

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ В РАБОЧЕМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.

Пьезоэлектрические датчики акустических давлений находят широкое применение в научных исследованиях, испытаниях промышленной продукции, в системах контроля и диагностики. Эти датчики незаменимы для измерения акустических нагрузок при наземных и летных испытаниях самолетов, проверке радиоэлектронной аппаратуры на акустическую устойчивость, исследовании аэродинамических характеристик изделий ракетно-космической техники [1-3].

Поскольку датчики акустических давлений предназначены для измерения малых уровней давлений, то, казалось бы, вопросы механической надежности для них не актуальны. Однако, акустические датчики работают в определенном диапазоне температуры. Поэтому интересно оценить их механическую надежность в рабочих условиях, с учетом того, что чувствительный элемент (ЧЭ) датчика неизбежно содержит детали из различных материалов: ПЭ выполнен из пьезоэлектрической керамики, мембрана, корпус – из стали и т.д.

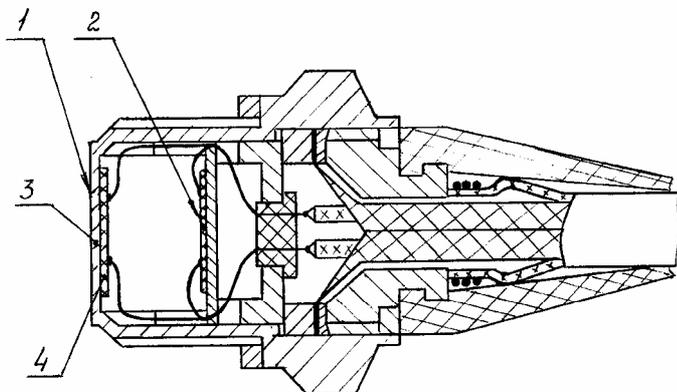
В качестве примера рассмотрим датчик, который должен удовлетворять следующим техническим требованиям: диапазон измерения акустических давлений от 125 до 185 дБ в полосе частот от 3 до 4000 Гц; КП - не менее 40 мкВ/Па при емкостной нагрузке 4700 пФ, основная погрешность - в пределах ± 1 дБ. Датчик должен работать в диапазоне температур от минус 70 до +200°C при действии избыточного медленноменяющегося давления до 0,2 МПа. Изменения КП от давления и температуры не более $\pm 30\%$. Вероятность безотказной работы не ниже 0,95.

Базовая конструкция датчика показана на рис. 1 [1]. Датчик содержит два ЧЭ - рабочий и виброкомпенсирующий. Принцип действия ЧЭ основан на деформации изгиба. ЧЭ содержит мембрану, выполненную за одно целое с корпусом, на которой с помощью клея закреплен ПЭ. Мембрана и корпус изготовлены из одного материала. ПЭ выполнен из керамики ЦТС-83Г по специально разработанной технологии шликерного литья пленки [4]

На первом этапе проектирования, исходя из заданных величин КП, частотного диапазона и габаритов (присоединительный размер M12x1), с использованием методики [5], были выбраны следующие размеры деталей ЧЭ: мембрана - $\varnothing 9,0 \times 0,15$ мм, ПЭ - $\varnothing 6,0 \times 0,05$ мм. В дальнейшем необходимо было решить вопрос обеспечения необходимой надежности и метрологических характеристик датчика при воздействии заданных уровней влияющих факторов.

Оценки показали, что при действии предельных статических и акустических давлений в ПЭ и других деталях датчика появляются механические напряжения, не превышающие 1,5 МПа, причем доля динамических напряжений - не более 0,2 МПа. Эти величины весьма малы по сравнению с пределами прочности материалов и не

могут привести к разрушению конструктивных элементов. Основным фактором, влияющим на механическую надежность, являются температурные напряжения, обусловленные различием коэффициентов теплового (КЛТР) расширения материалов мембраны и ПЭ и отличием рабочей температуры от температуры соединения этих деталей T_c – в нашем случае температуры полимеризации клея.



1. Рабочий ЧЭ. 2. Виброкомпенсирующий ЧЭ. 3. Мембрана. 4. Пьезоэлемент.
Рис. 1. Конструкция датчика акустических давлений

В связи с этим структурно функциональную схему надежности датчика можно представить в виде двух последовательно соединенных звеньев, одно из которых отражает вероятность не разрушения рабочего, другое - виброкомпенсирующего ЧЭ, Следовательно, надежность каждого ЧЭ должна, быть не ниже $\sqrt{0,95}=0,98$.

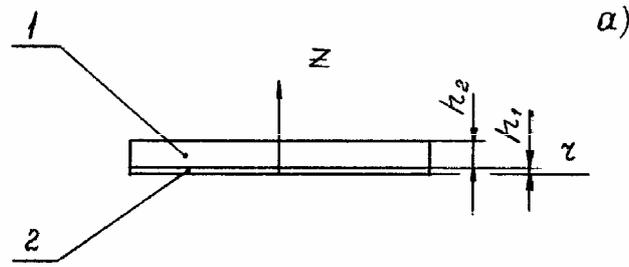
ЧЭ содержит мембрану, ПЭ и клеевой шов.

Очевидно, что в ЧЭ с колебаниями изгиба для реализации самого принципа преобразования клеевая прослойка должна быть жесткой. Клей должен обеспечивать непрерывность смещений и механических напряжений между мембраной и ПЭ. Причем для обеспечения высоких метрологических характеристик датчика это требование должно выполняться во всем заданном диапазоне давлений, частот, температур

Установив требования к клеевому шву, учтём, что его толщина не превышает 0,01 мм, что значительно меньше толщины ПЭ и мембраны. Поэтому влиянием жесткой тонкой клеевой прослойки на напряженное состояние ЧЭ можно пренебречь. В дальнейшем мы, так же как и авторы работы [5], будем рассматривать модель ЧЭ в виде двухслойной композиции, включающей ПЭ и мембрану, рис. 2 а.

С целью выбора материала мембраны проведены расчеты температурных напряжений в деталях ЧЭ при выполнении ее из сплавов 36НХТЮ, 44НХТЮ и 29НК. Расчеты выполнялись по формулам, приведенным в работе [6] с использованием значений упругих модулей и КЛТР материалов из работ [7,8].

Так как для соединения ПЭ с мембраной предполагалось использовать клей ВК-20, рекомендуемая температура полимеризации которого равна 170°C, в расчетах учтено, что $T_c = 170^\circ\text{C}$. Распределение термоупругих напряжений в деталях ЧЭ при увеличении температуры на 1 °С относительно T_c приведено на рис.2 б.



1. Мембрана. 2. Пьезоэлемент.

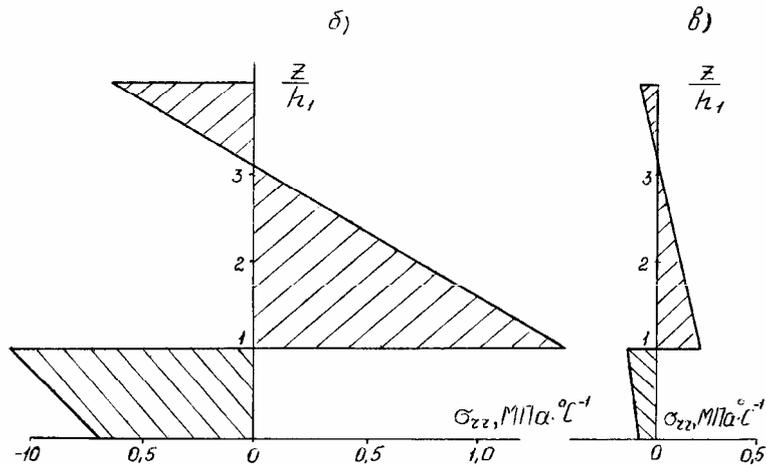


Рис. 2. Модель чувствительного элемента /а/ и распределение механических напряжений в его деталях при изменении температуры. Материалы деталей: б/ ЦТС-83Г - 36НХТЮ, в/ ЦТС-83Г - 29НК

В связи с тем, что осевая компонента механических напряжений в данной конструкции отсутствует, то эквивалентные напряжения совпадают по величине с планарными. При расчетах коэффициентов запаса η и гауссовских уровней надежности γ использовались значения пределов механической прочности керамики ЦТС-83Г, приведенные в [8]. Коэффициент вариации несущей способности ПЭ с учетом вариации прочности и КЛТР материалов был в пределах 0,26-0,29.

Вероятности не разрушения элементов конструкции рассчитывалась через интеграл вероятности Лапласа по методикам изложенным в работах [1,8]:

$$Y = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\gamma_k}^0 \exp\left(-\frac{t_k^2}{2}\right) dt_k \quad (1)$$

$$t_k = \frac{M_k - \bar{M}_k}{\delta M_k}, \quad \gamma_k = \frac{\bar{M}_k}{\delta M_k} \quad (2)$$

$$(\delta M_k)^2 = (\delta \sigma)^2 + (\delta \sigma_{Tk})^2 \quad (3)$$

где γ_k - гауссовский уровень надежности; $\bar{M}_k, M_k, \delta M_k$ - соответственно разность

между математическими ожиданиями, фактическая разность и суммарная дисперсия действующих механических напряжений и пределов прочности (текучести) материалов.

Коэффициент запаса в каждом элементе определялся по формуле:

$$\hat{e}_e = \frac{1}{1 - \gamma_e \mathfrak{G}_{Re}} \quad (4)$$

\mathfrak{G}_{Re} – коэффициент вариации - величина, зависящая от уровня применяемой технологии, обычно для металлов принимается равной 0,15 [1], для пьезокерамических материалов - 0,26 [8].

Результаты расчета вероятности не разрушения ПЭ Y_2 при изготовлении мембраны из различных материалов на верхней и нижней границе рабочего диапазона температуры приведены в таблице. Аналогичные оценки для мембраны показали, что во всех рассматриваемых вариантах вероятность ее разрушения не превышает 10^{-6} и ее нет смысла учитывать.

Из таблицы следует, что конструкция ЧЭ с мембраной из сплава 36НХТЮ неработоспособна. Вероятность не разрушения ПЭ меньше 0,5. ЧЭ с мембраной из сплава 44НХТЮ по надежности близок к предъявляемым требованиям. Наиболее перспективными для применения являются ЧЭ с мембраной из сплава 29НК.

Таблица

Материал мембраны	L_T^{\max} , МПа·°C ⁻¹	При 200°С			При минус 70°С			$Y_{2 \min}$
		η	γ	Y_2	η	γ	Y_2	
36НХТЮ	1,04	0,89	- 0,44	0,33	1,25	0,76	0,85	0,33
44НХТЮ	0,424	1,97	1,89	0,972	2,57	2,35	0,99	0,97
29НК	0,070	4,02	2,89	0,998	4,39	2,97	0,999	0,998

Примечание. L_T^{\max} - коэффициент пропорциональности между механическими напряжениями и разностью температур.

Следует отметить, что при выполнении мембраны из любого из перечисленных сплавов чувствительность и быстродействие датчика примерно равны, т.к. модули Юнга и плотности этих материалов отличаются незначительно.

При макетировании датчиков экспериментально исследованы различные варианты ЧЭ. В процессе работы варьировались материал мембраны и состав клея. С целью повышения термостойкости и жесткости в клей ВК-20 вводился наполнитель из двуокиси титана. Температура полимеризации клея составляла 170-200°С.

В процессе испытаний датчиков получены следующие результаты:

1. Датчики с мембраной из сплава 36НХТЮ и пластичной клеевой прослойкой (ВК-20 без наполнителя) имели КП от температуры 40..50 %, рис. 3. Причем со временем температурные уходы КП увеличивались. Отметим, что такие дефекты характерны и для датчиков аналогичного типа, описанных в литературе [5].

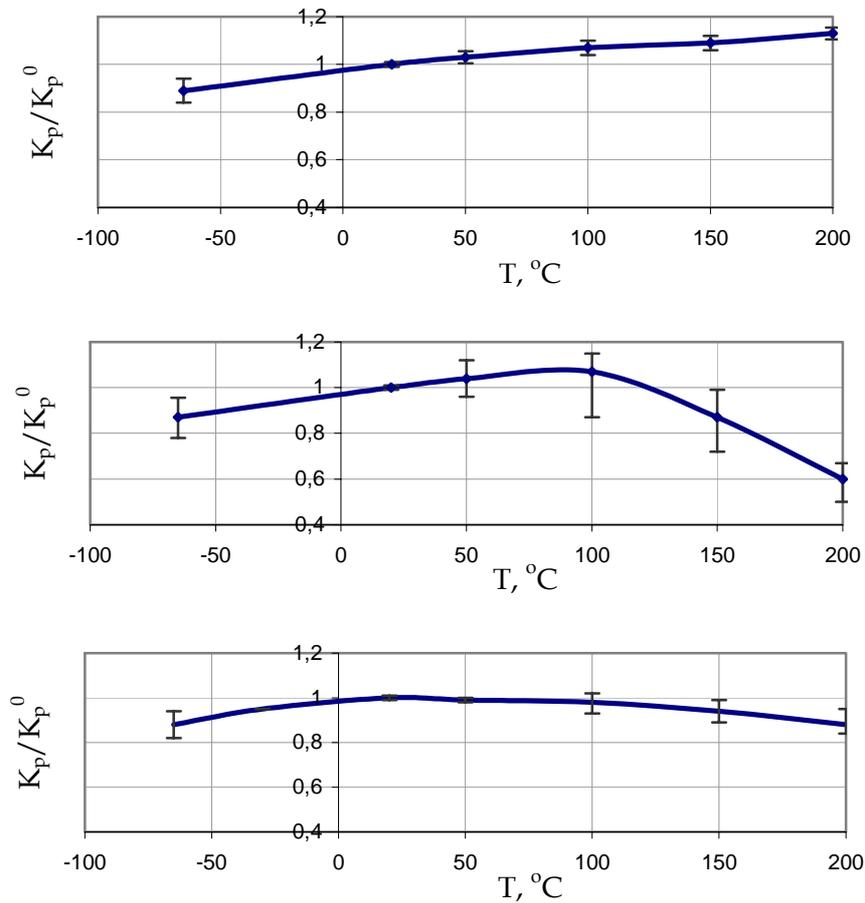


Рис. 3. Относительные изменения пьезоэлектрической чувствительности от температуры ПЭ (а) и макетов датчиков акустических давлений с мембраной из сплава 36НХТЮ (б) и 29НК (в).

2. Два датчика из пяти с мембраной из сплава 36НХТЮ и жесткой клеевой прослойкой (ВК-20 с наполнителем) полностью вышли из строя после первого температурного цикла от 20 до 200°C. КП необратимо снизился до нуля. Как показало вскрытие, причиной отказа были механические повреждения ПЭ (откалывание части ПЭ, отслоение его от мембраны).

3. Датчики с мембраной из 29НК имели уходы КП во всем рабочем диапазоне температур в пределах $\pm 15\%$. В процессе испытаний на надежность, выполненных по биномальной схеме [10], 5 датчиков отработали без отказов по 10 температурных циклов до 200°C что соответствует при достоверности 0,8 вероятности безотказной работы не ниже 0,96.

Таким образом, макетирование и испытания полностью подтвердили результаты анализа.

Целенаправленный выбор материала мембраны позволил не только обеспечить необходимую надежность при циклическом изменении температуры, но и более чем втрое снизить температурную погрешность и увеличить ресурс работы датчиков акустических давлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под общ. ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение. 1979. -480 с.

2. Михайлов П.Г., Бутов В.И., Политменцева Т.Н., Гориш А.В. Пьезодатчики быстропеременных, импульсных и акустических давлений. – Радиотехника, 1995, № 10, с36 –37.
2. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трех томах. Т.1 (кн. 2) / Под общ. ред. Ю.Н. Коптева; Под ред. Е.Е. Багдатьяна, А.В.Гориша, Я.В.Малкова. – М.: ИПРЖР, 1998. – 512 с.
4. Вусевкер Ю.А., Кудинов А.П., Богуш М.В., Шевченко Л.А. Исследование электрофизических свойств пьезоэлементов в виде тонких пленок. – В сб.: Керамические конденсаторные сегнето- и пьезоэлектрические материалы: Тезисы докладов Всесоюзного научного семинара, Рига, 1986, с.74.
5. Домаркас В., Петраускас А. Колебания ассиметричных биморфных излучателей. – Ультразвук: Научн. труды вузов Литовской ССР, 1976, вып. 8, с. 57-63.
6. Богуш М.В., Артемов Ю.А., Гориш А.В., Старостин В.Н. Температурные напряжения в пьезоэлектрических датчиках.- Зарубежная радиоэлектроника, 1996, №9, с.72-74.
7. Физические величины: Справочник/ А.П.Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. -1232 с.
8. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. Т. 3. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Издательство СКНЦ ВШ, 2006, 346 с: ил.
9. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романников Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента.- М.: Атомиздат, 1978. – 291с.

Богуш Михаил Валерьевич – канд. техн. наук, зам. директора НКТБ «Пьезоприбор» Южного Федерального Университета г. Ростов-на-Дону.

Тел. (863) 299-50-80, факс 290-58-22, E-mail: piezo@inbox.ru.