

**МЕХАНИКО-АКУСТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ
МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТРУКТУР
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ РАЗНОГО ВОЗРАСТА**

**MECHANICAL AND ACOUSTIC BEHAVIOR
OF MODIFIED STRUCTURES
OF A CEMENT STONE OF DIFFERENT AGE**

В.Т. ЕРОФЕЕВ, Н.И. МАКРИДИН, И.Н. МАКСИМОВА

V.T. EROFEEV, N.I. MAKRIDIN, I.N. MAKSIMOVA

(Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства)

(National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev,
Penza State University of Architecture and Construction)

E-mail: fac-build@adm.mrsu.ru; maksimovain@mail.ru

Тенденция использования в современной строительной практике цементных композитов повышенной конструкционной прочности как комплексной механической характеристики, включающей сочетание критериев прочности, надежности и долговечности, обусловлена как расширением областей их применения, в том числе и на объектах текстильной промышленности, так и разнообразием требований к их механическому поведению. С позиций структурной механики разрушения материалов важнейшим элементом структуры цементных композитов является цементный камень – как матричная фаза композита, предопределяющий качество конструкционной прочности и матричной фазы, и композита в целом. Экспериментально показано влияние концентрации и технологии дозирования суперпластификатора на формирование параметров качества структуры цементного камня в широком временном диапазоне с оценкой самого процесса разрушения с позиций физики и структурной механики разрушения материалов в реальном масштабе времени с использованием метода акустической эмиссии. Структурно-системный анализ механического поведения цементного камня под нагрузкой позволяет использовать полученную информацию по параметру суммарной энергии акустической эмиссии для улучшения понимания самого процесса разрушения и выявления параметров материала, определяющих вязкость его разрушения, и на этой основе осуществлять рациональную технологическую оптимизацию структуры и технологию получения цементных систем повышенной трещиностойкости, что будет способствовать повышению качества капитального строительства и ремонта промышленных объектов текстильной отрасли.

The tendency to use in modern construction practice cement composites of increased structural strength as an integrated mechanical characteristic, including a combination of strength, reliability and durability criteria, is due both to the expansion of their areas of application, including in the textile industry, and the variety of requirements for their mechanical behavior. From the standpoint of structural mechanics of materials destruction, the most important element in the structure of cement composites is cement stone as the matrix phase of the composite, which determines the quality of structural strength and matrix phase, and the composite as a

whole. Experimentally shown is the effect of concentration and superplasticizer dosing technology on the formation of quality parameters of the structure of cement stone in a wide time range with an assessment of the destruction process itself from the standpoint of physics and structural mechanics of materials destruction in real time using the acoustic emission method. Structural system analysis of the mechanical behavior of a cement stone under load allows you to use the information obtained on the total acoustic emission energy parameter to improve the understanding of the fracture process itself and identify the material parameters determining its fracture toughness, and on this basis implement a rational technological optimization of the structure and technology for producing cement systems increased crack resistance, which will improve the quality of capital construction and repairs industrial objects of the textile industry.

Ключевые слова: цементный камень, суперпластификатор, акустическая эмиссия, энергия акустической эмиссии, трещиностойкость, сооружения текстильной промышленности.

Keywords: cement stone, structure, superplasticizer, strength, acoustic emission, acoustic emission energy, crack resistance, textile industry buildings.

Современная тенденция поиска путей получения бетонов нового поколения (БНП) с очень высокими показателями прочности и расширение областей их применения в современном строительстве, в том числе при возведении и капитальном ремонте объектов текстильной промышленности, обусловили разнообразие требований к их свойствам и прежде всего к механическому поведению высокопрочной модифицированной матричной фазы БНП, так как многочисленными исследованиями показано, что цементный камень, являясь матрицей структуры БНП, предопределяет его механическое поведение как при силовом, так и несиловом воздействии. По мнению В.Г. Батракова [1], химические добавки являются ключом к решению технологических проблем современных бетонов и позволяют кардинально изменять реотехнологические свойства цементных систем, плотность, однородность и прочность структуры матричной фазы цементных композитов.

Это повлекло за собой необходимость осуществления комплексных испытаний, при которых учитывались бы различные факторы, определяющие как процессы направленного структурообразования цементных систем, так и предложение таких методов испытаний, которые позволяли бы более надежно судить о параметрах механического

поведения длительной конструкционной прочности, включающей сочетание критериев прочности, надежности и долговечности. Одним из путей дальнейшего выяснения природы механического поведения цементного камня и бетона на его основе под нагрузкой может служить новый подход к проблеме прочности, в основе которого лежит детальное изучение самого процесса разрушения.

Нами показано [2] влияние концентрации и процедуры введения суперпластификатора в цементно-водную композицию на субмолекулярную гетерогенность структуры цементного камня. По ионизационным рентгенограммам цементного камня в возрастном диапазоне от 28 суток до 18 лет определены величины его блоков мозаики L_d , по О.П. Мчедлову-Петросяну [3], позволяющие судить о гранулометрической однородности структуры образующихся фаз, о степени упорядоченности кристаллов, о величине удельной поверхности образующихся фаз и плотности дислокаций в структуре, определяющих в конечном итоге прочность цементного камня как матричной основы бетонов повышенной прочности. Однако все эти данные не раскрывают влияния суперпластификатора на процесс и параметры разрушения длительной конструкционной прочности цементного камня в широком временном диапазоне с учетом

поздних стадий гидратации и структурообразования матричной фазы цементного композита с позиций структурной механики разрушения материалов.

В работах [4...16] показано, что одним из путей дальнейшего выяснения природы механического поведения бетона под нагрузкой может служить новый подход к проблеме прочности, в основе которого лежит детальное изучение самого процесса разрушения с позиций физики и механики материала с использованием явления акустической эмиссии, поскольку акустическая эмиссия служит непосредственной мерой коэффициента интенсивности напряжения [9].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальной оценки и идентификации процесса разрушения модифицированной суперпластификатором гидратационной структуры цементного камня в широком временном интервале с целью повышения сопротивления модифицированной структуры матричной фазы цементного бетона стабильному и нестабильному развитию трещиноподобных дефектов структуры под нагрузкой.

Углубление физических представлений по данным вопросам позволит реализовать материаловедческое обеспечение повышения качества цементного камня и конструкционного бетона на его основе и тем самым повышения надежности, долговечности и экономической эффективности конструкций и сооружений на основе бетонов нового поколения, что является актуальной задачей современного строительного материаловедения.

В основу экспериментальных исследований оценки и идентификации процесса разрушения опытных образцов цементного кам-

ня типа I по суммарному энергетическому параметру акустической эмиссии ($\sum \mathcal{E}_{\text{АЭ}}, \text{В}^2/\text{см}^2$), который регистрировали с помощью акустико-эмиссионного устройства [10] в реальном масштабе времени при неравновесных механических испытаниях опытных образцов, положена стандартизированная методика ГОСТ 29167–91.

Для изготовления опытных образцов цементного камня при исследовании влияния добавки суперпластификатора на процесс и параметры его механического разрушения был использован бездобавочный сульфатостойкий портландцемент марки 400 Вольского завода с нормальной плотностью 24%. Было изготовлено четыре серии образцов типа I размером 4×4×16 см с В/Ц=0,24, наиболее характерных по процедуре введения и расходу суперпластификатора. При этом контрольная серия образцов 1 была приготовлена без суперпластификатора (СП) С-3, серия 2 была приготовлена с дозировкой СП в количестве 1 % от массы цемента. Суперпластификатор предварительно растворяли в воде затворения. Образцы серии 3 были приготовлены с двухстадийным введением воды затворения, при этом суперпластификатор вводили с первой и второй частью воды затворению поровну. Образцы серии 4 готовили также при двухстадийном введении воды затворения, при этом весь объем суперпластификатора вводили со второй частью воды затворения.

В табл. 1 приведены характеристики состава и процедуры двухстадийного затворения водой и введения добавки СП в цементное тесто сравниваемых серий опытных образцов.

Т а б л и ц а 1

Серия образца	В/Ц	СП С-3, % от массы цемента	Процедура приготовления цементного теста
1	0,24	–	Ц + 0,12Н ₂ О + 0,12Н ₂ О
2	0,24	1,0	Ц + (0,12Н ₂ О + 0,5СП) + (0,12Н ₂ О + 0,5СП)
3	0,24	0,5	Ц + (0,12Н ₂ О + 0,25СП) + (0,12Н ₂ О + 0,25СП)
4	0,24	0,5	Ц + 0,12Н ₂ О + (0,12Н ₂ О + 0,5СП)

Формование образцов осуществляли на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрации в течение 3...5 с. Отформованные образцы размещали

над водой в закрытой гидравлической ванне. После выдержки в течение 17 часов образцы подвергали в лаборатории тепло-влажностной обработке по режиму: подъем тем-

пературы два часа, изотермическая выдержка восемь часов при 85...90°C, естественное остывание образцов в пропарочной камере. Далее образцы находились в естественных лабораторных условиях, где в зависимости от сезона температура и относительная влажность изменялись соответственно, в диапазоне 8...24°C и 56...90%.

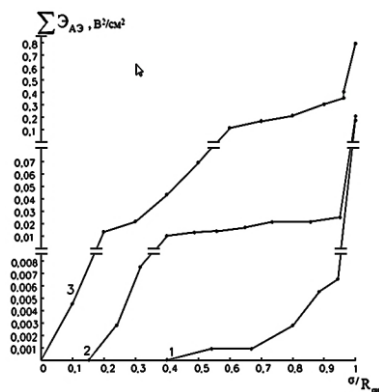


Рис. 1

Кинетику изменения суммарной удельной энергии акустической эмиссии и важнейших параметров трещиностойкости цементного камня на образцах серий 1–4 наблюдали в течение 18 лет. Следует отметить, что оценку контролируемых параметров во все сроки испытаний проводили в лаборатории при температуре (20±2)°C и относительной влажности 58...60%.

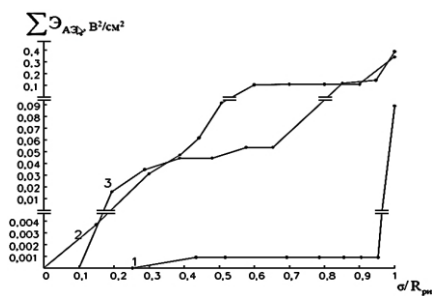


Рис. 2

На рис. 1...4 представлены экспериментальные кинетические зависимости 1...3 суммарной удельной энергии акустической эмиссии (АЭ) на кривой нагружения сравниваемых серий опытных образцов цементного камня типа I при неравновесных механических испытаниях соответственно, в возрасте 28 и 420 суток и 18 лет.

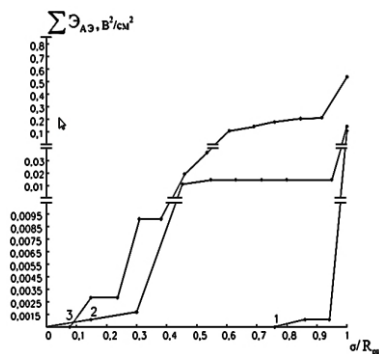


Рис. 3

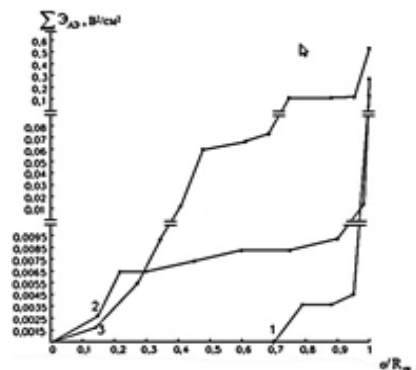


Рис. 4

Рис. 1 – зависимости суммарной удельной энергии акустической эмиссии ($\Sigma \mathcal{E}_{\text{АЭ}}$, $\text{В}^2/\text{см}^2$) от относительного напряжения ($\sigma/R_{\text{рн}}$) для образцов цементного камня серии 1: 1 – в возрасте 28 суток; 2 – в возрасте 420 суток; 3 – в возрасте 18 лет; рис. 2 – зависимости суммарной удельной энергии акустической эмиссии ($\Sigma \mathcal{E}_{\text{АЭ}}$, $\text{В}^2/\text{см}^2$) от относительного напряжения ($\sigma/R_{\text{рн}}$) для образцов цементного камня серии 2: 1 – в возрасте 28 суток; 2 – в возрасте 420 суток; 3 – в возрасте 18 лет; рис. 3 – зависимости суммарной удельной энергии акустической эмиссии ($\Sigma \mathcal{E}_{\text{АЭ}}$, $\text{В}^2/\text{см}^2$) от интенсивности напряжения ($\sigma/R_{\text{рн}}$) для образцов цементного камня серии 3: 1 – в возрасте 28 суток; 2 – в возрасте 420 суток; 3 – в возрасте 18 лет; рис. 4 – зависимости суммарной удельной энергии акустической эмиссии ($\Sigma \mathcal{E}_{\text{АЭ}}$, $\text{В}^2/\text{см}^2$) от интенсивности напряжения ($\sigma/R_{\text{рн}}$) для образцов цементного камня серии 4: 1 – в возрасте 28 суток; 2 – в возрасте 420 суток; 3 – в возрасте 18 лет.

Из анализа кинетических зависимостей 1...3 следует, что при прочих равных условиях регистрации суммарной энергии акустической эмиссии интенсивность энергии АЭ от уровня нагружения опытных образцов цементного камня сравниваемых серий, с одной стороны, в возрасте 28 суток значительно ниже, чем интенсивность в возрасте 420 суток и тем более в возрасте 18 лет, что, естественно, обусловлено как различной степенью гидратации цемента, так и упрочнением структуры во времени, связанным с переходом части адгезионных контактов электромагнитной и электростатической природы в кристаллизационные связи валентной природы [17]. С другой стороны – интенсивность суммарной энергии АЭ опытных образцов серии I в возрасте 18 лет оказалась в два раза выше, чем у образцов серии № 2 в том же возрасте, что отражает особенности гидратационного твердения цементного вяжущего при изменении условий твердения в присутствии добавки СП.

Стохастичность акустической эмиссии на этапах нагружения обусловлена неравновесными фазовыми переходами, соответствующими особой точке (точке бифуркации), при достижении которой скачкообразно изменяются свойства из-за самоорганизации процесса развития дефекта структуры и тем, как указано в [18], что в линейно упругом материале сингулярное поле напряжений вблизи вершины острой трещины характеризуется коэффициентами интенсивности напряжения K_1 , K_2 и K_3 , отражающими различные пути раскрытия трещин разрушения.

Ранее [19] рентгенофазовыми исследованиями опытных образцов сравниваемых серий в возрасте цементного камня 18 лет было показано, что в цементной системе в присутствии СП, содержащего активные функциональные группы, параллельно протекают, с одной стороны, процессы активации гидратации вследствие диспергирования частиц вяжущего, а с другой – процессы изменения морфологии гидросиликатов кальция и перекристаллизации гидратов, что приводит к существенному изменению дисперсно-кристаллитной структуры, свойств и па-

раметров механического поведения цементных материалов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, оценка механического поведения дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня сравниваемых составов с позиций структурной механики разрушения материалов во временном интервале от проектного возраста 28 суток до 18 лет с использованием метода акустической эмиссии позволяет сформулировать заключение.

Информацию, полученную по параметру $\sum \mathcal{E}_{АЭ}$, можно положить в основу идентификации процесса разрушения цементного композита под воздействием кратковременного силового нагружения с достаточно четкой идентификацией процесса, значения которого отражают влияние концентрации и технологии дозировки С-3 на формирование дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня и ее механическое поведение под нагрузкой, что позволяет использовать полученную информацию для улучшения понимания самого процесса разрушения и выявления параметров материала, определяющих вязкость его разрушения, и на этой основе осуществлять рациональную технологическую оптимизацию структуры и технологию получения цементных систем повышенной трещиностойкости, что будет способствовать повышению качества капитального строительства и ремонта промышленных объектов текстильной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1998.
2. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Овсякова Ю.В. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. – Часть 2 // Строительные материалы. – 2011, № 7. С.72...75.
3. Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Стройиздат, 1988.
4. Грешиников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976.
5. Муравин Г.Б., Павловская Г.С., Лихотько А.Д. Акустическая эмиссия при деформировании бетона // Дефектоскопия. – 1982, № 12. С. 3...13.
6. Бартенев О.А., Фадеев Ю.И. Применение акустической эмиссии в механических испытаниях // Западская лаборатория. – 1991, № 1. С. 34...39.

7. Бордюгов Д.М., Ерминсон А.Л. Энергия акустической эмиссии в процессе разрушения бетона // Дефектоскопия. – 1992, № 9. С. 29...31.

8. Макридин Н.И., Соломатов В.И., Панченко В.П. Влияние добавки суперпластификатора С-3 на характер разрушения высокопрочного бетона // Научн.-технич. сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия Проектирование и строительство. – 1986. Вып. 1(22). С. 47...56.

9. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика // Пер с англ., под ред. д-ра техн. наук А.С. Власова. – М.: Metallurgiya, 1980.

10. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении // Строительные материалы. – 2007, № 9. С. 25...27.

11. Перфилов В.А. Трещиностойкость бетона. – Волгоград: ВолгГАСА, 2000.

12. Акчурин Т.К., Ушаков А.В. Теоретические и методологические вопросы определения характеристик трещиностойкости бетона при статическом нагружении. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2005.

13. Arrington M., Evans B.M. Acoustic Emission Testing of High Alumina Cement Concrete // NDT Inter. – №10, 1977. P. 81...87.

14. Reymond M.C. Acoustic Emission in Rock and Concrete under Laboratory Conditions // Proceedings Sys. Conference on Acoustic Emission (Micro seismic Activity in Geologic Structures and Materials). Ser. Rockland Soil. Mechanics. – №5, 1980. P.27...34.

15. Брок Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. – М.: Высшая школа, 1980.

16. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов. – М.: МГСУ, 2013.

17. Сычев М.М. Некоторые вопросы химии бетона и цементного камня // Журнал прикладной химии АН СССР. – 1981. Т. LIV. № 9. С. 2036...2043.

18. Билби Б. Разрушение // В кн.: Механика разрушения. Разрушение конструкций. – М.: Мир, 1980. С. 203...228.

19. Макридин Н.И., Тарakanов О.В., Максимова И.Н., Суrow И.А. Фазовый состав и механические свойства модифицированной гидратационной структуры цементного камня многолетнего твердения // Приволжский научный журнал. – 2014, № 4(32). С.127...133.

REFERENCES

1. Batrakov V.G. Modifitsirovannye betony. Teoriya i praktika. – 2-e izd. – М.: Stroyizdat, 1998.

2. Makridin N.I., Maksimova I.N., Ovsyukova Yu.V. Dolgovremennaya prochnost' modifitsirovannoy struktury tsementnogo kamnya. – Chast' 2 // Stroitel'nye materialy. – 2011, № 7. S.72...75.

3. Mchedlov-Petrosyan O.P. Khimiya neorganicheskikh stroitel'nykh materialov. – 2-e izd. pererab. i dopoln. – М.: Stroyizdat, 1988.

4. Greshnikov V.A., Drobot Yu.B. Akusticheskaya emissiya. – М.: Izd-vo standartov, 1976.

5. Muravin G.B., Pavlovskaya G.S., Likhot'ko A.D. Akusticheskaya emissiya pri deformirovaniy betona // Defektoskopiya. – 1982, № 12. S. 3...13.

6. Bartenev O.A., Fadeev Yu.I. Primenenie akusticheskoy emissii v mekhanicheskikh ispytaniyakh // Zavedskaya laboratoriya. – 1991, № 1. S. 34...39.

7. Bordyugov D.M., Erminson A.L. Energiya akusticheskoy emissii v protsesse razrusheniya betona // Defektoskopiya. – 1992, № 9. S. 29...31.

8. Makridin N.I., Solomatov V.I., Panchenko V.P. Vliyanie dobavki superplastifikatora S-3 na kharakter razrusheniya vysokoprochnogo betona // Nauchn.-tekhnich. sb.: Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Proektirovanie i stroitel'stvo. – 1986. Vyp. 1(22). S.47...56.

9. Evans A.G., Lengdon T.G. Konstruktsionnaya keramika // Per s angl., pod red. d-ra tekhn. nauk A.S. Vlasova. – М.: Metallurgiya, 1980.

10. Makridin N.I., Korolev E.V., Maksimova I.N. Metod akusticheskoy emissii v stroitel'nom materialovedenii // Stroitel'nye materialy. – 2007, № 9. S.25...27.

11. Perfilov V.A. Treshchinostoykost' betona. – Volgograd: VolgGASA, 2000.

12. Akchurin T.K., Ushakov A.V. Teoreticheskie i metodologicheskie voprosy opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti betona pri staticheskom nagruzhenii. – Volgograd: VolgGASU, 2005.

13. Arrington M., Evans B.M. Acoustic Emission Testing of High Alumina Cement Concrete // NDT Inter. – №10, 1977. P. 81...87.

14. Reymond M.C. Acoustic Emission in Rock and Concrete under Laboratory Conditions // Proceedings Sys. Conference on Acoustic Emission (Micro seismic Activity in Geologic Structures and Materials). Ser. Rockland Soil. Mechanics. – №5, 1980. P.27...34.

15. Broek D. Osnovy mekhaniki razrusheniya / Per. s angl. – М.: Vysshaya shkola, 1980.

16. Makridin N.I., Korolev E.V., Maksimova I.N. Strukuroobrazovanie i konstruksionnaya prochnost' tsementnykh kompozitov. – М.: MGSU, 2013.

17. Sychev M.M. Nekotorye voprosy khimii betona i tsementnogo kamnya // Zhurnal prikladnoy khimii AN SSSR. – 1981. Т. LIV. № 9. S. 2036...2043.

18. Bilbi B. Razrushenie // V kn.: Mekhanika razrusheniya. Razrushenie konstruksiy. – М.: Mir, 1980. S.203...228.

19. Makridin N.I., Tarakanov O.V., Maksimova I.N., Surow I.A. Fazovyy sostav i mekhanicheskie svoystva modifitsirovannoy gidratatsionnoy struktury tsementnogo kamnya mnogoletnego tverdeniya // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. – 2014, № 4(32). S. 127...133.

Рекомендована кафедрой технологий строительных материалов и деревообработки ПГУАС. Поступила 15.03.19.