

УДК 537.8

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПОРИСТЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ С КОРРЕЛИРОВАННЫМИ МОНО- И ПОЛИДИСПЕРСНЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ СТРУКТУРАМИ

А. А. Паньков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

Статья поступила в редакцию 2 августа 2018 г.

Аннотация. Исследован пьезоэлектрический эффект пористого пьезоэлектрика PVDF в бинарном приближении метода корреляционных полидисперсных составляющих с уточненным учетом корреляционных функций квазипериодических моно- и полидисперсных коррелированных структур с однонаправленными туннельными порами. В бинарном приближении искомые тензоры эффективных пьезоэлектромагнитоупругих свойств двухфазного пьезокомпозиата рассчитывались по аналитической формуле через известные решения для традиционных полидисперсных структур и «приведенный коэффициент корреляции» – сумму начального и поправочного коэффициентов корреляции заданной квазипериодической монодисперсной и полидисперсной структур; получены решения для электромагнитоупругих полей в фазах композиата. Представлены результаты расчета в различных приближениях эффективного продольного пьезоэлектрического коэффициента для монодисперсной квазипериодической и полидисперсных структур в зависимости от объемной доли однонаправленных туннельных пор в пьезоэлектрике PVDF; установлены тип структуры и объемная доля пор, при которых достигается наибольшее значение пьезоэлектрического коэффициента.

Ключевые слова: пьезокомпозиат; электромагнитоупругость; корреляционная функция; эффективные свойства; полидисперсная структура.

Abstract. The pyroelectric effect of a porous piezoelectric material of PVDF in binary approach of a method of correlation polydisperse components with the specified accounting of correlation functions quasiperiodic mono - and the

polydisperse correlated structures with the unidirectional tunnel porosity is investigated. In the binary approach required tensors of effective pyroelectromagnetoelastic properties of a two-phase piezocomposite are calculated on an analytical formula through the known decisions for traditional polydisperse structures and "the effective correlation coefficient" is the sum of initial and correction coefficients of the correlation set quasiperiodic monodisperse and polydisperse structures; decisions for electromagnetoelastic fields in composite phases are received. Results of calculation in various approximations of effective longitudinal pyroelectric coefficient for monodisperse quasiperiodic and polydisperse structures depending on a volume fraction of the unidirectional tunnel porosity in piezoelectric material of PVDF are presented; the type of structure and a volume fraction of a porosity at which the greatest value of pyroelectric coefficient is reached are established.

Key words: piezocomposite; electro-magnetic elasticity; correlation function; effective properties; polydisperse structure.

Введение

Пироэлектрический эффект состоит в генерации электрических зарядов в материале (кристалле) под действием теплового инфракрасного излучения [1-4]. В композиционных материалах такие эффекты, как пиро-электромагнитные взаимосвязанности могут по отдельности отсутствовать в каждой из фаз и их возникновение [5-10] на «макроуровне» композита связано с взаимодействием элементов структуры на «микроуровне» [11-15].

Задача прогнозирования эффективных физико-механических свойств композитов или «задача эффективного модуля» является одной из центральных задач механики композитов [11-15]. Традиционные методы статистической механики композитов [12-14] представляют решения для тензоров эффективных физико-механических свойств композита со случайной структурой через функционалы от многоточечных моментных функций, в частности, нормированную двухточечную $r, r_1 \subset V$ корреляционную функцию

1-й фазы (волокон), случайным образом распределенной в непрерывной 2-й фазе (матрице),

$$k_{11}(\rho) = \frac{1}{D_{11}} \langle i_1'(\mathbf{r}) i_1'(\mathbf{r}_1) \rangle \quad (1)$$

для заданной модельной [12, 13] или реальной [14] структуры двухфазного композита, где дисперсия $D_{11} \equiv \langle i_1' i_1' \rangle = v_1(1 - v_1)$, пульсация $i_1'(\mathbf{r}) = i_1(\mathbf{r}) - v_1$, относительная объемная доля 1-й фазы $v_1 = \langle i_1 \rangle$, индикаторная функция 1-й фазы $i_1(\mathbf{r})$ со значением $i_1 = 1$ для $\mathbf{r} \in V_1$, 0 для $\mathbf{r} \notin V_1$, область 1-й фазы $V_1 \subset V$, область 2-й фазы $V_2 = V \setminus V_1$, оператор осреднения $\langle \dots \rangle$ по представительной области композита V .

В методе периодических составляющих [15] используется считающееся известным решение для идеальной периодической структуры и специальные многоточечные моментные функции, в частности [7], двухточечная корреляционная функция структуры

$$\tilde{k}_{11}(\rho) = \frac{1}{D_{11}} \langle i_1^\circ(\mathbf{r}) i_1^\circ(\mathbf{r}_1) \rangle, \quad (2)$$

где индикаторные функции отклонений $i_1^\circ(\mathbf{r}) \equiv i_1(\mathbf{r}) - i_1^p(\mathbf{r})$ и 1-й фазы периодической структуры $i_1^p(\mathbf{r})$, выполняются равенства $\langle i_1 \rangle = \langle i_1^p \rangle = v_1$.

В обобщенном сингулярном приближении метода периодических составляющих [7, 16] та или иная аппроксимация корреляционной функции (2) происходит опосредовано через выбор параметров «среды сравнения» [13] через приравнивание свойств среды сравнения, в частности, свойствам 1-й или 2-й фазы, осредненным по объему V значениям или по «схеме самосогласования» к искомым эффективным свойствам композита.

Уникальность предельно полидисперсных структур (рис.1) состоит в возможности получения точных аналитических решений [8, 9, 11] не только для констант эффективных свойств, но и электро-магнито-упругих полей в однотипных полидисперсных составных сферических или цилиндрических

(рис.1,а) ячейках и в инвариантности этих решений к особенностям взаимного расположения ячеек в композите, что делает эффективным использование полидисперсных структур в качестве вспомогательной «базисной» или «нулевого приближения» для заданных модельных или реальных, в частности, монодисперсных структур композитов и дает полидисперсным структурам значительное преимущество перед идеальными периодическими структурами [15], для которых решение задачи эффективного модуля представляет отдельную сложную задачу [5, 6] механики композитов.

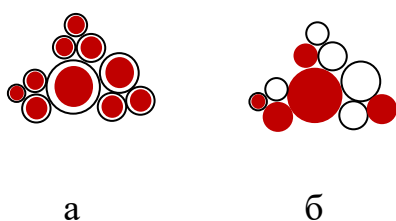


Рис.1 Фрагменты реализаций традиционных полидисперсных матричной (а) и кластерной (б) структур

Цель – изучение эффекта появления пьезоэлектрической связанности у пьезоэлектрика PVDF с туннельными порами на основе уточненного анализа двухточечных корреляционных функций монодисперсных и полидисперсных структур в бинарном приближении метода корреляционных полидисперсных составляющих [10].

1. Квазипериодические моно и полидисперсные коррелированные случайные структуры

В модели монодисперсной квазипериодической гексагональной структуры (рис.2,а) вероятность наличия волокна в гексагональной ячейке рассчитывается $p_0 = v_1 / v_{1\max}$ через значения заданной $v_1 \in (0; v_{1\max})$ и предельной $v_{1\max} = \pi\sqrt{3} / 6(1 + \delta/2)^{-2}$ относительных объемных долей волокон в композите при фиксированной величине минимальной гарантированной прослойки матрицы между волокнами δ , отнесенной к радиусу r_0 кругового поперечного сечения волокна. В моделях полидисперсных структур (рис.1, рис.2,б) распределение размеров поперечных сечений однофазных (рис.1,б) или однотипных составных

двухфазных (рис.1,а, рис.2,б) цилиндрических ячеек достаточно широко, включая и бесконечно малые, что обуславливает возможность заполнения такими полидисперсными ячейками всей представительной области V композита, допуская, в общем случае, как отсутствие (рис.1,а,б), так и наличие ближних и (или) дальних корреляций в значениях размеров (рис.2,б) и типах различных ячеек. На рис.2 черным цветом обозначена 1-я фаза, белым – 2-я фаза. Считаем, что рассматриваемые (рис.1, рис.2) модельные случайные структуры и поля обладают свойствами статистической однородности и эргодичности [14] в представительной области V композита.

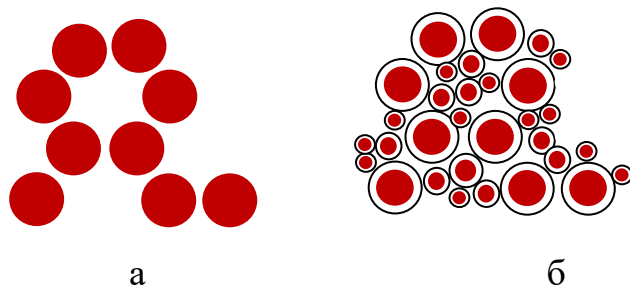


Рис.2 Фрагменты реализаций коррелированных квазипериодических монодисперсной (а) и полидисперсной (б) структур

В методе полидисперсных корреляционных составляющих [9, 10] также, как и в известном методе периодических составляющих [15] при решении краевых задач для нерегулярных структур (рис.2,а) используется коррелированная с заданной вспомогательная базисная структура с известным решением, которая для метода периодических составляющих – это идеальная периодическая структура, для метода полидисперсных составляющих – это полидисперсная структура I (рис.2,б). Корреляции структур обусловлены тем, что в методе периодических составляющих центры и границы всех ячеек квазипериодической и периодической монодисперсных структур попарно совпадают, а в методе полидисперсных составляющих имеем совпадение центров всех монодисперсных включений (поперечных сечений волокон) квазипериодической структуры (рис.2,а) с соответствующими центрами лишь группы из такого же числа монодисперсных включений в полидисперсной структуре (рис.2,б) при мысленном наложении структур друг на друга. Для монодисперсных квазипериодических структур ранее [7, 16, 17] получены

решения «задачи эффективного модуля» механики композитов в обобщенном сингулярном приближении метода периодических составляющих [7, 16] и в уточненном «первом приближении» этого метода с учетом корреляционных функций структуры [17] с использованием вспомогательной базисной монодисперсной идеальной периодической структуры.

В [9, 10] даны математические обоснования использования при решении «задачи эффективного модуля» методом полидисперсных корреляционных составляющих в первом [9] и втором (бинарном) [10] приближениях различных полидисперсных структур (рис.1,а, рис.2,б) в качестве коррелированных с заданными случайными «гибридной» полидисперсной [9] и монодисперсной (рис.2,а) [10] структурами, где получены уточненные аналитические решения для тензоров эффективных пьезоэлектромагнитных и термоупругих свойств композитов. Первое и второе (бинарное) приближения метода корреляционных полидисперсных составляющих [9, 10] связаны с учетом реального вида двухточечной нормированной корреляционной функции $\tilde{k}_{11}(\rho)$ 1-й фазы (2), где функция отклонений $i_1^{\circ}(\mathbf{r}) \equiv i_1(\mathbf{r}) - i_1^I(\mathbf{r})$. В этом подходе корреляционная функция $\tilde{k}_{11}(\rho)$ (2) аппроксимируется разложениями: в первом приближении [9]

$$\tilde{k}_{11}^{(1)}(\rho) \approx (1-p)k_{11}^{\text{II}}(\rho), \quad (3)$$

в бинарном приближении [10]

$$\tilde{k}_{11}^{(2)}(\rho) \approx \tilde{k}_{11}^{(1)}(\rho) + \Delta\tilde{k}_{11}^{(2)}(\rho) \quad (4)$$

через поправку

$$\Delta\tilde{k}_{11}^{(2)}(\rho) \approx p_{\Delta}\Delta k_{11}(\rho), \quad (5)$$

где «поправочный» коэффициент p_{Δ} , разность $\Delta k_{11}(\rho) = k_{11}^I(\rho) - k_{11}^{\text{II}}(\rho)$, базисные корреляционные функции (1)

$$k_{11}^{\text{I,II}}(\rho) = \frac{1}{D_{11}} \left\langle i_1^{\text{I,II}}(\mathbf{r}) i_1^{\text{I,II}}(\mathbf{r}_1) \right\rangle,$$

индексы « I » и « II » обозначают принадлежность к полидисперсным структурам на рис.2,б и рис.1,б соответственно. Выполняются равенства

объемных долей 1-й фазы и осредненных значений $v_1 = \langle i_1 \rangle = \langle i_1^{I,II} \rangle$ для рассматриваемых индикаторных функций различных двухфазных структур: заданной $i_1(\mathbf{r})$ (рис.2,а) и вспомогательных базисных полидисперсных $i_1^{I,II}(\mathbf{r})$ структур со значениями: $i_1 = 1$ для $\mathbf{r} \in V_1$ и 0 для $\mathbf{r} \notin V_1$, $i_1^{I,II} = 1$ для $\mathbf{r} \in V_1^{I,II}$ и 0 для $\mathbf{r} \notin V_1^{I,II}$, где области 1-й фазы в заданной V_1 и вспомогательных базисных $V_1^{I,II}$ структурах. Точность предложенных аппроксимаций (3), (4) подтверждена ранее в [9, 10] результатами численного моделирования случайных структур и решением тестовых задач.

2. Эффективные свойства композита

При механическом, электромагнитном и/или тепловом нагружении представительной области V пьезокомпозита в его фазах на структурном или «микроуровне», в общем случае, возникают существенно неоднородные поля напряжения σ , электрической \widehat{D} и магнитной \widehat{B} индукций, которые связаны с соответствующими полями деформации ε , электрической \widehat{E} и магнитной \widehat{H} напряженностями, температурой внешнего однородного по области V нагрева Θ определяющими соотношениями [1] посредством тензоров упругих свойств C_f , пьезоэлектрических e_f и пьезомагнитных h_f свойств, диэлектрических λ_f и магнитных μ_f проницаемостей, электромагнитных связанностей χ_f , κ_f , температурных коэффициентов β_f , пироэлектрических π_f и пирромагнитных ϑ_f постоянных, считающихся известными для каждой фазы $f = \overline{1,2}$. Искомые тензоры эффективных свойств: C^* , λ^* , μ^* , e^* , h^* , χ^* , κ^* , β^* , π^* , ϑ^* входят в определяющие соотношения на макроуровне композита

$$\sigma_{ij}^* = C_{ijmn}^* \varepsilon_{mn}^* - e_{nij}^* \widehat{E}_n^* - h_{nij}^* \widehat{H}_n^* - \beta_{ij}^* \Theta,$$

$$\widehat{D}_i^* = e_{imn}^* \varepsilon_{mn}^* + \lambda_{in}^* \widehat{E}_n^* + \chi_{in}^* \widehat{H}_n^* + \pi_i^* \Theta, \quad (6)$$

$$\widehat{B}_i^* = h_{imn}^* \varepsilon_{mn}^* + \mu_{in}^* \widehat{H}_n^* + \kappa_{in}^* \widehat{E}_n^* + \vartheta_i^* \Theta$$

и связывают осредненные или «макроскопические» значения напряжений $\sigma^* = \langle \sigma \rangle$, деформаций $\varepsilon^* = \langle \varepsilon \rangle$, индукций $\hat{D}^* = \langle \hat{D} \rangle$, $\hat{B}^* = \langle \hat{B} \rangle$ и напряженностей $\hat{E}^* = \langle \hat{E} \rangle$, $\hat{H}^* = \langle \hat{H} \rangle$, температуру нагрева Θ .

В бинарном приближении метода корреляционных полидисперсных составляющих решения для искомым тензоров $A^* \equiv \{C^*, \dots, \beta^*, \pi^*, \vartheta^*\}$ эффективных пьезоэлектромагнитоупругих свойств двухфазного пьезокомпозита [10]

$$A^* = p_{\bullet} A^{I*} + (1 - p_{\bullet}) A^{II*} \quad (7)$$

выражены через известные решения A^{I*} , A^{II*} для традиционных полидисперсных структур (рис.1) [8, 11] и приведенный коэффициент корреляции

$$p_{\bullet} = p + p_{\Delta}, \quad (8)$$

который рассчитывается через начальный

$$p = \frac{\langle i_1^I i_1^{I'} \rangle}{\sigma_1 \sigma_1^I} \quad (9)$$

и поправочный p_{Δ} (5) коэффициенты корреляции, где корреляционный момент $\langle i_1^I i_1^{I'} \rangle = v_{11} - v_1^2$, начальный смешанный момент $v_{11} = \langle i_1^I i_1^I \rangle$, среднеквадратические отклонения $\sigma_1 = \sigma_1^{I,II} = \sqrt{D_{11}}$.

Благодаря уникальной инвариантности решений для тензоров A^{I*} эффективных свойств полидисперсных структур вида (рис.1,а, рис.2,б) к распределению размеров и к особенностям, например: периодичности, квазипериодичности (рис.2,б) или статистической независимости (рис.1,а) взаимного расположения составных ячеек в области V композита в формуле (7) тензоры A^{I*} не зависят от конкретного вида коррелированной полидисперсной структуры. В результате этого эффективные свойства коррелированных структур, например, на рис.2,б равны известным эффективным свойствам традиционной полидисперсной структуры (рис.1,а) [8, 11]. В обобщенном сингулярном приближении [7, 16] метода периодических

составляющих решение для тензоров эффективных свойств \mathbf{A}^* совпадает по виду с решением (7) с заменой величин p_\bullet , \mathbf{A}^{II} соответственно на p (9) и \mathbf{A}^{s*} , в первом приближении метода корреляционных (периодических) составляющих [9] решение для \mathbf{A}^* также совпадает по виду с решением (7) с заменой лишь величины p_\bullet на p .

Отметим, что для рассматриваемого двухфазного композита с однонаправленной волокнистой структурой при трансверсальной изотропии фаз и композита в плоскости $r_1 r_2$ выполняются точные соотношения [18] для эффективных характеристик, в частности: температурных коэффициентов β^* , пирозлектрических π^* и пиромагнитных ϑ^* постоянного композита

$$\frac{\langle \beta_{11} \rangle - \beta_{11}^*}{\bar{k}_{12}} = \frac{\langle \beta_{33} \rangle - \beta_{33}^*}{\bar{C}_{1133}} = \frac{\pi_3^* - \langle \pi_3 \rangle}{\bar{e}_{311}} = \frac{\vartheta_3^* - \langle \vartheta_3 \rangle}{\bar{h}_{311}} = 2\nu_1 T_{(1)11}$$

с учетом общих выражений

$$\beta_{ij}^* = \langle \beta_{ij} \rangle - \langle C_{ijpq} T_{pq} \rangle, \quad \pi_i^* = \langle \pi_i \rangle + \langle e_{ipq} T_{pq} \rangle, \quad \vartheta_i^* = \langle \vartheta_i \rangle + \langle h_{ipq} T_{pq} \rangle,$$

которые для двухфазного однонаправленного волокнистого композита принимают вид

$$\beta_{11}^* = \beta_{22}^* = \langle \beta_{11} \rangle - 2 \sum_{f=1}^2 \nu_f k_{(f)12} T_{(f)11} = \langle \beta_{11} \rangle - 2\nu_1 \bar{k}_{12} T_{(1)11},$$

$$\beta_{33}^* = \langle \beta_{33} \rangle - 2 \sum_{f=1}^2 \nu_f C_{(f)1133} T_{(f)11} = \langle \beta_{33} \rangle - 2\nu_1 \bar{C}_{1133} T_{(1)11},$$

$$\pi_3^* = \langle \pi_3 \rangle + 2 \sum_{f=1}^2 \nu_f e_{(f)311} T_{(f)11} = \langle \pi_3 \rangle + 2\nu_1 \bar{e}_{311} T_{(1)11},$$

$$\vartheta_3^* = \langle \vartheta_3 \rangle + 2 \sum_{f=1}^2 \nu_f h_{(f)311} T_{(f)11} = \langle \vartheta_3 \rangle + 2\nu_1 \bar{h}_{311} T_{(1)11},$$

где компоненты $T_{(f)11} = T_{(f)22} \neq 0$ для различных фаз f связаны $\sum_{f=1}^2 \nu_f T_{(f)11} = 0$ и

входят в разложения осредненных по фазам $\langle \dots \rangle_f$ значений деформаций

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle_f = A_{(f)ijmn} \varepsilon_{mn}^* + B_{(f)ijn}(\mathbf{r}) \hat{E}_n^* + D_{(f)ijn} \hat{H}_n^* + T_{(f)ij} \Theta,$$

разности характеристик фаз $\bar{e}_{311} = e_{(1)311} - e_{(2)311}$, $\bar{h}_{311} = h_{(1)311} - h_{(2)311}$,
 $\bar{k}_{12} = k_{(1)12} - k_{(2)12}$, $\bar{C}_{1133} = C_{(1)1133} - C_{(2)1133}$, объемный модуль плоской деформации
 фаз $k_{(f)12} = 1/2(C_{(f)1111} + C_{(f)1122})$ композита.

Таким образом, решения для тензоров эффективных тепловых свойств композита с монодисперсной квазипериодической структурой (рис.2,а)

$$\beta^* = p_{\bullet}\beta^{I*} + (1 - p_{\bullet})\beta^{II*}, \quad \pi^* = p_{\bullet}\pi^{I*} + (1 - p_{\bullet})\pi^{II*}, \quad \vartheta^* = p_{\bullet}\vartheta^{I*} + (1 - p_{\bullet})\vartheta^{II*} \quad (10)$$

выражены через известные решения для базисных полидисперсных структур I, II, которые, например, для структур с однонаправленными цилиндрическими (туннельными) порами получены в [8] для эффективных пьроэлектрических

$$\pi_3^{*I,II} = (1 - \nu_1)(\pi_{(2)3} + \alpha^{I,II}e_{(2)311}), \quad (11)$$

температурных

$$\beta_{11}^{*I,II} = (1 - \nu_1)(\beta_{(2)11} - \alpha^{I,II}k_{(2)12}), \quad \beta_{33}^{*I,II} = (1 - \nu_1)(\beta_{(2)33} - \alpha^{I,II}C_{(2)1133})$$

и пьромагнитных $\vartheta_3^{*I,II} = (1 - \nu_1)(\vartheta_{(2)3} + \alpha^{I,II}h_{(2)311})$ коэффициентов, где

$\alpha^I = \nu_1\beta_{(2)11}/(\nu_1k_{(2)12} + G_{(2)12})$ для структур на (рис.1,а, рис.2,б) и

$\alpha^{II} = \nu_1\beta_{(2)11}/(\nu_1k_{(2)12} + G_{12}^{*II})$ для структуры на рис.1,б. Для полидисперсной

структуры рис.1,б расчет модуля сдвига G_{12}^{*II} в выражении для коэффициента

α^{II} происходит на основе расчетной схемы – одиночное волокно

(цилиндрическая пора) в эффективной среде совместно с вычислением на этой

же расчетной схеме объемного модуля плоской деформации k_{12}^{*II} ;

пьезоактивность PVDF не влияет на эти G_{12}^{*II} , k_{12}^{*II} решения.

3. Результаты численного моделирования

На рис.3,а изображены графики нормированных корреляционных функций $k_{11}(\rho)$ (1) для традиционных полидисперсных структур: (□) для структуры на рис.1,а и (△) для структуры на рис.1,б с отсутствием корреляций размеров и типов ячеек в каждой из этих структур, (•) для заданной квазипериодической монодисперсной структуры (рис.2,а) при значении

величины минимальной относительной толщины прослойки $\delta \approx 0.25$ матрицы между волокнами и (\circ) для коррелированной с ней полидисперсной структуры I (рис.2,б) при значении относительной объемной доли волокон (туннельных пор) $v_1 = 0.6$. На рис.3,б поправочный коэффициент p_Δ (\blacktriangle) найден из условия наилучшей аппроксимации $\Delta\tilde{k}_{11}^{(2)}(\rho)$ действительных значений функции отклонений $\Delta\tilde{k}_{11}(\rho)$ (5), приведенный коэффициент корреляции p_\bullet (\bullet) (8) есть сумма начального p (\blacksquare) (9) и поправочного p_Δ (\blacktriangle) коэффициентов корреляции квазипериодических структур (рис.2,а,б) для различных значений объемной доли $v_1 \in (0; v_{1\max})$.

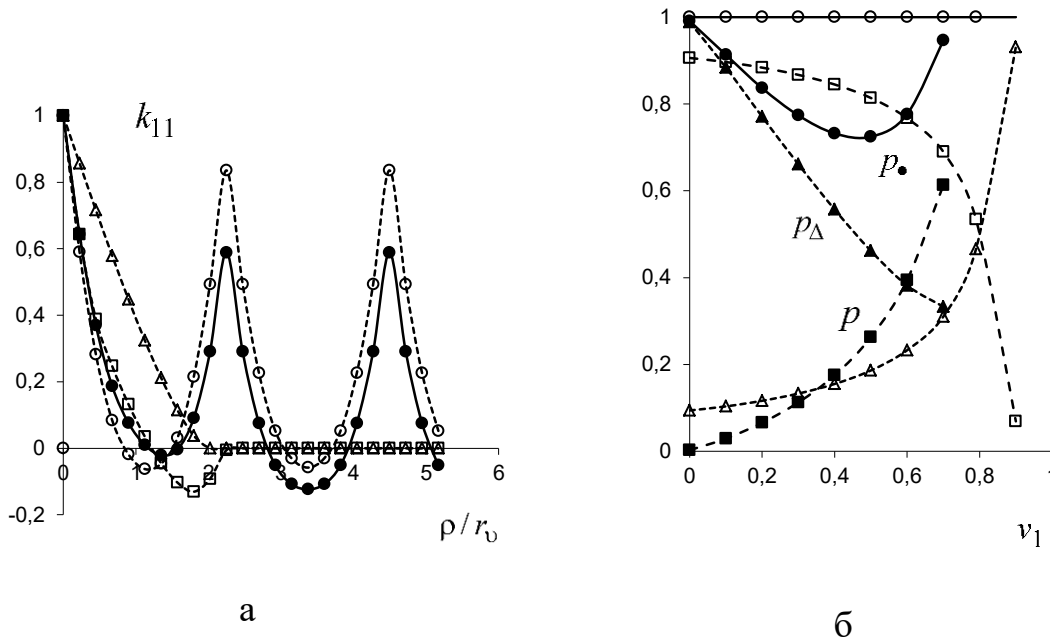


Рис.3 Нормированные корреляционные функции (а), начальный p , поправочный p_Δ и приведенный p_\bullet коэффициенты корреляции структур

Для сравнения на рис.3,б представлены результаты расчета коэффициентов p (\square), p_Δ (\triangle), p_\bullet (\circ) для частного предельного случая, когда монодисперсная квазипериодическая структура (рис.2,а) вырождается в периодическую структуру. В предельном случае, когда объемная доля $v_1 = v_{1\max}$, тогда квазипериодическая структура (рис.2,а) также вырождалась в периодическую структуру. Совпадение решений для полидисперсной (рис.1,а, рис.2,б) и монодисперсной периодической структур подтверждено ранее в [8]

для коэффициента эффективной электромагнитной связанности κ_{33}^* композита феррит/пьезоэлектрик в сравнении с известным точным решением асимптотического метода осреднения [6] для всех значений объемной доли $v_1 \in (0; v_{1\max})$ пьезоэлектрических волокон.

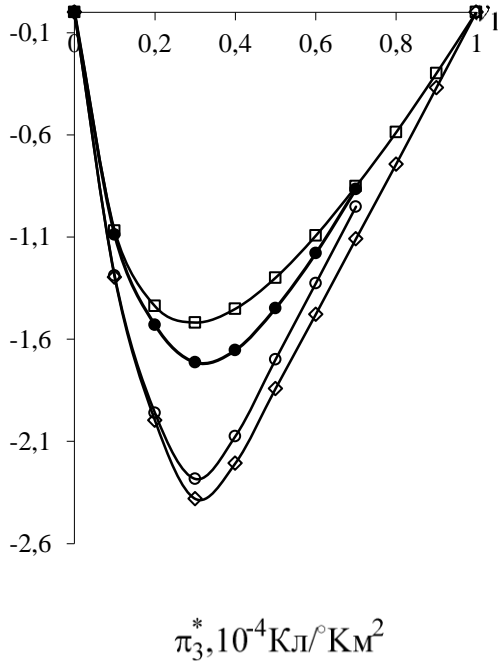


Рис. 4 Эффективный пьезоэлектрический коэффициент π_3^* для монодисперсной (\circ), (\bullet) (рис. 2,а) и полидисперсных (\square) (рис.1,а, рис.2,б), (\diamond) (рис.1,б) структур в зависимости от объемной доли пор v_1

Исследуем эффект появления пьезоэлектрической связанности у пьезоэлектрика PVDF с туннельными порами в отсутствие такого эффекта у пьезоэлектрика PVDF без пор с использованием полученного в бинарном приближении метода корреляционных полидисперсных составляющих решения для эффективного пьезоэлектрического коэффициента π_3^* (10), (11). На рис.4 представлены результаты расчета эффективного продольного пьезоэлектрического коэффициента π_3^* для монодисперсной квазипериодической структуры (рис.2,а) в первом (\circ) (3), во втором (\bullet) (4) приближениях и для полидисперсных структур: (\square) (рис.1,а, рис.2,б) и (\diamond) (рис.1,б) в зависимости от объемной доли v_1 цилиндрических однонаправленных вдоль оси r_3 туннельных пор в пьезоэлектрике PVDF [19]. Наибольшие значения пьезоэлектрического коэффициента π_3^* (рис.4) для всех

рассмотренных структур (рис.1, рис.2) достигаются при объемной доле туннельных пор $v_1 \approx 0.3$, при этом максимальное абсолютное значение для $\pi_3^* \approx 2.38 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}/^\circ\text{Км}^2$ имеем для полидисперсной пористой структуры (рис.1,б); отметим, что пьезоэлектрический коэффициент титаната бария $\pi_3^{(2)} = 19 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}/\text{Км}^2$ [5]. На рис.4 графики (□) соответствуют как полидисперсной структуре (рис.1,а, рис.2,б), так и идеальной периодической структуре, для которой приведенный коэффициент корреляции $\rho_\bullet = 1$ (рис.3,б) для всех рассматриваемых значений v_1 объемной доли пор.

Заключение

Исследован пьезоэлектрический эффект пористого пьезоэлектрика PVDF в бинарном приближении метода корреляционных полидисперсных составляющих с уточненным учетом корреляционных функций структуры из однонаправленных туннельных пор. В бинарном приближении искомые тензоры эффективных пьезоэлектромагнитоупругих свойств двухфазного пьезокомпозиата рассчитывались по аналитической формуле через известные решения для базисных полидисперсных структур и «приведенный коэффициент корреляции» – сумму начального и поправочного коэффициентов корреляции заданной квазипериодической монодисперсной и базисной полидисперсной структур; получены решения для электромагнитоупругих полей в фазах композиата. Представлены результаты расчета в различных приближениях эффективного продольного пьезоэлектрического коэффициента для монодисперсной квазипериодической и полидисперсных структур в зависимости от объемной доли однонаправленных туннельных пор в пьезоэлектрике PVDF; установлены тип структуры и объемная доля пор, при которых достигается наибольшее значение пьезоэлектрического коэффициента.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00722).

Литература

1. Д. Берлинкур, Д. Керран, Г. Жаффе. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях // Физическая акустика. Т.1: Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А. – М.: Мир, 1966, С. 204-326
2. Н.И. Коротких, Н.Н. Матвеев, А.С. Сидоркин. Пироэлектрические свойства полиэтиленоксида // Физика твердого тела, 2009, Т. 51, N 6, С. 1215-1217
3. Е.П. Смирнова, С.Е. Александров, К.А. Сотников, А.А. Капралов, А.В. Сотников. Пироэлектрический эффект в твердых растворах на основе магнониобата свинца // Физика твердого тела, 2003, Т. 45, N 7, С. 1245-1249
4. В.К. Ярмаркин, С.Г. Шульман, Г.А. Панкова, В.В. Леманов. Пироэлектрические свойства кристаллов некоторых соединений на основе белковых аминокислот // Физика твердого тела, 2005, Т. 47, N 11, С. 2047-2049
5. Р.И. Каралюнас. Эффективные термопьезоэлектрические свойства слоистых композитов // Механика композитных материалов, 1990, N 5, С. 823-830
6. И.П. Гетман. О магнитоэлектрическом эффекте в пьезокомпозитах // ДАН СССР, 1991, Т. 317, N 2, С. 341-343
7. А.А. Паньков. Статистическая механика пьезокомпозитов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009, 480 с.
8. А.А. Pan'kov. Piezoactive unidirectionally fibrous polydisperse composite // Mechanics of Composite Materials, 2012, Vol. 48, No. 6, pp. 603-610
9. А.А. Pan'kov. Correlation functions and piezoelectromagnetic properties of structures on the method of correlation components // Mechanics of Composite Materials, 2014, Vol. 50, No. 6, pp. 681-694

10. A.A. Pan'kov. Pyroelectromagnetic effects of a piezocomposite in the binary refinement of the method of quasi-periodic polydisperse correlation components // *Mechanics of Composite Materials*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 535-544
11. Р. Кристенсен. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982, 334 с.
12. В.А. Ломакин. Статистические задачи механики твердых деформируемых тел. – М.: Наука, 1970, 139 с.
13. Т.Д. Шермергор. Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1976, 399 с.
14. С.Д. Волков, В.П. Ставров. Статистическая механика композитных материалов. – Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1978, 208 с.
15. Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М.: Наука, 1984, 115 с.
16. А.А. Паньков. Пирозлектрические свойства пористого титаната бария // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*. 2014, N11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov14/19/text.pdf>
17. А.А. Паньков. Упругие свойства квазипериодических композитов с учетом корреляционных функций структуры // *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2011, Т. 17, N 3, С. 385-400
18. А.А. Паньков. Обобщение соотношений Хилла на электромагнитные и термоупругие свойства однонаправленных волокнистых пьезокомпозитов // *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2013, Т.19, N 1, С. 94-101
19. G.M. Sessler. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride // *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1981, Vol. 70, No. 6, pp. 1596-1608.

Для цитирования:

А. А. Паньков. Пирозлектрический эффект пористых пьезоэлектриков с коррелированными моно- и полидисперсными случайными структурами. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2018. № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.4