

05;12

Механоэлектрические преобразования при упругом ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов

© А.П. Суржиков, Т.В. Фурса

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: fursa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 5 июня 2007 г.)

Упругое ударное возбуждение композиционных диэлектрических материалов приводит к возникновению переменного электромагнитного поля, являющегося суперпозицией нескольких полей: поля, возникающего при приближении ударного элемента к поверхности, имеющей избыточный поверхностный заряд; поля за счет процессов электризации при контакте ударного элемента с поверхностью материала; поля, создаваемого смещением акустической волны зарядов, расположенных на внутренних неоднородностях; поля возникающего при акустических колебаниях поверхностных зарядов и поля, возникающего в пьезоактивных гетерогенных материалах за счет пьезоэффекта.

PACS: 77.65-j

Композиционные диэлектрические материалы часто используются в силовых конструкциях, где к ним предъявляются высокие требования по надежности. Поэтому задача контроля их качества и диагностики разрушения имеет очень важное практическое значение. Для решения этой задачи может быть использовано явление механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах при их импульсном механическом возбуждении [1–4]. Важнейшей составной частью этих работ является изучение явления механоэлектрических преобразований при импульсном механическом возбуждении многокомпонентных композиционных материалов, которое до настоящего времени изучено мало.

Представленная работа посвящена установлению основных процессов, приводящих к формированию переменных электромагнитных полей при ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов.

Исследования были выполнены с помощью разработанного в проблемной лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета измерительного комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение объектов исследования, регистрацию временной реализации электромагнитного и акустического откликов, производить измерение параметров механического возбуждения. Используемая измерительная аппаратура обладает высокой чувствительностью, помехозащищенностью и широкими возможностями по исследованию механоэлектрических преобразований на внутренних неоднородностях. Для регистрации электрической составляющей переменного электромагнитного поля, возникающего при импульсном механическом возбуждении образцов, применялся дифференциальный емкостной датчик, позволяющий значительно уменьшить величину внешних электрических помех. Для механического возбуждения материалов использовалось электромеханическое ударное устройство с длительностью импульса возбуждения в зависимости от материала порядка

$(3–8) \cdot 10^{-5}$ s, энергией $(0.4–1.4) \cdot 10^{-2}$ J и скоростью ударяющего тела порядка 2 m/s. Ударное возбуждение, которое создается в материалах, исследованных в рамках данной работы, напряжения более чем на три порядка меньше разрушающих, относится к области упругой деформации. Это показано путем сравнения механических напряжений в зоне контакта, полученных с использованием пьезопленки, нанесенной на поверхность материала, по которой производился удар, с разрушающими механическими напряжениями на сжатие.

Чтобы установить процессы, приводящие к возникновению электромагнитного отклика, регистрируемого при импульсном механическом возбуждении композиционных диэлектрических материалов, рассмотрим типичные из них (рис. 1). Как видно из рисунка, электромагнитный отклик на ударное возбуждение композиционных диэлектрических материалов состоит из плавной медленно нарастающей составляющей (1), значительного по величине одиночного импульса (2) и колебательной затухающей составляющей электромагнитного отклика (3) с периодом, отличающимся от периода составляющей (2).

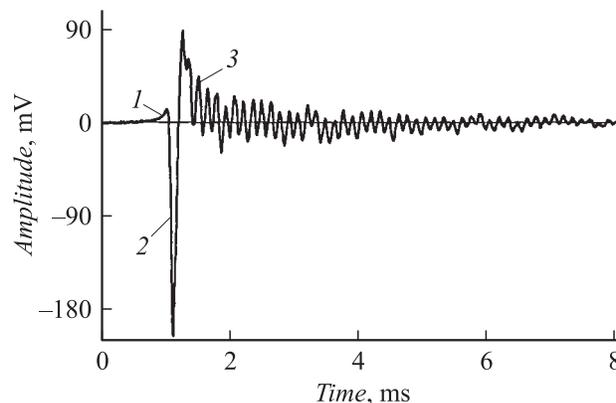


Рис. 1. Электромеханический отклик на ударное возбуждение образца строительной керамики.

Однако следует заметить, что не все из перечисленных составляющих всегда присутствуют в электромагнитных откликах различных по физико-механическим и структурным особенностям материалов и при различных способах их импульсного механического возбуждения.

Экспериментальными исследованиями на ряде диэлектрических материалов, имеющих различную величину плотности эффективного поверхностного заряда, показано, что наличие первой составляющей электромагнитного отклика связано с изменением напряженности электрического поля при приближении ударного элемента к поверхности образца, имеющего случайный поверхностный или объемный заряд. Этот факт (рис. 2) подтверждается данными по изменению величины этой составляющей при электризации поверхности монокристаллов LiF и изменении за ее счет величины и даже знака эффективной поверхностной плотности заряда. Плотность поверхностного заряда была измерена с использованием методики вибрирующего электрода: оказалось, что в исходном состоянии она составляла $1.8 \cdot 10^{-11} \text{ C/cm}^2$, а после электризации путем натирания фетром изменился знак, и ее величина уже составляла $-5.2 \cdot 10^{-11} \text{ C/cm}^2$.

Из рис. 2 видно, что полярность переднего фронта электромагнитного сигнала сменилась, в соответствии с изменением знака заряда: с отрицательной (а) на положительную (б), и амплитуда переднего фронта возросла практически пропорционально увеличению заряда. Кроме того, при электризации трением наряду с нара-

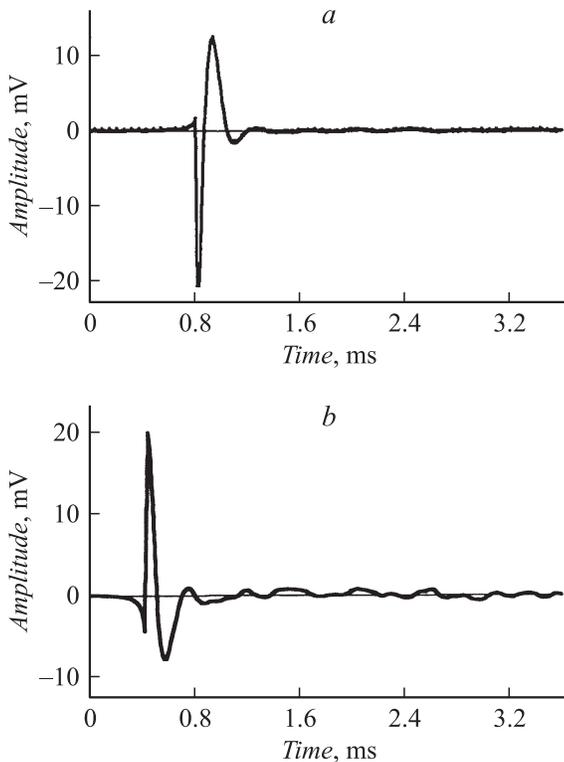


Рис. 2. Типичные формы электромагнитных откликов на ударное возбуждение монокристаллов LiF до (а) и после (б) электризации трением.

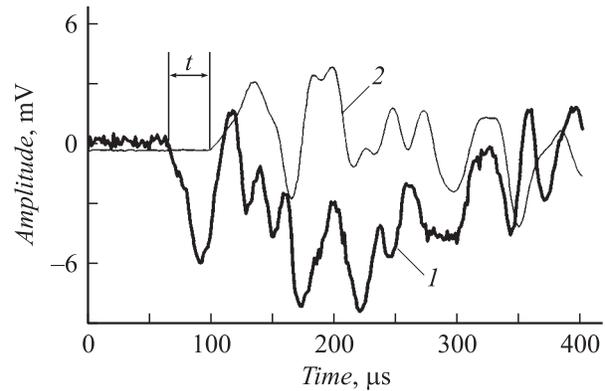


Рис. 3. Электромагнитный (1) и акустический (2) отклик у цементного камня.

танием передней затянутой части электромагнитного отклика происходит возрастание амплитуды всего отклика в целом. Если при натирании образца не происходит изменения знака заряда, то соответственно и не меняется полярность переднего фронта электромагнитного отклика, а изменяется только его амплитуда.

По величине и полярности этой составляющей электромагнитного отклика можно судить о величине и знаке избыточного поверхностного заряда в диэлектриках. При одинаковой геометрии расположения электрического и акустического датчиков относительно точки удара наличие задержки во времени (t) (рис. 3) регистрации электромагнитного и акустического откликов из диэлектрических материалов с плотностью поверхностного заряда $< 10^{-13} \text{ C/cm}^2$ служит доказательством того, что вторая составляющая электромагнитного сигнала связана с электризацией образца в точке контакта ударного элемента с поверхностью образца. В момент касания ударного элемента и 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 акустического датчика относительно точки приложения удара и геометрии образца) доходит до акустического датчика, и регистрируется акустический сигнал. Нами проведено сопоставление экспериментально определенного времени с рассчитанным исходя из геометрии эксперимента и скорости звука в исследуемом образце, и получено очень хорошее их совпадение. Для случая, когда удар производился по верхней поверхности цементного образца размером $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ и с помощью двухканального прибора одновременно регистрировались акустический и электромагнитный сигналы с помощью датчиков (емкостного и пьезоэлектрического), расположенных с противоположной от точки удара поверхности, экспериментальное время задержки составляло $31 \mu\text{s}$ (рис. 3), а расчетное — $32 \mu\text{s}$.

В процессе ударного возбуждения происходит ускоренное увеличение площади контакта во время активно-

го этапа удара и уменьшение ее во время пассивного этапа, а следовательно, и величины заряда двойного электрического слоя, формирующегося в процессе электризации в месте контакта ударного элемента с поверхностью образца в соответствии с изменением величины контактной силы. Это приводит к возникновению переменного электрического тока, который в данном случае представляет собой скорость изменения заряда на границе контакта. Тогда длительность переднего фронта будет определяться временем вдавливания ударного элемента в образец. Это время зависит от силы удара, конфигурации ударного элемента и твердости материала. Так как в наших экспериментах используется нормированное по силе ударное возбуждение и не меняется конфигурация ударного устройства, то длительность переднего фронта электромагнитного сигнала будет зависеть только от твердости материала. Был исследован ряд природных минералов с известной твердостью (по шкале Мооса) и получено, что длительность переднего фронта электромагнитного сигнала уменьшается с увеличением твердости [5]. Следовательно, длительность переднего фронта второй составляющей электромагнитного отклика может быть использована в качестве критерия для определения твердости материала.

Важную роль в формировании третьей (колебательной) составляющей электромагнитного отклика композиционных материалов при их ударном возбуждении играет процесс акустического возбуждения двойного электрического слоя, расположенного на границе адгезионного контакта компонентов. Особенно значительна роль этого механизма в слоистых и композиционных материалах с большой концентрацией и площадью зон адгезионного контакта (например, бетонах). Доказательством этому служат результаты сравнительного анализа электромагнитных откликов цементного и гипсового камней и слоистой системы, состоящей из этих материалов (рис. 4). Физические модели слоистой системы, изготовленные на основе цемента и гипса, после окончания процесса отверждения представляли собой параллелепипеды размером 5×10 см, состоящие из равных по размеру ($5 \times 5 \times 5$ см) слоев цементного и гипсового камня, достаточно надежно связанных друг с другом силами адгезионного взаимодействия.

Из рис. 4 видно, что при ударном возбуждении цементного и гипсового камня регистрируется практически одиночный электромагнитный сигнал, т.е. доля составляющей электромагнитного сигнала, связанная с процессом электризации в зоне контакта ударного элемента с поверхностью образцов, значительно превосходит составляющую, связанную с акустическим возбуждением внутренних заряженных неоднородностей — пор. При механическом возбуждении слоистого материала электромагнитный отклик представляет собой колебательный процесс, связанный с возбуждением двойного электрического слоя, расположенного на границе компонентов, акустическими волнами, формирующимися в образце конечных размеров при его ударном возбуждении.

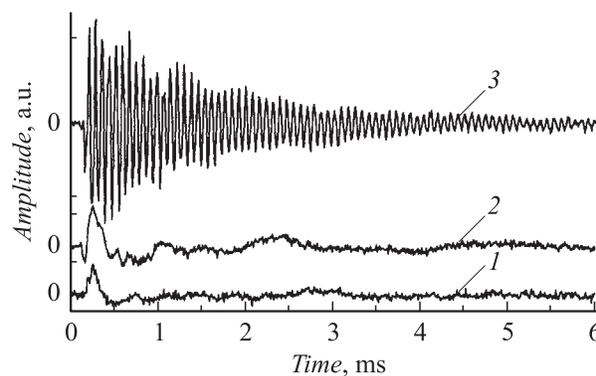


Рис. 4. Электромагнитные отклики на ударное возбуждение образцов камней: 1 — цементного, 2 — гипсового, 3 — двухкомпонентной системы, цементно-гипсового камня. t — время задержки акустического сигнала по отношению к электромагнитному.

Существенный вклад в третью составляющую электромагнитного отклика при ударном возбуждении композиционных материалов вносит поле, возникающее в пьезоактивных материалах за счет пьезоэффекта, что показывают результаты сравнительного анализа моделей с одинаковым процентным содержанием (порядка 25%) стеклопеска и речного песка.

С использованием рентгеноструктурного анализа было установлено, что содержание α -кварца в используемом в данных экспериментах речном песке составляло порядка 90%. Возникновение переменных электромагнитных полей связано с формированием индуцированных зарядов за счет пьезоэффекта при изменении механического напряжения, вызванного акустическими волнами. С одной стороны, электромагнитный отклик, связанный с пьезоэффектом, является помехой составляющей с точки зрения его использования для неразрушающего контроля материалов, в которых концентрация пьезоактивных включений неодинакова. С другой стороны, если концентрация пьезоэлементов в материале не меняется, то их наличие является положительным моментом, так как благодаря высокой эффективности механоэлектрических преобразований, связанной с пьезоэффектом, повышается соотношение сигнал—шум.

Определенную роль в формировании третьей составляющей электромагнитного отклика играет электромагнитное поле, возникающее при акустических колебаниях поверхностных зарядов относительно приемного электрического датчика при бесконтактном способе регистрации. Об этом свидетельствуют данные сравнительного анализа амплитудно-частотных характеристик откликов образцов до и после электризации трением, с регистрацией наведенного трением заряда и времени его релаксации.

Чтобы оценить роль этого эффекта в механоэлектрических преобразованиях, необходимо было получить электромагнитные отклики, в которых бы составляющая, связанная с акустическими колебаниями заряженной

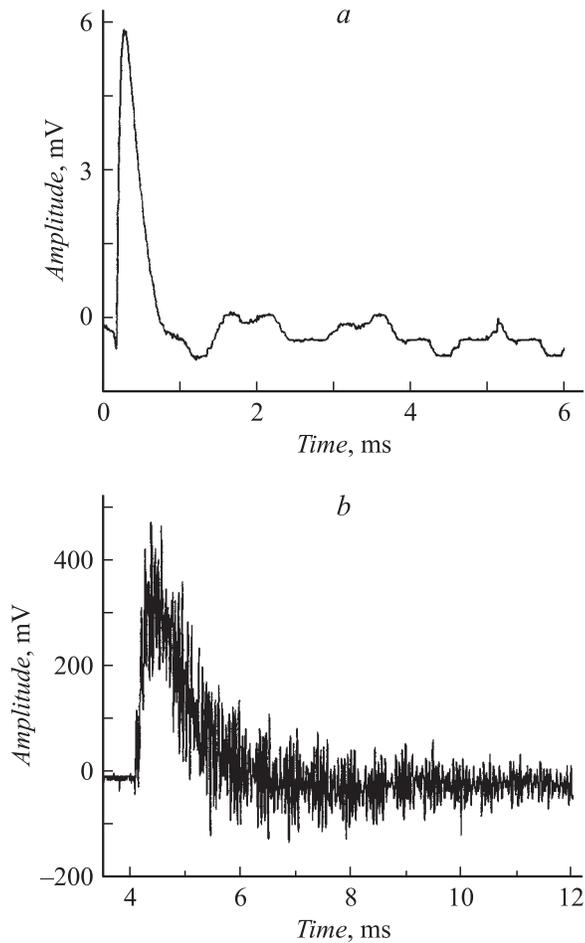


Рис. 5. Электромагнитные отклики на ударное возбуждение: *a* — цементного камня со стеклопеском, *b* — цементного камня с речным песком.

поверхности со стороны приемника, отсутствовала, и сравнить их с откликом, в котором она присутствует. Исключение этой составляющей достигалось тем, что приемный электрический датчик наносился на поверхность образца. В этом случае электрический датчик совершает колебания вместе с заряженной поверхностью (контактный способ). А в качестве бесконтактного способа, который позволяет измерять электромагнитный отклик, являющийся суперпозицией полей от внутренних и поверхностных источников механоэлектрических преобразований, использовалась металлическая пластина, расположенная на расстоянии 2 мм от поверхности образца.

Для исследования были взяты два строительных материала: цементный и гипсовый камни, у которых поверхностная плотность заряда, измеренная с помощью методики вибрирующего электрода, различается более чем на порядок, в частности, у гипсового камня она составляет 10^{-12} , а у цементного — $< 10^{-13}$ C/cm². На рис. 6, *a* приведены электромагнитные отклики, зарегистрированные при ударном возбуждении одного и того же образца гипсового камня с помощью различным

образом расположенных относительно поверхности образца датчиков. Из рисунка видно, что при бесконтактном способе регистрации величина спектрального максимума электромагнитного отклика из гипсового камня больше по сравнению с откликом, регистрируемым при контактном способе измерения, что свидетельствует о наличии составляющей, связанной с акустическими колебаниями поверхностных зарядов.

Показано, что соотношение максимумов спектральных амплитуд сигналов, зарегистрированных с помощью различным образом расположенных электрических датчиков, меняется в зависимости от материала образца. В частности, на рис. 6, *b* представлены спектры электромагнитных откликов, полученные при ударном возбуждении цементного камня, т. е., как было показано ранее, наличие на поверхности зарядов плотностью $< 10^{-13}$ C/cm² не оказывает влияния на генерируемый электромагнитный отклик. Поэтому происходит уменьшение электромагнитного отклика при бесконтактном способе регистрации по сравнению с контактном только за счет изменения емкости воздушного зазора, последовательно соединенной с образцом.

В зависимости от характеристик композиционных материалов роль каждого из приведенных выше ис-

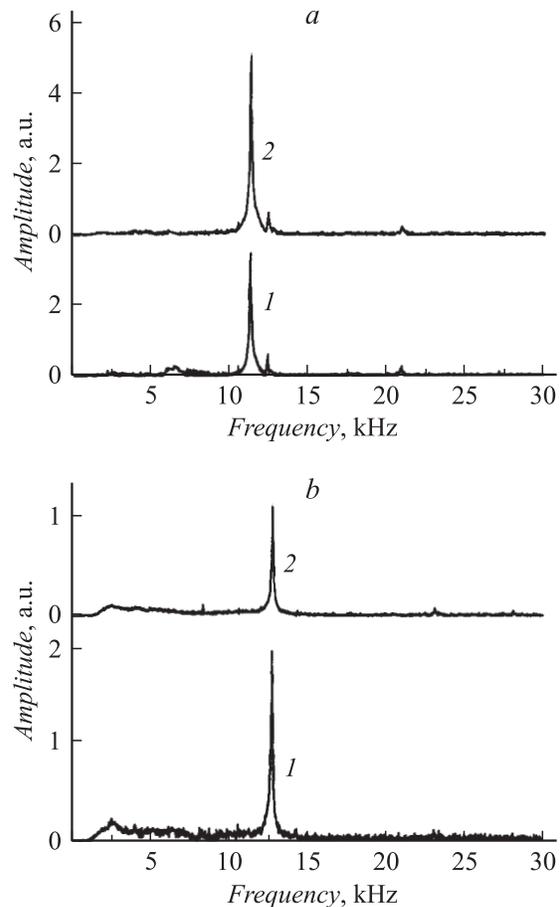


Рис. 6. Спектральные характеристики электромагнитных откликов, зарегистрированные для гипсового (*a*) и цементного (*b*) камня: 1 — контактном и 2 — бесконтактном способом.

точников механоэлектрических преобразований может быть различной. Методами физического моделирования показано, что для пористого цементного камня вклад в формирование переменных электрических полей поверхностных и внутренних зарядов примерно одинаков [6]. В глине, гипсе и асфальте роль поверхностной электризации значительно выше, нежели в цементном камне. В материалах, состоящих из цементной матрицы и заполнителей, роль поверхности и пористости очень незначительна, а основным источником механоэлектрических преобразований в таких композитах является двойной электрический слой на границе компонентов.

Список литературы

- [1] Чахлов В.Л., Мальшиков Ю.П., Гордеев В.Ф., Фурса Т.В., Чахлов Б.В., Картопольцев В.М. // Изв. вузов. Строительство. 1995. № 5–6. С. 54–58.
- [2] Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батурич Е.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 10. С. 51–55.
- [3] Фурса Т.В., Осипов К.Ю. // Изв. вузов. Физика. 2003. № 11. С. 61–65.
- [4] Суржиков А.П., Фурса Т.В. Патент № 2190204. Приоритет от 27.11.2000.
- [5] Фурса Т.В., Суржиков А.П., Гольд Р.М. // Дефектоскопия. 2001. № 9. С. 20–22.
- [6] Фурса Т.В., Суржиков А.П., Осипов К.Ю. // Дефектоскопия. 2007. № 2. С. 27–34.