

УДК 691.162

**СПОСОБ АКУСТИЧЕСКО-ЭМИССИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ВНУТРЕННЕГО СОСТОЯНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ЕГО ХЛОРИДНОЙ КОРРОЗИИ**

*канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ; канд. техн. наук А.Н. ЯГУБКИН;
Е.С. БОРОВКОВА; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Исследованы сигналы акустической эмиссии, возникающие в результате имитации и роста коррозионного дефекта на образце цементного камня в лабораторных условиях. Задачей исследования было выявление закономерностей излучения сигналов акустической эмиссии в зависимости от механизма хлоридной коррозии бетона. Полученные экспериментальные данные могут послужить базой для создания критерия степени опасности коррозионных повреждений на бетонных объектах различного эксплуатационного назначения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, хлоридная коррозия, цементный камень, динамика трещинообразования.

Введение. Процессы коррозии подвержены практически все строительные конструкции под влиянием различных внешних факторов. Коррозия бетона – необратимый процесс, в ходе которого идет распад его структуры, имеет место потеря плотности и прочности, что влечет за собой утрату эксплуатационных качеств сооружения. Разрушение бетонных элементов начинается с рассыпания или расслоения цементного камня, поскольку заполнители более стойки к агрессивным воздействиям [1]. Сложность изучения процессов и причин, повлиявших на разрушение бетона, объясняется тем, что в зависимости от условий эксплуатации и срока службы конструкций одновременно действует многочисленное количество факторов, приводящих к изменениям структуры и свойств материала.

Разрушительное воздействие на бетон могут оказывать: атмосферные осадки, содержащие и образующие кислоты; хлоридсодержащие средства, в частности антиобледенители; воздух с агрессивными компонентами выхлопных газов, выбросов от промышленных предприятий, солевого тумана (характерного для приморской атмосферы); загрязненная вода из грунта, дренажных систем и стоков; ранее использовавшиеся при зимнем бетонировании добавки – ускорители твердения бетона на основе хлоридных солей. В случае если конструкция выполнена из армированного бетона, к внешним факторам добавляется еще и опасность возникновения коррозионных процессов в арматуре. Коррозия бетона делится на три вида [2]:

- 1) процессы, в результате которых растворяются составные части цементного камня;
- 2) реакции обмена, сопровождающиеся образованием рыхлых, не обладающих вяжущими свойствами продуктов, которые ослабляют структуру цементного камня и в ряде случаев могут быть вынесены из камня в процессе фильтрации агрессивной среды;
- 3) процессы, приводящие к накоплению в порах цементного камня, трещинах и капиллярах бетона солей, которые при определенных условиях могут разрушить материал.

Все три вида коррозии являются сложными многоступенчатыми процессами, включающими химическую и физико-химическую стадии.

Как показывает анализ состояния современных физических методов неразрушающего контроля, в настоящее время для диагностики процесса коррозии непосредственно на объекте в процессе его эксплуатации наиболее перспективен метод акустической эмиссии (АЭ) [3]. Данный метод заключается в обнаружении, распознавании и обработке акустических сигналов, что и является ключевым моментом в мониторинге строительных объектов. Предпосылкой излучения акустических волн является процесс коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). Эффект АЭ при КРН возникает без приложения к объекту контроля дополнительной внешней испытательной нагрузки, тогда как во многих других случаях является обязательным условием, что объясняет преимущество использования этого метода. Метод АЭ позволяет проводить и непрерывный контроль (мониторинг), когда развитие дефектов происходит под воздействием рабочих нагрузок и окружающей среды. Заключение о состоянии контролируемого объекта дается на основании анализа АЭ процесса путем выявления тенденций изменения его характеристик. С помощью АЭ можно выявить не только растущие трещины, но и коррозионные процессы различного характера, такие как коррозионное растрескивание под напряжением, язвенная, щелевая и межкристаллитная коррозия [4].

Исследовательская часть. Изучению подвергались образцы из цементного камня кубической формы размером 100×100×100 мм по достижении проектного возраста 28 суток после их изготовления. Первый образец (I) находился в естественных нормально-влажностных условиях (с исключением агрес-

сивного влияния солевого воздействия на бетон); второй (II) – погруженный на 45 суток в солевой раствор (5%-ный раствор NaCl).

Цель эксперимента заключалась в выявлении закономерностей изменения свойств цементного камня в агрессивной среде и взаимосвязи с сигналами АЭ в режиме одноосного деформирования.

Для достижения поставленной цели при испытаниях бетонного образца одновременно запускались две программы: одна – для регистрации параметров сигналов АЭ, другая – для регистрации механических величин. При проведении испытаний использовались установка для нагружения – пресс гидравлический ПГМ-500МГ4А, пьезодатчик для регистрации АЭ, осциллограф и компьютер.



**Рисунок 1. – Разрушенные образцы цементного камня:
при нормально-влажностных условиях (а);
с хлоридной коррозией (б) – находился в соляном растворе 45 суток**

Механизм разрушения тесно связан с энергией межатомной связи и тепловым движением атомов в цементном камне. Процесс разрушения бетона под напряжением можно разделить на стадии [5]:

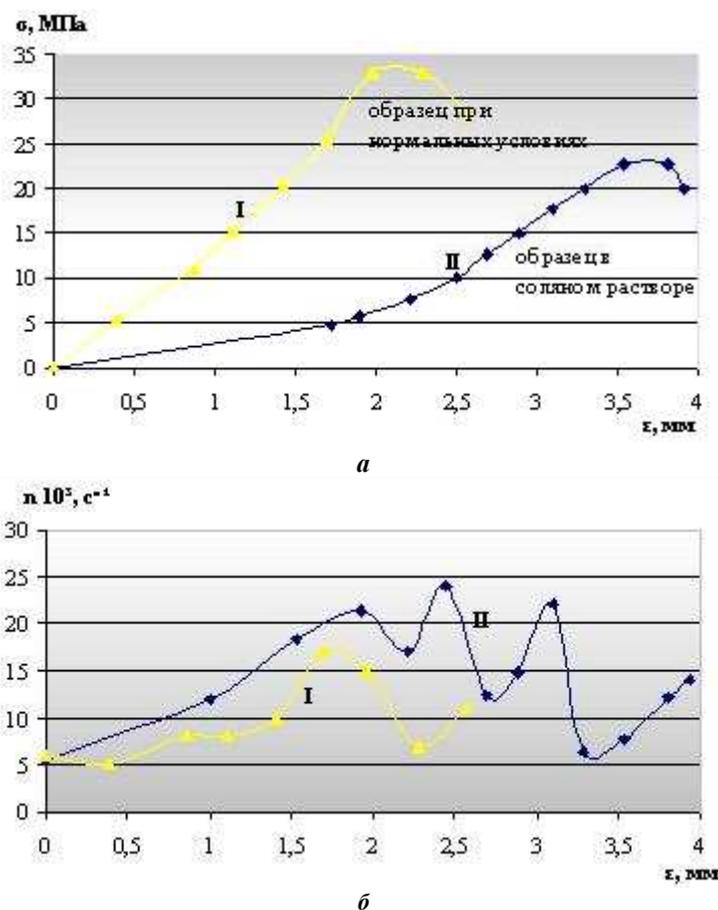
- 1) возмущение межатомных химических связей под действием механической нагрузки;
- 2) разрыв механически возбужденных связей термическими флуктуациями, создаваемыми тепловым колебательным движением;
- 3) накопление разорванных химических связей в нагруженном цементном камне, что приводит к разрыву его на части.

Образовавшиеся радикалы вследствие разрыва химических связей вступают в реакции с другими группировками структуры из-за большой химической активности первых, что является причиной образования разрушенной микрообласти, которая становится местом зарождения трещины в цементном камне. Именно тепловые флуктуации являются причиной разрыва межатомных связей, находящихся под механической нагрузкой. Концентрация разорванных связей под напряжением постепенно возрастает до момента образования и развития магистральной трещины. Приложенная к цементному камню механическая сила не разрывает связи между атомами, а только деформирует и возбуждает их. Таким образом, разрыв химических связей осуществляется термическими флуктуациями за счет энергии теплового движения [5].

При хлоридной коррозии в случае воздействия испытательных солевых растворов на образец в последнем возникают еще и дополнительные изменения. К ним можно отнести: кристаллизационное давление накопившейся соли, которая образовалась после перенасыщения ее раствором в малых по объемам дефектах структуры цементного камня, в зонах контакта составляющих бетона и микротрещинах зерен заполнителя [6]; усиление процесса миграции воды и рост влагоемкости бетона, в объеме пор которого накапливается соль; возникновение напряженного состояния на уровне микроструктуры цементного камня. Ион Cl^- легко мигрирует через цементное тесто, при этом скорость диффузии зависит от соотношения Cl^-/OH^- . В цементном камне миграция ионов Cl^- происходит через области повышенной проницаемости: микротрещины, капилляры и открытые поры. Связывание ионов Cl^- и их диффузионная способность определяет интенсивность хлоридной коррозии [7].

Рост прочности образца II (рисунок 2, а), находящегося в соляной среде, на начальной стадии эксперимента обеспечивается за счет кальматации пор кристаллами соли. Вследствие этого уменьшается количество зон с нарушениями сплошности структуры материала, которые под нагрузкой создают в нем напряженное состояние, являются концентраторами напряжений и вызывают зарождение трещин под действием внешних нагрузок [5]. При возрастании напряжений до уровня нижней границы микротрещинообразования происходит уплотнение структуры бетона, что снижает скорость проникновения в материал химически агрессивных реакторов по сравнению с ненагруженным бетоном. При дальнейшем росте

напряжений цементного камня в структуре материала начинается процесс образования, накопления и развития микротрещин, структура разрыхляется, скорость проникновения агрессивных сред в структуру возрастает. Следовательно, коррозионные повреждения «расшатывают» структуру бетона. В этом случае процессы коррозионного и силового разрушения носят взаимно усиливающий характер [8].



a – зависимость напряжений σ от относительной деформации ε ;
b – зависимость активности АЭ от деформации ε

Рисунок 2. – Взаимосвязь между прочностными и АЭ характеристиками образцов цементного камня, находившегося в естественных условиях (I) и в 5%-ном растворе NaCl (II)

На начальном этапе циклических испытаний происходит накопление повреждений в области концентратора. В результате данных процессов генерируются акустико-эмиссионные сигналы, несущественно отличающиеся как по активности, так и по величине амплитуды, характерные для двух образцов (рисунок 2, б). Активность сигналов резко возрастает в момент перехода от упругой деформации к пластическому течению. Однако при дальнейшем нагружении образцов на участке деформационного упрочнения наблюдается уменьшение регистрируемых импульсов АЭ. При увеличении локального напряжения до значения, превосходящего предел прочности материала, возникает скачкообразное увеличение дефекта, т.е. микровзрыв, что также сопровождается сигналами АЭ.

Таким образом, можно сделать вывод: когда напряжение в образцах приближается к исчерпывающему ресурсу материала, начинается резкий рост числа импульсов [9].

При коррозионных испытаниях метод АЭ особенно эффективен для слежения за коррозией под напряжением. Напряжения ускоряют процесс коррозии, в образце появляются трещины, деформация усиливается. Возникновение коррозионных трещин сопровождается появлением интенсивных сигналов АЭ, значительно отличающихся от сигналов в образце, находившемся в естественных условиях. Интенсивность и амплитуда акустических сигналов на всех стадиях эксперимента значительно выше у образца, находившегося в агрессивной среде, чем у образца, не подвергнувшегося коррозионным изменениям. По этим отличительным признакам можно судить о протекании процесса без доступа к месту коррозионного повреждения [4].

Заключение. С помощью регистрации данных акустической эмиссии определена связь между акустическими сигналами и механизмом хлоридной коррозии цементного камня при его деформационном изменении. Опираясь на результаты проведенных исследований возможно использование метода акустической эмиссии в качестве сопровождения бетонных объектов, подверженных в процессе эксплуатации агрессивному воздействию среды, усиленных механических нагрузок. Данный метод может быть использован и для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения эксплуатации или испытаний и предотвращения разрушения изделия, выражающегося в получении информации о возникновении и развитии опасных состояний в режиме реального времени, а также определении его ресурса на любой стадии эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yzgbkru.com/gazovaya-korroziya-betona>.
2. Москвин, В.М. Коррозия бетона / В.М. Москвин. – М. : Госстройиздат, 1952. – 337 с.
3. Соколкин, А.В. Акустико-эмиссионная диагностика коррозионно-механической повреждаемости объектов из низколегированной стали : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / А.В. Соколкин. – Екатеринбург, 2003.
4. Сазонов, А.А. Выявление язвенной коррозии на промышленных трубопроводах методом акустической эмиссии / А.А. Сазонов, А.Н. Мисейко // Диагностика трубопроводов : тез. докл. 3-й междунар. конф. – М., 2001.
5. Журков, С.Н. Физические основы прочности / С.Н. Журков // Наука и человечество : междунар. ежегодник. – М. : АН СССР, 1973. – С. 177–193.
6. Ботяновский, Э.И. Влияние многократных механических нагрузок на физико-химические свойства тяжелого бетона / Э.И. Ботяновский, А.И. Бондарович // Проблемы современного бетона и железобетона, 2009. – Ч. 2 : Технология бетона. – С. 62–79.
7. Вернигорова, В.Н. Химия композиционных материалов на неорганических вяжущих / В.Н. Вернигорова, К.Н. Махамбетова, С.М. Саженко. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 163 с.
8. Пахомова, Е.Г. Прочность изгибаемых железобетонных конструкций при коррозионных повреждениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.Г. Пахомова. – Орел, 2006.
9. Параметры сигналов акустической эмиссии и их применение при мониторинге состояния структуры бетона / Д.Н. Шабанов [и др.] // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 74–78.
10. Маринин, А.Н. Соппротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников. – Саратов : Издат. центр «РАТА», 2008. – 296 с.
11. Mezenov, V. Tough call for coating / V. Mezenov, M. Golovnenkova // Bridge: design and engineering. – 2009. – № 55. – V. 15. – 64 p.
12. Aitcin P.-C. The Art and Science of Durable High-Performance Concrete / P.-C. Aitcin // Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers. – Bucharest, 2003. – June. – P. 69–88.
13. Di Maio A.A. Chloride profiles and diffusion coefficients in structures located in marine environments / A.A. Di Maio, L.J. Lima, L.P. Traversa // Structural Concrete. – 2004. – 5 № 1. – P. 1–4.

Поступила 05.12.2019

METHOD OF ACOUSTIC-EMISSION STUDY OF THE INTERNAL STATE OF CEMENT STONE DURING ITS CHLORIDE CORROSION

D. SHABANOV, A. YAGUBKIN, E. BOROVKOVA, E. TRAMBICKIJ

In the work, acoustic emission (AE) signals arising as a result of imitation and growth of a corrosion defect on a cement stone sample in laboratory conditions are investigated. The objective of the study was to identify patterns of emission of acoustic emission signals depending on the mechanism of chloride corrosion of concrete. The obtained experimental data can serve as a basis for creating a criterion for the degree of danger of corrosion damage at concrete objects for various operational purposes.

Key words: *acoustic emission, chloride corrosion, cement stone, crack formation dynamics.*