

УДК 681.586.773

DOI: 10.30987/article_5d2d923295da08.42628593

С.В. Шилько, Д.А. Черноус, Т.В. Рябченко

РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИМПРЕГНИРОВАННОГО ПОЛИМЕРОМ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Разработана методика расчетного определения чувствительности датчика давления, представляющего собой тонкое покрытие из нанопористого анодного оксида алюминия, поры которого наполнены полимерным пьезоэлектриком. Датчик моделируется тонким двухслойным покрытием, размещенным на условно недеформируемом основании. Методика основана на трехфазной модели волоконно-армированного композита и упрощенной

постановке задачи электроупругости. При моделировании прямого пьезоэффекта на примере поливинилиденфторида в качестве наполнителя показано, что зависимость чувствительности от доли наполнителя близка к квадратичной.

Ключевые слова: датчик давления, анодный оксид алюминия, полимерный пьезоэлектрик, волоконно-армированный композит, электроупругость.

S.V. Shilko, D.A. Chernous, T.V. Ryabchenko

SENSITIVITY CALCULATION OF PIEZOELECTRIC PRESSURE SENSOR BASED ON ALUMINUM ANODIC OXIDE IMPREGNATED WITH POLYMER

The application of highly ordered thin ceramic coatings with nano-dimensional pores obtained by metal anodic oxidation in pressure sensors of a matrix type is promising. For this purpose the pores of a ceramic base are impregnated with polymer realizing a direct piezoelectric effect.

There is developed a procedure for the calculated definition of piezoelectric pressure sensor sensitivity which is a thin coating made of nano-porous aluminum anodic oxide the pores of which are filled with polyvinylidene fluoride.

The procedure is based on a three-phase model of fiber-reinforced composite and a simplified problem setting of electroelasticity. The sensor is modeled by a

thin two-layer coating located on a conditionally non-deformable base.

It is defined that for a coating lying freely on a rigid foundation the sensitivity is directly proportional to volume fraction of the polymer filler. For a coating connected in an adhesion way with the base the sensitivity dependence upon a filler share is close to a quadratic one. The estimated assessments of sensor characteristics under analysis at different ways of fastening coincide at 58% volume content of polymer piezoelectric.

Key words: pressure sensor, aluminum anodic oxide, polymeric piezoelectric, fiber-reinforced composite, electroelasticity.

Введение

При создании сенсорных элементов микроэлектронных и микроэлектромеханических систем активно используются высокоупорядоченные тонкие керамические покрытия с наноразмерными порами, получаемые анодным оксидированием металлов [1; 2]. Перспективным является использование этих покрытий в датчиках давления матричного типа, а также в качестве компонентов умных (интеллектуальных) материалов. С этой целью поры оксида, как керамической основы, импрегнируются полимером, реализующим прямой пьезоэлектрический эффект.

Ранее авторами был предложен способ импрегнирования нанопористого

анодного оксида алюминия (АОА) антифрикционными фторполимерами [3] и разработана методика прогнозирования деформационно-прочностных и триботехнических параметров получаемого полимер-керамического покрытия, как трансверсально-изотропного композита [4]. Вместе с тем функциональные показатели подобных покрытий, характеризующие эффективность их использования в качестве датчиков давления, изучены недостаточно полно.

В связи с вышесказанным, целью настоящего исследования является совершенствование ранее разработанной механико-математической модели импрегниро-

ванного полимером нанопористого АОА и описание прямого пьезоэффекта в поли-

мерном наполнителе.

Упрощенная формулировка задачи электроупругости

Физические уравнения для электроупругого материала без учета намагничиваемости и влияния температуры можно записать в виде [5]

$$\begin{aligned} D_i &= \lambda_{ij} E_j + e_{imn} \varepsilon_{nm}, \\ \sigma_{ij} &= C_{ijnm} \varepsilon_{nm} - e_{\rho ij} E_\rho. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций соответственно; D_i , E_i – компоненты векторов индукции и напряженности электрического поля соответственно; C_{ijnm} , $e_{ij\rho}$, λ_{ij} – компоненты тензоров модулей упругости, пьезоэлектрических постоянных и диэлектрической проницаемости соответственно; индексы $i, j, n, m, \rho = 1, 2, 3$.

При пренебрежении действием магнитного поля и отсутствии некомпенсированных объемных электрических зарядов уравнения Максвелла [6] сводятся к соотношению

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = D_{i,i} = 0. \quad (2)$$

Запятая перед индексом означает производную по соответствующей координате.

Компоненты тензора σ_{ij} должны удовлетворять условию равновесия элементарного объема материала:

$$\sigma_{ij,j} = 0. \quad (3)$$

В системе уравнений (3) не учитываются объемные силы. Компоненты тензора деформаций связаны с компонентами вектора упругих смещений \mathbf{u} [7]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

$$C_{1111} = C_{2222} = 8,6 \text{ ГПа}, C_{3333} = 7,1 \text{ ГПа}, C_{1122} = 5,6 \text{ ГПа}, C_{1133} = C_{2233} = 5,4 \text{ ГПа};$$

$$C_{1313} = C_{2323} = 1 \text{ ГПа}, C_{1212} = (C_{1111} - C_{1122})/2 = 1,5 \text{ ГПа};$$

$$e_{311} = e_{322} = -1,1 \text{ Кл/м}^2, e_{333} = 2,9 \text{ Кл/м}^2, e_{113} = e_{223} = 2,3 \text{ Кл/м}^2;$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{22} = 14,7\lambda_0, \lambda_{33} = 12,4\lambda_0.$$

Здесь $\lambda_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

При использовании для данного материала допущения (6) связь компонент

$$E_1 = -\frac{e_{113}}{\lambda_{11}} \varepsilon_{13}, \quad E_2 = -\frac{e_{223}}{\lambda_{22}} \varepsilon_{23}, \quad E_3 = -\frac{1}{\lambda_{33}} [e_{311} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) + e_{333} \varepsilon_{33}]. \quad (7)$$

Компоненты вектора напряженности электрического поля связаны с электрическим потенциалом ψ [8]:

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \psi \Rightarrow E_i = -\psi_{,i}. \quad (5)$$

Используя соотношения (4) и (5) в физических уравнениях (1) и подставив полученные выражения в (2) и (3), получим систему четырех дифференциальных уравнений в частных производных для четырех функций координат – компонент вектора смещений и электрического потенциала.

Сформулированная связанная задача электроупругости существенно упрощается, если имеется возможность принять решение дифференциального уравнения (2) в виде

$$D_i = 0. \quad (6)$$

Исходя из первых трех уравнений системы (1), выражения для компонент вектора напряженности электрического поля подставим в оставшиеся шесть физических уравнений. Таким образом, допущение (6) позволяет свести задачу электроупругости к задаче теории упругости при измененных значениях модулей упругости с последующим вычислением компонент напряженности электрического поля.

В качестве материала наполнителя нанопористого АОА был взят поливинилиденфторид (ПВДФ), характеристики которого приведены, в частности, в работах [8; 9]. Значения ненулевых компонент тензоров C_{ijnm} , $e_{ij\rho}$, λ_{ij} для рассматриваемого трансверсально-изотропного композита следующие:

вектора напряженности электрического поля с компонентами тензора деформаций имеет вид

Компоненты тензора C_{ijnm0} в задаче теории упругости, к которой при выполнении

$$\begin{aligned} C_{11110} = C_{22220} = C_{1111} + \frac{e_{311}^2}{\lambda_{33}}, \quad C_{11220} = C_{1122} + \frac{e_{311}^2}{\lambda_{33}}, \\ C_{11330} = C_{22330} = C_{1133} + \frac{e_{311}e_{333}}{\lambda_{33}}, \quad C_{33330} = C_{3333} + \frac{e_{333}^2}{\lambda_{33}}, \\ C_{13130} = C_{23230} = C_{1313} + \frac{e_{113}^2}{\lambda_{11}}, \quad C_{12120} = C_{1212} \end{aligned} \quad (8)$$

Напряженно-деформированное состояние пьезоактивного наполнителя

Рассматриваемый пьезоэлектрический пленочный датчик давления может быть представлен в виде двухслойного покрытия, размещенного на условно недеформируемом основании. Применительно к наноструктурированным покрытиям на основе анодных оксидов металлов более

тонкий поверхностный композитный слой толщиной h_1 образован нанопористым АОА, импрегнированным полимером (рис. 1). Метод газовой полимеризации позволяет достичь различной степени заполнения пор в зависимости от длительности данного процесса.

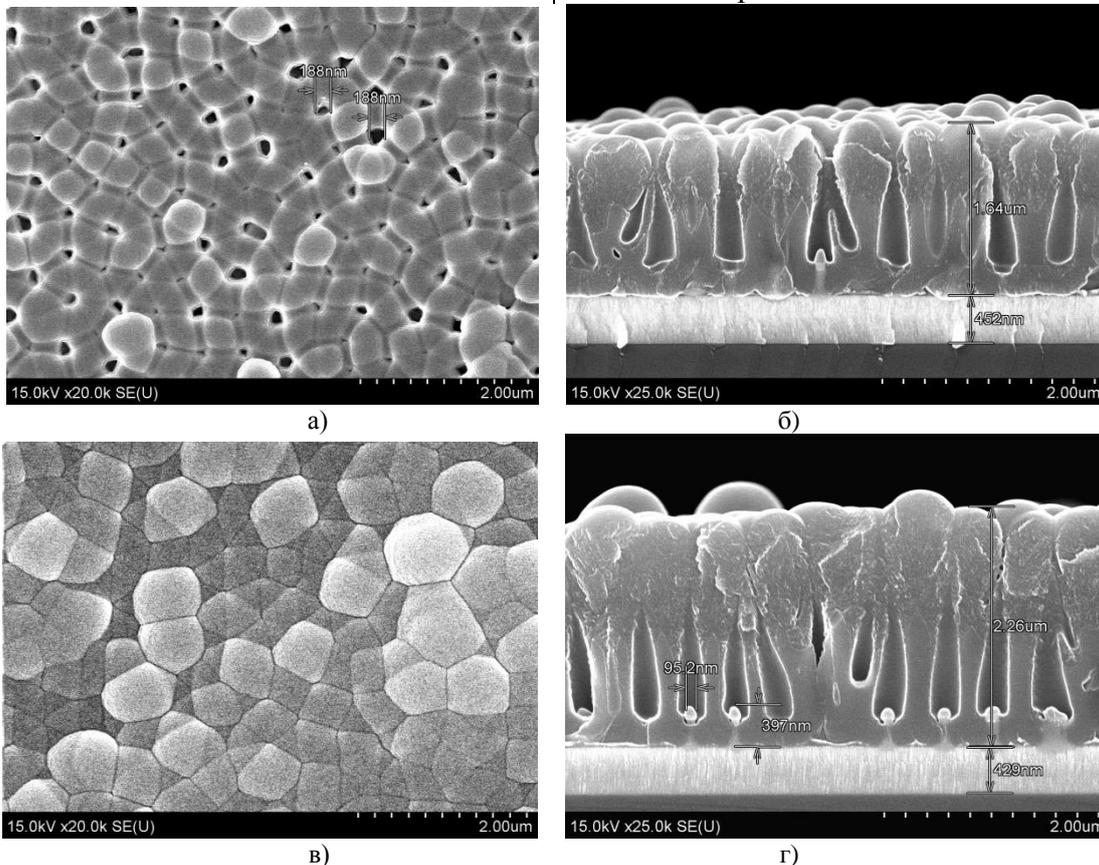


Рис. 1. Структура композитного покрытия на основе анодного оксида алюминия после 1 ч (а, б) и 2 ч (в, г) газовой полимеризации октафторциклобутана [3; 4]

После соответствующей обработки ряд фторполимеров, например ПВДФ, приобретают пьезоэлектрические свойства, что используется в датчиках описанной конструкции.

Материал поверхностного слоя будем рассматривать как одноосно армированный сплошными цилиндрическими волокнами композит. Волокна ориентирова-

ны по нормали к поверхности пластины. Материалом волокон является ПВДФ, материалом матрицы – анодный оксид алюминия. Нижний слой толщиной h_2 представляет собой подложку из алюминия. На верхнюю поверхность покрытия действует равномерно распределенное давление p . Нижний слой покрытия адгезионно связан с недеформируемым основанием. Общая

толщина покрытия много меньше характерного размера горизонтального поперечного сечения. Следовательно, с достаточной точностью можно принять [10], что при заданном режиме нагружения и наложенных граничных условиях покрытие находится в состоянии одноосной деформации, при которой $\varepsilon_{zz} \neq 0$, $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0$.

При анализе деформаций верхнего слоя покрытия будем использовать трехфазную модель волоконно-армированного композита [11; 12]. Основанная на данной модели методика расчетного определения механических характеристик импрегнированного полимером покрытия АОА подробно изложена в [4]. Трехфазная модель в рассматриваемом случае представляет собой составной цилиндр, помещенный в деформируемое пространство (рис. 2), характеристики которого соответствуют эффективным характеристикам композита. Внутренний цилиндр радиусом r_1 образован материалом волокна (ПВДФ), внешний слой с внутренним радиусом r_1 и внешним радиусом r_2 образован материалом матрицы (АОА). Значения радиусов r_1 и r_2 связаны с объемной долей полимерного

наполнителя V_f соотношением $V_f = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$.

Описание напряженно-деформированного состояния модели осуществляется в цилиндрической системе координат z, r, φ . Ось z совпадает с осью составного цилиндра, направлена по нормали к поверхности покрытия и совпадает с осью симметрии электромеханических характеристик

ПВДФ. При действии на поверхность пластины давления p осевая деформация ε_{zz} для различных элементов трехфазной модели (волокна, матрицы и композита) будет одинаковой и совпадающей с макроскопической деформацией ε_{zz1} верхнего (композитного) слоя:

$$\varepsilon_{zz}^f = \varepsilon_{zz}^m = \varepsilon_{zz}^c = \varepsilon_{zz1}.$$

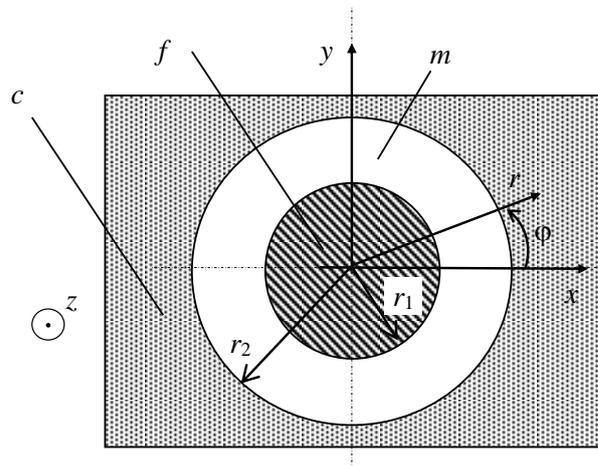


Рис. 2. Трехфазная модель волоконно-армированного композита

Верхние индексы f, m, c означают, что данная величина относится к волокну, матрице или композиту соответственно.

В силу осевой симметрии модели и рассматриваемого режима нагружения компонента u_φ вектора упругих смещений точек модели будет равна нулю. С учетом вышесказанного общее решение уравнений теории упругости в перемещениях для элементов трехфазной модели будет иметь вид [11]

$$u_z^f = u_z^m = u_z^c = \varepsilon_{zz1} z; \quad u_\varphi^f = u_\varphi^m = u_\varphi^c = 0; \quad u_r^i = A^i r + \frac{B^i}{r}. \quad (9)$$

Здесь A^i, B^i ($i = f, m, c$) – не зависящие от координат величины, определяемые из граничных условий.

Требование ограниченности смещений при $r=0$ будет выполняться при $B^f = 0$. Макроскопическая радиальная деформация композитного слоя определяется по формуле

$$\varepsilon_{rr1} = \left. \frac{du_r^c}{dr} \right|_{r \rightarrow \infty} = A^c.$$

Как было сказано выше, покрытие находится в состоянии одноосной дефор-

мации. Следовательно, $\varepsilon_{rr1} = 0$ и $A^c = 0$. Энергетический критерий гомогенизации Эшелби [13] будет выполняться при $B^k = 0$. Оставшиеся три константы определяются из условий неразрывности радиального смещения u_r и радиальной компоненты тензора напряжений на границе раздела волокно – матрица ($r = r_1$), а также условия неразрывности радиального смещения на границе раздела матрица–композит ($r = r_2$). После выполнения математических преобразований получим:

$$\begin{aligned}
 A^f &= \varepsilon_{zz1} a_\varepsilon^f, \quad A^m = \varepsilon_{zz1} a_\varepsilon^m, \quad B^m = r_1^2 \varepsilon_{zz1} b_\varepsilon^m, \\
 a_\varepsilon^m &= \frac{cK_1(C_{1111}^m - C_{1122}^m) - C_{1133}^m}{C_{1111}^m + C_{1122}^m - c(K_2 - 1)(C_{1111}^m - C_{1122}^m)}, \\
 a_\varepsilon^f &= K_1 + K_2 a_\varepsilon^m, \quad b_\varepsilon^m = a_\varepsilon^f - a_\varepsilon^m, \\
 K_1 &= \frac{C_{1133}^m - C_{11330}^f}{C_{11110}^f + C_{11220}^f + C_{1111}^m - C_{1122}^m}, \quad K_2 = K_1 \frac{2C_{1111}^m}{C_{1133}^m - C_{11330}^f}.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Здесь $C_{1111}^m, C_{1122}^m, C_{1133}^m$ – компоненты тензора модулей упругости матричного материала. Не снижая общности дальнейших выкладок, будем рассматривать АОА как изотропный линейно упру-

гий материал, механические свойства которого характеризуются модулем Юнга $E_{АОА} = 140$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu_{АОА} = 0,32$ [4]. Тогда

$$\begin{aligned}
 C_{1111}^m = C_{2222}^m = C_{3333}^m &= \frac{E_{АОА}(1 - \nu_{АОА})}{(1 + \nu_{АОА})(1 - 2\nu_{АОА})}; \\
 C_{1122}^m = C_{1133}^m = C_{2233}^m &= \frac{E_{АОА}\nu_{АОА}}{(1 + \nu_{АОА})(1 - 2\nu_{АОА})}.
 \end{aligned}$$

Нижний индекс ε в (10) означает, что константы a^f, a^m, b^m определены при условии адгезионной связи датчика с основанием. Для сравнения рассмотрим датчик, свободно лежащий на основании. Тогда состояние одноосной деформации пластины сменится одноосным напряженным состоянием. Вместо условия равенства нулю макроскопической радиальной деформации $\varepsilon_{rr1} = 0$ ($A^c = 0$) вводится требование равенства нулю макроскопического радиального напряжения $\sigma_{rr1} = 0$. Как при наличии адгезионной связи покрытия с основанием, так и при ее отсутствии энергетический критерий гомогенизации подра-

зумекает $B^c = 0$. При выполнении данного условия радиальная компонента напряжения σ_{rr}^c в «композитном» элементе трехфазной модели не будет зависеть от координаты r . Следовательно, при одноосном напряженном состоянии покрытия для определения констант A^f, A^m, B^m можно использовать условия неразрывности радиального смещения u_r и радиальной компоненты тензора напряжений на границе раздела волокно – матрица ($r = r_1$), а также условие равенства нулю радиального напряжения в матрице при $r = r_2$ (на границе с композитом). После выполнения математических преобразований получим:

$$\begin{aligned}
 A^f &= \varepsilon_{zz1} a_\sigma^f, \quad A^m = \varepsilon_{zz1} a_\sigma^m, \quad B^m = r_1^2 \varepsilon_{zz1} b_\sigma^m, \\
 a_\sigma^m &= -\frac{V_f K_1}{1 + V_f(K_2 - 1)}, \quad a_\sigma^f = K_1 + K_2 a_\sigma^m, \quad b_\sigma^m = a_\sigma^f - a_\sigma^m.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Промежуточные коэффициенты K_1 и K_2 определены в (10). Нижний индекс σ в (11) означает, что константы a^f, a^m, b^m определены при отсутствии сцепления покрытия с основанием.

Макроскопическая осевая компонента тензора напряжений определяется усреднением компоненты σ_{zz} по площади поперечного сечения составного цилиндра в трехфазной модели:

$$\sigma_{zz1} = \frac{2}{r_2^2} \left(\int_0^{r_1} \sigma_{zz}^f r dr + \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{zz}^m r dr \right).
 \tag{12}$$

Константы a^f, a^m, b^m в (12) определяются либо по формулам (10), либо из соотношений (11) – в зависимости от условий закрепления.

Макроскопическое осевое напряжение связано с приложенным к пластине

внешним давлением: $\sigma_{zz1} = -p$. Используя равенство (12), определим макроскопическую осевую деформацию композитного слоя, равную осевой деформации пьезоактивного полимерного наполнителя:

$$\varepsilon_{zz}^f = \varepsilon_{zz1} = - \frac{p}{c(C_{33330}^f + 2a^f C_{11330}^f) + (1-c)(C_{3333}^m + 2a^m C_{1133}^m)}. \quad (13)$$

Радиальная ε_{rr}^f и окружная $\varepsilon_{\varphi\varphi}^f$ деформации наполнителя совпадают с константой A^f :

$$\varepsilon_{rr}^f = \varepsilon_{\varphi\varphi}^f = A^f = \varepsilon_{zz1} a^f. \quad (14)$$

Зная компоненты тензора деформаций наполнителя, по формулам (7) определим компоненты вектора напряженности электрического поля. В рассматриваемой

упрощенной постановке задачи электроупругости отличной от нуля будет только осевая компонента:

$$E_z = - \frac{1}{\lambda_{33}} [e_{311} (\varepsilon_{rr}^f + \varepsilon_{\varphi\varphi}^f) + e_{333} \varepsilon_{zz1}] = - \frac{\varepsilon_{zz1}}{\lambda_{33}} (2a^f e_{311} + e_{333}). \quad (15)$$

Здесь деформация ε_{zz1} определяется соотношением (13).

Компонента напряженности электрического поля не зависит от координаты. Поэтому разность потенциалов определяется произведением осевой компоненты напряженности на толщину композитного пьезоактивного слоя. Электрический потенциал распределен только по поверхности наполнителя. Для оценки эффективного значения потенциала следует умножить его на отношение площади поверхности наполнителя к общей площади поверхно-

сти тензочувствительного покрытия, равное объемной доле наполнителя. Следовательно, разность потенциалов между поверхностью покрытия и подложкой можно определить следующим образом:

$$U = h_1 V_f E_z.$$

Эффективность датчика будем характеризовать удельной чувствительностью, определяемой как отношение разности потенциалов U к приложенному давлению p и h_1 :

$$Q = \frac{U}{ph_1} = V_f \frac{2a^f e_{311} + e_{3333}}{c(C_{33330}^f + 2a^f C_{11330}^f) + (1-c)(C_{3333}^m + 2a^m C_{1133}^m)}. \quad (16)$$

На рис. 3 представлены расчетные зависимости данной характеристики от объемной доли полимерного наполнителя. Можно отметить, что при отсутствии сцепления датчика с основанием чувствительность Q практически линейно возрастает с ростом V_f вплоть до $V_f \approx 0,8$. При увеличении объемной доли наполнителя до единицы скорость роста чувствительности несколько возрастает. Для датчика, ад-

гезионно связанного с основанием, зависимость $Q(V_f)$ существенно нелинейна и близка к квадратичной. При $V_f < 0,58$ величина Q для датчика, адгезионно связанного с основанием, меньше, чем при отсутствии сцепления. При $V_f > 0,58$ датчик, жестко связанный с основанием, обладает большей чувствительностью, чем датчик, свободно лежащий на основании.

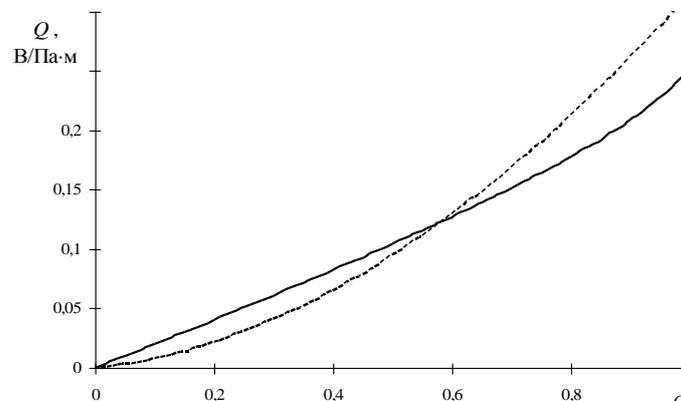


Рис. 3. Зависимость удельной чувствительности датчика от объемной доли полимерного пьезоактивного наполнителя (сплошная кривая – при отсутствии сцепления датчика с основанием; пунктирная – при адгезионной связи с основанием)

Заключение

Разработана методика расчетного определения чувствительности пьезоэлектрического датчика давления, представляющего собой тонкое покрытие из нанопористого анодного оксида алюминия, поры которого заполнены поливинилиденфторидом. Методика основана на трехфазной модели волоконно-армированного композита и упрощенной постановке задачи электроупругости. Установлено, что для рассматриваемого покрытия, свободно ле-

жащего на жестком основании, чувствительность прямо пропорциональна объемной доле полимерного наполнителя. Для адгезионно связанного с основанием покрытия зависимость чувствительности от доли наполнителя близка к квадратичной. Расчетные оценки исследуемой характеристики датчика при различных способах крепления совпадают при 58 % объемного содержания полимерного пьезоэлектрика.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект T18КОРГ-004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nanoporous Alumina: Fabrication, Structure, Properties and Applications / eds.: D. Losic, A. Santos. - Springer, 2015. - XIV. - 362 p.
2. Мухуров, Н.И. Электромеханические микроустройства / Н.И. Мухуров, Г.И. Ефремов. - Минск: Беларуская навука, 2012. - 257 с.
3. Shil'ko, S.V. Estimation of the friction coefficient of a nanostructured composite coating / S.V. Shil'ko, D. Chernous, T.V. Ryabchenko, V.V. Hat'ko // Mechanics of Composite Materials. - 2017. - Vol. 53. - № 5. - P. 579-588.
4. Шилько, С.В. Определение параметров деформирования и трения градиентных композитных покрытий, образованных частичным заполнением нанопор анодного оксида алюминия полимером / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, Т.В. Рябченко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. ОИМ. - Минск, 2017. - Вып. 6. - С. 141-144.
5. Партон, В.З. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел / В.З. Партон, Б.А. Кудрявцев. - М.: Наука, 1988. - 472 с.
6. Савельев, И.В. Основы теоретической физики. В 2 т. Т. 1. Механика и электродинамика / И.В. Савельев. - 2-е изд., испр. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. - 496 с.
7. Старовойтов, Э.И. Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости / Э.И. Старовойтов. - Гомель: БелГУТ, 2001. - 344 с.
8. Хорошун, Л.П. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов / Л.П. Хорошун, Б.П. Маслов, П.В. Лещенко. - Киев: Наук. думка, 1989. - 208 с.
9. Sessler, G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride / G.M. Sessler // J. Acoust. Soc. Amer. - 1981. - V. 70. - № 6. - P. 1596-1608.
10. Можаровский, В.В. Прикладная механика слоистых тел из композитов / В.В. Можаровский, В.Е. Старжинский. - Минск: Наука и техника, 1988. - 271 с.
11. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. - М.: Мир, 1982. - 334 с.
12. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин [и др.]. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. - 311 с.
13. Эшелби, Дж. Континуальная теория дислокаций / Дж. Эшелби. - М.: Иностран. лит., 1963. - 247 с.
1. Nanoporous Alumina: Fabrication, Structure, Properties and Applications / eds.: D. Losic, A. Santos. - Springer, 2015. - XIV. - 362 p.
2. Mukhurov, N.I. Electromechanical Micro-devices / N.I. Mukhurov, G.I. Efremov. - Minsk: belorussian Science, 2012. - pp. 257.
3. Shil'ko, S.V. Estimation of the friction coefficient of a nanostructured composite coating / S.V. Shil'ko, D. Chernous, T.V. Ryabchenko, V.V. Hat'ko // Mechanics of Composite Materials. - 2017. - Vol. 53. - № 5. - P. 579-588.
4. Shilko, S.V. Parameter definition of deformation and friction of gradient composite coatings formed with partial filling of aluminum anodic oxide nanopores by polymer / S.V. Shilko, D.A. Chernous, T.V. Ryabchenko // Actual Problems of Machine Science: OIM Proceedings. - Minsk, 2017. - edition 6. - pp. 141-144.
5. Parton, V.Z. Electromagnetoelasticity of Piezoelectric and Electroconductive Bodies / V.Z. Parton, B.A. Kudryavtsev. - M.: Science, 1988. - pp. 472.
6. Saveliev, I.V. Fundamentals of Theoretical Physics. In 2 Vol., Vol.1. Mechanics and Electrodynamics / I.V. Saveliev. - 2-d Edition revised. - M.: Science: Main editorial board of phys.-math. Lit., 1991. - pp. 496.
7. Starovoitov, E.I. Fundamentals of Theory of Elasticity, Plasticity, Viscous Elasticity / E.I. Starovoitov. - Gomel: BelSUT, 2001. - pp. 344.
8. Khoroshun, L.P. Prediction of Piezoactive Composite Efficient Properties / L.P. Khoroshun, B.P. maslov, P.V. Leshchenko. - Kiev: Scientific Thought, 1989. - pp. 208.

9. Sessler, G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride / G.M. Sessler // J. Acoust. Soc. Amer. – 1981. – V. 70. - № 6. – P. 1596-1608.
10. Mozharovsky, V.V. Applied Mechanics of Laminated Bodies and Their Composites / V.V. Mozharovsky, V.E. Starzhinsky. – Minsk: Science and Engineering, 1988. – pp. 271.
11. Cristensen, R. Introduction into Composite Mechanics / R. Cristensen. – M.: World, 1982. – pp. 334.
12. Dispersed-filled Polymeric Composites of Engineering and Medical Purpose / B.A. Lyukshin [et al.]. – Novosibirsk: Publishing house of SB RAS, 2017. – pp. 311.
13. Eshelby, J. Continuum Theory of Dislocations / J. Eshelby. – M.: Foreign Lit., 1963. – pp. 247.

Статья поступила в редакцию 18.04.19

Рецензент: д.т.н., профессор Белорусского государственного университета транспорта

Тариков Г.П.

Статья принята к публикации 7. 06. 19.

Сведения об авторах:

Шилько Сергей Викторович, к.т.н., доцент, зав. лабораторией «Механика композитов и биополимеров» ИММС НАН Беларуси, e-mail: shilko_mpri@mail.ru.

Shilko Sergey Victorovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Head of the Lab. “Mechanics of Composites and Biopolymers”, IMMS NAS of Belarus, e-mail: shilko_mpri@mail.ru.

Черноус Дмитрий Анатольевич, к.т.н., доцент, вед. науч. сотрудник ИММС НАН Беларуси, тел.: +375(232)34-06-31.

Рябченко Татьяна Владимировна, науч. сотрудник ИММС НАН Беларуси, e-mail: rits@tut.by.

Chernous Dmitry Anatolievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Leading researcher, IMMS NAS of Belarus, phone: +375(232)34-06-31.

Рябченко Татьяна Владимировна, науч. сотрудник ИММС НАН Беларуси, e-mail: rits@tut.by.