

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-10-55-63>

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ОБРАЗЦА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА

© Людмила Рафаиловна Ботвина^{1*}, Александр Николаевич Шувалов²,
Марат Равилевич Тютин¹, Татьяна Борисовна Петерсен³,
Виктор Петрович Левин¹, Максим Владимирович Федоров²

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Россия, 119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49; *e-mail: botvina@imet.ac.ru

² НОЦ ИС НИУ МГСУ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26

³ ООО «Диапак», Россия, 125367, Москва, ул. Габричевского, д. 5, корп. 1.

*Статья поступила 5 декабря 2018 г. Поступила после доработки 12 февраля 2019 г.
Принята к публикации 27 июня 2019 г.*

Одной из важных особенностей разрушения гетерогенных материалов с концентратором напряжения является масштабный эффект, связанный с зависимостью номинального напряжения от размера образца. Этот эффект необходимо учитывать при изучении процесса разрушения бетона для повышения безопасности эксплуатации бетонных конструкций. Цель данной работы — исследование влияния размеров образцов с надрезом из бетона класса В25 ($R = 28$ МПа) на прочностные характеристики и параметры акустической эмиссии, регистрируемой в процессе разрушения. Проведены испытания на трехточечный изгиб с регистрацией сигналов АЭ образцов трех размеров (длиной 1075, 465 и 215 мм), геометрия которых отвечала двумерному подобию, поскольку толщина образцов не менялась, а отношения длины образца и длины надреза к ширине оставались постоянными. Путем плоскостной локализации сигналов АЭ на более крупных образцах оценены размеры зоны локализации процесса разрушения на разных стадиях развития трещины и построена зависимость размера зоны от времени. На малых образцах размер зоны локализации определяли путем измерения коэффициента затухания ультразвука. С помощью анализа диаграмм нагружения, совмещенных с временными зависимостями параметров АЭ, установлено, что размер образца оказывает влияние на стадийность разрушения. Построены зависимости номинальной прочности, энергии разрушения, $b_{АЭ}$ -параметра и суммарного числа сигналов АЭ от размера образцов. Установлено, что для образцов больших размеров размерный эффект связан со снижением номинального напряжения и накопленного числа сигналов акустической эмиссии, увеличением энергии разрушения и $b_{АЭ}$ -параметра. Предполагается, что изменение характеристик АЭ с увеличением размера образца связано с уменьшением относительной доли структурной неоднородности (отношением среднего размера гранитного щебня к размеру образца) в образцах большего размера. Получены новые данные о влиянии размера образцов из бетона на акустические характеристики.

Ключевые слова: бетон; трехточечный изгиб; акустическая эмиссия; размерный эффект; ультразвуковое затухание; зона процесса.

EFFECT OF THE SAMPLE SIZE ON THE MECHANICAL AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF CONCRETE

© Lyudmila R. Botvina^{1*}, Alexander N. Shuvalov², Marat R. Tyutin¹,
Tatyana B. Petersen³, Viktor P. Levin¹, Maxim V. Fedorov²

¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials sciences of Russian Academy of Sciences, 49 Leninskiy prosp., Moscow, 119334, Russia; *e-mail: botvina@imet.ac.ru

² Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoe sh., 26, Moscow, 129337, Russia.

³ LLC "Diapac", Gabrichевского ul., 5/1, Moscow, 125367, Russia.

Received December 5, 2018. Revised February 12, 2019. Accepted June 27, 2019.

One of the important features of the fracture of heterogeneous materials with a stress concentrator is the scale effect associated with the dependence of the nominal stress on the specimen size. This effect must be considered when studying the fracture process of concrete to improve the operation safety of concrete structures. The purpose of this work is to study the size effect of the specimens with a notch made of a concrete (class B25, $R = 28$ MPa) on the strength characteristics and parameters of the acoustic emission

(AE) recorded in the process of fracture. Three-point bend tests with registration of AE signals were carried out using specimens of three sizes (1075, 465, and 215 mm long), their geometry corresponded to two-dimensional similarity, since the thickness of the specimens remained unchanged, and both length to width ratio for the specimen and notch remained constant. The size of the zone of fracture localization at different stages of crack development were estimated on the larger specimens using planar AE location and the time dependence of the zone size was plotted. The size of the localization zone of small specimens was determined by measuring the ultrasound attenuation coefficient. Analysis of the loading diagrams combined with the time dependences of the AE parameters revealed that the specimen size affects the fracture staging. The dependences of the rated strength, fracture energy, b_{AE} -parameter, and the total number of AE signals on the specimen size are plotted. It is shown that the size effect is associated with a decrease in the rated stress for the large-sized specimens and number of accumulated acoustic emission signals, as well as with an increase in the fracture energy and b_{AE} -parameter. It is assumed that change in the AE characteristics with increasing size of the specimen is attributed to a decrease in the relative fraction of structural heterogeneity (the ratio of the average size of granite aggregate to the specimen size) in large specimens. New data were obtained regarding the effect of the size of concrete specimens on the acoustic characteristics.

Keywords: concrete; three-point bending; acoustic emission; size effect; ultrasonic attenuation; process zone.

Разрушение квазихрупких материалов, типичным представителем которых является бетон, сопровождается стабильным ростом трещины вплоть до разрушения и развитием большой зоны локализации в устье надреза образца, приводящей к отклонению кривой номинальное напряжение — размер образца от степенной квадратичной зависимости, соответствующей соотношению линейной механики разрушения. Эта особенность квазихрупких материалов, являющаяся следствием гетерогенности их структуры, была обнаружена Р. Walsh [1] при испытании геометрически подобных образцов с надрезом из бетона. Z. Bazant [2 – 4] предложил соотношения для оценки номинального напряжения и энергии разрушения образцов с надрезом различного размера из квазихрупких материалов. Эти соотношения учитывали переход от гладких образцов, не проявляющих размерный эффект, к надрезанным образцам, при испытании которых этот эффект обнаруживался. К подобным соотношениям пришли и авторы работы [5]. Альтернативный подход, основанный на идее фракталов, разработали А. Carpinteri с коллегами [6, 7] в целях описания размерного эффекта и оценки номинального напряжения.

Параллельно с анализом размерного эффекта развивались исследования взаимосвязи характеристик разрушения квазихрупких материалов с физическими свойствами, в частности, с параметрами акустической эмиссии (АЭ) и ультразвуковыми параметрами. В качестве диагностического показателя акустической эмиссии при разрушении бетонов авторы [8 – 11] успешно использовали b_{AE} -параметр, характеризующий амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии. Установлена корреляция динамики b_{AE} -параметра со стадийностью процесса разрушения при нагружении образцов, в частности, снижение данного параметра перед достижением

нагрузки, соответствующей пределу прочности материала.

Другим эффективным инструментом исследования взаимосвязи характеристик разрушения квазихрупких материалов с физическими свойствами, который использовали в данной работе, является ультразвуковой метод, позволяющий измерять скорость и коэффициент затухания ультразвуковых (УЗ) волн. В ряде работ [12] получена эмпирическая связь между прочностью бетона и скоростью распространения ультразвуковых волн: более высокая скорость ультразвука коррелирует с более высокой прочностью при прочих равных условиях. Однако для бетона, представляющего собой материал со сложной гетерогенной структурой, скорость распространения УЗ волн является менее чувствительной характеристикой к его внутренней структуре, чем коэффициент затухания продольной ультразвуковой волны.

Корреляционные связи между коэффициентом затухания ультразвуковых волн и механическими свойствами бетонов менее изучены и проведение исследований в этом направлении представляется важным.

Цель работы состояла в изучении размерного эффекта, прочностных и акустических свойств бетона, широко используемого в промышленности.

Материал и методы исследования

Исследовали бетон класса В25 ($\bar{R} = 28$ МПа) со средним размером структурных составляющих (d) из гранитного щебня, равным 5 – 10 мм. Твердение бетона осуществлялось в естественных условиях при температуре 20 °С в течение 28 суток.

Для изучения влияния масштабного фактора на процесс разрушения бетона (по аналогии с работой [13]) испытывали малые, средние и боль-

шие образцы длиной (L) 1075, 465 и 215 мм и шириной (D) 40, 93 и 215 мм соответственно (рис. 1). Толщина (h) всех образцов была одинаковой ($h = 40$ мм), отношения длин $L_1/L_2 = L_2/L_3 = 5$, отношение длины к ширине $L/D \approx 2,3$, отношение длины надреза к ширине образцов $l/D \approx 0,3$. Поскольку толщина была постоянной, а изменялись длина и ширина образцов, можно считать, что геометрия образцов отвечала двумерному подобию. Для всех образцов бетона средний размер структурных неоднородностей $d_{cp} = 7,5$ мм. Было испытано по три образца каждого размера.

Испытания бетонных образцов на трехточечный изгиб (см. рис. 1) проводили на испытательной машине Instron 3382 (максимальная нагрузка 100 кН) со скоростью нагружения от 0,2 до 0,5 мм/мин. Одновременно в процессе нагружения регистрировали акустическую эмиссию (АЭ), используя многоканальную АЭ систему EXPRESS-8 производства МИСТРАС (США). Для фильтрации шумов от нагружающего устройства и электромагнитных (ЭМ) помех, а также идентификации различных классов источников АЭ параметров, регистрировали также оцифрованные формы сигналов. При этом частота дискретизации составляла 1 МГц, рабочий диапазон частот — 20 – 400 кГц, длина выборки формы сигнала — 2048 точек, амплитудный порог регистрации — 35 дБ. На предварительном этапе проведена калибровка АЭ системы с использованием в качестве источника звука имитатора Су – Нильсена. В результате оценены скорость и затухание звука в бетоне: средняя скорость составила 4,38 мм/мкс, кривая затухания звука, полученная вблизи источника, приведена на рис. 2.

Стадийность разрушения бетонных образцов изучали по данным акустической эмиссии, определяя АЭ характеристики потока сигналов на различных стадиях нагружения, в том числе суммарное число сигналов $\Sigma N_{АЭ}(t)$, активность акустической эмиссии $\dot{N}_{АЭ}(t)$, а также $b_{АЭ}$ -параметр, отражающий долю высокоамплитудных сигналов и оцениваемый по соотношению [14]

$$20 \log N_{АЭ} = \text{const} - b_{АЭ} A_{(дБ)}. \quad (1)$$

Для оценки размеров зон деформации в вершине надреза применяли локацию АЭ источников. При испытании малых образцов ($L = 215$ мм) выполняли линейную локацию, а при испытании средних и больших образцов ($L = 465$ и $L = 1075$ мм) — плоскостную локацию с использованием четырех датчиков, установленных на одной стороне образца (см. рис. 1).

Для определения размеров зоны локализации разрушения (зоны процесса) в образце наименьшего размера применяли ультразвуковой

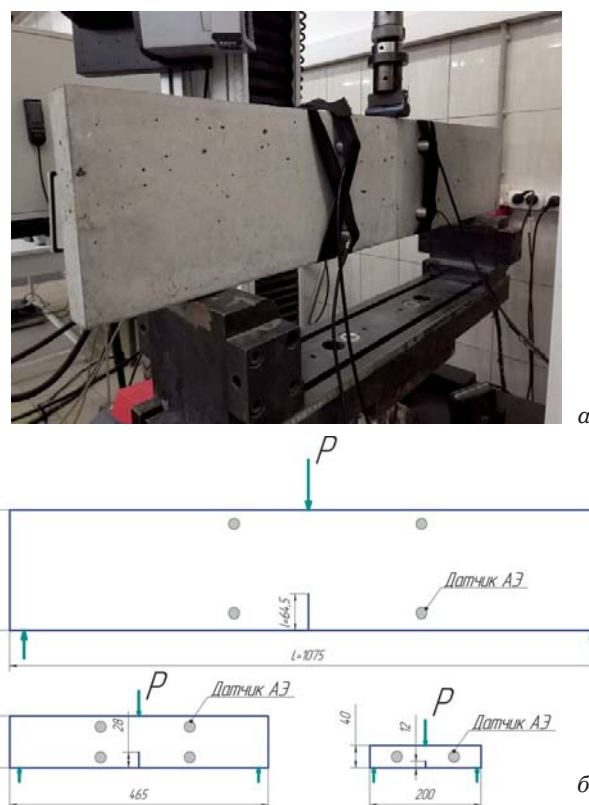


Рис. 1. Схема нагружения (а) и геометрия испытанных образцов с указанной расстановкой датчиков АЭ (б)

Fig. 1. The loading scheme (a) and geometry of tested samples with the indicated placement of the AE sensors (b)

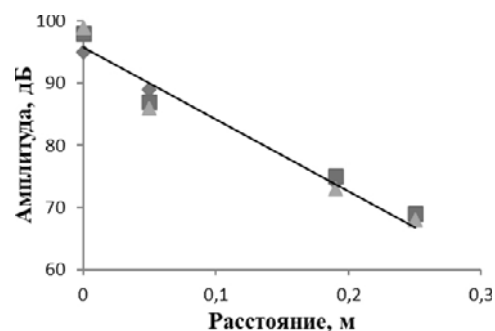


Рис. 2. Амплитудная зависимость сигналов АЭ от расстояния до источника излучения звука — имитатора Су – Нильсена: экспериментальные точки соответствуют трем сериям измерений; коэффициент затухания, оцененный по углу наклона кривых, составил 0,12 дБ/мм

Fig. 2. Amplitude dependence of the AE signals on the distance to the Hsu – Nielsen source. Experimental points correspond to three series of measurements. The attenuation coefficient value estimated from the slope of the curves is 0.12 dB/mm

метод неразрушающего контроля [15]. Коэффициент затухания α продольных ультразвуковых волн на частоте 2,25 МГц измеряли с помощью ультразвукового дефектоскопа Epoch-4. Диаметр преобразователя составлял 10 мм. Коэффициент

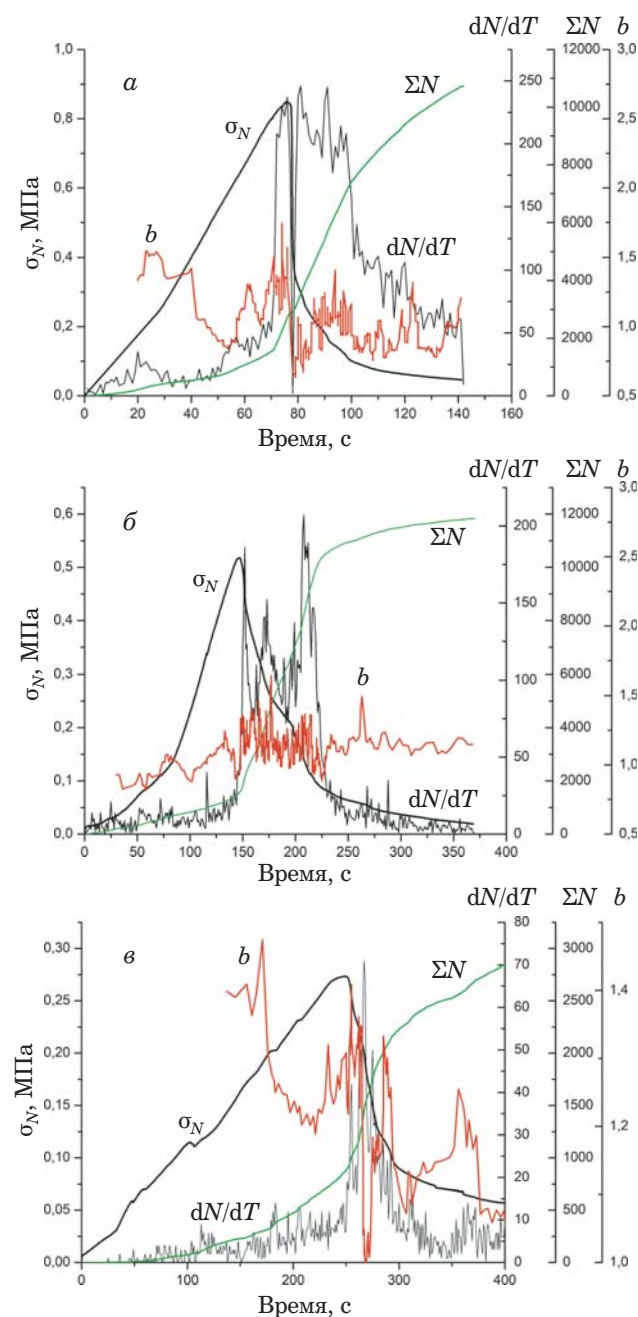


Рис. 3. Диаграммы деформирования и временные зависимости показателей акустической эмиссии: активности (N_{AE}), суммарного числа сигналов (ΣN_{AE}) и b_{AE} -параметра при испытании образцов из бетона трех размеров: 40 × 200 мм (а), 93 × 465 мм (б) и 215 × 1075 мм (в)

Fig. 3. Deformation diagrams and time dependences of the acoustic emission parameters: intensity (N_{AE}), total number of signals (ΣN_{AE}) and b_{AE} -parameter upon testing concrete specimens of three sizes: 40 × 200 mm (a), 93 × 465 mm (b), 215 × 1075 mm (c)

затухания ультразвуковых волн определяли по формуле

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \frac{A_{i+1}}{A_i},$$

где A_i и A_{i+1} — амплитуды АЭ сигналов.

Номинальную прочность (σ_{Nu}) оценивали по максимальной нагрузке (P_u), зафиксированной при разрушении образцов [16]:

$$\sigma_{Nu} = C_N \frac{P_u}{hD}, \quad (2)$$

где C_N — коэффициент, учитывающий форму образца и в нашем случае принятый равным единице.

Работу разрушения (W_F) определяли по площади под диаграммой нагружения образца в координатах нагрузка — перемещение, энергию разрушения (G_F) — по соотношению [17]

$$G_F = \frac{W_F}{hD(1 - \beta_0)}, \quad (3)$$

где β_0 — относительная длина надреза, равная отношению длины надреза к ширине образца (l/D).

Результаты испытаний

В таблице и на рис. 3 представлены механические и акустические характеристики бетона, оцененные при испытании образцов различной длины и ширины. При испытании бетона, как и любых других гетерогенных материалов, наблюдался существенный разброс экспериментальных данных. Поэтому в таблице представлены средние значения оцененных характеристик, а на рис. 3 — типичные диаграммы деформирования и изменения показателей акустической эмиссии. Из этих данных следует, что хотя номинальная прочность повышается с уменьшением размера образца, работа разрушения, оцененная при испытании малого образца, намного ниже полученной для образцов больших размеров. Это связано с тем, что при увеличении размера образца площадь под кривой нагружения растет, что, в свою очередь, является следствием различия в кинети-

Механические и акустические характеристики бетона, оцененные при испытании образцов различной длины и ширины
Mechanical and acoustic characteristics of concrete assessed by testing specimens of different lengths and widths

Ширина образца D , мм	P_u , кН	G_F , Н/м	σ_{Nu} , МПа	b_{AE}	ΣN_{AE}	d_{cp}/D
40	0,45	170	0,85	1,06	10 383	0,19
93	0,70	221	0,49	1,27	9771	0,08
215	0,48	222	0,34	1,44	4036	0,03

ке зарождения и роста магистральной трещины в образцах трех размеров.

Изучение временных зависимостей показателей акустической эмиссии испытанных образцов (см. рис. 3) позволило обнаружить следующие особенности.

1. При испытании малых образцов пик активности АЭ соответствует максимальной нагрузке ($P_{\max}$). Дальнейшее нагружение приводит к снижению активности. Следующий пик соответствует нагрузке, составляющей $\sim 50\% P_{\max}$. Наблюдаемые пики соответствуют двум точкам перелома на временной зависимости суммарного числа сигналов акустической эмиссии.

2. При испытании образцов средней толщины пики активности и точки перелома на временных зависимостях акустических параметров смещены вправо от максимальной нагрузки.

3. При испытании больших образцов второй пик становится много меньше или исчезает совсем, а суммарное число сигналов АЭ, соответствующее первому перелому на временной зависимости накопленного числа сигналов, становится значительно больше, чем при испытании образцов других размеров.

4. Наблюдается повышение накопленного числа сигналов акустической эмиссии с уменьшением размера образца.

5. Временные зависимости $b_{\text{АЭ}}$ -параметра имеют немонотонный характер, но максимальной нагрузке чаще всего предшествует его снижение, что подтверждает возможность использования этого параметра при прогнозировании разрушения.

Результаты оценки $b_{\text{АЭ}}$ -параметра представлены также в таблице и на рис. 4, где показаны амплитудные распределения сигналов АЭ, описываемые степенными соотношениями с показателями, равными $b_{\text{АЭ}}$ -параметрам. Из представленных данных следует, что указанный пара-

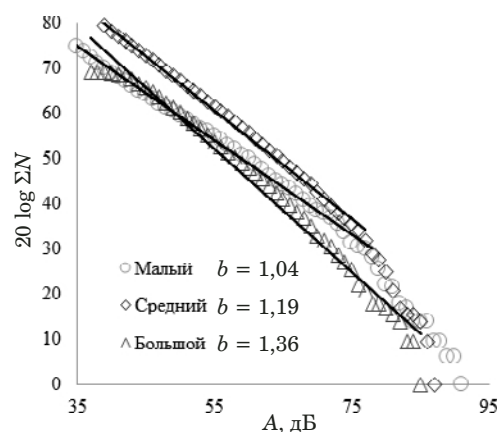


Рис. 4. Амплитудные зависимости накопленного числа сигналов акустической эмиссии и значения $b_{\text{АЭ}}$ -параметра, оцененные для образцов разного размера

Fig. 4. Amplitude dependences of the accumulated number of acoustic emission signals and b_{AE} -values estimated for the specimens of different sizes

метр возрастает с увеличением размера образца и его зависимость от ширины образца D выражается степенным соотношением с показателем $\sim 0,18$ ($R^2 = 0,99$) (рис. 5):

$$b_{\text{АЭ}} = 0,5D^{0,18}.$$

Зависимость накопленного числа акустических сигналов $\Sigma N_{\text{АЭ}}$ также описывается степенной зависимостью с показателем $\sim -0,55$ ($R^2 = 0,99$):

$$\Sigma N_{\text{АЭ}} = 6,2D^{-0,55}.$$

Возникает вопрос, какова причина снижения накопленного числа акустических сигналов и повышения $b_{\text{АЭ}}$ -параметра АЭ с увеличением размера образца? Возможно, ответ на этот вопрос следует искать в структуре исследуемого бетона, вернее в изменении относительной доли структурной неоднородности ($d_{\text{ср}}/D$), которая увеличи-

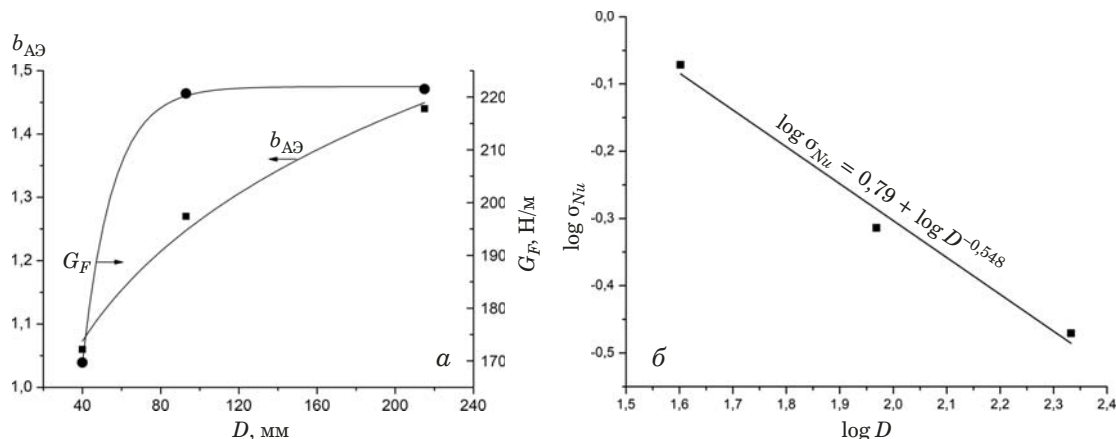


Рис. 5. Зависимости $b_{\text{АЭ}}$ -параметра, энергии разрушения G_F (а) и номинальной прочности σ_{Nu} (б) от размера образца D

Fig. 5. The dependences of the b_{AE} -parameter, fracture energy G_F (a) and rated strength σ_{Nu} (b) on the specimen size D

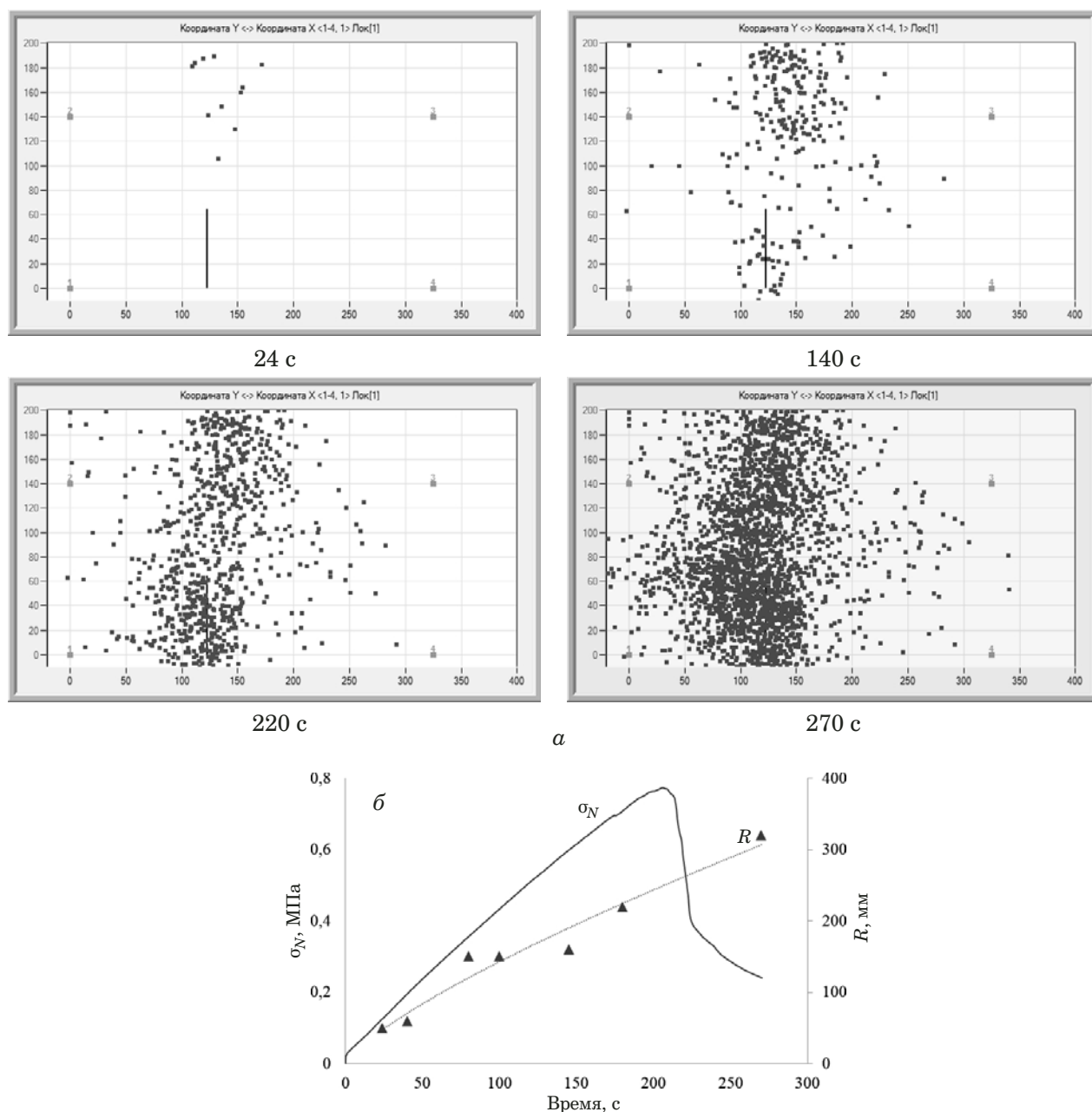


Рис. 6. Результаты локации АЭ сигналов (а) и временные зависимости номинального напряжения и размера зоны локализации разрушения R (б) в образце наибольшего размера ($D = 1075$ мм)

Fig. 6. The results of the AE signal location (а) and the time dependences of the rated stress and size of the zone of fracture localization R (б) in the largest sample ($D = 1075$ mm)

вается с уменьшением размеров образца. Согласно данным, представленным в таблице, число сигналов АЭ растет, а $b_{\text{АЭ}}$ -параметр снижается с увеличением относительной доли структурных неоднородностей.

Увеличение ширины образца, как показано на рис. 5, а, приводит к росту энергии разрушения G_f , но снижению номинального напряжения σ_{Nu} (см. рис. 5, б), оцененных по формулам (2) и (3). Угол наклона зависимости $\log \sigma_{Nu} - \log D$ составляет 0,54, что близко к значению этого пока-

зателя, равного 0,5, согласно линейной механике разрушения.

Таким образом, при испытании образцов трех размеров выявлен масштабный эффект, связанный с увеличением энергии разрушения и снижением номинальной прочности при увеличении размеров образца, что согласуется с данными работ [5, 18]. Установлено, что с увеличением размера образца акустические свойства бетона изменяются — повышается $b_{\text{АЭ}}$ -параметр и снижается $\Sigma N_{\text{АЭ}}$.

Результаты локализации сигналов АЭ на различных стадиях нагружения и зависимости размера зоны локализации разрушения от времени представлены на рис. 6. Видно, что размер зоны локализации разрушения монотонно возрастает по степенному закону, достигая максимального значения при окончательном разрушении образца (см. рис. 6, б).

На образцах меньшего размера (40×200 мм) проведение локализации сигналов АЭ было затруднено из-за близких размеров образца и датчиков АЭ. Поэтому для определения размеров зоны локализации разрушения на малых образцах измеряли коэффициент затухания продольной ультразвуковой волны (α) на частоте 2,25 МГц. Из полученных результатов следует, что при увеличении расстояния от излома образца коэффициент затухания α уменьшается на участке протяженностью 10 – 30 мм почти в четыре раза (рис. 7). Подобное поведение зависимости $\alpha = f(L)$ характерно для металлических материалов и обусловлено уменьшением поврежденности материала с увеличением расстояния L от излома образца, что, очевидно, имеет место и в случае образца из бетона. Размер зоны локализации процесса разрушения составляет ~ 20 мм. На следующем участке (протяженностью 25 – 45 мм) значения коэффициента затухания α остаются практически постоянными и минимальными, а далее снова возрастают (см. рис. 7).

Повышение коэффициента затухания с увеличением расстояния от излома, особенно заметное вдоль направления 3, может быть вызвано неоднородностью структуры бетона по длине образца [15].

Для неповрежденной зоны образца значения коэффициентов затухания, полученные методом АЭ (см. рис. 2) и ультразвуковым методом (см. рис. 7), оказались близкими ($\sim 0,12$ дБ/мм), несмотря на различные диапазоны измерений — 20 – 400 кГц и 2,25 МГц соответственно.

Обнаруженный при испытании бетонных образцов размерный эффект в основном согласуется с данными работ [5, 18]. Однако, как показано выше, проведенное исследование показало влияние размера образцов и на акустические свойства бетона, обусловленное, вероятно, структурой бетона. Подтверждение наблюдаемого роста числа сигналов АЭ с увеличением относительной доли структурных неоднородностей можно найти в работах [9, 19]. Так, авторы [9] обнаружили, что число и амплитуда (энергия) сигналов акустической эмиссии в композиционном материале, содержащем моноразмерные стеклянные частицы, в несколько раз выше, чем в цементной пасте, не содержащей частиц стекла. По мнению авторов, причиной увеличения числа сигналов АЭ могли служить микроструктурные препятствия в виде

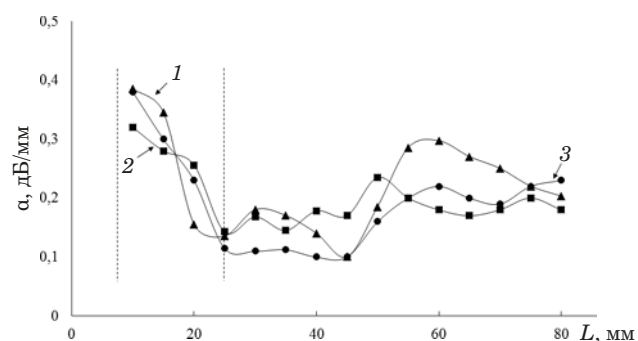


Рис. 7. Зависимости изменения коэффициента затухания α продольной ультразвуковой волны от расстояния L от излома образца размером 40×200 мм, полученные по данным измерений вдоль трех горизонтальных направлений (1, 2, 3) на боковой поверхности образца: штриховые линии — границы зоны локализации процесса разрушения (зоны процесса)

Fig. 7. The dependences of changes in the attenuation coefficient α of a longitudinal ultrasonic wave on the distance L from the specimen fracture obtained from measurements along three horizontal directions (1, 2, 3) on the lateral surface of the specimen (40×200 mm). Dashed lines mark the boundaries of the fracture zone

стеклянных сфер, которые, кроме того, вызывали образование многих мелких трещин. Согласно [19], размер наполнителя в высокопрочном бетоне является важным фактором, определяющим характеристики разрушения, в частности, энергию разрушения и трещиностойкость, которые возрастают с увеличением размера наполнителя, а также вид и характерную длину трещины.

Роль наполнителя продемонстрирована и в работе [20], где показано влияние процентного содержания резиновой крошки в бетоне на временные зависимости нагрузки сжатия, акустической активности и пороговые значения кумулятивного числа сигналов АЭ. Авторы [20] обнаружили, что первый перелом на кривых кумулятивного числа сигналов АЭ, связанный с резким увеличением числа сигналов, соответствует максимальной нагрузке на диаграмме нагружения, причем с увеличением содержания наполнителя кривые кумулятивного числа сигналов смещаются вправо по временной оси и их наклон уменьшается. Подобный эффект наблюдался и в наших экспериментах, но был обусловлен изменением размера образца.

Так, из рис. 8 следует, что при увеличении размера образцов кривые суммарного числа сигналов смещаются вправо по оси времени, причем, как и в [20], первый перелом на кривых появляется при нагрузке, близкой к максимальной (обозначена кружком на рис. 8). Суммарное число сигналов, соответствующее как первому, так и второму перелому (обозначен квадратом на рис. 8) и наклон (m) среднего участка этих кривых (m равно 209,5, 121,6, 43,5 для малого, сред-

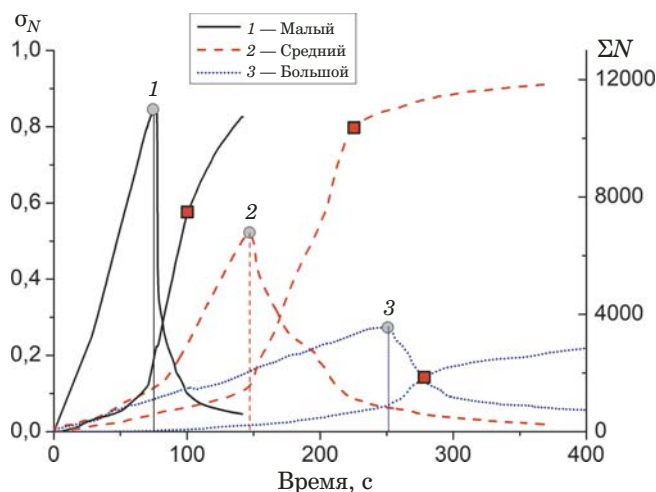


Рис. 8. Диаграммы деформирования и соответствующие им временные зависимости накопленного числа сигналов акустической эмиссии (ΣN) для образцов трех размеров

Fig. 8. Fracture diagrams and corresponding time dependences of the accumulated number of acoustic emission signals (ΣN) for the specimens of three sizes

него и большого образцов соответственно) снижаются с увеличением размера образца.

В отличие от данных, представленных в [20, 21], на кривых числа сигналов обнаруживаются два пика активности (см. рис. 3), появление которых может быть связано с отличием схемы нагружения: сжатием в [20], растяжением [21] и трехточечным изгибом при испытании бетонных образцов. В последнем случае в силу неоднородности нагружения по сечению образца рост трещины, наблюдаемой при лоцировании сигналов АЭ (см рис. 6), начинается от надреза, затем несколько замедляется в области нейтральной оси образца и далее продолжается до полного разрушения.

Структурные неоднородности бетона оказывают влияние и на скорость распространения ультразвуковой волны [22 – 24]. Результаты, полученные в данной работе, свидетельствуют о достаточно сложном характере изменения коэффициента затухания ультразвука α в зависимости от расстояния от излома образца, что обусловлено, вероятно, неоднородностью структуры образца.

Выводы

Показано, что размерный эффект при испытании на трехточечный изгиб образцов бетона класса B25 ($\bar{R} = 28$ МПа) связан со снижением для образцов больших размеров номинального напряжения и накопленного числа сигналов акустической эмиссии, увеличением энергии разрушения и $b_{\text{АЭ}}$ -параметра. Изменение акустических показателей коррелирует с изменением относительной доли неоднородностей в структуре бетона, меняющейся с увеличением размера образца.

В условиях сильно зашумленного ультразвукового сигнала, когда измерение скорости распространения ультразвуковых волн, обычно используемое для оценки прочности бетона, затруднительно или невозможно, измерение коэффициента затухания α ультразвуковой волны, по всей видимости, позволяет оценить размеры зон локализации процесса разрушения в образцах из бетона.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-58-48008 ИНД_оми.

ЛИТЕРАТУРА

- Walsh P. F. Crack initiation in plain concrete / Magazine of Concrete Research. 1976. Vol. 28. N 94. P 37 – 41.
- Bažant Z. P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal / Journal of Engineering Mechanics. 1984. Vol. 110. N 4. P 518 – 535.
- Bažant Z. P. Scaling of quasibrittle fracture: asymptotic analysis / International Journal of Fracture. 1997. Vol. 83. N 1. P. 19.
- Bažant Z. P., Ozbolt J., Eligehausen R. Fracture size effect: review of evidence for concrete structures / Journal of structural engineering. 1994. Vol. 120. N 8. P 2377 – 2398.
- Hu X., Wittmann F. Size effect on toughness induced by crack close to free surface / Engineering fracture mechanics. 2000. Vol. 65. N 2 – 3. P 209 – 221.
- Carpinteri A., Chiaia B., Ferro G. Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder / Materials and Structures. 1995. Vol. 28. N 6. P 311.
- Carpinteri A., Chiaia B. Power scaling laws and dimensional transitions in solid mechanics / Chaos, Solitons & Fractals. 1996. Vol. 7. N 9. P 1343 – 1364.
- Shiotani T. Application of the AE Improved b-Value to Quantitative Evaluation of Fracture Process in Concrete-Materials / Journal of acoustic emission. 2001. Vol. 19. P 118 – 133.
- Shiotani T., Bisschop J., Van Mier J. G. M. Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials / Engineering Fracture Mechanics. 2003. Vol. 70. N12. P 1509 – 1525.
- Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G. Damage analysis of reinforced concrete buildings by the acoustic emission technique / Structural Control and Health Monitoring. 2011. Vol. 18. N 6. P 660 – 673.
- Carpinteri A., Grazzini A., Lacidogna G., and Manuello A. Durability evaluation of reinforced masonry by fatigue tests and acoustic emission technique / Structural Control and Health Monitoring. 2014. Vol. 21. N 6. P 950 – 961.
- Бриганти М., Сумбатян М. А. Акустические методы в неразрушающем контроле бетона: обзор зарубежных публикаций в области экспериментальных исследований / Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 52 – 67.
- Kirane K., Bažant Z. P. Size effect in Paris law and fatigue lifetimes for quasibrittle materials: Modified theory, experiments and micro-modeling / International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 83. P 209 – 220.
- Ботвина Л. Р., Петерсен Т. Б., Тютин М. Р. Оценка и анализ b -параметра акустической эмиссии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 3. С. 43 – 50.

15. **Ермолов И. Н., Ланге Ю. В.** Неразрушающий контроль: Справочник в 7-ми томах. Т. 3. Ультразвуковой контроль. — М.: Машиностроение. 2004. — 864 с.
16. **Bažant Z. P.** Scaling laws in mechanics of failure / *Journal of Engineering Mechanics*. 1993. Vol. 119. N 9. P. 1828 – 1844.
17. **RILEM TC.FMC 1.** Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams / *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. — E & FN SPON, 1994. P. 99 – 101.
18. **Hoover C. G., Bažant Z. P.** Comprehensive concrete fracture tests: size effects of types 1 & 2, crack length effect and post-peak / *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 110. P. 281 – 289.
19. **Nimbolkar P. V., Shete M.** Effect of aggregate size on fracture parameters of high strength concrete / 14th International Conference on Fracture (ICF 14) June 18 – 23, 2017, Rhodes, Greece.
20. **Xu J., Fu Z., Han Q., Lacidogna G., and Carpinteri A.** Micro-cracking monitoring and fracture evaluation for crumb rubber concrete based on acoustic emission techniques / *Structural Health Monitoring*. 2018. Vol. 17. N 4. P. 946 – 958.
21. **Ботвина Л. Р., Петерсен Т. Б., Тютин М. Р.** Акустическое затишение как диагностический признак предразрушения / *ДАН*. 2018. Т. 479. № 5. С. 514 – 518.
22. **Качанов В., Соколов И. В., Авраменко С. Л.** Проблемы акустического контроля крупногабаритных строительных конструкций из бетона / *Дефектоскопия*. 2008. № 12. С. 12 – 22.
23. **Бриганте М., Сумбатян М. А.** Акустические методы в неразрушающем контроле бетона: обзор зарубежных публикаций в области теоретических исследований / *Дефектоскопия*. 2013. № 4. С. 3 – 16.
24. **Авраменко С. Л.** Корреляционный метод определения скорости распространения акустической волны в крупногабаритных компактных изделиях из бетона / *Дефектоскопия*. 2009. № 1. С. 54 – 67.
8. **Shiotani T.** Application of the AE Improved *b*-Value to Quantitative Evaluation of Fracture Process in Concrete-Materials / *Journal of acoustic emission*. 2001. Vol. 19. P. 118 – 133.
9. **Shiotani T., Bisschop J., Van Mier J. G. M.** Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials / *Engineering Fracture Mechanics*. 2003. Vol. 70. N12. P. 1509 – 1525.
10. **Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G.** Damage analysis of reinforced concrete buildings by the acoustic emission technique / *Structural Control and Health Monitoring*. 2011. Vol. 18. N 6. P. 660 – 673.
11. **Carpinteri A., Grazzini A., Lacidogna G., and Manuello A.** Durability evaluation of reinforced masonry by fatigue tests and acoustic emission technique / *Structural Control and Health Monitoring*. 2014. Vol. 21. N 6. P. 950 – 961.
12. **Brigante M., Sumbatyan M. A.** Acoustic methods for the nondestructive testing of concrete: A review of foreign publications in the experimental field / *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2013. Vol. 49. N 2. P. 100 – 111.
13. **Kirane K., Bažant Z. P.** Size effect in Paris law and fatigue lifetimes for quasibrittle materials: Modified theory, experiments and micro-modeling / *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 83. P. 209 – 220.
14. **Botvina L. R., Petersen T. B., Tiutin M. R.** Assessment and Analysis of *b*-Parameter of Acoustic Emission / *Zavod. Lab. Diagn. Mater*. 2011. Vol. 77. N 3. P. 43 – 50 [in Russian].
15. **Ermolov I. N., Lange Iu. V.** Non-Destructive Testing: A Handbook in 7 Volumes. Volume 3. Ultrasonic testing. — Moscow: Mashinostroenie. 2004. — 864 p. [in Russian].
16. **Bažant Z. P.** Scaling laws in mechanics of failure / *Journal of Engineering Mechanics*. 1993. Vol. 119. N 9. P. 1828 – 1844.
17. **RILEM TC.FMC 1.** Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams / *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. — E & FN SPON, 1994. P. 99 – 101.
18. **Hoover C. G., Bažant Z. P.** Comprehensive concrete fracture tests: size effects of types 1 & 2, crack length effect and postpeak / *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 110. P. 281 – 289.
19. **Nimbolkar P. V., Shete M.** Effect of aggregate size on fracture parameters of high strength concrete / 14th International Conference on Fracture (ICF 14) June 18 – 23, 2017, Rhodes, Greece.
20. **Xu J., Fu Z., Han Q., Lacidogna G., and Carpinteri A.** Micro-cracking monitoring and fracture evaluation for crumb rubber concrete based on acoustic emission techniques / *Structural Health Monitoring*. 2018. Vol. 17. N 4. P. 946 – 958.
21. **Botvina L. R., Petersen T. B., Tyutin M. R.** The Acoustic Gap as a Diagnostic Sign of Prefailure / *Dokl. RAN. Ser. Fiz*. 2018. Vol. 63. N 4. P. 174 – 177 [in Russian].
22. **Kachanov V. K., Sokolov I. V., Avramenko S. L.** The problems of acoustic inspection of large-size concrete building structures / *Defektoskopiya*. 2008. N 12. P. 12 – 22 [in Russian].
23. **Brigante M., Sumbatyan M. A.** Acoustic methods in nondestructive testing of concrete: Review of foreign publications in the field of theoretical studies / *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2013. Vol. 49. N 4. P. 185 – 195.
24. **Avramenko S. L.** A correlation method for determining the propagation velocity of an acoustic wave in large-size compact concrete articles / *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2009. Vol. 45. N 1. P. 40 – 49.

REFERENCES