

УДК 691.162

ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРЫ БЕТОНА

канд. техн. наук **Д.Н. ШАБАНОВ**; **А.Н. ЯГУБКИН**;
канд. физ.-мат. наук, доц. **С.А. ВАБИЩЕВИЧ**; **Е.С. БОРОВКОВА**; **Е.А. ТРАМБИЦКИЙ**
(Полоцкий государственный университет)

Приведены результаты экспериментальных исследований акустической эмиссии, возбуждаемых в бетонных образцах в режиме одноосного деформирования. Установлено, что в областях упругих и неупругих деформаций образца возникают сигналы акустической эмиссии. Получены экспериментальные данные, связывающие характеристики акустической эмиссии с механизмом деформирования бетонного образца. Приведенные закономерности могут послужить основой для создания критерия оценки степени опасности бетонных повреждений на объектах различного назначения.

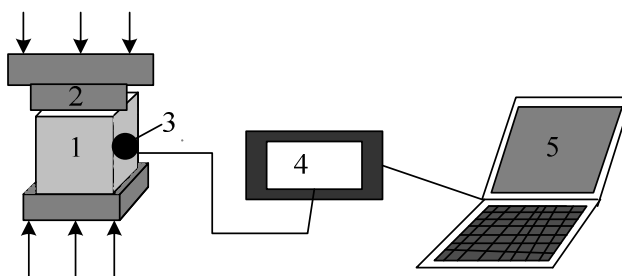
Ключевые слова: акустическая эмиссия, бетонные конструкции, динамика трещинообразования.

Введение. Одна из важных задач в строительстве – обеспечение безопасной эксплуатации объектов. При этом особое внимание представляют конструкции, изготовленные из бетона как наиболее распространенного и востребованного строительного материала.

В процессе эксплуатации строительного сооружения в бетоне накапливаются усталостные повреждения из-за воздействия влажности и коррозионных сред, различной силы и временной протяженности нагрузок, приводящие к микроразрывам в материале, колебаний температур, периодического замораживания и оттаивания, а также из-за нарушения контактов между цементным камнем и заполнителем. Эти повреждения на начальной стадии развития не обнаруживаются средствами магнитного, вихрекового и ультразвукового контроля, так как такие активные методы не несут информации о динамике развития дефектов и поведении объекта в процессе влияния перечисленных воздействий. Вопрос о безопасной эксплуатации таких деталей может быть решен только с использованием средств неразрушающего контроля (НК), чувствительных к малозначительным развивающимся дефектам. В связи с этим задача выявления растущих трещин, в том числе находящихся на начальной стадии развития, представляется особенно актуальной. Для решения такой задачи хорошо зарекомендовал себя интегральный метод обследования на основе явления акустической эмиссии (АЭ) [1].

Исследовательская часть. В данной работе проведен ряд экспериментальных исследований при заданной скорости нарастания нагрузки по испытанию бетонных образцов при их циклическом нагружении, вплоть до разрушения. В качестве экспериментального образца использовался бетонный камень кубической формы размером 100 × 100 × 100 мм. При испытаниях бетонного образца одновременно запускаются две программы: одна для регистрации параметров и полных сигналов АЭ, вторая – для регистрации механических величин. Эмиссия возникает только при напряжении, поэтому АЭ контроль обычно проводится путем нагружения контролируемого объекта.

Для проведения испытаний использовались: установка для нагружения – пресс гидравлический ПГМ -500МГ4А; пьезодатчик для регистрации АЭ; осциллограф и компьютер. Комплекс измерительного оборудования представлен на рисунке 1.



1 – образец из бетонного камня; 2 – пресс гидравлический;
3 – пьезодатчик; 4 – осциллограф; 5 – ЭВМ

Рисунок 1. – Компонетка экспериментального оборудования

В процессе нагружения контролируемого объекта в его материале происходят локальные изменения структуры, называемые пластической деформацией. Эти физические явления сопровождаются излу-

чением АЭ сигналов. Акустическая эмиссия представляет собой явление генерации волн напряжений, вызванных внезапной перестройкой в структуре материала. Классическими источниками АЭ является процесс деформирования, связанный с ростом дефектов, например, трещины или зоны пластической деформации, при фазовых превращениях, связанных с изменением кристаллической решетки [2].

Физическим механизмом акустической эмиссии является движение в веществе дислокаций и их скоплений [3]. Генерация и распространение волн напряжения в бетонных конструкциях имеет некоторые особенности. Сам по себе бетон – смесь многокомпонентных поликристаллов, которые взаимодействуют между собой по физико-химическим законам, при этом его структура включает в себя систему пор и микротрещин. Поэтому сигналы акустической эмиссии, распространяясь к поверхности образца, претерпевают существенные изменения вследствие дисперсии скорости звука, трансформации типов волн при дифракции, отражении, преломлении, затухании (рисунок 2). Особенность состоит еще и в том, что законы распространения акустических волн в бетоне имеют весьма сложный характер. Это обусловлено тем, что бетон является упруговязкопластичным неоднородным материалом, физико-механические свойства которого существенно отличаются от условно принятых свойств теоретической изотропной упругой среды. Бетон отличается непостоянством акустического сопротивления его составляющих: цементного камня; щебня или гравия; песка и пор, заполненных воздухом и водой [4].

Таким образом, на основании вышеперечисленного можно сделать вывод, что в бетоне при распространении акустических волн возникают сложные процессы дисперсии, дифракции, отражения и их преломления при распространении.

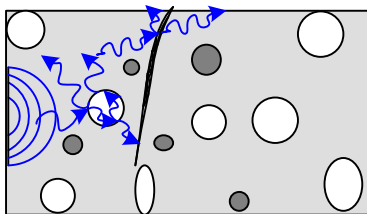


Рисунок 2. – Распространение акустических волн внутри образца

Вследствие многомодальности распространения, трансформации волн различных типов в твердом теле, затухания высокочастотных составляющих и резонансных свойств приёмной аппаратуры сигналы АЭ, регистрируемые на выходе датчика, имеют вид радиоимпульса с затухающей по экспоненте амплитудой колебаний (рисунок 3) [5].

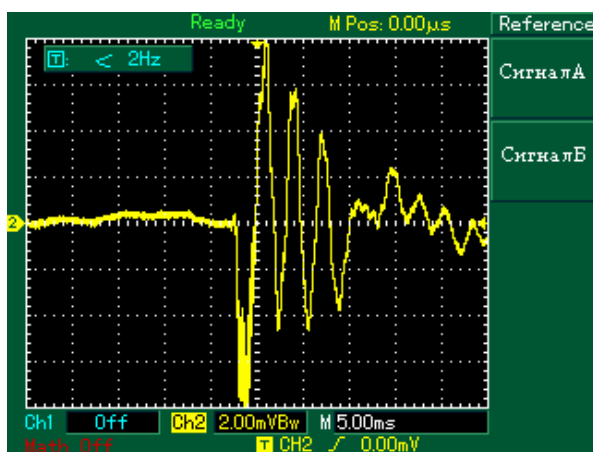


Рисунок 3. – Изображение сигнала акустической эмиссии на выходе преобразователя

Источник АЭ в образце излучает сферическую продольную и поперечную волну. При этом высокочастотная составляющая сигнала претерпевает ослабление, вследствие прямо пропорциональной зависимости коэффициента затухания в материале и частоты. Учитывая особенности распространения волн, перечисленных выше, возникают сигналы, амплитуда которых уменьшается с расстоянием намного медленнее, чем для сферической волны. Вследствие этого регистрируется преимущественно данный вид сигналов.

Основная задача АЭ контроля – выявление показателей, которые отображают образование и рост трещин в бетонной конструкции, таких как место и время образования, оценка размера трещины, ее эво-

люция. Поэтому важно выделить и обработать перечисленную информацию из общего массива данных. В первую очередь, применяют потоковые характеристики АЭ: активность, суммарный счет, число импульсов и скорость суммарного счета. На рисунке 4 представлены графики, связывающие потоковые характеристики с механизмом деформирования в процессе всего испытания бетонного образца.

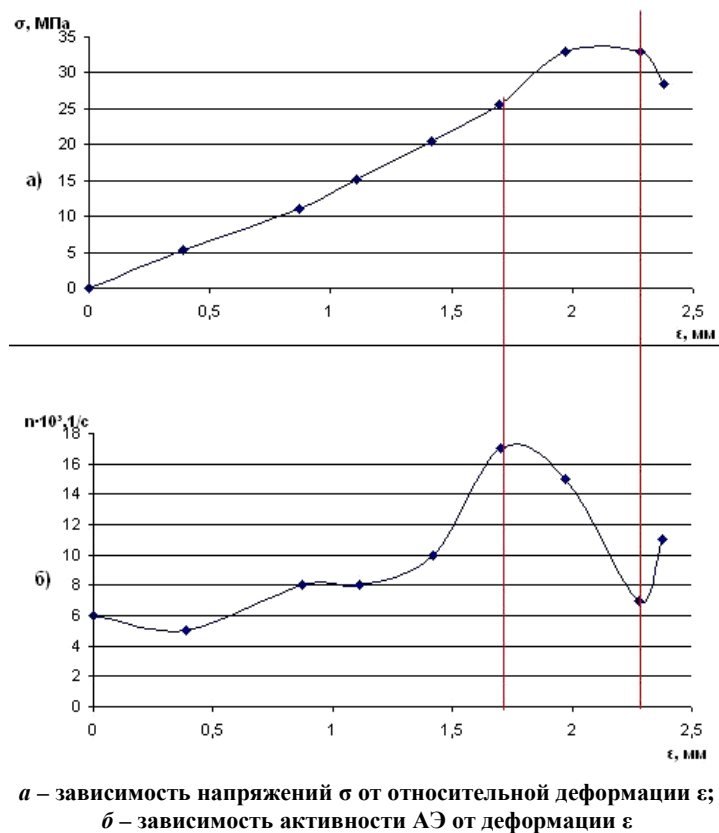


Рисунок 4. – Результаты АЭ испытаний бетонного камня

На начальном этапе циклических испытаний происходит накопление повреждений в области концентратора. В результате данных процессов генерируются акустико-эмиссионные сигналы, незначительно отличающиеся один от другого как по активности, так и по величине амплитуды. При разгрузке и повторном нагружении образца необходимо учитывать такое явление, как «эффект Кайзера» [6], согласно которому акустические сигналы отсутствуют в области упругих деформаций до тех пор, пока не будет превышена первоначальная нагрузка. Этим и объясняется вид графика в первой области на рисунке 4. В неоднородных по своей структуре материалах, т.е. имеющих, в том числе, и естественные трещины, возникает концентрация напряжений вблизи острого края дефекта. В связи с этим образуется локальная зона пластической деформации, от которой появляются импульсы АЭ. Пластическую деформацию связывают с большим количеством возникающих дефектов кристаллической решетки и их перемещением, образованием и движением дислокаций, двойникованием. Активность сигналов резко возрастает в момент перехода от упругой деформации к пластическому течению. Эта закономерность позволяет выявлять в контролируемом объекте локальные места с пластической деформацией и оценивать коэффициент концентрации напряжений [1]. Однако при дальнейшем нагружении образца на участке деформационного упрочнения наблюдается уменьшение регистрируемых импульсов АЭ (вторая область показана на рисунке 4). При увеличении локального напряжения до величины, превосходящей предел прочности материала, возникает скачкообразное увеличение дефекта, т.е. микровзрыв, что также сопровождается сигналами АЭ. Поэтому когда напряжение в образце приближается к исчерпывающему ресурсу материала, начинается резкий рост числа импульсов.

Для оценки состояния объекта и классификации выявленных источников можно воспользоваться критерием Иванова – Быкова (локально-динамический критерий) [7]. Данный критерий позволяет производить оценку в реальном масштабе времени с использованием следующих параметров: U_{i+1}^2 и U_i^2 – квадраты амплитуд соответственно последующего и предыдущего событий из источника, P_{i+1} и P_i – значения внешнего параметра (в данном случае в качестве этого параметра используем деформацию, мм) в моменты регистрации последующего и предыдущего событий соответственно. Здесь $i = 1, \dots, n$ – номер события.

По критерию Иванова – Быкова классификация источника производится следующим образом:

- источник I класса (пассивный), если $W_{i+1} \ll V_{i+1}$;
- источник II класса (активный), если $W_{i+1} < V_{i+1}$;
- источник III класса (критически активный), если $W_{i+1} > V_{i+1}$;
- источник IV класса (катастрофически активный), если $W_{i+1} \gg V_{i+1}$.

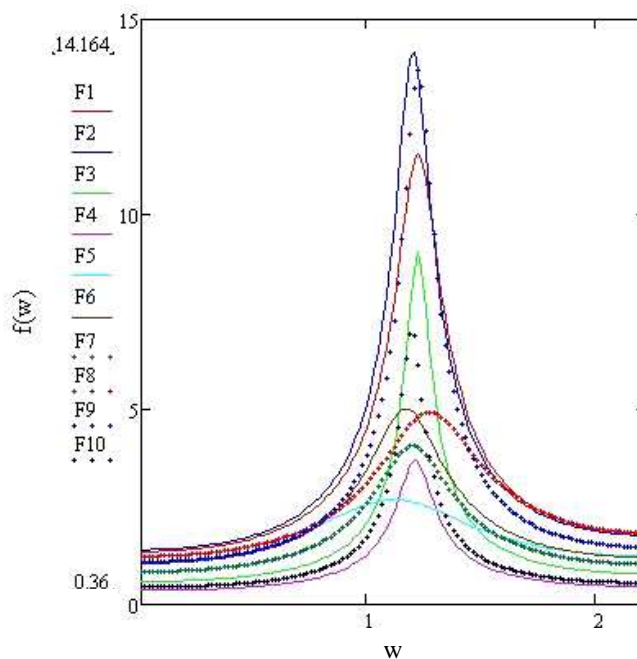
Здесь

$$W_{i+1} = \frac{U_{i+1}^2}{U_i^2}, \quad (1)$$

$$V_{i+1} = \left(1 + \frac{P_{i+1} - P_i}{P_i}\right)^4 - 1. \quad (2)$$

Приведем примеры некоторых конкретных расчетов, касающихся полученных данных в исследовании. Если воспользоваться точками из первой области, максимальная амплитуда, соответствующая деформации $P_1 = 1,11$ мм, $U_1 = 10,16$ мВ, а $U_2 = 2,72$ мВ и $P_2 = 1,42$ мм. Подставляя эти значения в (1) и (2), получим $W_2 = 0,000217$ и $V_2 = 1,203$. Значит, в этом случае источник пассивный. Если взять другие точки из третьей области $P_3 = 2,06$ мм, $U_3 = 5,76$ мВ и $U_4 = 9,12$ мВ, $P_4 = 2,28$ мм, получим $W_4 = 2,506$ и $V_4 = 0,44$, что относится к катастрофически активному источнику. Таким образом, теоретические вычисления подтверждают правоту обработанных экспериментальных данных.

Еще одной наглядной характеристикой АЭ является амплитудный спектр (рисунок 5). Как уже говорилось выше, из-за неоднородности структуры бетона его разрушение сопровождается предварительным развитием пластических деформаций вблизи концентраторов напряжений (дефектов в виде трещин). На начальной стадии нагружения образца происходит разрушение слабых связей между отдельными структурными элементами. Вследствие этого возникают неупругие деформации, что сопровождается значительной активностью акустической эмиссии, как видно из рисунка 5 (зависимости $F1 \dots F4$).



F1 соответствует нагрузке 22,9 кН; **F2** – 52,35 кН;
F3 – 102,3 кН; **F4** – 128 кН; **F5** – 178 кН; **F6** – 229 кН;
F7 – 280,2 кН; **F8** – 303,7 кН; **F9** – 332,2 кН; **F10** – ресурс образца исчерпан

Рисунок 5. – Амплитудный спектр

По мере дальнейшего увеличения нагрузки количество прочных связей между отдельными структурными элементами также увеличивается, при этом активность АЭ уменьшается. При достижении некоторых значений напряжений в образце достигается состояние максимального уплотнения. Это состояние

характеризуется минимумом действующих и возникающих дефектов, а значит и минимумом активности АЭ, возникающей под влиянием нагружения [8]. На графике (см. рисунок 5) это можно проследить на участках F5...F7. При превышении нагрузкой некоторого порогового значения происходит образование новых дефектов, а значит и рост амплитуды сигнала, что видно на рисунке 5 (участки F8...F10).

Таким образом, в заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) с помощью регистрации данных акустической эмиссии определена связь между акустическими сигналами и деформационными изменениями в бетонных образцах;

2) опираясь на результаты проведенных исследований, можно говорить о возможности использования метода акустической эмиссии в качестве сопровождения бетонных объектов, что выражается в получении информации о возникновении и развитии опасных состояний в режиме реального времени, а также определении ресурса на любой стадии эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бехер, С.А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии : учеб. пособие / С.А. Бехер, А.Л. Бобров. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2013. – 145 с.
2. Полок, А. Акустико-эмиссионный контроль / А. Полок // Physical Acoustics Corporation (PAC) // Металлы (Metals handbook). – 9-е изд., Т. 17, ASM International. – 1989. – С. 278–294.
3. Красильников, В.А. Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов. – М. : Наука, 1984. – 403 с.
4. Дурасов, А.С. Физические методы контроля качества бетона / А.С. Дурасов, Н.А. Крылов. – М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву, архитектуре и строительным материалам, 1959. – 103 с.
5. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций [и др.] ; под ред. Л.Н. Степановой. – М. : Радио и связь, 2000.
6. Kaiser, J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen / J. Kaiser // Archiv für das Eisenhüttenwesen. – 1953. – Bd 24, № 1/2. – S. 43–45.
7. Иванов, В.И. О критериях оценки степени опасности дефекта по параметрам акустической эмиссии / В.И. Иванов, С.П. Быков, А.Н. Рябов. – Дефектоскопия. – 1985. – № 2. – С. 62–68.
8. Нарышкин, Д.А. Особенности акустико-эмиссионного корреляционного контроля разрушения горных пород / Д.А. Нарышкин // Сб. трудов Всероссийской науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения А.В. Римского-Корсакова, Москва, 10–11 нояб. 2010 г. ; АКИН. – М. : ГЕОС, 2010. – С. 139–142.

Поступила 11.06.2019

PARAMETERS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS AND THEIR APPLICATION IN MONITORING THE STATE OF THE CONCRETE STRUCTURE

**D. SHABANOV, A. YAGUBKIN,
S. VABISHCHVICH, E. BOROVKOVA, E. TRAMBICKIJ**

The results of experimental studies of acoustic emission excited in concrete samples under uniaxial deformation are presented. It is established that acoustic emission signals appear in the areas of elastic and inelastic deformations of the sample. Experimental data were obtained linking the characteristics of acoustic emission with the mechanism of deformation of a concrete sample.

Keywords: *acoustic emission, concrete structures, crack formation dynamics.*