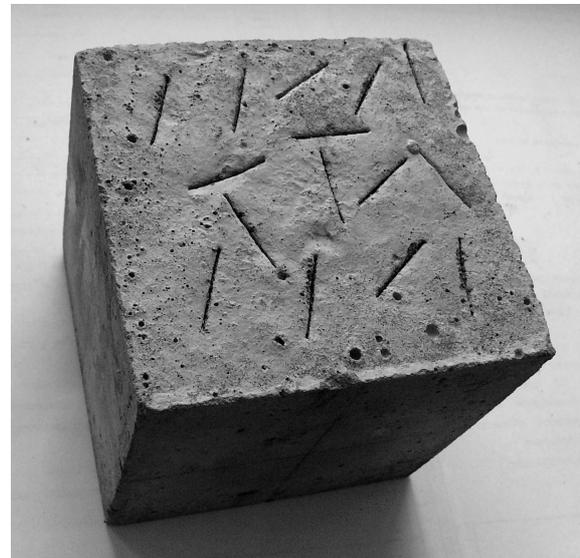
делей. Полученные электрические сигналы также были обработаны по приведенной выше методике.

На рис. 5 приведен график зависимости коэффициента затухания от количества различно ориентированных трещин.

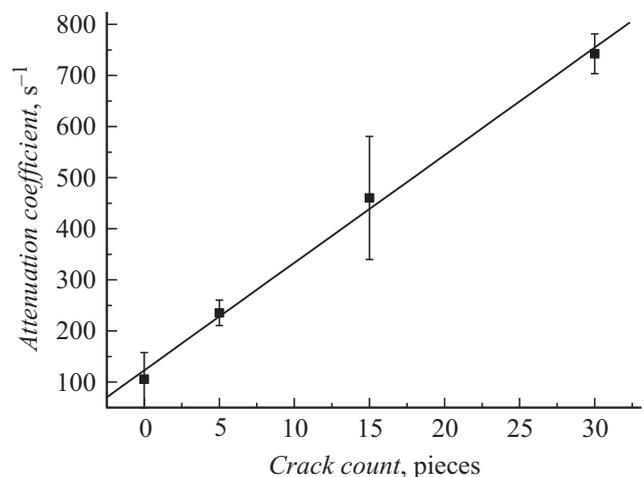
Данная зависимость хорошо аппроксимируется прямой линии вида  $\beta = 122.97 + 21.05C$  с коэффициентом корреляции 0.98.

Следовательно, даже при случайной ориентации трещин относительно друг друга сохраняется линейная зависимость коэффициента затухания спектральной энергии электрических сигналов от концентрации трещин в образце.

При изготовлении данных образцов использовалось соотношение цемента к песку 1:2. Средний диаметр



**Рис. 4.** Фотография образца с искусственными трещинами, имеющими различную ориентацию относительно друг друга.



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента затухания от количества случайно ориентированных искусственных трещин в цементно-песчаном образце.

песчинок составлял порядка 0.4 mm. Оценки показали, что количество пьезоэлектрических источников механических преобразований в образце составляет порядка  $10^7$ . Источники распределены равномерно по всему образцу и имеют случайное расположение пьезоэлектрических осей кварца. Ударное возбуждение производится сферическим ударным элементом, и в образце создается сферическая упругая волна. В результате этого формируется сложная волновая картина, в которой присутствуют волны, распространяющиеся в разных направлениях. Поэтому в электрическом отклике присутствуют составляющие, отражающие взаимодействие акустических волн возбуждения с трещинами, имеющими различную ориентацию.

Проведенные исследования показывают, что по параметрам затухания энергии электрических откликов на упругое ударное возбуждение можно судить о развитии процессов трещинообразования в бетонах.

Работа выполнена в рамках Государственного задания „Наука“.

## Список литературы

- [1] *Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., Manuello A.* // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34. N 4. P. 529–537.
- [2] *Kentaro O., Masayasu O.* // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. N 12. P. 2339–2346.
- [3] *Kyriazopoulos A., Anastasiadis C., Triantis D., Brown C.J.* // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 29. N 4. P. 1980–1990.
- [4] *Fifolt D.A., Petrenko V.F., Schulson E.M.* // Philosophical Magazine. Part B. 1993. Vol. 67. N 3. P. 289–299.
- [5] *Koktavy P.* // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20. N 1. 015704.
- [6] *Суржиков А.П., Фурса Т.В.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 4. С. 71–76.
- [7] *Фурса Т.В., Данн Д.Д.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 8. С. 53–58.
- [8] *Фурса Т.В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 7. С. 53–56.
- [9] *Фурса Т.В., Савельев А.В., Осипов К.Ю.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 59–63.
- [10] *Фурса Т.В.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 8. С. 1–6.
- [11] *Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 7. С. 1–7.
- [12] *Anugonda P., Wiehn J.S., Turner J.A.* // Ultrasonics. 2001. N 39. P. 429–435.
- [13] *Quiviger A., Payan C., Chaix J.-F., Garnier V., Salin J.* // NDT&E International. 2012. N 45. P. 128–132.
- [14] *Осипов К.Ю., Фурса Т.В.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 10. С. 65–71.