

05

## Исследование электромагнитной эмиссии из диэлектрического образца под действием ступенчатой одноосной нагрузки сжатия

© В.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов

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

(Поступило в Редакцию 22 апреля 2014 г.)

Рассмотрены закономерности распределения импульсов электромагнитной эмиссии из образца под действием ступенчатой нагрузки при одноосном сжатии с использованием мультисенсорной системы контроля. Показано, что импульсы электромагнитной эмиссии различаются по уровню, но близки по форме. На основании этого для выделения импульсов электромагнитной эмиссии из шума был применен метод оптимальной фильтрации. Были построены распределения импульсных потоков отклика для каждой ступени нагрузки в двойных логарифмических координатах. Было показано, что при нагрузках, превышающих 60% от разрушающей, появляется степенное распределение электромагнитных импульсов. При этом наклон прямых на графиках степенного распределения закономерно уменьшается с нагрузкой.

### Введение

Мерой оценки состояния исследуемого объекта под нагрузкой с точки зрения его остаточного ресурса может быть информация о характере распределения регистрируемых параметров, связанных с развивающимися трещинами.

Для оценки интенсивности дефектообразования наиболее широкое применение находит метод акустической эмиссии, позволяющий давать оценку концентрации дефектов по акустическому сигналу, сопровождающему их образование и развитие.

В работе [1] показано, что характер распределения энергии акустической эмиссии может быть двух типов: экспоненциальный и степенной. Первый тип характеризует хаотичное по объему образца формирование дефектов, в то время как степенному распределению соответствует локализация дефектообразования. Степенной характер распределения свидетельствует о переходе системы в опасное состояние самоорганизованной критичности, при котором небольшие внешние воздействия могут привести к разрушению образца.

Для изучения динамики трещинообразования используется также электромагнитная эмиссия (ЭМЭ), обусловленная формированием переменного электромагнитного поля при разделении зарядов в устьях развивающихся трещин [2]. Впервые указанное явление было использовано в Томском политехническом университете при разработке методов прогноза геодинамических явлений (землетрясений, горных ударов, оползней). В дальнейшем усилия были сосредоточены на использовании явления ЭМЭ при разработке методов неразрушающего контроля дефектности и прочности.

Метод ЭМЭ нашел широкое применение при исследовании динамики разрушения горных пород в Институте горного дела (ИГД) СО РАН. Исследования сотрудников данного института, в частности, показали,

что при одноосном сжатии образцов горных пород возникают характерные импульсы ЭМЭ, представляющие собой выбросы с короткими фронтами, релаксирующие в виде колебания с большим коэффициентом затухания, сопровождаемые локальным спадом нагрузки [3], что свидетельствует о связи импульсов с локальными разрушениями в образце.

Для изучения дефектности и напряженно-деформированного состояния в Томском политехническом университете была разработана мультисенсорная система контроля, принцип которой основан на многократном возбуждении образца механическими импульсами заданной формы с регистрацией электрического отклика (ЭО), обусловленного механоэлектрическими преобразованиями в материале [4]. Высокая детерминированность при прохождении акустической волны возбуждения по образцу, ее отражении от границ и рассеянии на дефектах и неоднородностях при постоянстве структуры обусловила возможность накапливать полезную составляющую сигнала отклика. Это обеспечило высокую чувствительность аппаратуры к изменению структуры исследуемого объекта за счет существенного повышения отношения сигнал–шум. При проведении экспериментов при ступенчатом одноосном сжатии диэлектрических образцов наблюдались импульсы ЭМЭ, аналогичные по форме тем, которые приведены в [3].

Цель настоящей работы — выявить закономерности распределений импульсов ЭМЭ от нагрузки по данным, полученным при использовании мультисенсорной системы контроля.

### Проведение эксперимента и обсуждение результатов

Образец для эксперимента с размерами  $60.5 \times 78 \times 87.5$  mm был изготовлен из эпоксидной смолы с наполнением в виде песка, содержащего кварц. Его

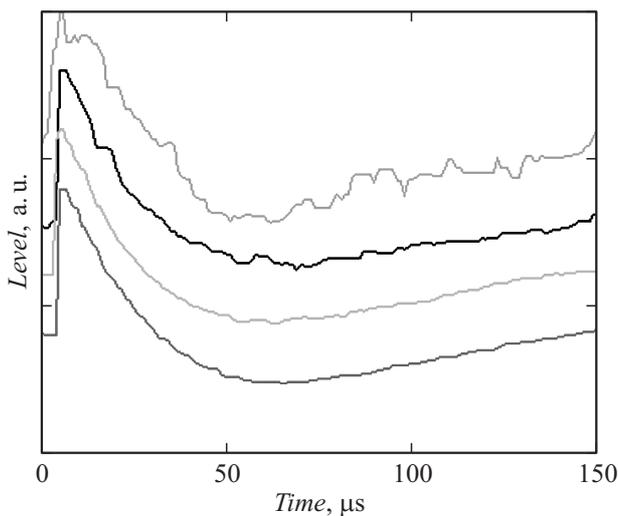


Рис. 1. Нормированные импульсы ЭМЭ.

помещали в пресс и подвергали ступенчатому одноосному сжатию. Величина ступеньки составляла примерно 4 МПа. На каждой ступеньке давления образец возбуждали серией из 141 импульса заданной формы. Длительность временной реализации откликов для каждой нагрузки составляла около 1 с. В данном эксперименте для регистрации откликов был использован 1 емкостный датчик  $78 \times 87$  мм. Разрушение образца наступило при нагрузке 85 МПа.

Сигнал отклика  $s$  можно представить в виде трех составляющих

$$s = s_d + s_e + s_n,$$

где  $s_d$  — ЭО (детерминированная составляющая),  $s_e$  — ЭМЭ,  $s_n$  — составляющая шума.

Составляющая отклика  $s_{en} = s_e + s_n$  легко выделяется из общего сигнала путем вычитания из всех реализаций откликов при заданных нагрузках ее детерминированных составляющих (усредненных значений ЭО). Для оценки возможности выделения ЭМЭ из шума необходимо рассмотреть форму их импульсов.

На рис. 1 показаны импульсы ЭМЭ разной амплитуды.

Сверху вниз отображены нормированные импульсы ЭМЭ с относительными амплитудами 0,7, 2,0, 4,2, 7,1 соответственно. Как видно из рис. 1, несмотря на разные масштабы и искажения малоамплитудной ЭМЭ шумовой составляющей (верхний график), формы импульсов ЭМЭ близки. По скорости нарастания сигнала ЭМЭ и по характеру его спадания можно сделать предположение, что природа этих импульсов лежит в разделении зарядов при быстром прорастании трещины разного размера с последующей релаксацией возбужденной зарядовой подсистемы материала образца. Сходство формы импульсов ЭМЭ делает возможным использование метода оптимальной фильтрации для их выделения из шумовой составляющей.

Метод оптимальной фильтрации заключается в том, что если на вход системы с известной импульсной характеристикой длительностью  $T$  подать ее зеркальное отображение, то в момент времени  $T$  отклик будет иметь наибольшее отношение сигнал/шум. Обозначим выборку сигнала ЭМЭ как  $f_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ), где  $n$  — число отсчетов сигнала ЭМЭ. Тогда зеркальное отображение сигнала ЭМЭ можно представить как  $F_i = f_{i-n}$ . Свертка  $F_i$  с фрагментами временной реализации  $s_{en}$ , последовательно вырезаемыми скользящим окном шириной  $n$ , и регистрацией  $n$ -го отсчета позволит переформатировать  $s_{en}$  в новый сигнал  $s_m$ , в котором уровень импульсов ЭМЭ указанной формы относительно шума становится выше. Такая процедура была проделана для всех реализаций  $s_{en}$  при каждой нагрузке. Затем были рассчитаны распределения импульсного потока  $s_m$  для каждой нагрузки при нижних порогах отсечки импульсного потока на уровне 1 и 10.

На рис. 2, *a* показаны огибающие гистограмм распределений в двойных логарифмических координатах при четырех нагрузках: 8, 55, 74, 82 МПа и порогах отсечки на уровнях 1 и 10. Для наглядности распре-

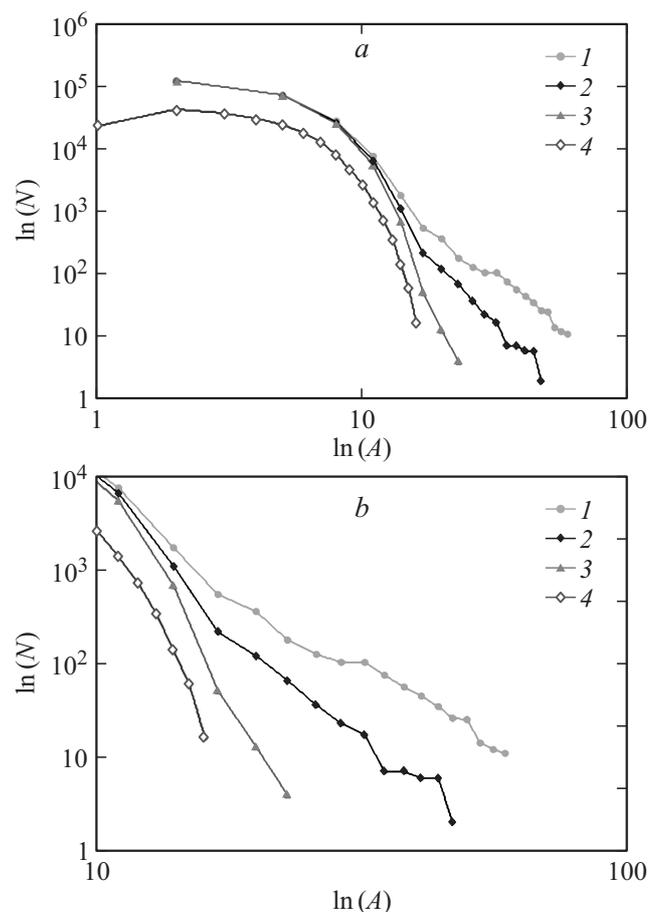


Рис. 2. Гистограммы распределения количества  $N$  импульсов  $s_m$  от амплитуд  $A$  при нагрузках: 82 — 1, 74 — 2, 55 — 3, 8 МПа — 4. *a* — нижний порог отсечки равен 1, *b* — нижний порог отсечки равен 10.

деление при нагрузке 8 МРа смещено вниз. На самом деле оно до уровня 10 сливается с распределениями при других нагрузках. Из формы распределения при нагрузке 8 МРа видно, что степенной составляющей в ней нет. Подобный же характер носят распределения при нагрузках ниже уровня 0.4 от разрушающей. Распределения при нагрузках 55, 74, 82 МРа имеют сложный вид. До 10-го уровня все распределения сливаются, не имеют выраженной степенной составляющей и обусловлены, вероятно, смесью шума и импульсами ЭМЭ, хаотично распределенными по образцу. На более высоком уровне в распределениях проявляется степенная составляющая (распределения „выпрямляются“). На рис. 2, *b* это видно более наглядно. При этом наклон прямых распределений с ростом нагрузки закономерно уменьшается относительно оси абсцисс, что свидетельствует об увеличении абсолютного значения показателя степени функции распределения, что, вероятно, можно связать с долговечностью образца при данной нагрузке.

## Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что электромагнитная эмиссия является информативным параметром при исследовании дефектообразования диэлектрических материалов под нагрузкой.

Характер распределений ЭМЭ под нагрузкой дает основание для разработки методов оценки долговечности испытываемого объекта при заданной нагрузке.

Исследование ЭМЭ может служить полезным дополнением при анализе дефектности и напряженно-деформированного состояния в совокупности с данными детерминированной составляющей мультисенсорной системы контроля.

Работа выполнена в рамках государственного задания „Наука“.

## Список литературы

- [1] Дамасинская Е.Е., Кадомцев А.Г. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 2. С. 29–35.
- [2] Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 4. С. 57–67.
- [3] Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. Новосибирск: Параллель, 2008. 315 с.
- [4] Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. // Контроль. Диагностика. 2011. № 11. С. 17–20.