

УДК 620.179.17

## МОНИТОРИНГ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ФИБРОБЕТОНА ПО ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

*Е.С. Боровкова, Д.Н. Шабанов*

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь  
e-mail: e.borovkova@psu.by, d.shabanov@psu.by

*Приведены результаты акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга структурных изменений бетона с добавлением стальной фибры. Представлены основные характеристики акустических сигналов, возникающих в образцах при одноосном нагружении. Определена связь между прочностными и АЭ характеристиками каждого образца.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, бетонные образцы, стальная фибра.

## MONITORING OF THE STRUCTURAL STATE OF FIBER CONCRETE BY PARAMETERS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

*E. Borovkova, D. Shabanov*

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus  
e-mail: e.borovkova@psu.by, d.shabanov@psu.by

*The results of acoustic emission (AE) monitoring of structural changes in concrete with the addition of steel fiber are presented. The main characteristics of acoustic signals arising in samples under uniaxial loading are presented. The relationship between the strength and AE characteristics of each sample is determined.*

**Keywords:** acoustic emission, concrete samples, steel fiber.

**Введение.** В настоящее время метод акустической эмиссии является одним из наиболее распространенных и широко развиваемых методов неразрушающего контроля [1]. Акустико-эмиссионный метод контроля основан на регистрации акустических сигналов, вызванных перестройкой внутренней структуры материала при силовых, температурных или коррозионных процессах. Современная акустико-эмиссионная аппаратура обеспечивает одновременную регистрацию и обработку параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) по нескольким независимым каналам с высокой частотой оцифровки, которая составляет несколько десятков тысяч измерений в секунду. Высокая чувствительность АЭ метода к динамике процессов, протекающих в материале конструкции при изменении напряженно-деформированного состояния, делает его незаменимым при диагностике состояния объекта [2].

**Оборудование и материалы для экспериментальных исследований.** Для измерения параметров АЭ использовалась цифровая АЭ системы серии A-Line DDM–1 производства ООО "ИНТЕРЮНИС-ИТ". АЭ система представляет собой 8-канальную систему сбора и обработки акустико-эмиссионной информации. АЭ-оборудование работает только с электрическими сигналами, поэтому пьезоэлектрические преобразователи в основном используются для приема и излучения акустических волн, преобразования акустических колебаний в колебания электрического напряжения и наоборот [2]. Поэтому для регистрации и преобразования энергии упругих механических волн в электрический сигнал к АЭ-модулям были подключены полосо-

вые преобразователи производства ООО "Донские измерительные системы" – GT200 с рабочим диапазоном частот от 130 до 200 кГц. Преобразователи АЭ крепились на две боковые поверхности балки.

В таблице 1 представлены материалы исследуемых образцов. Армирование стальными фибрами изменяет свойства материала, в результате добавления стальных волокон образуется новый композит – сталефибробетон [3]. Размеры балок: длина – 450 мм, высота – 150 мм, ширина – 150 мм. Бетонирование проводилось в металлических формах.

Таблица 1. – Характеристики материалов, используемые для изготовления исследуемых образцов

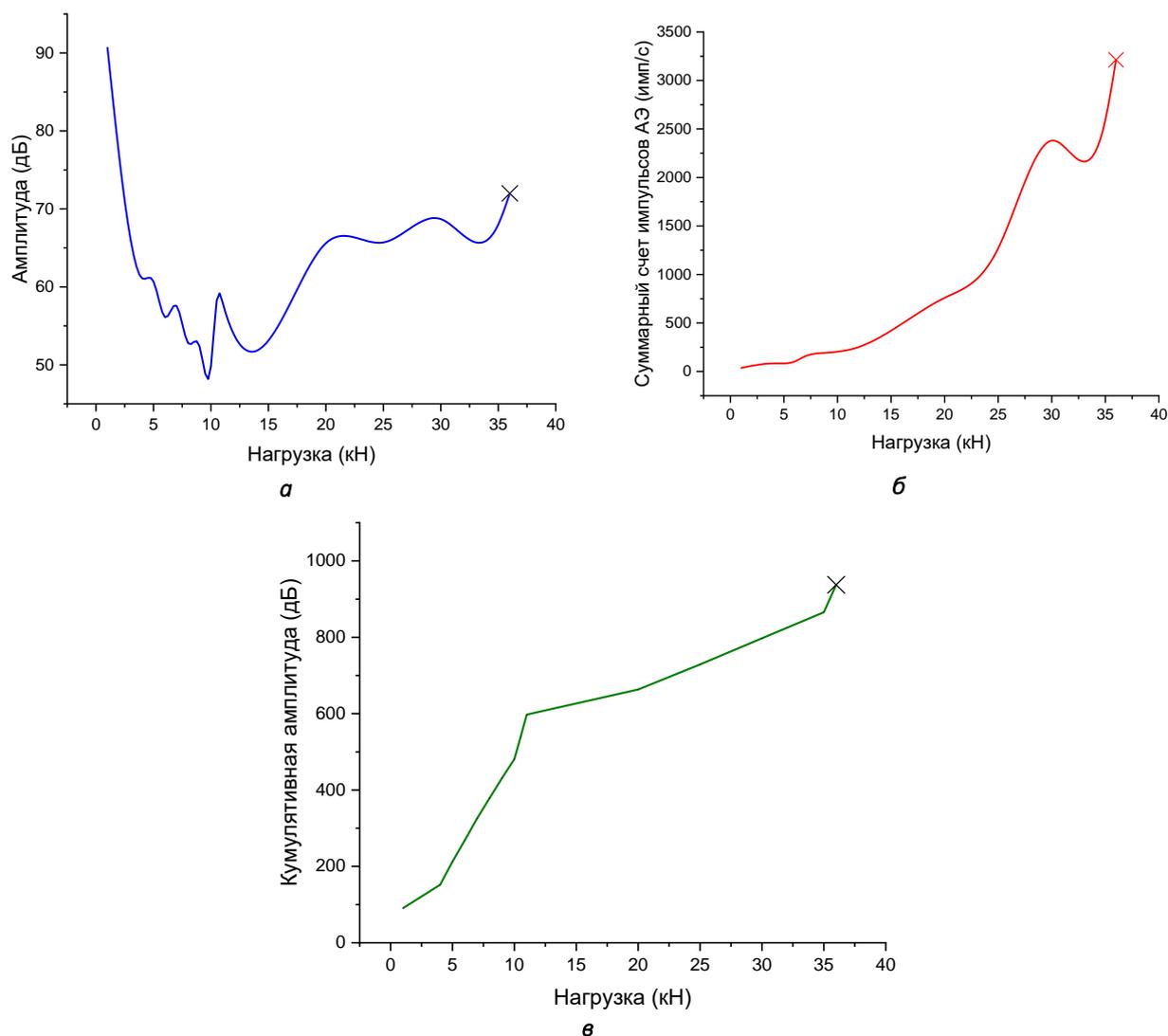
Материал	Основные сведения	Масса, кг
Вяжущее	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ОАО «КРИЧЕВЦЕМЕНТНОШИФЕР»), с удельной поверхностью 3615 см <sup>2</sup> /г, нормальной густотой НГ=26,5%	11
Песок	Песок карьерный отсеянный фракции до 5 мм	12
Щебень	Щебень фракции 5–25 мм	26
Армирующий материал	Фибра стальная анкерная диаметром 1 мм и длиной 50 мм (РУП «Белорусский металлургический завод»)	40 кг на 1 м <sup>3</sup>

**Исследовательская часть.** При лабораторных испытаниях запускались две программы: одна для регистрации параметров сигналов АЭ и вторая - для регистрации механических величин. Для испытаний были использованы установка, представленная на рисунке 1. Нагрузка прикладывалась к центральной части балки ступенями. На этапе приложения нагрузки и выдержки под нагрузкой регистрировались сигналы АЭ.



Рисунок 1. – Внешний вид экспериментального оборудования

При превышении механического напряжения на образец некоторого порогового значения для разрушения фибробетона требуется дополнительная энергия для преодоления вязкости волокон и вытягивания их из цементной матрицы. Это улучшает общую несущую способность бетона, что приводит к увеличению энергии, необходимой для разрушения [4]. На рисунке 2 представлены графики зависимости акустических характеристик сигналов АЭ (амплитуда, суммарный счет импульсов, кумулятивная амплитуда).



**а** – зависимость амплитуды сигналов АЭ от разрушающей силы  $F$ ; **б** – зависимость суммарного счета импульса АЭ от разрушающей силы  $F$ ; **в** – зависимость кумулятивной амплитуды АЭ от разрушающей силы  $F$ ; X – обозначено разрушение образца

Рисунок 2. – Взаимосвязь между механическими и АЭ характеристиками лабораторных образцов

Зависимость динамического напряжения от деформации фибробетона может быть разделена на стадии уплотнения, линейной упругости, пластической текучести и разрушения [5]. На начальном этапе циклических испытаний происходит разрушение слабых межзатомных связей, т.к. для их разрыва требуется приложение наименьшей нагрузки. Разрушение происходит в результате концентрации механических напряжений в областях, в которых возникла наименьшая энергия связи между отдельными структурными элементами, зависящая от их взаиморасположения и объемного содержания [1]. Это сопровождается значительной активностью

акустической эмиссии. На стадии линейной упругости нагрузка воспринимается как цементной основой, так и волокном, количество прочных межатомных связей увеличивается из-за разрушения слабых связей между структурными элементами образца при меньших нагрузках, а вследствие этого активность АЭ уменьшается. После достижения стадии текучести наблюдается зарождение и распространение микротрещин в бетоне, и волокно начинает рассеивать большое количество энергии. На стадии разупрочнения изолированные трещины постепенно расширяются и соединяются между собой, образуя зону разрушения [5]. При этом акустические характеристики сигналов АЭ резко увеличиваются.

Под действием динамической нагрузки волокна фибробетона могут передавать напряжение на окружающую их цементную основу, препятствуя образованию и распространению трещин и тем самым изменяя динамические свойства исходного бетона [4].

**Заключение.** Метод акустической эмиссии позволяет определить параметры эксплуатационных и предельных напряженно-деформированных состояний при силовых воздействиях. Опираясь на приведенные исследования, возникает возможность использовать метод акустической эмиссии, как структурно чувствительный метод, в качестве сопровождения строительных объектов, при этом массивных и густоармированных конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боровкова, Е.С. Физические свойства структурных изменений в бетоне / Е.С. Боровкова, Д.Н. Шабанов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. – 2021. – №8: Строительство и архитектура. – С. 39–42.
2. Бехер, С.А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии: учеб. пособие / С.А. Бехер, А.Л. Бобров. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2013. – 145 с.
3. Серова Р.Ф. Исследование физико-механических свойств дисперсно-армированных бетонов / Р.Ф. Серова, Г.М. Рахимова, Е.А. Стасилович, С.Ж. Айдарбекова // Эпоха науки №14. Технические науки. – 2018. – С. 192-195.
4. Гонов М.Е. Обзор механических свойств фибробетонов при динамическом растяжении и сжатии / Гонов М.Е., Макаров Н.С., Игумнова О.Л., Сабаяева Т.А., Денисова Н.А. // Проблемы прочности и пластичности, т. 85, № 1, 2023 г. – С. 120-142.
5. Xia W., Xu J., Nie L., Wang Z., Huang Z., Yao A. Dynamic compressive mechanical properties of carbon nanofibers reinforced concrete under impact load. *Materials Reports*. 2021. Vol. 35. Iss. 22. P. 22063–22071. <https://doi.org/10.11896/cldb.20100229>.
6. ГОСТ Р 52727—2007 Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
7. Aggelis D.G., Polyzos D., Philippidis T.P. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results / Aggelis D.G., Polyzos D., Philippidis T.P. // *Journal of the Mechanics and Physics of solids* 2005. – P. 857–883.
8. Koen VAN DEN ABEELE, Geert DE SCHUTTER, Martine WEVERS. Non Destructive Online Evaluation of Concrete Hardening Using Acoustic Emission and Harmonic Wave/. Koen VAN DEN ABEELE, Geert DE SCHUTTER, Martine WEVERS // *Spectroscopy*, 2006. – P. 1–9.
9. Rustem Gul, Ramazan Demirboga, Tekin Guvercin. Compressive strength and ultrasound pulse velocity of mineral admixture mortars / Rustem Gul, Ramazan Demirboga, Tekin Guvercin // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, v. 13, 2006. – P. 18–24.
10. Release 16.2 Documentation for ANSYS [electronic document] / ANSYS Inc. Electronic data and software.
11. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.Y. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications / Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.Y. – Springer. 2009. – 321 p.
12. Сагайдак, А. И. Применение акустико-эмиссионных критериев для исследования процессов деформирования и разрушения конструкций из железобетона / А. И. Сагайдак, Е. С. Боровкова // *Бетон и железобетон*. – 2023. № 3 (617). – С. 38–44.