

05;12;08

Анизотропия электромеханических свойств и высокая пьезочувствительность композитов типа 1–1

© С.В. Глушанин, В.Ю. Тополов

Ростовский государственный университет, Ростов-на-Дону

E-mail: topolov@phys.rnd.runnet.ru

Поступило в Редакцию 12 февраля 2001 г.

Впервые исследованы электромеханические свойства 1–1- и 1–0–1-композитов на основе сегнетопьезокерамики. Проанализировано влияние геометрического фактора на пьезоэлектрические коэффициенты, коэффициенты электромеханической связи, параметры приема и пьезочувствительность, немонотонное концентрационное поведение которых не имеет аналогов среди известных данных по пьезокомпозитам с другими связностями.

Проблемы создания новых структур пьезоактивных композитов, прогнозирования и оптимизации их физических свойств являются актуальными на протяжении последних лет [1–3]. Современные методы компьютерного моделирования структур и свойств облегчают поиск компонентов, способствующих дальнейшему эффективному применению композитных материалов в качестве элементов различных пьезотехнических устройств — гидрофонов, микрофонов, сенсоров, актюаторов и др. Несмотря на относительно простую микрогеометрию, ранее не исследовались пьезокомпозиты со связностью 1–1, два взаимодействующих компонента которых, подобно параллельным стержням [4], распределяются непрерывно в одном и том же направлении. Цель настоящего сообщения — анализ электромеханических свойств двух- и трехкомпонентных пьезокомпозитов с элементами связности 1–1.

В предлагаемой модели 1–1-композит представляет собой систему чередующихся в направлениях OX_1 и OX_2 прямоугольных параллелепипедов из сегнетопьезокерамики (СПК) и полимера (рис. 1). Основания всех параллелепипедов лежат в плоскости X_1OX_2 , а их высоты, отсчитываемые вдоль оси поляризации OX_3 , равны h , причем $h \gg |LN|$ и $h \gg |LU|$. Дополнительно учитывается пористость полимера, т. е.

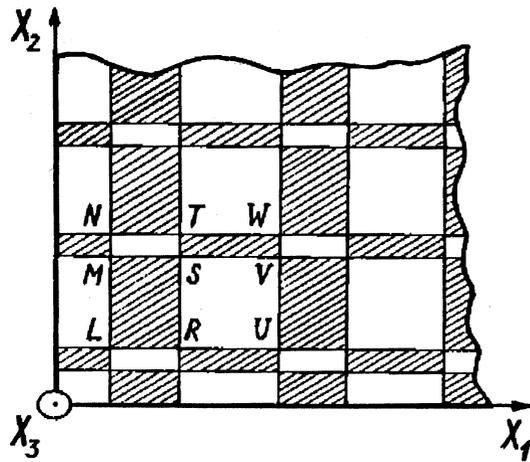


Рис. 1. Сечение 1–1-пьезокомпозиата, поляризованного вдоль оси OX_3 . Штриховкой показан СПК компонент; $t = |MS|/|MN|$ и $n = |RS|/|RT|$ — параметры, определяющие объемную концентрацию каждого компонента.

последний имеет вид матрицы, разбитой на кубические ячейки Банно единичного объема [5,6], внутри которых имеются воздушные включения в форме прямоугольного параллелепипеда с ребрами, параллельными осям OX_i . Высота данного параллелепипеда составляет ν -ю часть длины ребра ячейки Банно, а площадь основания — r -ю часть площади основания данной ячейки. Физические константы пористого полимера определяются согласно [6,7] в зависимости от ν и r . Соответствующий композит "СПК — пористый полимер" характеризуется связностью 1–0–1. Усреднение констант СПК и полимерного (однородного или пористого) компонентов проводится в два этапа по формулам [7,8]: сначала по параметру концентрации t вдоль оси OX_1 (при удовлетворении граничных условий электро- и эластостатики для протяженных вдоль OX_3 слоев типов $LMSR$ и $RSVU$, а также типов $MNTS$ и $STWV$; всюду $x_1 = \text{const}$, затем по n вдоль оси OX_2 (при удовлетворении аналогичных условий для слоев, ограниченных прямыми LU , MV и NW). Рассмотренные структуры 1–1- (рис. 1) и 1–0–1-композиатов описываются точечной группой симметрии $mm2$ и характеризуются сле-

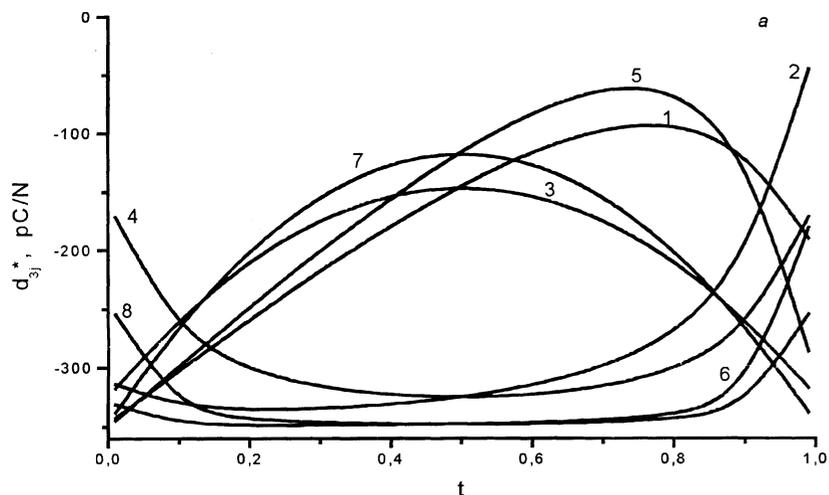


Рис. 2. Концентрационные зависимости d_{3j}^* (a), e_{31}^* , e_{32}^* , $10^{-1}e_{33}^*$ (b), $-10^2k_{31}^*$, $10^2k_{33}^*$ (c), $10^{\alpha}\psi_f$ (d), рассчитанные для пьезокомпозитов "СПК ПКР-7М — аральдит" и "СПК ПКР-7М — пористый аральдит" со связностями 1-1 и 1-0-1 соответственно: a — $d_{31}^*(t, 0.1)$ (1,5), $d_{31}^*(t, 0.5)$ (3,7), $d_{32}^*(t, 0.1)$ (2,6), $d_{32}^*(t, 0.5)$ (4,8), 1-4 и 5-8 построены для 1-0-1-композитов с матрицами A и B соответственно, $d_{33}^*(t, 0.5) = 747$ pC/N (матрица A), $d_{33}^*(t, 0.5) = 758$ pC/N (матрица B); b — $e_{31}^*(t, 0.1)$ (1,6), $e_{31}^*(t, 0.5)$ (4,9), $e_{32}^*(t, 0.1)$ (2,7), $e_{32}^*(t, 0.5)$ (5,10), $10^{-1}e_{33}^*(t, 0.1)$ (3,8), 1-5 и 6-10 построены для 1-1- и 1-0-1-композитов соответственно, $e_{33}^*(t, 0.5) = 18.5$ C/m² (1-1-композит), $e_{33}^*(t, 0.5) = 19.1$ C/m² (1-0-1-композит); пористый полимер в структуре 1-0-1 представлен матрицей B; c — $(-10^2)k_{31}^*(t, 0.1)$ (1,4,7), $(-10^2)k_{31}^*(t, 0.5)$ (3,6,8), $10^2k_{33}^*(t, 0.1)$ (2,5), $10^2k_{33}^*(t, 0.5)$ (5), 1-3 и 4-8 построены для 1-1- и 1-0-1-композитов соответственно, $k_{33}^*(t, 0.5) = 0.803$ (1-1-композит), $k_{33}^*(t, 0.5) = 0.813$ (1-0-1-композит, матрица A), $k_{33}^*(t, 0.5) = 0.815$ (1-0-1-композит, матрица B); пористый полимер в структуре 1-0-1 представлен матрицей A (4-6) или B (7,8); d — $10^{-1}\psi_1$ (5), ψ_1 (8), $10^{-3}\psi_2$ (6), ψ_2 (2), $10^{-1}\psi_3$ (7), $10\psi_3$ (3), ψ_4 (1), $10\psi_4$ (4), 1,5-7 построены для 1-0-1-композита (матрица A), 2-4,8 — для 1-1-композита.

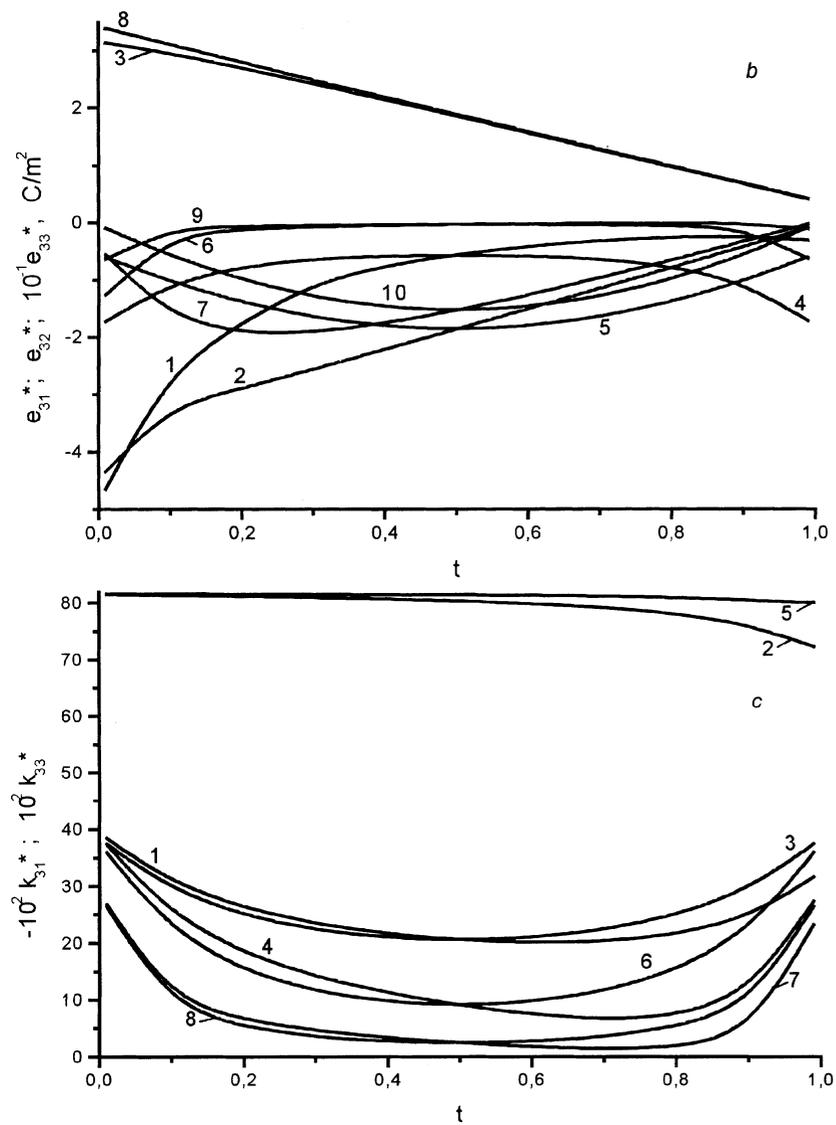


Рис. 2 (продолжение).

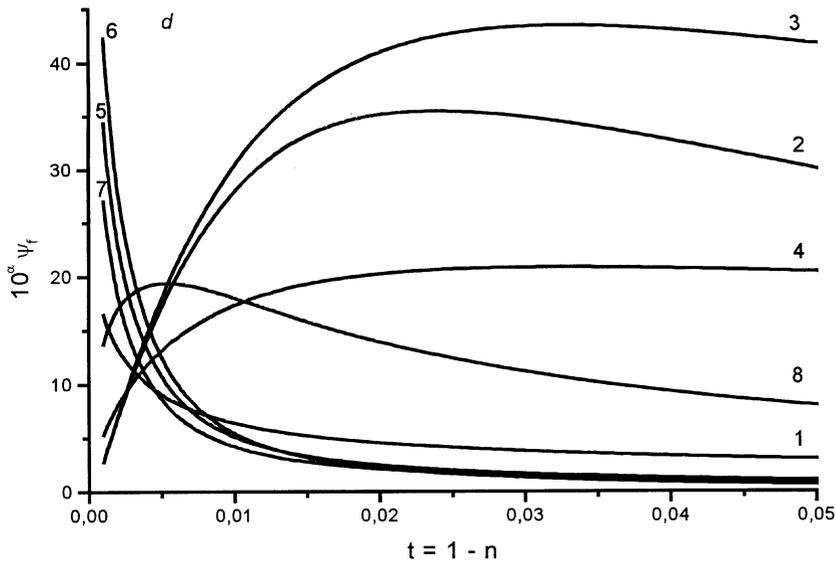


Рис. 2 (продолжение).

дующей особенностью. Электромеханические свойства, определенные для конкретной связности (1-1 или 1-0-1), не изменяются при переходе от параметров $(t; n)$ к $(1 - t; 1 - n)$.

В качестве пьезоактивного компонента 1-1- и 1-0-1-композигов выбирается перовскитовая СПК ПКР-7М, отличающаяся высокими значениями пьезомодулей $d_{ij}^{FC,1}$ наивысшим среди СПК на основе $Pb(Zr,Ti)O_3$ пьезокоэффициентом e_{33}^{FC} [9] и обуславливающая рекордно высокую пьезочувствительность композигов с элементами связности 1-3 [1]. Второй компонент структуры 1-1 — непьезоактивный полимер аральдит. В структуре 1-0-1 аральдит является пористым и представляется в виде вышеописанной матрицы, содержащей систему плоскопараллельных ($\nu = 0.10$; $r = 0.99$, матрица A) или вытянутых вдоль оси Ox_3 воздушных пор ($\nu = 0.99$; $r = 0.10$, матрица B)

¹ Здесь и далее электромеханические константы СПК и пьезокомпозигов обозначаются верхним индексом FC (X^{FC}) и звездочкой (X^*) соответственно. Переход от X^* к X^{FC} осуществляется при $t = n = 0$ или $t = n = 1$.

с одинаковой объемной концентрацией νr . На рис. 2 изображены некоторые расчетные зависимости от параметров концентрации ($t; n$) эффективных пьезомодулей d_{3j}^* , пьезокоэффициентов e_{3j}^* , коэффициентов электромеханической связи $k_{3m}^* = d_{3m}^*/(\varepsilon_{33}^{*\sigma} s_{mm}^{*E})^{1/2}$ и факторов ψ_f , где s_{iq}^{*E} и $\varepsilon_{33}^{*\sigma}$ — упругие податливости и диэлектрическая проницаемость соответственно,

$$\psi_1 = g_{33}^*/g_{33}^{FC}; \psi_2 = (Q_h^*/Q_h^{FC})^2; \psi_3 = (Q_{33}^*/Q_{33}^{FC})^2; \psi_4 = Q_d^*/Q_d^{FC}. \quad (1)$$

В формулах (1) пьезокоэффициент g_{33}^* , квадрат гидростатического параметра приема $(Q_h^*)^2 = (d_{31}^* + d_{32}^* + d_{33}^*)^2/\varepsilon_{33}^{*\sigma}$ и квадрат параметра приема $(Q_{33}^*)^2 = d_{33}^*g_{33}^*$ описывают пьезочувствительность композита, параметр $Q_d^* = d_{33}^*/(\varepsilon_{33}^{*\sigma}/\varepsilon_0)^{1/2}$ характеризует удельную чувствительность, учитывающую внутреннее сопротивление пьезоприемника. Для расчетов используются значения электромеханических констант [7,9], измеренных при комнатной температуре.

То, что $d_{3j}^*(t, n)$, $e_{3j}^*(t, n)$ и $k_{31}^*(t, n)$ при $n = 0.1$ изменяются в более широких интервалах, чем при $n = 0.5$ (рис. 2, *a-c*), является следствием большего перераспределения внутренних механических и электрических полей при чередовании вдоль OX_1 и OX_2 слоев с заметно различающейся толщиной. Тем не менее при $n = 0.5$ обнаруживается более значительная, чем при $n = 0.1$, анизотропия $e_{33}^*(t, n)/|e_{3j}^*(t, n)| > 10$ ($j = 1; 2$), даже несмотря на то, что вблизи $t = 0.5$ e_{31}^* и e_{32}^* различаются в 3–40 раз. Концентрационные зависимости, подобные $e_{3j}^*(t, n)$, ранее не рассматривались в литературе (см., например, [1,3,6,10,11]) и могут представлять интерес для некоторых приложений. Различия между конфигурациями кривых $d_{3j}^*(t, 0.1)$ и $e_{3j}^*(t, 0.1)$ (ср. рис. 2, *a* и *b*) обусловлены поведением упругих податливостей $s_{iq}^{*E}(t, 0.1)$; влияние последних, особенно с $q = 3$, становится более сильным при переходе от однородного аральдита к пористому (матрицы *A* и *B*). Постоянство $d_{33}^*(t, 0.5)$, $e_{33}^*(t, 0.5)$ и $k_{33}^*(t, 0.5)$ связано с тем, что изменение толщин слоев $|RU|$ и $|LR|$ при $|LR| = |MN|$ (рис. 1) не влияет на объемную концентрацию СПК компонента и отклик композита в направлении OX_3 при внешнем воздействии вдоль этой же оси вследствие граничных условий при $x_j = \text{const}$ ($j = 1; 2$).

Формирование пор вызывает значительные изменения параметров композита из (1). При $t = 1 - n \ll 1$ установлены резкое возрастание пьезочувствительности структуры 1–0–1 по сравнению с 1–1

и $\psi_f \approx 10 \dots 4.2 \cdot 10^4$. Переход от матрицы A к B существенно не влияет на $d_{33}^*(t, n)$, $e_{33}^*(t, n)$, $k_{33}^*(t, n)$ и $\psi_f(t, n)$, и это является важным преимуществом данного 1–0–1-композиата. В отличие от 1–3-композиата "СПК стержни–полимер" (симметрия ∞mt) [4,6,7] в 1–0–1-композиате (симметрия $mt2$) при $t = 1 - n \ll 1$ создается система стержней, которые состоят из пористого полимера и окружены тонкими СПК слоями, параллельными плоскости X_1OX_3 или X_2OX_3 . Определенный интерес представляют зависимости $k_{31}^*(t, n)$: на их поведение (ср. кривые 1,3,4,6–8 на рис. 2, с) сильно влияет упругая податливость s_{11}^{*E} , в значительной мере зависящая от упругих свойств пористого полимера. Следствием такого влияния является заметное различие между факторами анизотропии d_{3j}^* и k_{3j}^* (например, при $t = 0.5$ $d_{33}^*/d_{31}^* \approx -6.6 \dots -5.2$ и $k_{33}^*/k_{31}^* \approx -34 \dots -9.1$), не свойственное композиатам с симметрией ∞mt [3,4,6,7,11].

Таким образом, приведенные выше результаты расширяют физические представления о факторах, благоприятствующих большой пьезоэлектрической анизотропии [3,6,11] и повышению параметров приема [1,2,12], а также свидетельствуют о перспективности использования структур типа 1–1 с большими значениями $e_{33}^*/|e_{3j}^*|$, k_{33}^* , $k_{33}^*/|k_{31}^*|$ и ψ_f^* .

Список литературы

- [1] Тополов В.Ю., Турик А.В. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 2. С. 84–89.
- [2] Sigmund O., Torquato S., Aksay I.A. // J. Mater. Res. 1998. V. 13. N 4. P. 1038–1048.
- [3] Тополов В.Ю., Турик А.В. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 11. С. 65–70.
- [4] Newnham R.E. // MRS Bull. 1997. V. 22. N 5. P. 20–33.
- [5] Banno H. // Ceram. Bull. 1987. V. 66. N 9. P. 1332–1337.
- [6] Levassort F., Topolov V.Yu., Lethiecq M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. N 16. P. 2064–2068.
- [7] Levassort F., Lethiecq M., Certon D., Patat F. // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., a. Freq. Contr. 1997. V. 44. N 2. P. 445–452.
- [8] Аксакава Е., Farnell G.W. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 9. P. 4469–4473.
- [9] Высокоэффективные пьезокерамические материалы (Справочник). Ростов н/Д: Книга, 1994. 32 с.
- [10] Grekov A.A., Kratarov S.O., Kuprienko A.A. // Ferroelectrics. 1987. V. 76. N 1–4. P. 43–48.
- [11] Topolov V.Yu., Turik A.V. // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. N 1. P. 372–379.
- [12] Петров В.М. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 11. С. 2273–2275.