

05;12

О механизме механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов на основе цементного вяжущего

© Т.В. Фурса

Томский политехнический университет,
634034 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 3 августа 2000 г.)

Предложен и экспериментально подтвержден механизм механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов на основе цементного вяжущего. Показано, что процесс механоэлектрических преобразований протекает в два этапа: первый — электризация материала в точке удара и второй — механоэлектрические преобразования на границе раздела матрицы и заполнителя.

Явление механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении диэлектрических материалов находит применение при разработке неразрушающего метода контроля механической прочности конструктивных материалов [1]. С целью повышения точности разрабатываемого метода и расширения его функциональных возможностей проводятся исследования источников и механизмов механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах при их ударном возбуждении. В работах [2–4] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований источников механоэлектрических преобразований в бетонах. В данной работе предпринята попытка разработки механизма механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов, состоящих из цементного вяжущего и заполнителя.

Для решения поставленной задачи был выполнен большой объем экспериментальных исследований с использованием метода физического моделирования. В качестве моделей композиционных материалов использовались различные варианты образцов, изготовленных на основе цементной матрицы и различных включений.

Эксперимент проводился следующим образом. По поверхности испытываемого образца производился динамический удар и с помощью двухканального прибора "Emission-1" [5] одновременно регистрировались акустический и электромагнитный сигналы. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. В процессе проведения экспериментов приемники сигналов и ударное устройство располагались относительно образца всегда одинаковым образом. Для механического возбуждения материалов использовалось электромеханическое ударное устройство с длительностью импульса возбуждения порядка $3 \cdot 10^{-5}$ с и скоростью ударяющего тела-бойка порядка 2 м/с.

На рис. 2, *a, b* приведены типичные электромагнитные импульсы (кривые 1) и сигналы акустической эмиссии (кривые 2), зарегистрированные при ударном возбуждении различных по композиционному составу образцов. На рис. 2, *a* показаны сигналы из образца, изготовленно-

го из цемента, песка и воды, а на рис. 2, *b* — сигнал из образца, изготовленного также из цемента, песка и воды, но содержащего одиночное металлическое включение. Из рисунков видно, что в зависимости от состава образцов регистрируются различные электромагнитные отклики, в то время как сигналы акустической эмиссии по форме практически одинаковы. При ударном возбуждении цементно-песчаного образца, являющегося однокомпонентным гетерогенным материалом, регистрируются одиночные электромагнитные отклики, а при переходе на двухкомпонентную систему, состоящую из цементной матрицы и включения, электромагнитный отклик приобретает более сложный колебательный характер.

Появление одиночного электромагнитного отклика при ударном возбуждении цементного камня может быть связано с трибоэлектрическим эффектом при контакте бойка ударного устройства с поверхностью образца, так как известно, что при контакте, трении и последующем разделении материалы электризуются за счет трибоэлектрического эффекта [6]. В работе [7] приведены результаты исследований электризации материалов при ударном нагружении. Доказательством того, что этот сигнал связан с электризацией образца в момент кон-

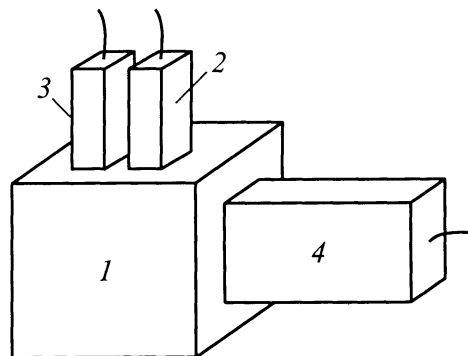


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: 1 — образец, 2 — боек, 3 — детектор акустической эмиссии, 4 — детектор электромагнитного сигнала.

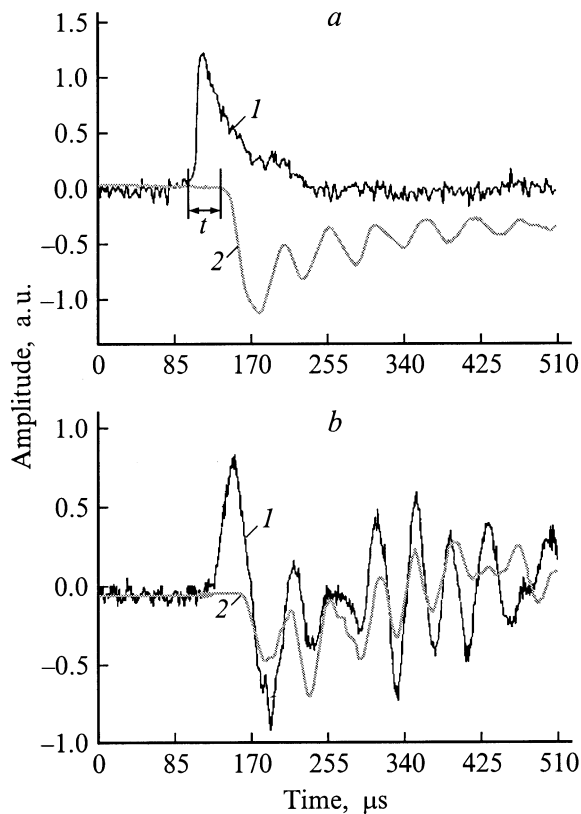


Рис. 2. Типичные электромагнитные импульсы (1) и сигналы акустической эмиссии (2), зарегистрированные при ударном возбуждении модельных образцов.

такта бойка ударного устройства с поверхностью образца служит эксперимент по одновременной регистрации электромагнитного отклика и акустического сигнала (рис. 2, *a*). Наличие задержки по времени регистрации электромагнитного и акустического сигналов (t) связано с различной скоростью прохождения электромагнитной и акустической волн. Процесс механоэлектрических преобразований можно представить следующим образом: в момент касания бойка ударного устройства поверхности образца происходит электризация контактирующих материалов и возникает электрический сигнал, который практически мгновенно регистрируется электрическим датчиком; затем поверхностная или объемная упругая волна (в зависимости от места расположения датчика акустической эмиссии относительно точки приложения удара и геометрии образца) доходит до акустического датчика, и регистрируется сигнал акустической эмиссии. В частности, для случая, приведенного на рис. 2, *a*, сравним время задержки, полученное расчетным и экспериментальным путем. Принимая скорость распространения поверхностной волны в цементном камне ≈ 2000 м/с при расстоянии от точки удара до акустического датчика ≈ 5 см, получаем время прихода акустической волны от точки удара до акустического датчика ≈ 25 μ s. Хорошее совпадение расчетных значений с экспериментальными

($t = 29$ μ s) свидетельствует о том, что электромагнитный сигнал, регистрируемый до появления сигнала акустической эмиссии, возникает в момент удара. Практическое отсутствие колебательной части электромагнитного отклика при ударном возбуждении цементно-песчаных образцов связано с тем, что при используемой нами системе ударного возбуждения имеются ограничения по эффективности взаимодействия с препятствиями, имеющими линейные размеры меньше длины волны возбуждения [8].

Ранее было показано, что при ударном возбуждении бетона, являющегося двухкомпонентным гетерогенным материалом, регистрируется знакопеременный электромагнитный отклик [1]. Было высказано предположение, что возникновение электромагнитного колебательного отклика связано с изменением дипольного момента двойного электрического слоя на границе матрицы и заполняется при прохождении через нее акустической волны. Чтобы показать, что это именно так, были проведены исследования характера изменения формы электромагнитного отклика в процессе твердения модельных бетонов. Для этого были сформированы образцы, состоящие из цементно-песчаной смеси, в которую было помещено по одному зерну гравия. Перед тем как поместить включения из гравия в смесь, было проведено их испытание.

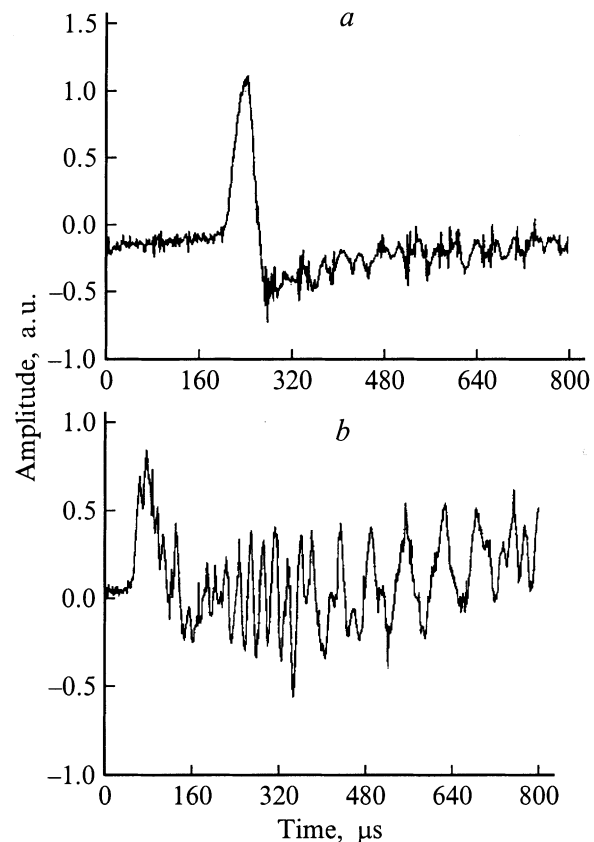


Рис. 3. Типичные электромагнитные отклики из зерен гравия: *a* — мелкозернистого, *b* — крупнозернистого кварцсодержащего.

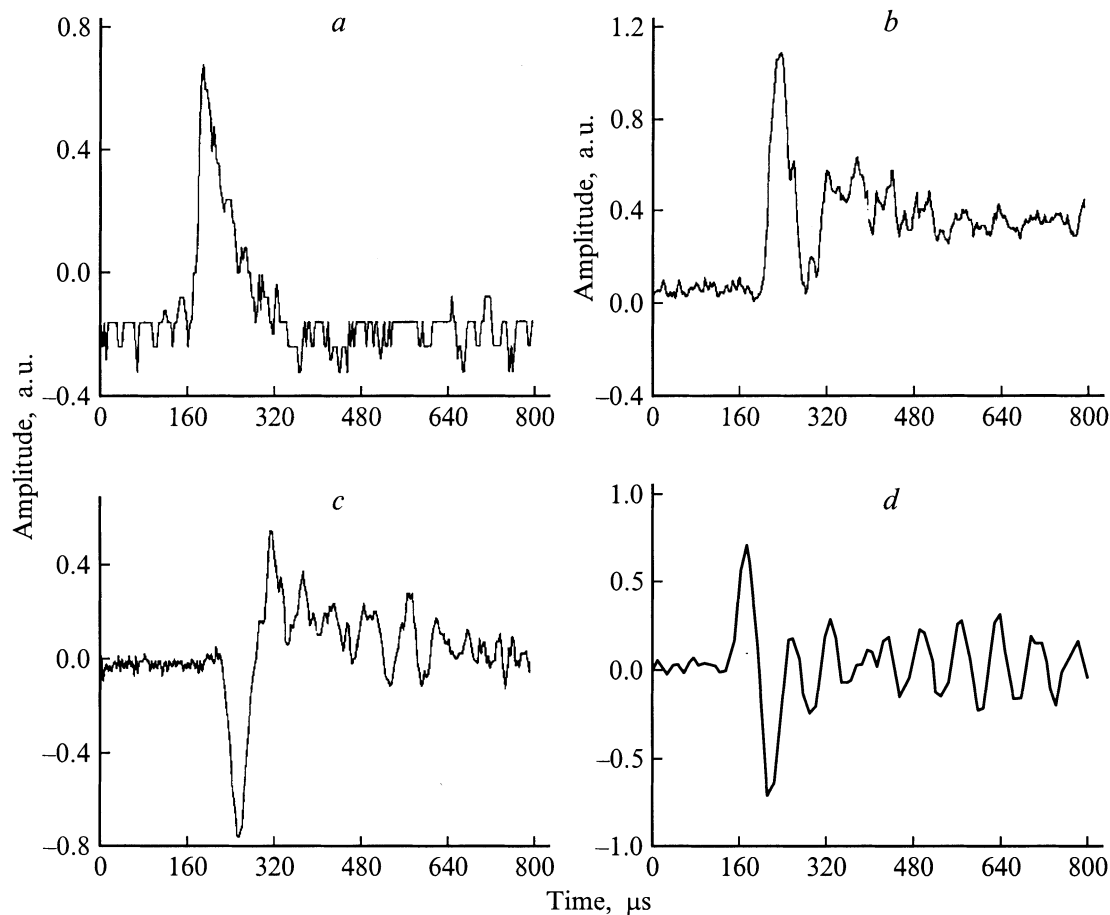


Рис. 4. Типичные электромагнитные отклики из модельных образцов бетона, зарегистрированные на различных стадиях твердения на 5-й (*a*), 13-й (*b*), 19-й (*c*), 30-й день после их изготовления (*d*).

Чтобы исключить влияние состояния поверхности и масштабного фактора на параметры электромагнитного отклика, из зерен гравия были вырезаны образцы одинакового размера ($80 \times 80 \times 7$ mm) и проведена полировка их поверхности. Из этих образцов были выбраны такие, которые отличаются по форме электромагнитного отклика, возникающего при их ударном возбуждении (рис. 3). Сигналы первого вида (рис. 3, *a*) регистрируются при ударном возбуждении гравия, имеющего мелкозернистую структуру, а с повышением зернистости гравия наблюдаются электромагнитные отклики другого вида (рис. 3, *b*). Кроме того, эффективность механоэлектрических преобразований в гравии значительно возрастает, если этот гравий представляет собой кварцсодержащую горную породу.

Затем отобранный таким образом гравий поместили в цементно-песчаную смесь, сформировали образцы размером $100 \times 50 \times 50$ mm и в процессе твердения производили их испытание. На рис. 4 приведены типичные электромагнитные отклики, снятые через 5, 13, 19, 30 дней после изготовления образцов. Из рис. 4 видно, что в начальный момент твердения (*a*) регистрируется одиночный отклик, а при дальнейшем затвердевании

наряду с одиночным появляется знакопеременный электромагнитный отклик (*b, c*). Из практики известно, что процесс твердения бетонов длится порядка 28 суток. Наличие на начальной стадии твердения (рис. 4, *a*) одиночного электромагнитного отклика и отсутствие знакопеременного сигнала, по-видимому, связано с экранировкой электрического сигнала, обусловленного механическими преобразованиями на границе матрицы и включения проводящей средой мокрого цементного теста. В процессе твердения происходят химическое взаимодействие свободной воды с цементом при формировании структуры цементного камня, а также испарение влаги, что ведет к снижению проводимости. Уже на 13-й день затвердевания в электромагнитном отклике появляется знакопеременная составляющая (рис. 4, *b*), величина которой возрастает вплоть до 30-го дня и при дальнейшем твердении больше не изменяется. Полученные результаты при соответствующей доработке могут найти применение в практике для определения степени твердения бетонов. Изменение формы электромагнитных откликов в процессе твердения цементных образцов не зависит от того, какого типа включение помещено в цементно-песчаную смесь, т.е. включение, имеющее отклик типа рис. 3, *a*

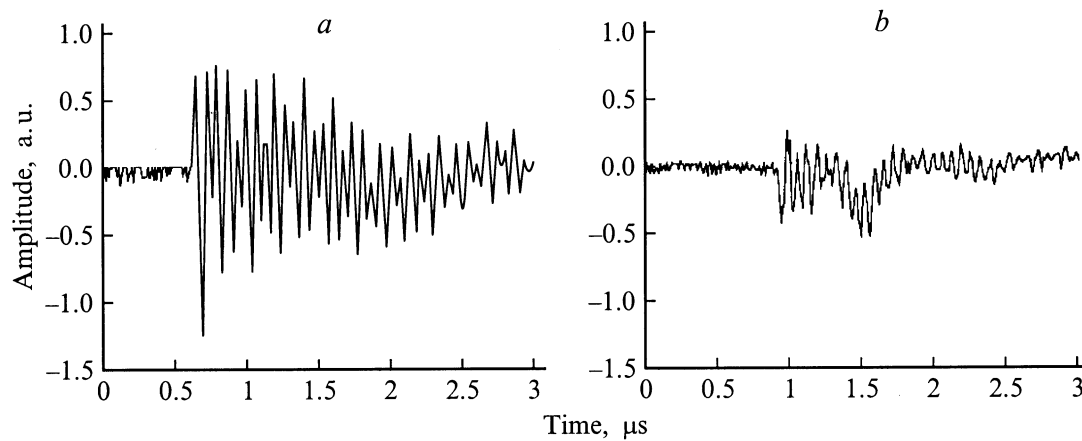


Рис. 5. Электромагнитные отклики из цементных образцов с гладким (а) и шероховатым включениями (б).

или типа рис. 3, б. Как в тех, так и в других образцах при затвердевании формируется знакопеременный электромагнитный отклик. Следовательно, возникновение на определенной стадии твердения знакопеременного электромагнитного отклика связано с акустическим возбуждением двойного электрического слоя на границе цементной матрицы и включения, формирующегося в процессе затвердевания цементного камня.

Из теории формирования адгезионных связей в композиционных материалах, состоящих из вяжущего и заполнителя, известно, что качество адгезионного контакта зависит от состояния поверхности заполнителя [9]. В частности, если поверхность заполнителя более развита, то качество адгезионного контакта такого заполнителя с матрицей становится лучше. Если качество адгезионного контакта влияет на эффективность механоэлектрических преобразований, то в зависимости от состояния поверхности включения амплитуда электромагнитного отклика должна изменяться. Для проверки данного предположения были изготовлены специальные модельные образцы, состоящие из цементной основы и одиночных металлических включений одинаковых размеров, гладких и с искусственно созданной на их поверхности шероховатостью. На рис. 5 приведены типичные электромагнитные отклики из образцов с гладкими и шероховатыми включениями. Видно, что шероховатость поверхности включения приводит к уменьшению амплитуды электромагнитного отклика. Уменьшение амплитуды электромагнитного отклика из образцов с шероховатыми включениями по сравнению с амплитудой отклика из образцов с гладкими включениями, по-видимому, связано с уменьшением эффективной площади двойного электрического слоя синхронно возбуждаемого акустической волной. Эти результаты еще раз свидетельствуют о том, что знакопеременный электромагнитный отклик непосредственно определяется границей адгезионного контакта цементной основы и включения.

Проведенные исследования позволяют представить механизм механоэлектрических преобразований при

ударном возбуждении композиционных материалов следующим образом: в момент удара происходит электризация поверхности материала в точке удара, что приводит к возникновению одиночного электромагнитного отклика; затем в образце формируется упругая волна, которая изменяет дипольный момент двойного электрического слоя на границе матрицы и заполнителя, что приводит к возникновению знакопеременного затухающего сигнала.

Список литературы

- [1] Чахлов В.Л., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф. и др. // Изв. вузов. Сер. Строительство. 1995. № 5–6. С. 54–58.
- [2] Малышков Ю.П., Фурса Т.В., Гордеев В.Ф. и др. // Изв. вузов. Сер. Строительство. 1996. № 12. С. 31–37.
- [3] Фурса Т.В., Ласуков В.В., Малышков Ю.П. и др. // Изв. вузов. Сер. Строительство. 1997. № 10.
- [4] Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батурич Е.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 10. С. 51–55.
- [5] Гордеев В.Ф., Елисеев В.П., Малышков Ю.П. и др. // Дефектоскопия. 1994. № 4. С. 48–54.
- [6] Бивин Ю.К., Викторов В.В., Кулинич Ю.В., Черсин А.С. // Механика тв. тела. 1982. № 1. С. 183–186.
- [7] Громов Ю.А., Каргапольцев А.В., Чахлов Б.В. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1992. № 4. С. 120–122.
- [8] Фурса Т.В., Гордеев В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 3. С. 30–34.
- [9] Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.