

УДК 537.226
 © 1990

ОБ АНОМАЛИЯХ ОБЪЕМНОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА В КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИНКАХ

М. В. Богуш, В. В. Мадорский, В. Н. Митько

Аномальное поведение объемного пьезомодуля тонких пьезокерамических пластин при измерениях в жидких и газообразных средах объясняется вкладом в измеряемый сигнал пирозффекта. В предположении адиабатичности пульсаций давления в измерительной камере рассчитывается эффективный объемный пьезомодуль d_{eff} и сравниваются теоретические и экспериментальные зависимости d_{eff} от толщины образца, частоты пульсирующего давления и величины статического давления в среде.

В работе [1] при исследовании объемного пьезоэффекта тонких пластин поликристаллических твердых растворов титаната свинца с модифицирующими добавками было обнаружено резкое увеличение объемного пьезомодуля d_v при уменьшении толщины образца от 1.0 до 0.05 мм. При этом значения пьезомодулей d_{33} и d_{31} от толщины не зависели. В результате нарушалось классическое соотношение $2d_{31} + d_{33} = d_v$. В дальнейшем были обнаружены и другие аномальные явления: зависимость d_v от среды испытаний, снижение d_v при увеличении статического давления при испытаниях в воздухе и практическое отсутствие такого эффекта в масле.

Эти явления были неожиданными и до настоящего времени не получили какого-либо объяснения.

Для того чтобы выяснить природу их возникновения, рассмотрим детально известную методику определения объемного пьезомодуля d_v пьезоэлемента при действии на него всестороннего давления [2]

$$d_v = Q/PS, \tag{1}$$

где Q — измеряемый пьезозаряд, S — площадь электродов, P — изменение давления. При этом предполагается, что процесс измерения объемного пьезомодуля изотермический.

Однако если всестороннее сжатие передается на пьезоэлемент через среду (газ или жидкость), условие постоянства температуры нарушается. Изменение температуры среды можно рассчитать по известной формуле [3]

$$dT_0/dP = \beta_0 T_0 / \rho_0 c_0, \tag{2}$$

где β_0 — коэффициент объемного расширения; ρ_0 , c_0 — плотность и удельная теплоемкость среды. Для воздуха при $T_0 = 300$ К величины $\rho_0 = 1.29$ кг/см³, $c_0 = 1.006$ кДж/кг·К, $\beta_0 = 3.36 \cdot 10^{-3}$ 1/К и из (2) изменение температуры от давления равно [4] $\Delta T_0/\Delta P = 0.846 \cdot 10^{-3}$ К/Па. Для трансформаторного масла $\Delta T_0/\Delta P = 0.2 \cdot 10^{-8}$ К/Па [4]. Для учета влияния пульсации температуры на пьезоэлемент необходимо в уравнении линейного пьезоэффекта учесть слагаемое, связанное с пирозлектрическим эффектом. Для всестороннего давления и условия короткого замыкания уравнение для электрической индукции можно записать в следующем виде [5]:

$$D = d_v P + \chi \Delta T, \tag{3}$$

D — электрическая индукция, χ — пироконстанта. Для пьезокерамики величина χ обычно находится в пределах $10^{-4} - 10^{-5}$ Кл/м²·К, объемный

пьезомодуль $\sim 10^{-10}$ пКл/Н. Тогда из формул (2), (3) следует, что для реально существующих пьезоэлементов даже при изменении температуры в образцах на величину $\Delta T = 10^{-5}$ К пиро- и пьезоэффекты сравнимы.

Рассчитаем изменения температуры в пьезоэлектрическом образце при действии всестороннего сжатия в жидкой и газообразной средах. Для этого необходимо решить дифференциальное уравнение Фурье [6]

$$\partial\theta/\partial\tau = a\nabla^2\theta \quad (4)$$

при следующих условиях теплообмена на граничных поверхностях:

$$-\lambda(\partial\theta/\partial n) = a(\theta - \theta_c), \quad (5)$$

$\theta = \Delta T$ — изменение температуры в образце; a — коэффициент температуропроводности керамики; τ — время, ∇^2 — оператор Лапласа; α — коэффициент теплообмена; n — нормаль к поверхности образца; θ_c —

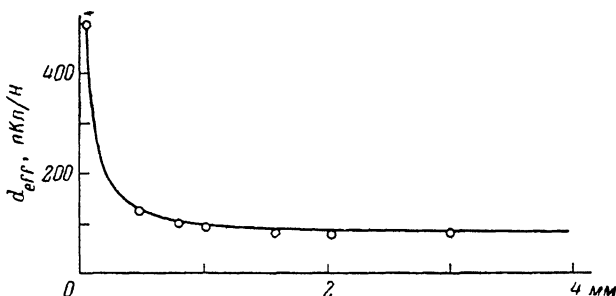


Рис. 1. Зависимость d_{eff} от толщины для пьезокерамики ЦТС-19.

изменение температуры в жидкой или газообразной среде при всестороннем сжатии, определяемое из формулы (2) при условии $\theta_c = \Delta T_0$.

На основании поставленной краевой задачи (2)—(5) в квазистатическом приближении, предполагая, что толщина пьезоэлемента значительно меньше других его линейных размеров, получим следующую формулу для определения объемного пьезомодуля с учетом пироэффекта:

$$d_v = \sqrt{\left(\frac{Q}{PS}\right)^2 - \left(\frac{\alpha\theta_c x}{2\gamma HP} \frac{a_1 a_2 + b_1^2 \lambda \gamma}{b_2}\right)^2} - \frac{\alpha\theta_c x}{2\gamma HP} \frac{b_1 a_2 - a_1 b_1 \lambda \gamma}{b_2}, \quad (6)$$

где

$$\gamma = \sqrt{\omega/2a}, \quad a_1 = \text{sh } 2\gamma H - \sin 2\gamma H, \quad a_2 = a a_3 + \lambda \gamma a_1, \quad b_1 = \sin 2\gamma H + \text{sh } 2\gamma H, \\ a_3 = \cos 2\gamma H + \text{ch } 2\gamma H, \quad b_2 = (a a_3 + \lambda \gamma a_1)^2 + \lambda^2 \gamma^2 b_1^2,$$

λ — коэффициент теплопроводности керамики, ω — круговая частота, H — полутолщина образца.

Если ввести предположение $2\gamma H > 1$ и $\alpha \ll \lambda\gamma$, что выполняется для большинства реальных пьезоэлементов, и учесть (2), (3), то из формулы (6) получим следующее соотношение:

$$d_{eff} = Q/PS = d_v + \alpha\beta_{jx} T_0 / \rho c_0 \omega H c_p, \quad (7)$$

d_{eff} — так называемый эффективный объемный пьезомодуль — состоит из двух слагаемых, одно из которых зависит от объемного пьезоэффекта, а другое от пироэффекта. Пироэлектрическая добавка является функцией параметров среды, толщины пьезоэлемента, частоты акустического поля, удельной теплоемкости c , плотности ρ керамики и других факторов.

На рис. 1 представлена теоретическая (линия) и экспериментальная зависимости d_{eff} для ЦТС-19 от толщины пьезоэлемента при испытаниях

в воздушной среде ($f=31$ Гц, $d_p=70$ пКл/Н). Видно, что с уменьшением толщины пьезоэлемента d_{eff} резко возрастает. Аналогичная зависимость d_{eff} от толщины была получена и для других керамик, например ТС-1. Таким образом, для реальных пьезоматериалов при измерениях в газе на низких частотах тонких образцов пьезоэлектрическая добавка может существенно превышать вклад от пьезоэффекта.

На рис. 2 дана теоретическая зависимость d_{eff} от частоты акустического поля для керамики ЦТС-19 (1) и ТС-1 (2) при толщине образцов 0.25 мм, откуда видно, что на частотах ниже 150 Гц наблюдается значительное уве-

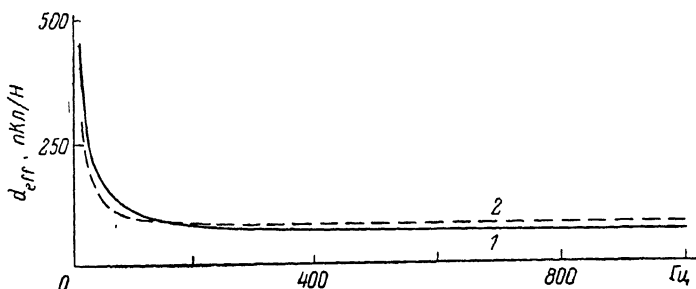


Рис. 2. Зависимость d_{eff} от частоты.

личение d_{eff} . В то же время на частоте 1 кГц ошибка при измерении заряда, обусловленная пьезоэффектом, для данной толщины не превышает 5%. ¶

Поскольку статическое давление и плотность газа пропорциональны друг другу, то, согласно (7), пьезоэлектрическая добавка к объемной чувствительности обратно пропорциональна статическому давлению в газе.

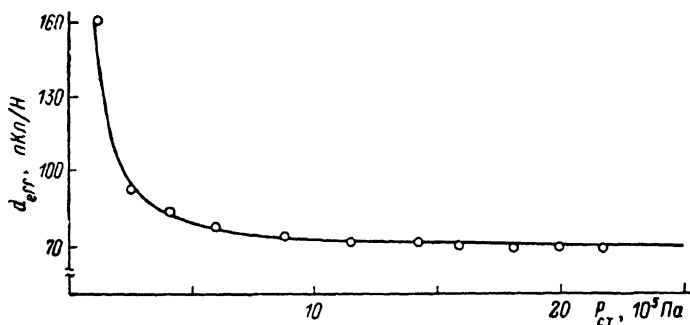


Рис. 3. Зависимость d_{eff} от статического давления в воздухе для пьезокерамики ТС-1.

На рис. 3 приведены теоретическая и экспериментальная зависимости d_{eff} от статического давления в воздухе и масле для образцов из керамики ТС-1 толщиной 0.2 мм при измерениях на частоте 50 Гц. При испытаниях в воздухе наблюдается снижение d_{eff} при увеличении статического давления более чем вдвое. При испытаниях в масле изменение d_{eff} не превышает 5%.

Последнее объясняется тем, что в жидкой среде (трансформаторное масло) изменение температуры от давления из (2) в 10^5 раз меньше, чем в воздушной среде, и поэтому влияние пьезоэффекта мало, что и подтверждается экспериментом.

Таким образом, построенная модель качественно и количественно объясняет основные аномальные явления при измерении объемного пьезомодуля.

Авторы благодарны С. Б. Расторопову за помощь в проведении экспериментальных измерений.

Список литературы

- [1] Лопатин С. С., Богущ М. В., Расторопов С. Б., Лупейко Т. Г., Коган С. Л., Доля В. К., Чеботаренко О. Б. // Тез. докл. III Всес. конф. по актуальным проблемам получения и применения сегнето- и пьезоматериалов. М., 1987. С. 151.
- [2] Смажевская Е. Г., Фельдман М. Б. Пьезоэлектрическая керамика. М., 1971. 199 с.
- [3] Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Статистическая физика. М., 1976. 583 с.
- [4] Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972. 720 с.
- [5] Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. М., 1979. 640 с.
- [6] Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., 1967. 599 с.

Ростовский-на-Дону
государственный университет

Поступило в Редакцию
15 февраля 1990 г.
