

УДК 691.21

Макридин Н.И. – доктор технических наук, профессор

E-mail: techbeton@pguas.ru

Тараканов О.В. – доктор технических наук, профессор

E-mail: zigk@pguas.ru

Максимова И.Н. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: maksimovain@mail.ru

Суров И.А. – аспирант

E-mail: techbeton@pguas.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Адрес организации: 440028, Россия, Пенза, ул. Германа Титова, д. 28

Механика разрушения песчаного бетона и фибробетона

Аннотация

Представлены результаты анализа экспериментально полученных данных по изменению параметров механики разрушения песчаного бетона и фибробетона с изучением процесса разрушения с помощью метода акустической эмиссии. Предложены акустические параметры процесса разрушения цементных гетерогенных систем с использованием метода акустической эмиссии, основанного на регистрации акустических ультразвуковых импульсов относительно малой и большой амплитуды, испускаемых материалом при его механическом нагружении. Дана оценка механических и акустических параметров разрушения (трещиностойкости) с позиций структурной механики разрушения композитных материалов.

Ключевые слова: песчаный бетон, песчаный фибробетон, энергия разрушения, энергия акустической эмиссии, коэффициент интенсивности напряжения.

Как известно, трещиностойкость (или вязкость разрушения) конструкционных материалов является важнейшим параметром конструкционной прочности и представляет собой инженерный термин, характеризующий сопротивление материала развитию трещины и разрушению. В работах [1, 2] отмечается, что наука «механика разрушения» в качестве меры этого свойства предлагает величину, называемую *энергией разрушения*, которая определяется либо как *работа*, необходимая для образования новой поверхности трещины, либо как *энергия*, поглощенная вновь образованной поверхностью разрушения и приходящаяся на единицу площади.

Изучение этого параметра прочности привлекает внимание исследователей своей фундаментальностью, практической важностью и возможностью разработки в рамках механики разрушения подходов, которые позволяли бы указать технологам оптимальные пути создания конструкционных бетонов нового поколения и реализации основной идеи композитных материалов, заключающейся в соединении высокой прочности с хорошей вязкостью разрушения (трещиностойкостью), для которых оценка действительных предельных состояний структуры приобретает особую научную и практическую значимость, так как из механики материалов известно, что высокопрочные материалы обладают малой трещиностойкостью и остаточной прочностью при наличии дефектов структуры.

Вместе с тем, решение задач повышения качества бетона и эффективности конструкций на его основе невозможно без дальнейшего развития физических представлений о природе и кинетике процесса разрушения бетона под нагрузкой в рамках его структурной механики как композитного материала.

Для исследования были запроектированы два состава песчаного бетона (ПБ) с Ц/П=1:1 и 1:3 при В/Ц=0,37 и 0,45, соответственно. На этих составах ПБ были изготовлены, соответственно, и два состава песчаного фибробетона (ПФБ) с одинаковым содержанием металлической фибры в количестве 0,364 % по объему. Диаметр фибры составлял 0,5 мм, а длина – 38 мм. При формовании опытных образцов размером 4x4x16 см фибру размещали ортотропно в сингулярном поле напряжений относительно вершины искусственной трещины в четыре ряда по высоте и пять фибр по ширине с зазором между

фибрами по высоте и ширине примерно 4-5 мм, т.е. по всему фронту движения трещины образца под нагрузкой. При этом ПБ названных составов приготавливали на основе сульфатостойкого портландцемента марки 400 Вольского завода и Сурского речного песка с модулем крупности 1,57.

В данной работе на образцах типа I по ГОСТ 29167 исследовано механическое поведение ПБ и ПФБ с комплексной оценкой на диаграмме нагружения критических значений: прочности на растяжение при изгибе, R_{PI} , МПа; энергии разрушения, G , Дж/м²; коэффициента интенсивности напряжения, K_{IC} , МПа·м^{0,5}; суммарной энергии выделившейся акустической эмиссии, $\sum \mathcal{E}_{AЭ}$, В²/см²; количества ультразвуковых импульсов акустической эмиссии N_1 и N_2 с амплитудой A_1 и A_2 и амплитудно-энергетическое отношение $N_1(A_1)/N_2(A_2)$ и удельные расходы цемента в кг на 1 МПа R_{PI} и на 1 Дж/м² G .

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице и на графических зависимостях рис. 1 и 2.

Таблица

Критические значения параметров механики разрушения ПБ и ПФБ в возрасте 28 суток

Параметры	Песчаный бетон		Песчаный фибробетон	
	Состав		Состав	
	Ц/П=1:1 В/Ц=0,37	Ц/П=1:3 В/Ц=0,45	Ц/П=1:1 В/Ц=0,37	Ц/П=1:3 В/Ц=0,45
Плотность бетона в возрасте 28 суток, кг/м ³	2140	2080	2125	1958
Прочность, R_{PI} , МПа	4,66	4,44	11,43	7,56
Энергия разрушения, G , Дж/м ²	52,1	57,3	873,7	935,0
Прогиб образца, h , мм	0,062	0,072	0,426	0,687
Коэффициент интенсивности напряжения, K_{IC} , МПа·м ^{0,5} ,	0,459	0,436	1,12	0,742
Суммарная энергия АЭ, $\sum \mathcal{E}_{AЭ}$, В ² /см ²	0,49	0,36	0,45	5,0
Акустический параметр, $\sum N_1(A_1)/\sum N_2(A_2)$	1,55	1,24	2,12	2,71
Расход цемента на 1 м ³ ПБ и ПФБ, кг	934	524	934	524
Удельный расход цемента на 1 МПа R_{PI}	200,4	180,0	81,7	69,3
Удельный расход цемента на 1 Дж/м ² G	17,9	9,1	1,07	0,56

Оценку силовой характеристики трещиностойкости R_{PI} , энергии разрушения G и критического коэффициента интенсивности K_{IC} образцов ПБ и ПФБ типа I при трехточечном изгибе проводили по формулам, приведенным в работах [3-5], а построение графических зависимостей осуществляли аналогично методическим указаниям, изложенным в работе, опубликованной в настоящем сборнике.

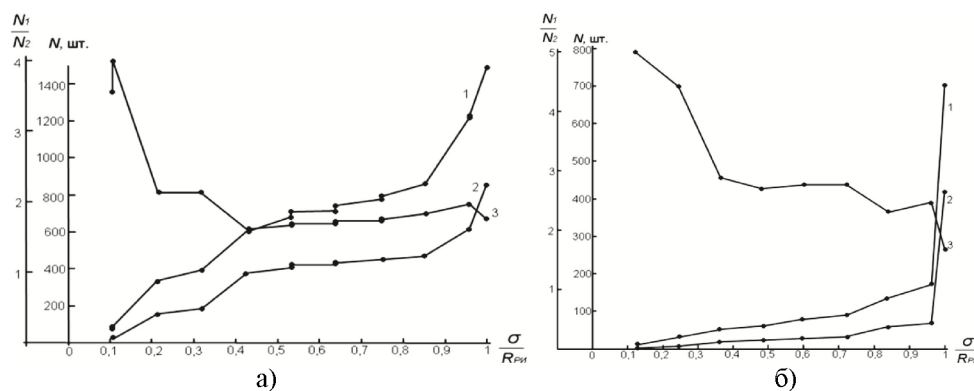


Рис. 1. Зависимость количества, $N=N_1+N_2$, сигналов акустической эмиссии с амплитудами, соответственно, A_1 и A_2 , и отношения N_1/N_2 – от интенсивности нагружения образцов ПБ в возрасте 28 суток: 1 – амплитуда сигналов АЭ $A_1=0,05-0,5$ В; 2 – амплитуда сигнала АЭ $A_2>0,5$ В; 3 – отношение N_1/N_2 сигналов АЭ.
а) ПБ 1:1 В/Ц=0,37; б) ПБ 1:3 В/Ц=0,45

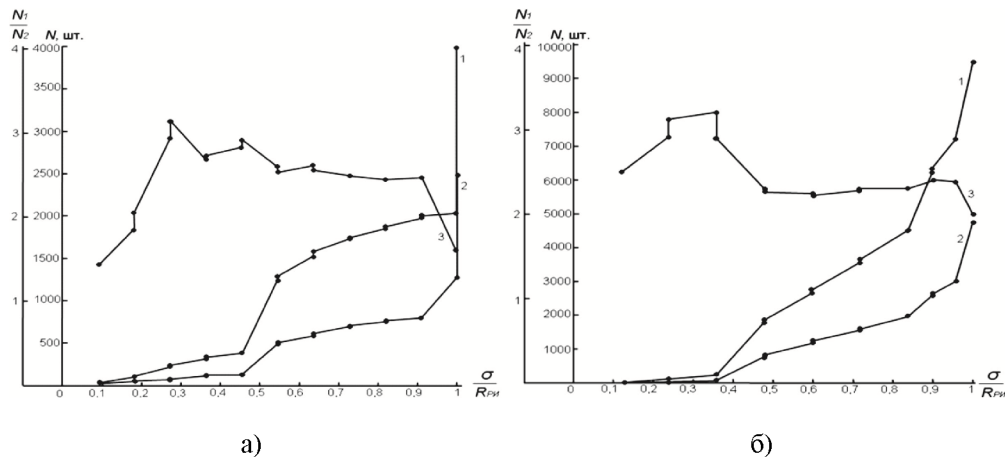


Рис. 2. Зависимость количества, $N=N_1+N_2$, сигналов акустической эмиссии с амплитудами, соответственно, A_1 и A_2 , и отношения N_1/N_2 – от интенсивности нагружения образцов ПФБ в возрасте 28 суток: 1 – амплитуда сигналов АЭ $A_1=0,05-0,5$ В; 2 – амплитуда сигнала АЭ $A_2>0,5$ В; 3 – отношение N_1/N_2 сигналов АЭ.
а) ПФБ 1:1 В/Ц=0,37; б) ПФБ 1:3 В/Ц=0,45

Анализ численных значений параметров механики разрушения, приведенных в таблице, позволяет констатировать, что использование фибры в объеме 0,364 % относительно контрольных составов ПБ при Ц/П, равном 1:1 и 1:3, приводит к увеличению $R_{пр}$, соответственно, в 2,45 и 1,7 раза; G – в 16,8 и 16,3 раза; $K_{1С}$ – в 2,44 и 1,7 раза; h – в 6,87 и 9,54 раза; суммарной энергии акустической эмиссии – в 2,96 и 13,9 раза.

При этом следует отметить, что в образцах ПФБ с Ц/П=1:1 и В/Ц=0,37 фибры, в основном, претерпевали разрыв при нагружении, за исключением одной-двух фибр в последнем ряду от вершины трещины.

В образцах же ПФБ с Ц/П=1:3 и В/Ц=0,45, напротив, фиксировали выдергивание фибр за счет ослабления адгезионного сцепления с цементным камнем. Именно разрыв фибры или (и) ее выдергивание в сравниваемых составах ПФБ обуславливает существенное различие акустических параметров разрушения $\sum_{A_{AЭ}}$ и $\sum_{N_1(A_1)}/\sum_{N_2(A_2)}$, отражающих вклад пластической и хрупкой составляющей деформирования цементного фибропесчаного композита в генерацию ультразвуковых импульсов акустической эмиссии.

Вместе с тем, как следует из экспериментальных табличных данных, использование фибры в сравниваемых составах ПФБ приводит к заметному снижению удельного расхода цемента на единицу прочности $R_{пр}$ и единицу энергии разрушения G .

На рис. 1 и 2 представлены графические зависимости количества $N=N_1+N_2$ генерируемых ультразвуковых импульсов АЭ, соответственно, с амплитудами A_1 и A_2 , и отношения N_1/N_2 – от интенсивности нагружения образцов ПБ и ПФБ сравниваемых серий. Анализ графических зависимостей рис 1а) и 1б) достаточно четко отражает качественную и количественную сторону излучения УЗ импульсов акустической эмиссии образцов ПБ сравниваемых составов, а рис. 2а) и 2б) – образцов ПФБ. Характер изменения графических зависимостей рис. 1 и 2 от интенсивности нагружения образцов в совокупности отражает влияние механических свойств матричной фазы (цементного камня) и дисперсной фазы (кварцевого песка), объемного содержания дисперсной фазы, качества сцепления матричной и дисперсной фазы, толщины прослойки матричной фазы между зернами дисперсной фазы, изменяющейся длины фронта трещины, – от взаимодействия с неоднородностями дисперсной фазы и, как отмечено в работе [6, 7], в линейно-упругом материале сингулярное поле напряжения вблизи вершины острой трещины характеризуется коэффициентами интенсивности напряжения K_1 , K_2 и K_3 , развитие которых является также источником физического процесса генерации УЗ импульсов АЭ, что в полной мере характерно и для дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня, с учетом величин блоков мозаики и плотности дислокаций его реальной микроструктуры [8].

Проведенные исследования дают основание сделать вывод о перспективности методологического подхода структурной механики разрушения материалов при оценке силовых, энергетических и деформационных критериев механического поведения цементных композитных материалов конструкционного назначения. Использование при этом метода акустической эмиссии для изучения самого процесса разрушения в реальном масштабе времени дает возможность получать информацию, позволяющую с достаточной точностью контролировать отклонение от линейной упругости в вершине трещины и прогнозировать наступление предельного состояния структуры материала по трещиностойкости на его диаграмме нагружения.

Список библиографических ссылок

1. Ленг Ф.Ф. Разрушение композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице // Композиционные материалы, Том 5, Разрушение и усталость. Пер. с англ. Под ред. Г.П. Черепанова. – М.: Мир, 1978. – С. 9-57.
2. Брок Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
3. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Овсянюкова Ю.В. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня // Строительные материалы, 2011, № 7. – С. 72-75.
4. Макридин Н.И., Скачков Ю.П., Максимова И.Н., Суров И.А. Комплексная оценка механического поведения заполнителей бетона из горных пород // Региональная архитектура и строительство, 2012, № 3 (14). – С. 18-25.
5. Карпенко Н.И., Зайцев Ю.В., Окольникова Г.Э., Андрианов А.А. Экспериментальное определение физико-механических свойств и параметров механики разрушения ультравысокопрочных бетонов. – Москва-Орел: РААСН, 2011.
6. Билби Б. Разрушение // Механика разрушения. Разрушение конструкций. – М.: Мир, 1980. – С. 203-228.
7. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 336 с.
8. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов: монография. – М.: МГСУ, 2013. – 152 с.

Makridin N.I. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: techbeton@pguas.ru

Tarakanov O.V. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: zigk@pguas.ru

Maksimova I.N. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: maksimovain@mail.ru

Surov I.A. – post-graduate student

E-mail: techbeton@pguas.ru

Penza State University of architecture and construction

The organization address: 440028, Russia, Penza, German Titov st., 28

Fracture mechanics of sand concrete and fiber concrete

Resume

The problem of mechanical behavior of deformable solid body structural applications is the focus of researchers in addressing testing of material challenges for the development and construction of building materials with the desired mechanical properties. Mechanical strength is the defining property of the material of construction. In turn, the most important parameter is the strength of the fracture toughness that characterizes the resistance of materials development of cracks and breakage.

Study of strength involving physical representations about the nature and kinetics of the degradation of concrete under loading in the framework of its structural mechanics of composite material attracted the attention of researchers for its the importance of these, pragmatically and

opportunity in the development of fracture mechanics approaches for creating composite high strength with good ductility fracture.

The study gives reason to conclude that the prospect of structural materials, fracture mechanics approach in assessing the strength, energy and deformation criteria, the mechanical behaviour of cement composites.

Using the method of acoustic emission study of fracture real time pilot opens up new possibilities for optimizing the structure of the cement composite.

Keywords: sand concrete, sand plates, energy depletion, energy of acoustic emission, stress intensity factor.

Reference list

1. Leng F.F. Destruction of composites with dispersed particles in the fragile matrix // Composite materials, Volume 5, Fracture and fatigue. Translation from English. Ed. G.P. Cherepanov. – M.: Mir, 1978. – P. 9-57.
2. Broek D. Foundations of mechanics of destruction. – M.: High school, 1980. – 368 p.
3. Makridin N.I., Maksimova I.N., Ovsykova Yu.V. The long-term durability of the modified structure of cement stone // Building materials, 2011, № 7. – P. 72-75.
4. Makridin N.I., Skachkov Yu.P., Maksimova I.N., Surov I.A. Integrated assessment of the mechanical behaviour of concrete aggregate of rocks // Regional architecture and construction, 2012, № 3 (14). – P. 18-25.
5. Karpenko N.I., Zaitsev Yu.V., Okolnikova G.E., Andrianov A.A. Experimental determination of mechanical properties and fracture mechanics parameters of ultrahigh-strength concretes. – Moscow-Orel: RAACS, 2011.
6. Bilbi B. Destruction // Fracture mechanics. Destruction of structures. – M.: Mir, 1980. – P. 203-228.
7. Christensen P. Introduction to mechanics of composites. – M.: Mir, 1982. – 336 p.
8. Makridin N.I., Korolev E.V., Maksimova I.N. Cross-linking and structural strength of cement composites: monograph. – M.: MSBU, 2013. – 152 p.