

УДК 539.375

© 2003 г. С.М. АФОНИН

## **ДЕФОРМИРОВАНИЕ, РАЗРУШЕНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТАВНОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Исследованы деформация и разрушение, диаграммы сжатия и упругие податливости составных пьезопреобразователей. Определены характерные точки диаграммы сжатия, соответствующие механическому напряжению выбора зазоров и смятия микронеровностей, пределу временного сопротивления на сжатие с образованием микротрещин по краям пьезопластин, пределу временного сопротивления на сжатие, механическому напряжению упругого разрушения. Рассчитаны механические и регулировочные характеристики составного пьезопреобразователя, используемого в качестве пьезодвигателя наноперемещений. Определены статические и динамические характеристики составного пьезопреобразователя.

**1. Постановка задачи.** Применение пьезопреобразователей перспективно в оборудовании нанотехнологии и микроэлектроники [1–3]. Пьезопреобразователь работает на основе обратного пьезоэффекта, в котором перемещение достигается за счет деформации пьезоэлементов при приложении электрического напряжения, и применяется в качестве пьезодвигателя наноперемещений. Увеличение диапазона перемещения достигается за счет использования составного пьезопреобразователя.

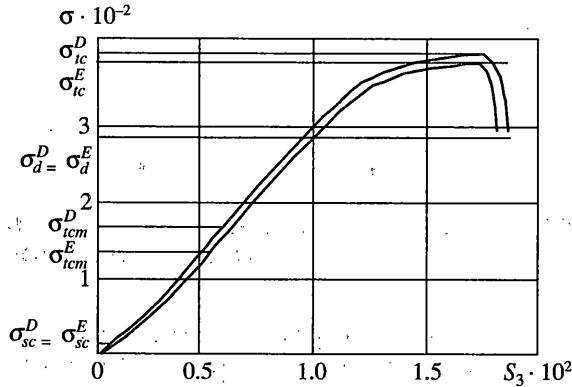
Пьезопреобразователи для приводов наноперемещений имеют диапазон перемещения от нескольких нанометров до десятков микрон, чувствительность менее 1 нм/В, нагрузочную способность до 1000 Н, мощность на выходном валу до 100 Вт и полосу пропускания порядка нескольких десятков Гц. Так как предельные разрушающие механические напряжения на сжатие в пьезокерамике в среднем в 10 раз по величине превышают предельные разрушающие напряжения на растяжение, то из соображений прочности целесообразно осуществлять предварительное поджатие пьезоэлементов с помощью пружины или мембраны. Причем усилие предварительного поджатия должно превышать максимальную растягивающую нагрузку, чем обеспечивается гарантированное рабочее сжатие пьезоэлементов.

Пьезопреобразователь стягивается предварительно деформированным упругим элементом в виде шпильки или мембраны. Удельное усилие сжатия выбирается порядка 5 МПа. При этом усилие выбираются зазоры и зависимость деформации пьезопреобразователя от внешнего усилия принимает линейный характер.

Основным параметром внешней нагрузки пьезопреобразователя является жесткость нагрузки, т.е. отношение величины силы упругой реакции нагрузки к величине деформации нагрузки.

В зависимости от жесткости нагрузки выбираются конструктивные параметры составного пьезопреобразователя. Для практического использования составных пьезопреобразователей необходимо знание их основных характеристик: пьезомодулей, упругих податливостей, пределов временного сопротивления на сжатие.

**2. Диаграммы сжатия составных пьезопреобразователей.** Для пьезокерамических материалов, к которым относится пьезоэлектрическая керамика из цирконата-титаната свинца промышленной марки ЦТС-19, имеем  $\sigma_{ts}/\sigma_{tc} \leq 0.1$ , где  $\sigma_{ts}$  – предел времен-



Фиг. 1

ного сопротивления на растяжение,  $\sigma_{ic}$  – предел временного сопротивления на сжатие. Поэтому из соображений прочности выбираем предварительное поджатие исполнительного составного пьезопреобразователя с силой, превышающей рабочую нагрузку.

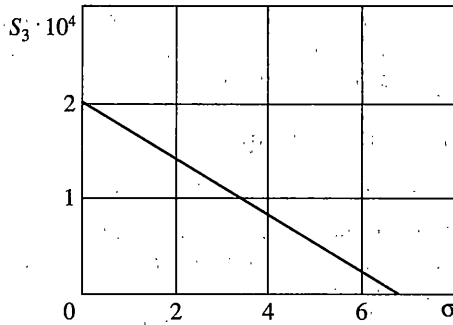
На диаграмме сжатия (фиг. 1) составного пьезопреобразователя можно отметить четыре характерные точки с координатами:  $\sigma_{sc}$  – механическое напряжение выбора зазоров и смятия микронеровностей,  $\sigma_{icm}$  – предел временного сопротивления на сжатие с образованием микротрещин по краям пьезопластин,  $\sigma_{ic}$  – предел временного сопротивления на сжатие,  $\sigma_d$  – механическое напряжение хрупкого разрушения, причем  $\sigma_{sc} < \sigma_{icm} < \sigma_{ic}$ . Числовые значения по координатным осям приведенной диаграммы сжатия  $\sigma$  [МПа] соответствуют для пьезопреобразователя из пьезокерамики ЦТС-19, в котором обкладки пьезопластин диаметром  $D = 15$  мм, толщиной  $\delta = 0.6$  мм при спекании пьезопреобразователя соединены электрически параллельно.

На диаграмме сжатия (фиг. 1) наблюдаются два режима: при постоянной индукции и при постоянной напряженности электрического поля в пьезодвигателе. Индекс  $D$  соответствует измерениям при постоянной индукции при управлении от источника тока или при измерениях с разомкнутыми электродами составного пьезодвигателя. Индекс  $E$  соответствует измерениям при постоянной напряженности электрического поля в пьезодвигателе или измерениях с замкнутыми электродами. Упругие податливости  $s_{33}^E > s_{33}^D$ , причем  $s_{33}^E/s_{33}^D \approx 1.2$ , и пределы временного сопротивления  $\sigma_{icm}^D > \sigma_{icm}^E$ , причем  $\sigma_{icm}^D/\sigma_{icm}^E \approx 1.2$ .

Исследовались следующие образцы ( $N$ ) составных пьезопреобразователей из пьезокерамики на основе цирконата-титаната свинца промышленной марки ЦТС-19, соответствующие различным конструктивным исполнениям: ( $N = 1$ ) пьезопреобразователь, спеченный из пьезопластин диаметром  $D = 15$  мм и толщиной  $\delta = 0.6$  мм; ( $N = 2$ ) пьезопреобразователь, склеенный эпоксидной смолой, из пьезопакетов ПП-6; ( $N = 3$ ) пьезопреобразователь, составленный из пьезопакетов П-3; ( $N = 4$ ) пьезопреобразователь, составленный из пьезопластин диаметром  $D = 20$  мм и толщиной  $\delta = 0.6$  мм.

Измерения производились на прессе марки УММ-5 в диапазоне рабочих нагрузок при механических напряжениях в пьезопреобразователе от 5 МПа до 100 МПа. Результаты измерений приведены ниже

$N$	1	2	3	4
$s_{33}^D \cdot 10^{11}$ [м <sup>2</sup> /Н]	2.7	3.5	7.3	23
$s_{33}^E \cdot 10^{11}$ [м <sup>2</sup> /Н]	3	3.8	7.5	24



Фиг. 2

Из условия прочности механическое напряжение  $\sigma$  в пьезопреобразователе не должно превышать допустимого напряжения  $[\sigma] = \sigma_{\text{тсм}}/k_s$ , где  $k_s$  – коэффициент запаса, причем  $5 < k_s < 10$ , для предотвращения растрескивания пьезопластин по краям и потери работоспособности пьезопреобразователя вследствие последующих электрического пробоя или механического разрушения по образовавшимся трещинам при рабочих нагрузках.

**3. Механические и регулировочные характеристики составного пьезопреобразователя.** В классическом электроприводе статические характеристики электродвигателям в установившихся режимах работы делятся на механические  $\omega(M)$  и регулировочные  $\omega(U)$ , где  $\omega$  – угловая скорость вращения вала,  $M$  – момент нагрузки,  $U$  – управляющее напряжение.

Аналогично для пьезопреобразователей, используемых в качестве пьезодвигателей наноперемещений, статические характеристики вида  $S_3(\sigma)$  или  $\Delta l(F)$  будем называть механическими характеристиками (фиг. 2), где  $S_3$  – относительная деформация по оси 3,  $\sigma$  [МПа] – механическое напряжение,  $\Delta l$  – относительное перемещение,  $F$  – внешняя сила, а вида  $S_3(E_3)$  или  $\Delta l(U)$  регулировочными характеристиками пьезопреобразователя, где  $E_3 = U/\delta$  – напряженность электрического поля по оси 3,  $\delta$  – толщина пьезопластины.

Статическую механическую характеристику  $S_3(\sigma)$  пьезопреобразователя для образца из пьезокерамики ЦТС-19, спеченного из пьезопластин  $D = 15$  мм,  $\delta = 0.6$  мм,  $d_{33} = 0.4$  нм/В,  $s_{33}^E = 3 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н при  $E_3 = 500$  КВ/м (фиг. 2) с управлением по напряжению получаем

из уравнения обратного пьезоэффекта [4]  $S_3 = d_{33}E_3 + s_{33}^E T_3$ , где  $d_{33}$  – пьезомодуль при продольном пьезоэффекте, когда деформация по оси 3 совпадает с напряженностью  $E_3$  электрического поля по оси 3,  $T_3 = \sigma = F/S_0$  – механическое напряжение по оси 3,  $S_0$  – поперечное сечение пьезопластины.

Следовательно, получаем уравнение статической механической характеристики пьезодвигателя при управлении по напряжению  $\Delta l = d_{33}nU + s_{33}^E Fl/S_0$ ,  $l = n\delta$ , где  $l$  – длина составного пьезопреобразователя,  $n$  – число пьезопластин в составном пьезопреобразователе.

Из полученного уравнения механической характеристики пьезопреобразователя следует, что наряду с пьезомодулем одной из важнейших физических характеристик пьезопреобразователя является упругая податливость. Для увеличения жесткости механической характеристики пьезопреобразователя необходимо выбирать его конструктивное исполнение с минимальной упругой податливостью составного пьезопреобразователя.

**4. Расчет статических и динамических характеристик составного пьезопреобразователя.** Основным параметром внешней нагрузки пьезопреобразователя является жесткость нагрузки. В зависимости от жесткости нагрузки выбираются конструктивные параметры пьезопреобразователя.

Следовательно при управлении по напряжению

$$\xi = d_{33}nU - F/C_c, \quad C_c = S_0/(s_{33}^E l), \quad F = F_0 + C_a \xi + C_e \xi + C_e \xi, \quad F_0 = \sigma_a S_0$$

где  $C_c$  – жесткость составного пьезопреобразователя с управлением по напряжению при продольном пьезоэффекте;  $F$  – внешняя сила;  $F_0$  – сила первоначального поджатия упругим элементом;  $\sigma_a$  – механическое напряжение первоначального армирования в пьезопреобразователе;  $C_a$  – жесткость армирующего элемента;  $C_e$  – жесткость нагрузки.

Откуда получаем выражение для перемещения армированного пьезопреобразователя

$$\xi = \frac{d_{33}U - \sigma_a l s_{33}^E}{1 + (C_a + C_e)/C_c} = \frac{l(d_{33}E_3 - \sigma_a s_{33}^E)}{1 + (C_a + C_e)/C_c}$$

Так как механическое напряжение первоначального армирования для каждого образца пьезопреобразователя имеет определенную постоянную величину, то перемещение пьезопреобразователя в зависимости от первоначального армирования получает постоянное смещение, не зависящее от подаваемого на двигатель электрического напряжения.

Следовательно, амплитуда перемещения армированного пьезопреобразователя под внешней нагрузкой записывается в виде

$$\Delta l = \frac{\Delta l_m}{1 + (C_a + C_e)/C_c}, \quad \Delta l_m = d_{33}nU_m$$

где  $\Delta l_m$  – амплитуда перемещения составного пьезопреобразователя до армирования;  $U_m$  – амплитуда напряжения на электродах пьезопреобразователя.

Динамические характеристики пьезопреобразователя рассчитываются на основе совместного решения волнового уравнения, уравнения продольного пьезоэффекта при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях.

При расчете пьезопреобразователей используется волновое уравнение [3, 4], описывающее распространение волны в длинной линии с затуханием без искажений

$$\frac{1}{(c^E)^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{c^E} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \alpha^2 \xi = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

где  $\xi(x, t)$  – смещение сечения пьезопреобразователя;  $x$  – координата;  $t$  – время;  $c^E$  – скорость звука при  $E = \text{const}$ ;  $\alpha$  – коэффициент затухания.

При одном закрепленном торце пьезопреобразователя, например, при  $x = 0$  получаем  $\xi(x, t) = 0$  и при упруго-инерционной нагрузке на пьезопреобразователь при  $x = l$  имеем уравнение сил, действующих на другом торце пьезопреобразователя, в виде

$$T_3 S_0 = -M \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - (C_a + C_e) \xi$$

где  $M$  – перемещаемая масса.

Используя преобразование Лапласа

$$\Xi(x, p) = L\{\xi(x, t)\} = \int_0^{\infty} \xi(x, t) e^{-pt} dt$$

получим передаточную функцию  $W(p)$  пьезопреобразователя при упруго-инерционной нагрузке

$$W(p) = \frac{\Xi(l, p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{Mp^2/C_c + \text{cth}[l(p/c^E + \alpha)]l(p/c^E + \alpha) + (C_a + C_e)/C_c}$$

где  $\Xi(l, p)$  – преобразование Лапласа перемещения торца составного пьезопреобразователя по оси 3;  $U(p)$  – преобразование Лапласа напряжения на обкладках составного пьезопреобразователя при нулевых начальных условиях.

Откуда получаем выражение для статического перемещения  $\xi(l, \infty) = \Delta l$  армированного составного пьезопреобразователя в установившемся режиме при подаче напряжения  $U(t) = U_0 1(t)$  в случае упруго-инерционной нагрузки

$$\begin{aligned} \xi(l, \infty) &= \lim_{t \rightarrow \infty} \xi(l, t) = \lim_{p \rightarrow 0} pW(p) \frac{U_0}{p} = \\ &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{d_{33}nU_0}{0l(p/c^E + \alpha)/\text{th}[l(p/c^E + \alpha)] + (C_a + C_e)/C_c} = \frac{d_{33}nU_0}{1 + (C_a + C_e)/C_c} \end{aligned}$$

Тогда передаточная функция  $W(p)$  пьезопреобразователя на рабочих частотах при упруго-инерционной нагрузке, имеющей фильтрующие свойства в диапазоне рабочих частот  $0 < \omega < 0.01 c^E/l$ , записывается в виде

$$W(p) = \frac{\Xi(l, p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{[1 + (C_a + C_e)/C_c](T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)}$$

$$T_{33} = \sqrt{\frac{M}{C_a + C_e + C_c}}, \quad \xi_{33} = \frac{\alpha l^2 C_c}{3c^E \sqrt{M(C_a + C_e + C_c)}}$$

где  $T_{33}$  – постоянная времени колебательного звена при продольном пьезоэффекте и упруго-инерционной нагрузке;  $\xi_{33}$  – коэффициент затухания колебательного звена при продольном пьезоэффекте и упруго-инерционной нагрузке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин С.М. Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений // Приборы и системы управления. 1998. № 2. С. 41–42.
2. Афонин С.М. Расчет статических и динамических характеристик пьезодвигателя наноперемещений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2000. № 7. С. 56–57.
3. Афонин С.М. Параметрическая структурная схема пьезопреобразователя // МТТ. Изв. АН. 2002. № 6. С. 101–107.
4. Физическая акустика. Т. 1. Ч. А. Методы приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.

Москва

Поступила в редакцию  
25.06.2002