

УДК 621.317:084.2

**МЕТОДИКА СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗВИТИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ
В ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМАХ**

*канд. техн. наук, доц. Д.Н. ШАБАНОВ;
А.Н. ЯГУБКИН; В.А. ХВАТЫНЕЦ; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается проблема напряженно-деформированного состояния цементных систем. Анализируются существующие методы определения трещин, зарождающихся внутри бетонных конструкций. Представлен тензометрический комплекс для определения напряженно-деформированного состояния цементных систем, в котором усовершенствован ранее применяемый авторами глубинный датчик. Описана методика сопровождения развития структурных дефектов в применяемых образцах-кубиках из цементного теста. Параллельно с глубинным датчиком результаты фиксировались датчиками акустической эмиссии и программного комплекса SonicVisualizer. Показана цель предложенного способа – повышение точности определения зарождения и развития трещины в образце по параметрам акустической эмиссии. Согласно гипотезе, данная система с более высокой достоверностью может получать области упругих деформаций в цементных системах, избегая накопления пластических деформаций, что позволит в дальнейшем предотвратить прогрессирующее разрушение бетонных конструкций.

Ключевые слова: цементная система, трещина, глубинный датчик, акустическая эмиссия, пластическая деформация, прогрессирующее разрушение, остаточный ресурс.

Введение. Для корректного определения остаточного ресурса бетона исходные данные необходимо определять по результатам натуральных испытаний и измерений. Величины напряжений, возникающих в бетоне, как правило, принимаются по результатам стандартных расчетов, что не отражает действительной работы конструкции. Возникает необходимость искать достоверные оперативные способы получения исходных данных для расчетов непосредственно в процессе эксплуатации. Выходом из создавшегося положения служит применение телеметрических систем контроля за состоянием объектов [1].

В статьях [1; 2] рассмотрены тенденции создания систем строительного мониторинга. Выделены основные факторы, влияющие на безопасность эксплуатации объектов, определены основные задачи данных систем. Создание подобной системы позволит регистрировать изменения напряженно-деформированного состояния конструкции и оценивать степень этого изменения. Для решения данной задачи достаточно использовать аналогово-цифровые преобразователи, микроконтроллеры, датчики с низкой относительной погрешностью.

Работа С.Г. Никольского [3] посвящена проблеме создания неразрушающего метода определения следующих величин для конкретного изделия: максимальной неразрушающей нагрузки, остаточного ресурса конструкции и эрозии бетона. Цель предложенного способа – повышение точности определения износа материала по параметрам акустической эмиссии (АЭ). Сдвиговые микропластические деформации в вершине трещины предшествуют ее старту, поэтому дискретная акустическая эмиссия при разгрузке появляется еще до старта трещины. Это обстоятельство позволило создать надежный способ определения пороговой нагрузки для изделий с исходными технологическими дефектами, результат которого не зависит от предыстории изделия.

Используя неразрушающий способ, можно определить максимальную неразрушающую нагрузку, которую изделие способно воспринять при различных схемах его нагружения, и с учетом полученных результатов оптимально ориентировать изделие для дальнейшей эксплуатации. Такой прием позволяет повысить несущую способность изделия в несколько раз, а долговечность при заданном режиме нагружения – на несколько порядков. Описанный в указанной работе прием определения максимальной неразрушающей нагрузки изделия позволяет контролировать кинетику разрушения, независимо от внешних факторов. Авторами исследованы общие принципы построения систем строительного мониторинга, предложена их типовая структурная схема и проведена классификация используемых технических средств. Разработаны рабочие предпосылки создания измерительного комплекса, методика лабораторных исследований зарождения и сопровождения дефекта и программное обеспечение для обработки полученных экспериментальных данных. При этом предусматривается обработка сразу нескольких этапов трещинообразования, исходя из их энергетических уровней, что позволяет определить переходный этап по параметрам звуковой волны, которая, в свою очередь, характеризует встречающиеся препятствия.

Для более детального изучения развития деформаций в бетонных образцах в работах [4–8] принято решение использовать глубинные датчики. Как показали исследования [9], применение такого типа глубинного датчика дает хорошую сходимость экспериментальных и теоретических данных.

Искажение измеряемых напряжений может быть весьма существенным и зависит от степени несоответствия деформативных свойств среды и датчика напряжений, а также ряда других факторов. Поэтому успех применения датчиков напряжений в первую очередь зависит от решения вопросов уменьшения искажения напряжений в зоне их включения в среду [10].

Как показали первые испытания глубинных датчиков, выполненных по технологии, представленной в [13; 14], существует ряд проблем, связанных с внедрением датчика в структуру бетона. Форма датчика имеет достаточно углов, которые могут быть концентраторами напряжений в структуре исследуемого бетона и тем самым способствовать снижению прочности экспериментального образца.

В работе Л.Н. Фомицы [10] для датчиков вводятся дополнительные требования, обеспечивающие повышение точности измерений:

- 1) модуль деформации датчика в направлении измеряемых напряжений должен быть выше модуля деформации среды;
- 2) геометрическая форма датчика должна быть такой, чтобы искажение измеряемой компоненты было минимальным;
- 3) датчик должен обладать избирательными свойствами – быть чувствительным только к измеряемой компоненте напряжений и инертным по отношению к другим;
- 4) показания датчика не должны зависеть от характера распределения напряжений по его рабочей поверхности – он должен обладать интегрирующими свойствами;
- 5) условия контакта со средой должны обеспечивать надежную передачу измеряемых напряжений.

При создании системы мониторинга зачастую невозможно установить датчики во все интересующие элементы конструкции, так как для этого необходимо использовать слишком большое количество датчиков и коммуникационных комплектующих, что неизбежно приводит к значительному росту стоимости системы. В этом случае представляется рациональным устанавливать датчики в наиболее нагруженных (по результатам компьютерного моделирования) конструктивных элементах здания [11].

Использование рассмотренного выше метода, а также методов акустической эмиссии позволит сопровождать развитие дефекта в магистральную трещину, исключая возможность разрушения материала из-за образования этой трещины.

Основная часть. Сопровождение развития дефекта осуществлялось с помощью тензометрического комплекса, включающего в себя: глубинный датчик [13; 14], микроконтроллер с аналогово-цифровым преобразователем STM32 и программное обеспечение PhyZ Module [12]. Тензометрический комплекс позволяет представить процесс развития дефекта в виде графика, таблицы в реальном времени с выводом на монитор компьютера или записью на электронный носитель.

Для определения напряженно-деформированного состояния цементного теста в качестве опытных образцов использовались три цементных кубика с размерами $70 \times 70 \times 70$ мм. Водоцементное отношение 0,4. Перед началом испытаний кубики взвешивались для определения их средней плотности. В данном эксперименте, в отличие от работ [13; 14], применялся датчик цилиндрической формы. По принятому решению использовался глубинный датчик цилиндрической формы (рисунок 1), так как согласно выдвинутой гипотезе это позволит избежать концентраций дополнительных напряжений в образце.

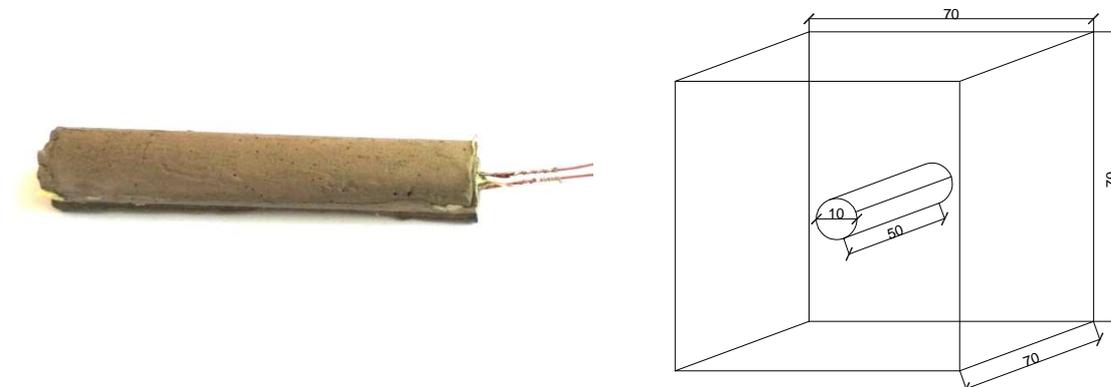
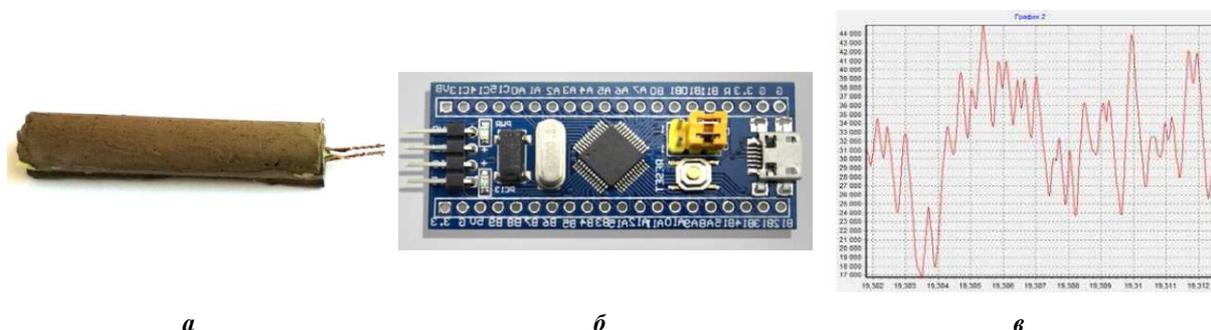


Рисунок. 1 – Глубинный датчик цилиндрической формы и его расположение в образце

В образцах № 1 и № 2 цилиндрические датчики размещались взаимно перпендикулярно друг другу (по направлениям развития главных деформаций) с зазором так, чтобы они не соприкасались. Образец № 3 был заформован без глубинных датчиков внутри.

Результаты испытаний цементных кубов фиксировались с помощью гидравлического прессы ПГМ-500МГ4А, а также с помощью тензометрического комплекса.

Тензометрический комплекс принимает аналоговые сигналы с последующей их оцифровкой и передачей через канал связи на компьютер. Принцип работы данной установки показан на рисунке 2.



a – глубинный датчик; *б* – микроконтроллер STM32; *в* – программа PhyZModule [12]

Рисунок 2. – Необходимые компоненты для работы собранной установки

Преимущество данного комплекса заключается в том, что он автоматически снимает отсчеты, регистрирует их в журнал испытаний и обрабатывает результаты наблюдений, что существенно сокращает продолжительность снятия отсчетов и уменьшает трудоемкость данного процесса. Благодаря многоканальности данной системы стало возможным одновременное снятие показаний с нескольких датчиков, что крайне важно для получения полной картины напряженно-деформированного состояния исследуемого образца. Фиксация данных проводилась на протяжении полного цикла нагружения с синхронизацией во времени. Результаты испытаний для трех образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики испытуемых цементных образцов

| № образца | В/Ц | Цемент, кг/м ³ | Вода, кг/м ³ | Плотность, кг/м ³ | Прочность на сжатие, МПа | Разность электрического напряжения между состоянием покоя и разрушением образца, В |
|-----------|-----|---------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------|--|
| 1 | 0,4 | 300 | 120 | 1,965 | 28,94 | 0,387 |
| 2 | 0,4 | 300 | 120 | 1,985 | 30,33 | 0,402 |
| 3 | 0,4 | 300 | 120 | 1,99 | 33,9 | – |

На основании анализа данных, представленных в таблице 1, можно сделать следующие выводы:

- при внедрении в структуру цементной системы глубинного датчика незначительно снижается прочность самого образца, при этом плотность остается почти такая же, как и в образце без установленного датчика. Следует отметить необходимость дальнейших испытаний для определения влияния глубинного датчика на структуру бетона;

- созданная система фиксирует изменение напряжения только в датчиках, установленных в образцах горизонтально, при этом наблюдаются сильные шумы. Кроме того представленная система реагирует на выходной сигнал глубинного датчика, однако при должной настройке планируется улучшить наглядность получаемых результатов. Параллельно с глубинным датчиком снимали показания результатов с датчиков акустической эмиссии и программного комплекса SonicVisualizer.

Таким образом, цель предложенного способа заключается в повышении точности определения зарождения и развития трещины в образце по параметрам акустической эмиссии, а применение представленных методов (глубинным датчиком и датчиком акустической эмиссии) обеспечит более высокую достоверность получения области упругих деформаций и позволит избежать накопления пластических, исключив тем самым прогрессирующее разрушение.

В дальнейшем предполагается увязать полученные результаты с возможностями компьютерного моделирования для последующей визуализации и анализа происходящих структурных изменений в цементных системах.

Совершенствуя датчики и установку для контроля за напряженно-деформированным состоянием цементных систем, можно добиться предупреждения и предотвращения возможных обрушений бетонных и железобетонных конструкций. Результаты, полученные с помощью датчиков акустической эмиссии, отображены на рисунке 3.

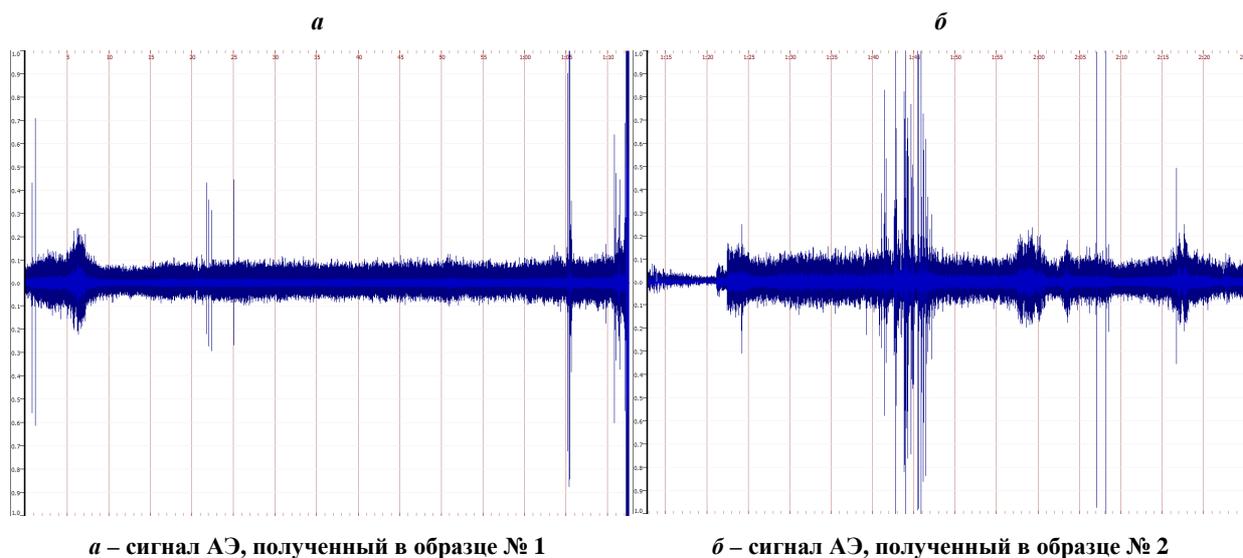


Рисунок 3. – Общий вид сигналов акустической эмиссии

Характер разрушения образцов с глубинными датчиками внутри показан на рисунке 4.



Рисунок 4. – Характер разрушения цементного куба с установленным в него глубинным датчиком

Заключение. Проведенные исследования позволяют представить механизм развития структурных дефектов в цементных системах следующим образом: с помощью двух типов датчиков (глубинного и акустической эмиссии) ведется контроль за формированием и дальнейшим развитием микродефектов (трещин) в структуре цементных образцов. При этом созданная система предусматривает обработку сразу нескольких входящих сигналов, что подразумевает ее многоканальность. В перспективе данный комплекс будет использоваться для определения переходного этапа трещинообразования бетонных и железобетонных конструкций, исходя из их энергетических уровней по параметрам звуковой волны (которая, в свою очередь, характеризует встречающиеся препятствия) и глубинного датчика, характеризующего механические изменения, непосредственно внутри конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шешуков, А.Н. Применение телеметрических систем для мониторинга напряженно деформированного состояния конструкций / А.Н. Шешуков, С.В. Мальцев, Р.П. Богуш // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений : сб. науч. тр. ; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск, 2001. – С. 402–404.
2. Соломахо, В.Л. Методы и средства строительного мониторинга / В.Л. Соломахо, И.Ф. Мирошниченко, П.А. Петрусенко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та : науч.-техн. журн. – 2007. – № 5. – С. 21–24.
3. Никольский, С.Г. Экспресс-метод контроля эрозии бетона / С.Г. Никольский // Инженерно-строительный журнал. – 2008. – № 2. – С. 39–44.

4. Исследование деформативности бетонных колонн методом глубинной тензометрии / Г.Л. Ватуля [и др.] // Збірник наук. праць ; Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво. – 2014. – № 3 (2). – С. 30–36.
5. Ватуля, Г.Л. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагурия, Д.Г. Петренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 2. – С. 48–56.
6. Ватуля, Г.Л. Определение механических характеристик конструкций с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагурия, Д.Г. Петренко // Будівельна механіка і гідраліка : зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2016. – Вып. 138. – С. 231–235.
7. Безгодков, И.М. К вопросу о методике исследования бетона в условиях трехосного сжатия [Электронный ресурс] / И.М. Безгодков, И.А. Горбунов, П.Ю. Шульгин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2010. – Режим доступа: <http://pamag.ru/src/pressa/076.pdf>.
8. Макаренко, С.Ю. Применение глубинных датчиков на основе тензорезисторов при исследовании деформаций ползучести тяжелого бетона / С.Ю. Макаренко // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы : материалы науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения проф. Н.Н. Леонтьева и 110-летию проф. В.З. Власова ; МГСУ. – 2017. – С. 74–77.
9. Красновский, Р.О. О методике испытания железобетонных балок на действие поперечных сил / Р.О. Красновский // Методика лабораторных исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и железобетонных конструкций. – М. : Госстройиздат, 1962. – С. 160–173.
10. Фомица, Л.Н. Полупроводниковые преобразователи для измерения механических напряжений / Л.Н. Фомица. – Минск : Выш. школа, 1983. – 123 с.
11. Таракановский, В.К. Обзор современных средств мониторинга состояния конструкций и грунтов оснований высотных зданий / В.К. Таракановский // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. тр. – М., 2010. – Вып. 9. – С. 243–262.
12. Змитрович, С.Ю. Обработка аналоговых сигналов датчиковой аппаратуры. Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) [Электронный ресурс] / С.Ю. Змитрович, С.А. Вабищевич : электрон. сб. ст. I междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. – С. 272–275.
13. Шабанов, Д.Н. Determination of the stress-strain state of concrete using the tensometry method / Е.А. Трамбицкий, Д.Н. Шабанов // European & national dimension in research : materials X Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, 10–12 May 2018. – С. 77–78.
14. Шабанов, Д.Н. Контроль напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций с использованием метода тензометрии [Электронный ресурс] / Д.Н. Шабанов, А.Н. Ягубкин, Е.А. Трамбицкий // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. – С. 242–247.

Поступила 12.12.2018

TECHNIQUE OF SUPPORTING THE DEVELOPMENT OF STRUCTURAL DEFECTS IN CEMENT SYSTEMS

D. SHABANOV, A. YAGUBKIN, V. HVATYNETS, E. TRAMBITSKY

The stress-strain state of cement systems is considered. The analysis of existing methods for the determination of cracks arising within concrete structures is presented. The strain gauge complex used to determine the stress-strain state of cement systems is presented, in which the depth sensor used by the authors has been improved. The technique of supporting the development of structural defects in the used cubic samples of cement paste is described. In parallel with the downhole sensor, the results were recorded by acoustic emission sensors and the SonicVisualizer software package. The purpose of the proposed method is to improve the accuracy of determining the nucleation and development of cracks in the sample according to the parameters of acoustic emission. According to the hypothesis, this system with higher reliability can receive areas of elastic deformations in cement systems, avoiding the accumulation of plastic deformations, which will further prevent the progressive destruction of concrete structures.

Keywords: *cement system, crack, deep sensor, acoustic emission, plastic deformation, progressive failure, residual life.*