

## Диагностика и измерение физических параметров изделий из диэлектрических материалов

А.А. Ерофеев<sup>1</sup>, Ф.Ф. Легуша<sup>2</sup>, С.И. Пугачев

Санкт-Петербург, Государственный технический университет,

Санкт-Петербург, Государственный морской технический университет

### Введение

В данной работе рассматривается возможность применения разработанных нами методов [1,2,3] визуализации полей акустической и электрической диссипации, возникающих в поляризованной и неполяризованной пьезокерамике при воздействии на нее переменного электрического поля, а также для контроля состояния и некоторых физических параметров изделий, изготовленных из диэлектриков, вещество которых не обладает пьезоэлектрическим эффектом.

Исследования пьезокерамических элементов методами визуализации полей акустической и электрической диссипации позволили установить следующее.

В том случае, когда вещество пьезокерамического элемента не поляризовано, то при помещении его в переменное электрическое поле на поверхности элемента возникает температурное поле, параметры которого в первую очередь зависят от пространственного распределения локальных значений диэлектрической проницаемости и электрической добротности вещества элемента. Измерение параметров температурного поля позволяет установить распределение по поверхности усредненных по толщине образца значений диэлектрической проницаемости, выявить некоторые типы дефектов, а также построить частотные зависимости диэлектрической проницаемости и электрической добротности вещества образца.

При возбуждении переменным электрическим полем пьезокерамического элемента (ПКЭ), изготовленного из поляризованной пьезокерамики, на его поверхности возникает температурное поле, представляющее собой суперпозицию температурного поля акустической диссипации и температурного поля электрической диссипации. Параметры получаемого при этом температурного поля зависят от условий возбуждения и типа пьезоэффекта. Вблизи собственных частот пьезоэлемента параметры температурного поля на его поверхности полностью определяются акустической диссипацией и величиной связанных с этим процессом физических характеристик вещества. Скачки температуры в температурном рельефе поверхности возбужденного образца пропорциональны локальным значениям квадрата модуля динамических механических напряжений в образце. Двухмерное изображение поверхностного температурного рельефа несет в себе

информацию о дефектах различной физической природы, которые могут иметь место в изделиях из пьезокерамики.

### Температурное поле поверхности поляризованной пьезокерамики

Разработка методов визуализации полей электрической и акустической диссипации показала, что в ряде случаев измерения параметров поверхностного температурного поля позволяют произвести оценку некоторых электрофизических параметров материала поляризованных ПКЭ. Оценка мощности удельного тепловыделения, возникающего при возбуждении ПКЭ, показала, что для большинства составов низкодобротной пьезокерамики основными видами потерь являются диэлектрические и механические потери [2,3]. Связь между распределением удельной мощности источников внутреннего тепла  $p(x,y,z)$  и температурным полем поверхности пьезопластины можно найти из решения уравнения теплопроводности. Не останавливаясь на особенностях решения задачи, отметим, что в моменты времени, близкие к началу возбуждения ПКЭ, теплопроводность пьезокерамики не влияет на динамику формирования температурного поля, и из уравнения теплопроводности можно найти выражение для распределения скорости изменения температуры образца

$$T' = \partial T / \partial t = T'_e + T'_{ni} = p(x, y, z) / \rho C_m,$$

где  $\rho$  - плотность, а  $C_m$  - теплоемкость вещества ПКЭ,  $T'_e, T'_{ni}$  - скорость изменения температуры поверхности образца за счет диэлектрических и акустических потерь соответственно.

Параметры температурного поля поверхности ПКЭ зависят от условий возбуждения и его геометрической формы, поэтому для их количественной оценки нужно выбрать конкретный тип колебательной системы. Рассмотрим, например, возбуждение колебаний в пластине, поляризованной по толщине и имеющей электроды на широких гранях. Геометрические размеры пластины удовлетворяют определению длинного стержня. Наибольший размер пластины  $L$  совпадает с осью  $OX$ , а толщина ориентирована по оси  $OZ$ . Предположим, что пластина возбуждается однородным электрическим полем  $E_0 \cos \omega t$ . При этих условиях выражение для скорости изменения температуры поверхности пьезопластины за счет электрической диссипации имеет вид

$$T'_\varepsilon = \frac{\pi \varepsilon_o \cdot \varepsilon_3}{\rho C_m Q_e} f E_o^2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $f$  - частота,  $\varepsilon_3$  - диэлектрическая проницаемость среды, а формула для расчета скорости изменения температуры поверхности образца за счет акустической диссипации может быть записана в виде следующего одномерного распределения

$$T'_{ni}(x) = \frac{4,50 \cdot 10^{-11}}{n^2 \rho C_m} \varepsilon_3 k_{3i}^2 Q_{mi} \sin^2 \left( \frac{n\pi x}{L} \right) f E_o^2, \quad (2)$$

где  $i=1$  при поперечном и  $i=3$  при продольном пьезоэффекте,  $k_{3i}$  - коэффициент электромеханической связи,  $Q_{mi}$  - механическая добротность материала ПКЭ,  $n=1,3,5,\dots$  - номера собственных мод колебаний.

Из выражения (1) следует, что наличие диэлектрических потерь приводит к равномерному разогреву материала ПКЭ при возбуждении в нем однородного переменного электрического поля. В тоже время при аналогичных условиях возбуждения в результате акустической диссипации разогрев ПКЭ происходит неравномерно (см. формулу (2)). Наибольшая скорость разогрева  $(T'_{ni})_{\max}$  имеет место в максимумах механических напряжений, координаты которых могут быть найдены из условия  $\sin(n\pi x/L) = 1$ . Число максимумов равно номеру моды. Величины локальных значений температуры поверхности образца пропорциональны механической добротности его вещества. Кроме того, в работе [2] показано, что по своей форме температурное поле поверхности ПКЭ, появившиеся за счет акустической диссипации, совпадает с распределением квадрата модуля динамических механических напряжений, возникающем в объеме образца при его возбуждении.

Для оценки величины относительного вклада электрической и акустической диссипации в поверхностный температурный рельеф ПКЭ, поделим выражение (2) на формулу (1). В максимумах распределения температур  $T'_{ni}(x)$ , после элементарных преобразований имеем

$$g_{ni} = \frac{(T'_{ni})_{\max}}{T'_\varepsilon} = \frac{1,62 Q_e Q_{mi} k_{3i}^2}{n^2}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что для некоторых составов пьезокерамики становятся величинами одного порядка при колебаниях ПКЭ на модах с  $n > 13$ . Это подтверждается экспериментально. Например, на длинных стержневых ПКЭ, выполненных из состава ЦТС-19, на поперечном пьезоэффекте наблюдались все нечетные моды колебаний, вплоть до моды с  $n = 11$ . Ясно, что при малых временных промежутках возбуждения ПКЭ, совершающих колебания на модах с малыми номерами, влиянием электрической диссипации на температурное поле поверхности ПКЭ можно пренебречь.

Локальные значения температуры поверхности ПКЭ, определяемые формулами (1) и (2), изменяются линейно в некотором временном промежутке, близком

к началу возбуждения образца. Если предположить, что характер изменения температуры сохраняется до начала теплообмена поверхности ПКЭ с окружающей средой, то величину этого временного промежутка можно оценить при помощи выражения

$$t_v \leq \tau = h^2 / 4a, \quad (4)$$

где  $a = \chi / \rho C_m$  - коэффициент температуропроводности,  $\chi$  - коэффициент теплопроводности вещества ПКЭ. Большинство составов промышленной пьезокерамики имеют практически одинаковые значения теплоемкости и коэффициента теплопроводности, которые соответственно близки к следующим значениям  $C_m = 420$  Дж/К·кг и  $\chi = 1,25$  Вт/К·м. Это позволяет легко оценивать величину  $\tau$ . Например, при  $h = 4,0$  мм для пластины из состава ТБК-3  $\tau = 7,1$  с. Следовательно, величина постоянной времени  $\tau$  реальных ПКЭ может быть достаточной для реализации процедуры измерения скорости разогрева его поверхности.

Скорость изменения температуры поверхности ПКЭ для любого типа потерь зависит от его режима возбуждения. Для оценки значений  $T'_\varepsilon$  и  $(T'_{ni})_{\max}$  предположим, что все образцы, изготовленные из различных составов пьезокерамики, возбуждаются на первой моде и частота возбуждающего сигнала 10 кГц, а амплитуда напряженности электрического поля в веществе образцов равна 10 кВ/м. Тогда для изделий, изготовленных из сегнетомягкой пьезокерамики, имеем:

$$\begin{aligned} (T'_{11})_{\max} &= (0,1 \dots 0,5) K / c; & g_{11} &= (3,0 \dots 7,0) \cdot 10^2; \\ (T'_{13})_{\max} &= (0,6 \dots 1,8) K / c; & g_{13} &= (1,0 \dots 4,0) \cdot 10^3; \\ T'_\varepsilon &= (3 \dots 15) \cdot 10^{-4} K / c. \end{aligned}$$

Аналогично для изделий, изготовленных из сегнетожесткой пьезокерамики, получаем:

$$\begin{aligned} (T'_{11})_{\max} &= (1,8 \dots 3,2) K / c; & g_{11} &= (1,2 \dots 8,1) \cdot 10^4; \\ (T'_{13})_{\max} &= (7,2 \dots 14,4) K / c; & g_{13} &= (0,5 \dots 3,6) \cdot 10^5; \\ T'_\varepsilon &= (0,4 \dots 1,5) \cdot 10^{-4} K / c. \end{aligned}$$

Результаты этих расчетов при условии выполнения неравенства (4) хорошо совпадают с экспериментальными данными, некоторые из которых приведены в работе [2].

Анализ этих результатов показывает, что разогрев вещества ПКЭ за счет диэлектрических потерь происходит более интенсивно у сегнетомягких пьезокерамик, но в обоих случаях температурное поле, обусловленное этим видом потерь, не может перекрыть температурный рельеф, вызванный процессами акустической диссипации. В изделиях, изготовленных из сегнетожестких пьезокерамик, температурный рельеф характеризуется большими значениями скачков температуры. Это, в первую очередь, обеспечивается их большей механической добротностью. Для любого типа пьезокерамик возбуждение в них колебаний на продольном пьезоэффекте приводит к повышенному

тепловыделению по сравнению с колебаниями на поперечном пьезоэффекте.

### Измерение параметров и неразрушающий контроль пьезокерамических элементов

Если теплофизические параметры вещества пьезокерамики известны, процедуру измерения некоторых электрофизических параметров вещества можно свести к измерению скорости разогрева поверхности образца. Действительно, если произвести измерения  $T'_e$  и максимального значения  $T'_{ni}$ , то при фиксированном режиме возбуждения ПКЭ могут быть соответственно найдены частотные зависимости комплексов  $\varepsilon_3/Q_e$  и  $\varepsilon_3 k_{3i}^2 Q_{mi}$ , в состав которых входят основные электрические и механические параметры вещества ПКЭ. Процедура разделения параметров, содержащихся в этих комплексах, рассмотрена в работе [3].

Учитывая порядок величины скорости изменения температуры поверхности ПКЭ при различных видах диссипации энергии и значений постоянной времени образцов  $\tau$ , можно отметить следующее. При измерениях комплекса  $\varepsilon_3 k_{3i}^2 Q_{mi}$  допустимое значение абсолютной ошибки измерения температуры может составлять величину порядка 0,1К. При измерениях комплекса  $\varepsilon_3/Q_e$  желательно брать как можно более толстые образцы. В этом случае удовлетворительные результаты измерений получаются при абсолютных ошибках измерения температуры порядка 0,01 К.

Учитывая то обстоятельство, что максимумы и минимумы распределения (2) разнесены в пространстве, можно при испытаниях одного и того же образца одновременно измерять максимальное значение  $T'_{ni}$  и значение  $T'_e$ . Это позволяет определять весь набор параметров на собственных частотах исследуемого образца. Отметим, что определяемые при помощи формул (1) и (2) комплексы электрофизических параметров ПКЭ в такой же форме записи входят в некоторые расчетные выражения, которые используются для оценки эффективности современных электроакустических преобразователей, и определение их реальной величины важно для этих расчетов.

Наши измерения показывают, что величина механической добротности материала ПКЭ также зависит от типа пьезоэффекта, за счет которого производится возбуждения в нем колебаний. Если предположить, что значения коэффициентов электромеханической связи, приводящиеся в справочной литературе верны, то измеряемое значение механической добротности на продольном пьезоэффекте довольно близко к величине механической добротности, приводящемуся в справочной литературе для исследуемого состава пьезокерамики.

Изображение температурного поля поверхности пьезокерамического элемента несет в себе также

информацию о наличии в материале пьезокерамики дефектов различной физической природы. Это позволяет использовать метод поверхностного термографирования для диагностики и неразрушающего контроля изделий из пьезоактивных материалов [4,5,6]. Дефекты типа разрыва сплошности среды (раковины, трещины, инородные включения и т.п.) выглядят на термограмме в виде областей локального перегрева. Особенно хорошо эти дефекты проявляются вблизи максимумов и минимумов функции (2). Исключительной особенностью данного метода неразрушающего контроля пьезоэлементов является то, что он позволяет обнаруживать дефекты типа распределенной структурной неоднородности среды. Отметим, что такие дефекты не обнаруживаются ни одним из существующих стандартных методов контроля, применяемых при испытании пьезоэлементов. В рассмотренном выше примере пьезокерамического стержня со свободными концами это проявляется в обнаружении на термограммах изображений четных мод колебаний, которые не обнаруживаются стандартными методами неразрушающего контроля, основанными на измерении электрофизических параметров пьезокерамики.

Экспериментальные исследования показали, что разработанный нами метод диагностики ПКЭ имеет чувствительность, превышающую в  $Q$  раз (где  $Q$  - механическая добротность материала изделия) чувствительность стандартных методов контроля, основанных на измерении электрофизических параметров пьезоэлементов. Этот метод целесообразно применять для контроля качества ПКЭ, идущих на сборку электромеханических преобразователей, работающих в режимах жесткого динамического и электрического возбуждения.

### Неразрушающий контроль изделий из пассивных диэлектриков

Анализ экспериментальных данных показал, что рассмотренные выше методы диагностики и контроля изделий из поляризованной пьезокерамики могут быть использованы для исследования параметров изделий, изготовленных из любых диэлектрических материалов, не относящихся к классу сегнетоэлектриков. При этом наиболее эффективным остается метод, основанный на визуализации поля акустической диссипации. Сложностью реализации данного метода для контроля изделий из пассивных диэлектриков является необходимость разработки и изготовления специальных устройств, предназначенных для возбуждения в них акустических колебаний, но открывающиеся при этом возможности получения дополнительной информации об исследуемом объекте во многих случаях окупают понесенные затраты.

### Заключение

Все экспериментальные работы, связанные с измерением параметров температурных полей возбужденных ПКЭ, и реализацией методов их неразрушающего контроля осуществлялись за счет использования жидкокристаллических пленок, выполненных на основе холестерических жидких кристаллов. Дальнейшее развитие этих методов исследования возможно за счет применения для этой цели современных тепловизионных систем. Анализ литературных данных показывает, что разработанные в настоящее время тепловизионные системы по многим своим параметрам удовлетворяют методике, описываемых в этой работе измерений и, кроме того, обладают рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с жидкокристаллическими пленками.

Рассмотренные выше методы неразрушающего контроля и диагностики целесообразно применять при испытаниях изделий из диэлектриков, вещество которых в процессе эксплуатации подвергаются жесткому электрическому и механическому воздействию. При этом желательно, чтобы изделия были предварительно протестированы стандартными методами неразрушающего контроля.

#### Литература

1. Пьезокерамические преобразователи: Справочник/ Под ред. С.И. Пугачева. - Л.: Судостроение, 1984. - 256 с.
2. **Легуша Ф.Ф., Пасынков Р.Е.** Термографирование ультразвуковых полей с помощью жидких кристаллов.

Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики. - Тверь: ТГУ, 1990. - С. 19...52.

3. **Бочагов А.В., Ерофеев А.А. Легуша Ф.Ф., Пугачев С.И.** Акустотермооптический метод исследования физических свойств пьезокерамических материалов. Сб. докладов МНПК: "Пьезотехника-97". Обнинск 25...27 ноября 1997, с. 270...276.
4. **Легуша Ф.Ф., Легуша Ф.Ф.-мл., Пугачев С.И.** Измерение электрофизических параметров пьезокерамики акустотермооптическим методом. Сб. докладов МНПК: "АПЭП-98". Новосибирск 23...26 сентября 1998, т. 10, с. 77...78.
5. А.С. СССР №1474531. Способ неразрушающего контроля изделий из диэлектрических материалов./ Исаков Н.Я., Легуша Ф.Ф., Пасынков Р.Е., Пугачев С.И., Финагин Б.А. Опубликовано 23.08.1989, бюл. №15.
6. А.С. СССР №1642348. Способ неразрушающего контроля изделий из диэлектрических материалов./ Легуша Ф.Ф., Пасынков Р.Е., Финагин Б.А. Опубликовано 15.04.1991, бюл. №14.

A.A.Jrofeev, F.F.Legusha, S.I. Pugachiov

#### **Diagnostics of dielectric materials and measurement their physical parameters**

#### Summary

For evaluation of physical features of piezoelectric ceramic materials approach based on imaging of acoustic fields in the sample

Pateikta spaudai 1999 12 15

DOI: 10.5755/j01.u.33.3.7943