

05;12

## Электромагнитный отклик на импульсное механическое возбуждение слоистых композиционных диэлектрических материалов

© Т.В. Фурса

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

(Поступило в Редакцию 11 января 2006 г. В окончательной редакции 14 апреля 2006 г.)

Проведенными исследованиями установлена определяющая роль двойного электрического слоя в формировании электромагнитного отклика из слоистых композиционных материалов. Оценена плотность эффективного заряда двойного электрического слоя на границе адгезионного контакта двухкомпонентной системы цемент–гипс, которая оказалась порядка  $4 \cdot 10^{-9} \text{ C/cm}^2$ .

PACS: 77.65.-j

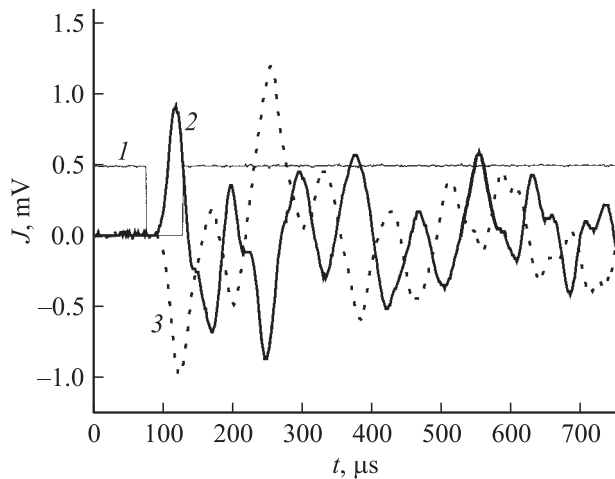
При ударном возбуждении диэлектрических материалов наблюдается генерирование электромагнитного сигнала [1,2]. По нашим представлениям, один механизм механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении слоистых композиционных материалов заключается в генерировании переменного электромагнитного поля, обусловленного смещением зарядов двойного электрического слоя, находящегося на границе компонентов в композите акустической волной возбуждения, относительно приемника сигнала при неизменной конфигурации системы двойной слой–приемник сигнала [3].

В данной работе предпринята попытка получить дополнительные доводы в пользу такого механизма механоэлектрических преобразований и оценить зарядовое состояние двойного электрического слоя. Методика регистрации электромагнитного отклика на механическое возбуждение заключалась в следующем. Импульсное механическое возбуждение образцов производили стальным шариком массой 0.7 г, который сбрасывали на поверхность образца. Такое механическое воздействие позволяло создавать импульс возбуждения энергией порядка  $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ J}$  и скоростью ударяющего тела — шарика порядка 2.6 м/с. В качестве приемника электрической составляющей электромагнитного поля использовали емкостной датчик, который располагали на расстоянии 2 мм от нижней поверхности образца. Переменный электрический сигнал с емкостного датчика регистрировался с помощью осциллографа „PSC-500“, совмещенного с ЭВМ. В процессе измерения регистрировалась также длительность ударного возбуждения, для чего удар производился шариком, на который подавался потенциал по тонкой заземленной металлической подложке, накатанной на верхнюю поверхность образца. На падающий шарик, через прикрепленную к нему тонкую металлическую нить, подавался через сопротивление небольшой потенциал (70 мВ), и это напряжение поступало на один из входов осциллографа. При соприкосновении шарика с заземленной поверхностью образца сопротивление закорачивалось, напряжение падало до нуля и регистриро-

валось осциллографической приставкой. Таким образом, в момент касания шарика с заземленной подложкой регистрировалось падение напряжения до нуля, которое сохранялось от момента начала удара до момента отлета ударного элемента.

Чтобы оценить роль двойного электрического слоя в генерировании электромагнитного отклика на механическое возбуждение слоистых композиционных материалов была изготовлена модель двойного электрического слоя — искусственно созданный электрет. Термоэлектрет был изготовлен из фторопластовой пленки толщиной 50 мкм по стандартной методике. После его изготовления был измерен заряд электрета с помощью методики вибрирующего электрода, он составил порядка  $10^{-9} \text{ C/cm}^2$ . Заряд электрета сохранялся неизменным в течение нескольких дней, что позволило использовать его как модель двойного электрического слоя с известными параметрами. Затем электрет помещался между двух образцов изготовленных из цемента размером  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ . Далее проводилось ударное возбуждение и регистрация электромагнитного отклика из этой физической модели по методике, описанной выше. Различная схема размещения электрета между образцами по направлению вектора диполя относительно приемника сигнала обеспечивала инверсию электромагнитного отклика. Ниже приведена пространственно-временная реализация, на которой показаны: сигнал, обусловленный соприкосновением шарика с поверхностью и отражающий длительность импульса механического возбуждения (1), в дальнейшем именуемый длительностью механического возбуждения, форма электромагнитного отклика, зарегистрированного при возбуждении в схеме с одним расположением электрета (2), и форма отклика, зарегистрированного при возбуждении в схеме с перевернутым электретом (3).

Из рис. 1 видно, что изменение направления поля диполя электрета относительно приемного электрического датчика приводит к изменению фазы электромагнитного отклика на  $180^\circ$  при полном совпадении величины и



**Рис. 1.** Типичные электромагнитные отклики из физической модели композита с искусственным двойным электрическим слоем (электретом) при ее импульсном механическом возбуждении.

формы электромагнитных откликов, что служит доказательством определяющей роли двойного электрического слоя на механоэлектрические преобразования в такой модели.

Для исследования взаимосвязи характеристик двойного электрического слоя на границе двух различных материалов с параметрами электромагнитного отклика, была изготовлена физическая модель, состоящая из образцов цемента и гипса, между которыми был помещен электрет (искусственный двойной электрический слой). Импульсное механическое возбуждение производилось по двум разным сторонам модели: по цементу и по гипсу и тем самым менялся на противоположный вектор дипольного момента двойного электрического слоя относительно приемного датчика.

Из рис. 2 видно, что геометрия расположения двойного электрического слоя относительно приемного датчика также приводит как к инверсии фазы, так и отклика, причем фазовое смещение отличается от  $180^\circ$ . Это связано с тем, что скорость звука в гипсе и цементе разная и относительно момента удара происходит смещение отклика. Была измерена скорость звука в этих материалах, она оказалась в гипсе  $2.3 \cdot 10^3$  м/с, а в цементе —  $3.5 \cdot 10^3$  м/с. В связи с этим полученные сигналы (рис. 2, кривые 3, 4) находятся не полностью в противофазе. Важно отметить, что длительность импульса возбуждения для различных материалов также разная. Это видно из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 2 и связано с различиями в упругих характеристиках самих материалов. В частности, модуль Юнга в гипсе равен  $6.9 \cdot 10^9$  Па, а в цементе  $1.8 \cdot 10^{10}$  Па. Поэтому наряду со смещением по фазе наблюдается некоторое изменение формы и амплитуды электромагнитного отклика в соответствии с изменением длительности и энергии импульса механического возбуждения.

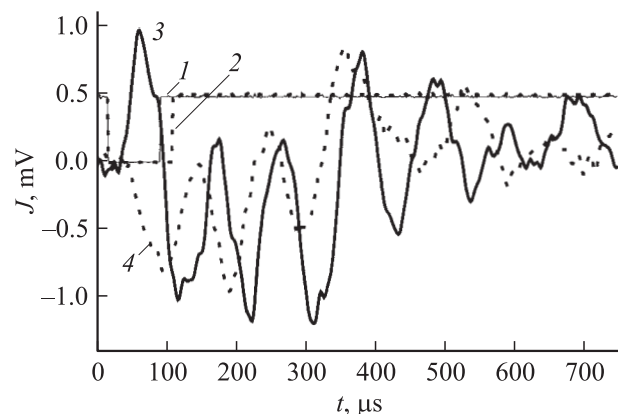
Теперь сравним электромагнитные отклики из модели, состоящей из слоя гипса и цемента с электретом, помещенным между этими слоями и из образца с таким же соотношением слоев из гипса и цемента, но с естественным двойным электрическим слоем, образованным в процессе формирования адгезионного контакта при твердении вяжущих.

После окончания процесса твердения эта модель представляла собой параллелепипед размером  $5 \times 5 \times 10$  см, состоящий из равных по размеру ( $5 \times 5 \times 5$  см) слоев цементного и гипсового камней, достаточно надежно связанных друг с другом силами адгезионного взаимодействия.

При сравнении откликов из модели с электретом и двухкомпонентной системы с естественным двойным электрическим слоем видно явное подобие откликов, на основании чего можно сделать вывод о том, что основным источником электромагнитного отклика при ударном возбуждении слоистых композиционных материалов является двойной электрический слой, находящийся на границе компонентов.

Для оценки зарядового состояния естественного двойного электрического слоя были использованы результаты сравнения параметров электромагнитного и акустического откликов, зарегистрированные из физической модели, состоящей из цемента и гипса, между которыми помещен электрет (искусственный двойной электрический слой) и из двухкомпонентного композита из этих же материалов с естественным двойным электрическим слоем, сформированным в процессе их твердения.

В связи с тем что в одном случае у нас помещается между образцами электрет, а в другом образован естественный двойной электрический слой, характеристики акустических волн в таких образцах могли быть разные.



**Рис. 2.** Типичные электромагнитные отклики из физической модели двухкомпонентной системы цемент–гипс с искусственным двойным электрическим слоем (электретом). 1, 3 — длительность механического возбуждения и отклик, зарегистрированный при ударе по цементу; 2, 4 — длительность механического возбуждения и отклик, полученный при ударе по гипсу соответственно.

Для того чтобы это установить были сняты акустические отклики из этих образцов и установлено, что в акустическом плане модели с искусственным и естественным двойным электрическим слоем практически идентичны.

Для определения величины заряда естественного двойного электрического слоя были сняты электромагнитные отклики из моделей с искусственным и естественным двойным электрическим слоем (рис. 3).

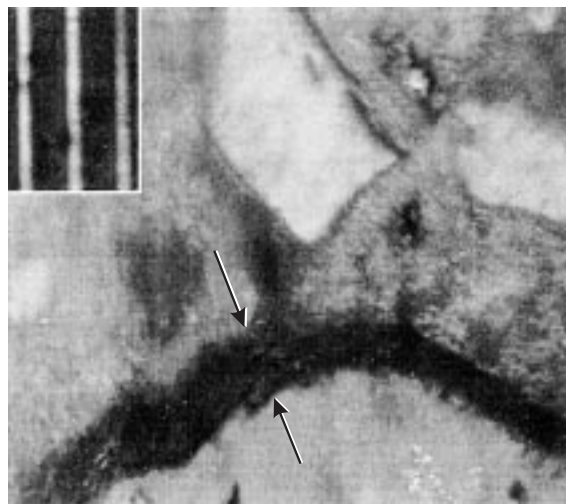
Оценим дипольный момент электрета  $P_1 = \sigma_1 \cdot S_1 \cdot l_1$ .

Плотность заряда электрета  $\sigma_1 = 10^{-9} \text{ C/cm}^2$ , площадь электрета  $S_1 = 25 \text{ cm}^2$ , толщина электрета  $l_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ .

Чтобы определить дипольный момент естественного двойного электрического слоя, введем поправочные коэффициент ( $k$ ), учитывающий различия в электромагнитных откликах из моделей с искусственным и естественным двойным электрическим слоем. Для определения различий в электромагнитных откликах из образцов с искусственным и естественным двойным электрическим слоем используем максимальное значение амплитуды первого полупериода отклика, так как на первой стадии возбуждения еще слабо сказываются процессы наложения акустических волн от различного рода отражений. Как видно из рис. 3, максимальное значение первого полупериода отклика из модели с естественным двойным электрическим слоем примерно в 1.4 раза больше, чем из модели с электретом, т.е.  $k \approx 1.4$ .

Чтобы оценить ширину адгезионного контакта на границе цемента и гипса были выполнены специальные исследования по оптической регистрации контактной зоны с помощью микроскопа.

Из рис. 4 видно, что ширина адгезионного контакта в модели цемент–гипс составляет порядка  $10\text{--}20 \mu\text{m}$ . Тогда дипольный момент естественного двойного слоя  $P = P_1 \cdot k$ , а плотность заряда двойного электрического



**Рис. 4.** Микрофотография зоны адгезионного контакта цемент–гипс. Стрелками показана ширина контакта. (В верхнем углу фотографии изображена линейка, цена деления  $10 \mu\text{m}$ ).

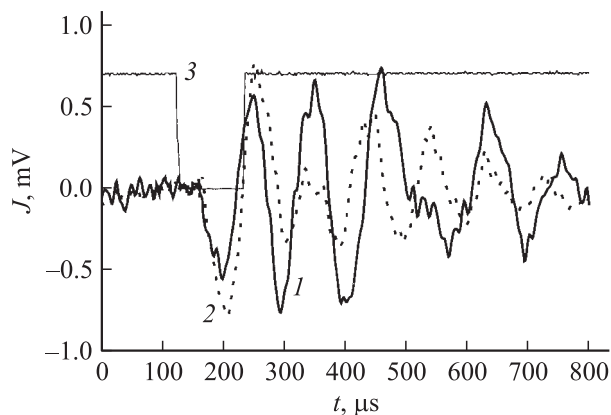
слоя  $\sigma = P/S \cdot l$ , где площадь двойного электрического слоя  $S = 25 \text{ cm}^2$  и его толщина  $l = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$ .

Расчет показал, что плотность заряда, сформированного на границе адгезионного контакта цемента и гипса, составляет порядка  $4 \cdot 10^{-9} \text{ C/cm}^2$ .

Данный подход может быть использован для определения зарядового состояния любых слоистых композиционных материалов.

## Список литературы

- [1] Фурса Т.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 7. С. 53–56.
- [2] Суржиков А.П., Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 1. С. 57–61.
- [3] Суржиков А.П., Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. // Изв. ТПУ. 2005. Т. 308. № 7. С. 6–9.



**Рис. 3.** Электромагнитные отклики из образцов: 1 — с искусственным двойным электрическим слоем (электретом); 2 — с естественным двойным электрическим слоем и 3 — длительность механического возбуждения.