

Диагностика разрушения армированного бетона в условиях изгиба по параметрам электрического отклика на ударное воздействие

© Т.В. Фурса,¹ Д.Д. Данн,¹ М.В. Петров,¹ А.Н. Соколовский²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

² University of Washington, Seattle, Department of Materials Science and Engineering, Seattle, United States
e-mail: fursa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 1 марта 2018 г.)

Исследованы закономерности изменения напряженно-деформированного состояния армированного бетона в процессе испытания на четырехточечный изгиб. Проанализировано изменение характеристик электрического отклика на ударное воздействие в процессе последовательного увеличения внешней нагрузки. Выявлены закономерности связи параметров электрического отклика на ударное воздействие с этапами напряженно-деформированного состояния армированных балок в процессе изгиба. Предложены критерии определения стадий разрушения армированных балок по параметрам электрического отклика.

DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46969.91-18

Введение

Разрушение материалов на основе цемента является очень важным вопросом, так как структурная целостность инженерных сооружений имеет большое значение для обеспечения безопасности как инфраструктуры, так и людей. По объему использования в различных областях строительства железобетон находится на одном из первых мест. Это определяется, прежде всего, его сравнительной дешевизной и долговечностью. Долговечность железобетонной конструкции зависит от коррозии, возникающей под воздействием внешней агрессивной среды. В результате этого происходит потеря несущей способности железобетонных конструкций и в целом зданий и сооружений. Композиционная полимерная арматура все чаще используется в качестве альтернативы стали, благодаря ее электромагнитной прозрачности, более высокой стойкости к коррозии в агрессивных средах и высокому соотношению прочности к весу, по сравнению со стальной арматурой [1]. Конструкции из армированного бетона часто эксплуатируются в условиях изгиба. Поэтому поведение бетонных балок в условиях изгиба широко изучается в литературе. Исследуются деформации и напряжения в бетонных балках, изучаются модели изгибных трещин, исследуется нагрузочно-деформационное поведение и процессы трещинообразования в условиях изгиба [2,3]. Поведение бетонных армированных балок в условиях изгиба в значительной степени зависит от прочности связи арматуры с бетоном. Поведение связи широко проанализировано при краткосрочном тестировании армированного бетона в процедуре выдвигных испытаний [4]. В процессе длительной эксплуатации в естественных условиях конструкций из армированного бетона происходит их постепенное разрушение. Поэтому существует необходимость разработки методов контроля с целью обеспечения безопасной эксплуатации инженерных кон-

струкций. В любой системе оценки и мониторинга жизненно важно использовать неразрушающий контроль, который является надежным и предоставляет информацию о реальном состоянии структуры. В настоящее время предложено большое количество методов, которые позволяют определять повреждения в бетоне. Среди них метод акустической эмиссии [5,6], электрической и электромагнитной эмиссии [7–9], импакт-эхо методы [10,11], ультразвуковые и лазерные методы [12–15], импедансные методы [16,17] и др. Наряду с этими методами разрабатывается метод оценки повреждения бетона, основанный на характеристиках электрического отклика, возникающего в бетоне в результате импульсного механического воздействия [18–21].

Суть метода состоит в том, что объект исследования подвергается слабому ударному воздействию, в результате чего в образце начинают распространяться акустические волны, которые приводят к появлению переменного электрического поля. Электрическое поле является следствием деформации и смещения упругой волной двойных электрических слоев, расположенных на границах компонентов в бетоне и поляризации пьезокварца, который содержится в песке и гравии. Электрический измерительный приемник располагается в непосредственной близости от образца и находится в зоне действия этого поля. Проведенными ранее исследованиями установлено, что основной вклад в электрический отклик на ударное воздействие бетона вносит составляющая, связанная с пьезоэлектрическим эффектом при деформации пьезоэлектрических включений [18]. Разработанная на основе классических соотношений электродинамики и механики сплошных сред физико-математическая модель устанавливает однозначную связь между параметрами акустических волн, формирующихся в материале при ударном воздействии и характеристиками электрического отклика [20]. Поэтому параметры электрического отклика связаны с характе-

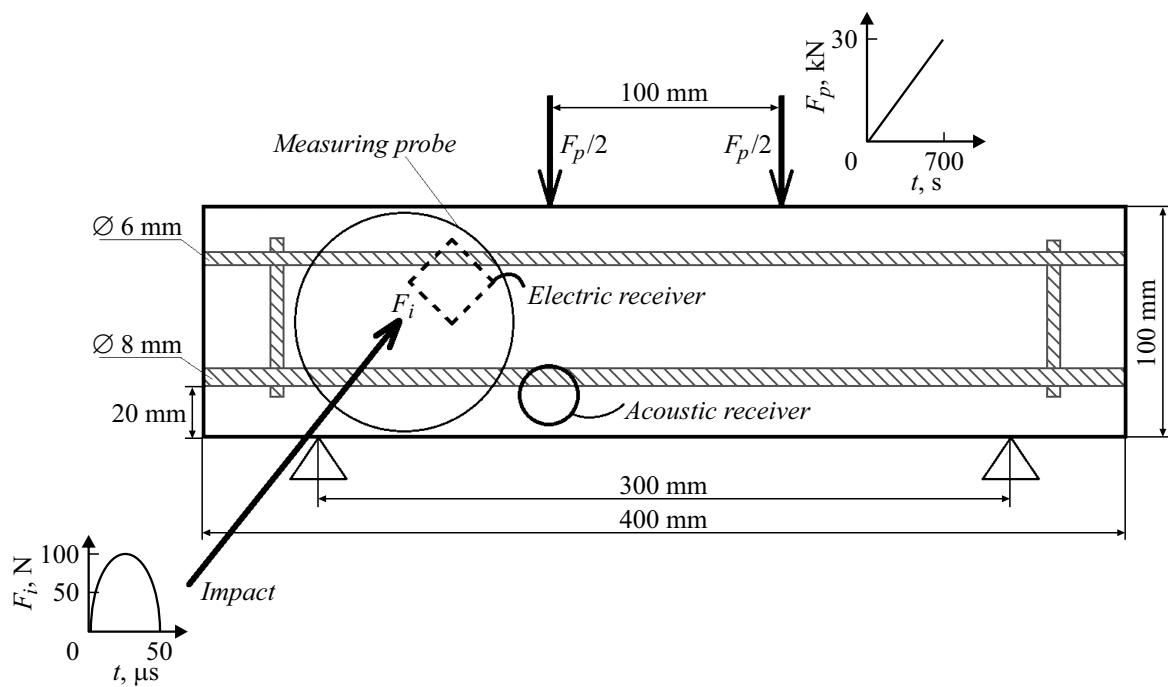


Рис. 1. Схема испытания армированных бетонных балок на изгиб.

ристиками упругих волн и надежно отражают процессы их взаимодействия с внутренними структурными неоднородностями и дефектами. Основным преимуществом предлагаемого в настоящей работе способа является то, что электрический отклик чувствителен к волнам, распространяющимся во всех направлениях в образце. Это связано с тем, что электрические оси пьезоэлектрических включений имеют различное направление. В результате этого предлагаемый метод чувствителен к дефектам при их различной ориентации и конфигурации.

Целью исследований приведенных в настоящей работе являлось изучение закономерностей изменения параметров электрического отклика на ударное воздействие армированных бетонных балок в процессе изгиба и поиск диагностических критериев оценки динамики их разрушения.

1. Методика экспериментальных исследований

Проведены экспериментальные исследования параметров электрического отклика на ударное воздействие образцов армированного бетона в условиях изгиба.

Для проведения исследований были изготовлены балки бетона размером $100 \times 100 \times 400$ мм, содержащие арматурный каркас. Арматурный каркас состоял из двух стальных или стеклопластиковых арматурных стержней диаметрами 6 и 8 мм длиной 400 мм, которые были соединены между собой перемычками. Была использована стальная и стеклопластиковая арматура периодического профиля. Изготовление образцов бетона

производилось согласно ГОСТ 7473-2010. Соотношение цемент/песок/крупный заполнитель было 1:2:4 с максимальным размером заполнителя 20 мм. Водно-цементное отношение было 0.5.

Были проведены исследования армированных бетонных балок в условиях комплексного квазистатического нагружения на четырехточечный изгиб с постоянной скоростью и периодического слабого ударного воздействия. Испытание на изгиб проводилось с использованием компьютеризированного пресса ИП-500. Расстояние между нижними и верхними опорами для проведения четырехточечного изгиба задавалось ГОСТ 10180-2012 и ASTM C78/C78M. Скорость нагружения составляла 0.05 кН/с. Измерение нагрузки производилось датчиком давления Kogund DI-120, а смещение с помощью датчика STTLX0050 Matest. В процессе нагружения с помощью специальной программы производилась регистрация нагрузки и смещения с дискретом по времени, равным 1 с. В процессе квазистатического изгиба с постоянной скоростью с начала загрузки до разрушения проводилось дополнительное периодическое (через каждые 5–10 с) слабое ударное воздействие вдоль боковой поверхности образца и измерялся электрический отклик на это воздействие. Для регистрации электрического отклика был использован аппаратно-программный комплекс, позволяющий производить импульсное ударное воздействие по образцу и регистрацию электрического отклика. Комплекс состоит из выносного измерительного зонда, источника питания, платы ввода-вывода и компьютера. Выносной зонд представляет собой металлический стакан, внутри которого расположено ударное устройство и дифференциальный электрический датчик.

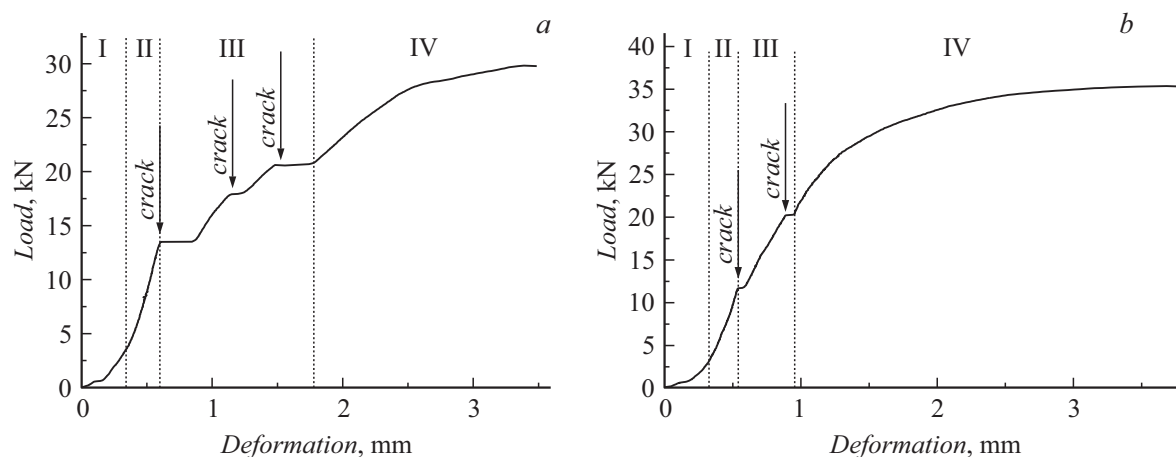


Рис. 2. Нагрузочные кривые при изгибе: *a* — бетона, армированного стеклопластиковой и *b* — стальной арматурой.

Ударное воздействие осуществляется с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой удара (100 N) и длительностью 50 μ s. Регистрация электрического сигнала производится с помощью дифференциального емкостного датчика, который позволяет значительно повысить соотношение сигнал-помеха. Приемник дифференциального датчика состоит из измерительного электрода, размещенного на высоте 2 mm от поверхности образца, и компенсационного электрода, который находится на высоте 25 mm выше от измерительного электрода. Более подробно конструкция, достоинства дифференциального датчика и методика измерения электрического отклика на ударное воздействие изложены в работе [19].

Для проведения измерений электрического отклика в условиях изгиба измерительный зонд с помощью резиновых жгутов прикреплялся к боковой поверхности образца в зоне между верхним и нижним роллерами. Затем образец бетона вместе с зондом устанавливался на нижние роликовые опоры. На рис. 1 приведена схема эксперимента.

Нагружение производилось вплоть до момента, когда возникало резкое падение нагрузки на 10 kN. Для этого в управляющей программе задавалось максимальное снижение нагрузки, при котором происходила автоматическая остановка пресса.

Для обработки полученных данных используются стандартная программа Origin и специальные программы, разработанные в среде программирования LabVIEW.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Анализ напряженно-деформированного состояния армированного бетона при изгибе

В процессе изгиба в армированной бетонной балке возникают внутренние механические напряжения, которые в различных областях могут достигать прочности

на разрыв, и начинается процесс разрушения. Основная часть дефектов вызвана действием на армированную балку изгибающих моментов. Следовательно, характер разрушения армированной балки целесообразнее исследовать в процессе изгиба.

Проведены экспериментальные исследования характера трансформации упругопластических характеристик бетонных балок с различным видом арматуры в условиях испытания на изгиб. В процессе испытания производилось нагружение образцов армированного бетона на изгиб вплоть до момента, когда падение нагрузки составляло 10 kN, но не происходило полной потери целостности образцов. На рис. 2 приведены экспериментальные нагрузочные кривые при изгибных испытаниях бетонных балок.

Нагрузочные кривые при изгибе армированных балок имеют четыре характерных участка. Начальный криволинейный участок I от 0 до 3.5 kN связан с разрушением более слабого поверхностного слоя бетона в зонах контакта с нижними и верхними роллерами. Затем идет участок линейной упругой деформации бетона II. Затем наступает этап появления трещин в нижнем слое бетона — зоне растяжения III. При нагрузках 12–14 kN на нагрузочных кривых наблюдаются участки возрастания деформации без изменения нагрузки, связанные с возникновением трещин. Так как испытание на изгиб производилось с постоянной скоростью нагружения, то не происходило уменьшения нагрузки в момент прорастания трещины за счет обратной связи. В результате этого на нагрузочной кривой появляются полочки. Так как пластиковая арматура имеет меньший модуль упругости, то при одинаковой внешней нагрузке ее деформация значительно больше и на нагрузочной кривой более ярко видны участки возникновения или скачкообразного прорастания трещин. Как видно из рис. 2, при нагрузке выше 20 kN нагрузочная кривая переходит в область нелинейных деформаций IV. На этом этапе, наряду с нарушением зоны контакта арматуры с бетоном, протекают процессы разрушения бетона в сжатой зоне. Как

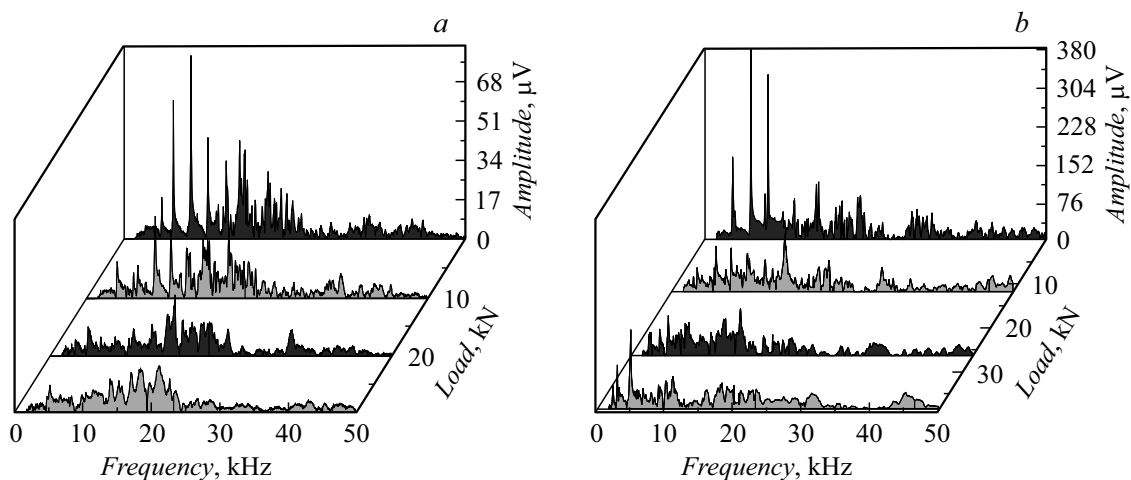


Рис. 3. Изменение амплитудно-частотных характеристик электрических откликов из бетонных балок, армированных стеклопластиковой (а) и стальной (б) арматурами в процессе изгиба.

видно из рис. 2, зоны III и IV имеют различия для бетона, армированного стальной и стеклопластиковой арматурой. В зоне трещинообразования III деформация балки, армированной стеклопластиковой арматурой, составляет порядка 1.1 mm, а деформация балки, армированной стальной арматурой, порядка 0.5 mm. Отличия в разрушении бетона, армированного стальной и стеклопластиковой арматурой, заключаются в том, что после образования трещин пластиковая арматура за счет меньшего модуля упругости прогибается сильнее. Размер микро- и макротрещин при одинаковой нагрузке в бетоне с металлической арматурой меньше, чем в бетоне со стеклопластиковой арматурой. В результате этого максимальная нагрузка, которую выдерживают образцы со стальной арматурой, выше, чем для образцов с пластиковой арматурой.

Установленные особенности в характере разрушения бетонных балок с различным типом арматуры должны найти свое отражение в параметрах электрического отклика, зарегистрированного на различных этапах изгибных испытаний.

2.2. Поиск диагностических критериев оценки разрушения армированного бетона в условиях изгиба

Для выявления диагностических критериев проведено всестороннее исследование ряда параметров электрического отклика на упругое ударное воздействие, и установлены основные закономерности их изменения в условиях разрушения армированных бетонных балок в условиях четырехточечного изгиба.

Механические напряжения, возникающие под действием внешней нагрузки, приводят к развитию трещин в бетоне. На разных этапах изгибных испытаний формируются трещины различных размеров и ориентации. С увеличением внешней механической нагрузки происходит увеличение размера и концентрации трещин

в различных нарушенных зонах образца. Акустические волны, формирующиеся в образце в результате ударного воздействия, взаимодействуют с трещинами. При взаимодействии с трещинами происходит отражение акустических волн от трещин и их распространение вокруг трещин, что приводит при многократном прохождении фронта акустического возбуждения через образец к формированию в дефектном образце колебаний различных периодов. Наличие колебаний, имеющих различный период, отслеживает спектральная характеристика сигнала, полученная с помощью фурье-преобразования.

На рис. 3. приведены типичные спектры электрических сигналов из армированных бетонных балок в процессе их изгиба. Из рис. 3 видно, что в процессе последовательного увеличения нагрузки в процессе изгиба наблюдается уменьшение амплитуды большинства спектральных пиков электрических откликов. Кроме того, в процессе разрушения происходит значительное уменьшение доминирующих пиков, в результате чего в спектрах сигналов наблюдается большое количество практически равнозначных спектральных пиков. Полученные результаты свидетельствуют о том, что амплитудно-частотные характеристики несут информацию о процессах разрушения армированного бетона в условиях изгиба.

Для количественной оценки изменения формы амплитудно-частотных характеристик электрических сигналов был использован корреляционный анализ. С помощью программы в среде программирования LabVIEW осуществлялось последовательное смещение спектров сигналов, зарегистрированных на различных этапах нагружения со спектром сигнала, зарегистрированного до нагружения, определялся максимальный коэффициент взаимной корреляции двух сравниваемых спектров и величина смещения по частоте, при котором наблюдается максимальный коэффициент корреляции. Максимальный коэффициент корреляции дает информацию об изменении формы спектра сигнала, регистрируе-

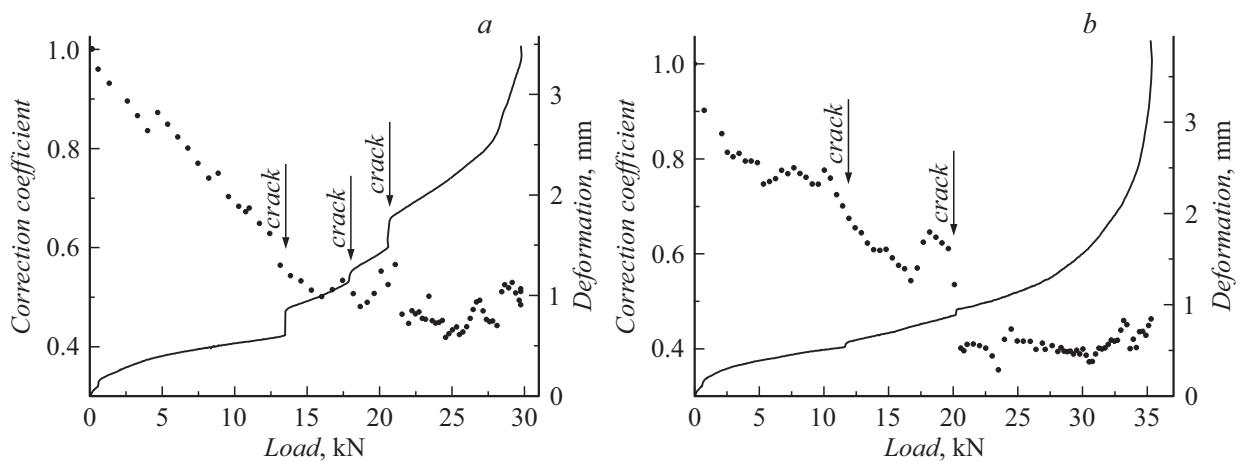


Рис. 4. Изменение максимального коэффициента корреляции спектра сигнала в процессе изгиба бетонных балок, армированных стеклопластиковой (а) и стальной (б) арматурой.

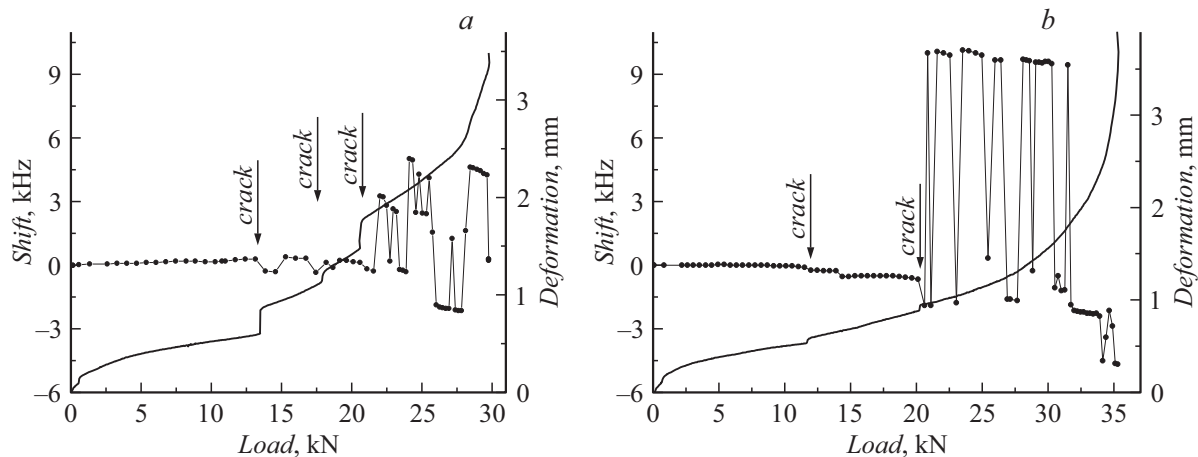


Рис. 5. Изменение смещения по частоте, при котором наблюдается максимальный коэффициент корреляции, в процессе изгиба бетонных балок, армированных стеклопластиковой (а) и стальной (б) арматурой.

мого в процессе возрастания внешней нагрузки. Смещение по частоте, при котором наблюдается максимальный коэффициент корреляции, позволяет оценить смещение спектра сигнала в сторону высоких или низких частот. На рис. 4 приведены зависимости максимального коэффициента корреляции, а на рис. 5 смещения для образцов армированного бетона в условиях изгиба.

Изменения спектрального состава электрического отклика происходит за счет появления дополнительных спектральных пиков при взаимодействии акустических волн возбуждения с образовавшимися трещинами. Наблюдается резкое уменьшение коэффициента корреляции в моменты скачкообразного прорастания трещин в зоне растяжения и изменения смещения, которые коррелируют с появлением или скачкообразным прорастанием трещин. При переходе в IV стадию нелинейной деформации, где происходит разрушение в бетонной зоне, наблюдается большое количество близких по величине спектральных пиков, соотношение между которыми меняется в процессе разрушения. В результате

чего наблюдается скачкообразное изменение смещения то в сторону увеличения, то в сторону снижения и общее уменьшение коэффициента корреляции до 0.4–0.5. Эти два параметра могут быть использованы в качестве диагностических критериев для оценки процессов трещинообразования в условиях действия сжимающих нагрузок.

В результате проведения исследований установлено, что при используемой нами методике измерения (см. рис. 1) имеются особенности, связанные с геометрией расположения электрического и акустического датчиков относительно трещин, которые формируются в бетонной балке в процессе изгиба. В частности, на рис. 6 приведена фотография бетонной балки после разрушения в прессе.

При проведении испытаний для улучшения качества контакта подложки ударного устройства и акустического приемника производилось нанесение на поверхность испытываемого образца иммерсионного слоя из литола. Поэтому на рис. 7 явно видны отпечатки в местах расположения подложки С, по которой производится

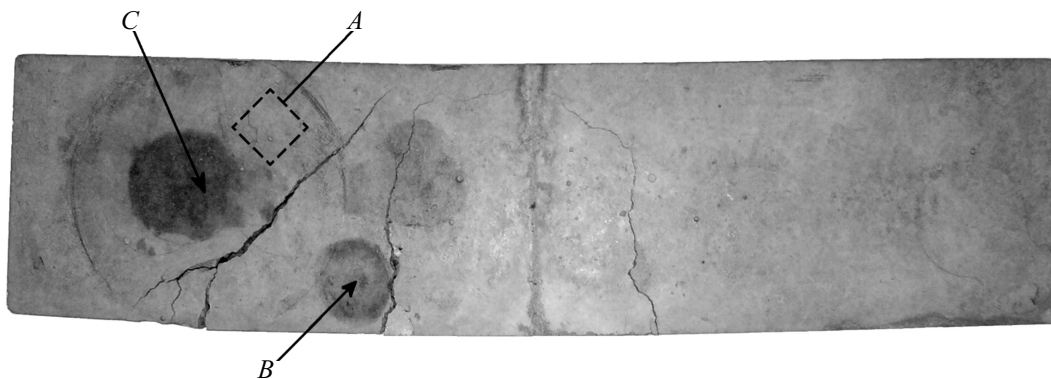


Рис. 6. Фотография бетонной балки, армированной стеклопластиковой арматурой, после проведения испытаний на изгиб.

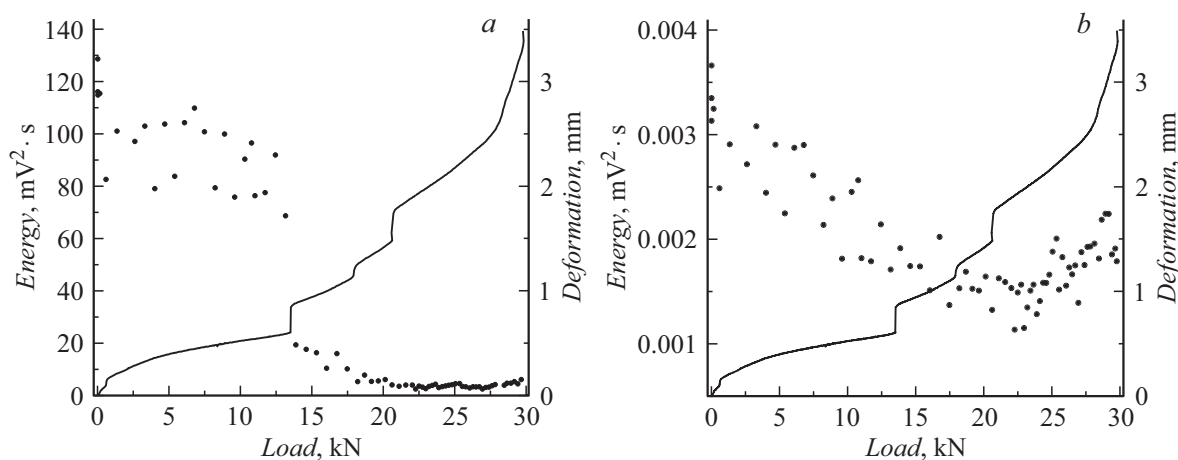


Рис. 7. Изменение энергии акустического (а) и электрического (б) сигналов в процессе нагружения армированной стеклопластиковой арматурой бетонной балки на четырехточечный изгиб.

удар бойком ударного устройства и акустического приемника *B*. Как видно из рисунка, в процессе разрушения происходит прорастание трещины между расположением электрического и акустического датчиков. Наличие такой трещины приводит к тому, что электрический *A* и акустический *B* датчики по разному располагаются относительно точки удара и трещины. В результате этой зависимости энергии акустического и электрического сигналов имеют существенные различия (см. рис. 7).

Как видно из рис. 7, зависимости энергии электрических и акустических сигналов хорошо коррелируют с геометрией расположения датчиков и характером разрушения армированной бетонной балки. После того как произошло появление макротрещины в растянутой зоне (при нагрузке 13.5 kN) резко (в 3.5 раза) уменьшилась энергия акустического сигнала. Это свидетельствует о том, что трещина прошла через всю толщу образца и акустическая волна, возникающая при ударном воздействии, практически полностью отразилась от этой трещины и не дошла до места расположения акустического приемника *B*. Наряду с этим электрический сигнал на всем протяжении от начала нагружения и до нагрузки 22 kN уменьшается практически по линейной

зависимости. Уменьшение энергии электрических откликов происходит в результате того, что пьезоэлектрические источники электрического отклика (кварцевые включения) зажимаются возникающими внутренними напряжениями в условиях постепенно возрастающей внешней нагрузки. Наблюдающееся после 22 kN возрастание энергии электрических откликов может происходить за счет вклада в результирующий отклик отраженных от сквозной трещины волн. Таким образом, по характеру трансформации энергии электрических и акустических откликов можно судить о геометрии прорастания трещин.

В процессе изгиба напряжения в различных областях (местах) бетонной балки могут достигать разрушающих напряжений на растяжение или сжатие, и начинается процесс трещинообразования. При ударе по поверхности трехмерного образца продольная волна распространяется в образец по полусферическому волновому фронту и отражается от дефектов, неоднородностей и шести внешних границ образца. В результате в образце формируется сложная волновая картина, которая определяется геометрией образца, его упругими характеристиками, длительностью удара и наличием дефек-

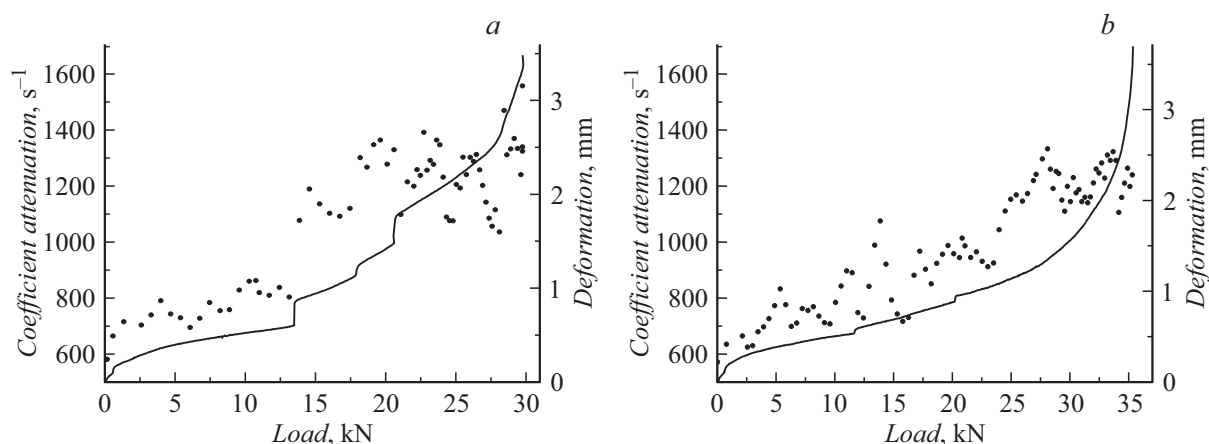


Рис. 8. Изменение коэффициента затухания энергии электрических откликов из балок, армированных стеклопластиковой (а) и стальной (b) арматурой в условиях испытания на изгиб.

тов [10,22]. Многократное рассеяние акустических волн на неоднородностях и дефектах приводит к затуханию энергии акустического возбуждения, а следовательно, и электрического отклика. Рассеяние упругих волн на трещинах отражает процесс затухания от времени. Для определения коэффициента затухания энергии сигнала из бетонных балок в зависимости от величины внешней нагрузки использован частотно-временной анализ, как это описано в работе [14]. Такая методика позволяет отслеживать затухание энергии сигнала как функцию времени в области любого, выбранного диапазона частот. В данном случае для анализа был выбран частотный диапазон от 2 до 40 kHz, в котором находится основная доля энергии электрических сигналов, возникающих в образцах при упругом ударном воздействии. На рис. 8 приведены графики, которые иллюстрируют зависимость коэффициента затухания энергии электрических откликов от величины внешней механической нагрузки. На рисунках зависимость коэффициента затухания от нагрузки наложена на нагрузочную кривую деформация-нагрузка, что позволяет совместить моменты появления макротрещин и этапы напряженно-деформированного состояния с характером изменения коэффициента затухания.

В поведении бетона, армированного различными типами арматуры, наблюдаются общие закономерности и отличительные особенности. В частности, для обоих типов арматуры наблюдается возрастание коэффициента затухания энергии электрических откликов от начала нагружения до полного разрушения. Однако для бетона, армированного стальной арматурой, общее возрастание происходит в 2 раза, в то время как для бетона, армированного стеклопластиковой арматурой, в 2.5 раза. Кроме того, при переходе во II стадию наблюдается резкое возрастание коэффициента затухания для бетона, армированного стеклопластиковой арматурой, а для бетона, армированного стальной арматурой, происходит плавное возрастание коэффициента затухания. Отличия в разрушении бетона, армированного стальной и стеклопластиковой арматурой заключаются в том,

что после образования трещин пластиковая арматура за счет меньшего модуля упругости прогибается сильнее. В результате чего процессы прорастания трещин в бетоне со стеклопластиковой арматурой протекают более интенсивно, что приводит к тому, что и коэффициент затухания энергии электрических откликов в бетоне со стеклопластиковой арматурой в процессе нагружения растет быстрее. В процессе разрушения армированных бетонных балок на втором этапе возникают и прорастают трещины в нижней растянутой зоне балок. Эти трещины проходят через все сечение балки (100 mm) и имеют большое раскрытие и глубину. Размер этих трещин наиболее близко соответствует длине волны акустического возбуждения при ударном воздействии. Отражающие и рассеивающие свойства неоднородностей определяются размером неоднородности и отношением длины волны возбуждения к эффективному диаметру рассеивателя. В диапазоне частот от 2 до 40 kHz минимальная длина волны (λ) составляет 100 mm. Поэтому наиболее интенсивное рассеяние должно происходить на макротрещинах, которые образуются при изгибе в бетоне растянутой зоны.

Заключение

В настоящей работе проведено исследование закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния армированного стальной и стеклопластиковой арматурой бетона при изгибе и поиск диагностических критериев контроля разрушения армированного бетона на основе регистрации и анализе параметров электрического отклика на ударное воздействие.

Следующие заключительные выводы могут быть сделаны из экспериментального исследования.

Установлено, что нагрузочная зависимость в условиях изгиба для армированных бетонных балок имеет четыре характерных этапа. Начальный этап связан с процессами уплотнения поверхностного слоя образца, затем

идет этап квазиупругой деформации, потом следует этап хрупкого разрушения бетона в зоне растяжения и заключительный этап, связанный с процессами разрушения на границе бетона с арматурой и разрушении бетона в сжатой зоне. Поведение бетонных балок, армированных стальной и стеклопластиковой арматурой, практически идентично, что дает основание предлагать для использования в условиях изгиба как стальную, так и стеклопластиковую арматуру.

Диагностическими признаками предстоящего разрушения армированного бетона является:

— возрастание в 2–2.5 раза коэффициента затухания энергии электрических откликов;

— уширение спектра электрического отклика как в сторону высоких, так и низких частот;

— уменьшение энергии электрических откликов в 2 раза;

— уменьшение максимального коэффициента взаимной корреляции анализируемых спектров сигналов с исходным спектром до 0.4–0.45;

— скачкообразное частотное смещение, при котором наблюдается максимальный коэффициент взаимной корреляции спектров сигналов, регистрируемых на различных этапах нагружения, с исходным спектром до нагружения.

Результаты экспериментов показали, что предложенный метод имеет потенциал для мониторинга эволюции повреждений в бетоне при изгибе.

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда (грант № 16-19-10119).

Список литературы

- [1] *Pendhari S.S., Kant T., Desai Y.M.* // *Compos. Struct.* 2008. Vol. 84. P. 114–124.
- [2] *Gribniak V., Kaklauskas G., Torres L., Daniunas A., Timinskas E., Gudonis E.* // *Compos. Part B Eng.* 2013. Vol. 50. P. 158–170.
- [3] *Paegle I., Minelli F., Fischer G.* // *Cement Concrete Composites.* 2016. Vol. 73. P. 147–163.
- [4] *Yan F., Lin Z., Yang M.* // *Compos. Part B Eng.* 2016. Vol. 98. P. 56–69.
- [5] *Aggelis D.G., Soulioti D.V., Sapouridis N., Barkoula N.M., Paipetis A.S., Matikas T.E.* // *Construction Building Materials.* 2011. Vol. 25. N 11. P. 4126–4131.
- [6] *Alam S.Y., Loukili A.* // *Intern. J. Fracture.* 2017. Vol. 206. N 1. P. 49–66.
- [7] *Kyriazopoulos A., Anastasiadis C., Triantis D., Brown C.J.* // *Constr. Build. Mater.* 2011. Vol. 29. P. 1980–1990.
- [8] *Alexandridis A., Triantis D., Stavrakas I., Stergiopoulos C.* // *Constr. Build. Mater.* 2012. Vol. 30. P. 294–300.
- [9] *Gade S.O., Alaca B.B., Sause M.G.R.* // *J. Nondestructive Evaluation.* 2017. Vol. 36. P. 21.
- [10] *Hsiao C., Cheng C.-C., Liou T., Juang Y.* // *NDT & E Int.* 2008. Vol. 41. P. 98–107.
- [11] *Krzemień K., Hager I.* // *Constr. Build. Mater.* 2015. Vol. 96. P. 155–163.
- [12] *Song H., Popovics J.S.* // *Cement and Concrete Composites.* 2017. Vol. 83. P. 111–124.
- [13] *In C.-W., Schempp F., Kim J.-Y., Jacobs L.J.* // *J. Nondestructive Evaluation.* 2015. Vol. 34. P. 272.
- [14] *Quiviger A., Payan C., Chaix J.-F., Garnier V., Salin J.* // *NDT & E Int.* 2012. Vol. 45. P. 128–132.
- [15] *Махмудов Х.Ф., Менжулин М.Г., Захарян М.В., Султонов У., Абдурахманов З.М.* // *ЖТФ.* 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 79–85. [*Makhmudov Kh.F., Menzhulin M.G., Zakharyan M.V., Sultonov U., Abdurakhmanov Z.M.* // *Techn. Phys.* 2015. Vol. 60. N 11. P. 1651–1657.]
- [16] *Fengqi G., Zhiwu Y., Peng L., Zhi D.* // *Res. Nondestr. Eval.* 2015. Vol. 27. N 1. P. 26–33.
- [17] *Seppänen A., Hallaji M., Pour-Ghaz M.* // *Struct. Health Monit.* 2017. Vol. 16. N 2. P. 215–224.
- [18] *Fursa T.V., Dann D.D., Petrov M.V.* // *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol. 155. P. 451–462.
- [19] *Fursa T.V., Dann D.D., Petrov M.V., Lykov A.E.* // *J. Nondestruct. Eval.* 2017. Vol. 36. Is. 2. N 30.
- [20] *Фурса Т.В., Уцын Г.Е., Данн Д.Д., Петров М.В.* // *Дефектоскопия.* 2017. № 2. С. 24–30. [*Fursa T.V., Utsyn G.E., Dann D.D., Petrov M.V.* // *Russian J. Nondestructive Testing.* 2017. Vol. 53. N 2. P. 104–110.]
- [21] *Суржиков В.П., Федотов П.И., Хорсов Н.Н.* // *ЖТФ.* 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 69–72. [*Surzhikov V.P., Fedotov P.I., Khorsov N.N.* // *Techn. Phys.* 2015. Vol. 60. N 3. P. 385–388.]
- [22] *Lin Y., Sansalone M.* // *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. Vol. 91. N 2. P. 885–893.