

УДК 537.226.86

В. М. Цаплев, Р. С. Коновалов, В. Е. Земскова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Изменение свойств пьезоэлектрических элементов под действием статических нагрузок

Представлены результаты экспериментального исследования пьезоэлектрических свойств керамических элементов из ЦТС-19 в виде пластин с толщинами 1, 5, 10 и 15 мм под действием статической нагрузки. Все измерения проведены на лабораторной установке, обеспечивавшей усилия сжатия до 20 МПа. Проведена оценка возникающего при нагружении пьезоэлементов электрического заряда. Показано, что для ЦТС-19 нижняя граница усилия сжатия составляет 2 МПа. Обнаружены особенности в зависимостях $Q(\sigma)$, связанные с изменением площади контакта пьезоэлемента в процессе измерения и переориентационными эффектами.

Пьезокерамика, квазистатический метод, усилия сжатия, пьезомодуль, цикл нагружения

При использовании пьезоэлектрических приборов для систем неразрушающего контроля, виброметрии, пьезоэлектрических источников питания и т. п., пьезокерамический элемент подвергается механической нагрузке, поэтому возникает необходимость точного определения пьезомодулей в статическом и квазистатическом режимах [1]. При этом константы пьезоэлектрических материалов для расчетов часто используют без учета условий механических напряжений, что в свою очередь может привести к созданию неправильных конструкций приводов и датчиков [2]. Между тем именно данные о нелинейности неупругих параметров необходимы для реализации всех возможностей пьезокерамических материалов при разработке пьезопреобразователей, работающих в условиях статических, динамических и ударных нагрузок. Нелинейные свойства дают также возможность построения целого нового класса пьезопреобразователей – параметрических преобразователей, работающих на нелинейном эффекте, поэтому важно определить свойства этих материалов в зависимости от приложенного напряжения. Стоит отметить, что напряженность электрического поля связана с уровнем заряда на обкладках пьезоэлемента, поэтому степень поляризации можно оценить по отношению пьезозаряда и механического усилия, значения которых напрямую связаны с временем воздействия на пьезоэлемент и измерения возникающего при этом пьезозаряда [2].

Анализ методов измерения пьезосвойств в [1] показал, что их можно разделить на две группы – полностью и частично исключаящие влияние доменных переориентаций. Наиболее точно первую группу представляет метод расчета пьезомодуля по значениям межплоскостных расстояний семейства кристаллографических плоскостей, которые оцениваются по смещению соответствующего дифракционного максимума под действием электрического поля [3]. Во вторую группу включены статические, квазистатические и динамические методы [4].

Из изложенного следует, что квазистатические методы позволяют определять статические пьезоконстанты, а значит, и различные свойства пьезокерамики, с наименьшими по сравнению с другими методами погрешностями, причем основная часть их возникает из-за трудностей учета утечек пьезозаряда, возникающего на электродах испытуемого образца при действии на него измерительного усилия. Так, в [5]–[9] зависимости диэлектрических и пьезоэлектрических свойств от механической нагрузки были исследованы для таких материалов, как BaTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$, $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$, PbTiO_3 и их композиций. Тем не менее, в литературе слабо отражены данные, касающиеся результатов систематического исследования влияния прикладываемого напряжения сжатия на пьезоэлектриче-

ские свойства керамики, поэтому в данной статье приведены результаты экспериментального исследования пьезоэлектрических свойств керамики типа ЦТС-19 в зависимости от условий механического сжатия.

Описание лабораторной установки. Для исследования свойств пьезоэлементов был использован лабораторный макет, схема которого представлена на рис. 1. Механическое напряжение в ней создавалось прессом 1. Система пятка (2) – подпятник (3) обеспечивала равномерность прикладываемой к пьезоэлементу (4) нагрузки за счет шарнирного соединения. Значения прикладываемого механического усилия сжатия измерялись с помощью динамометра (ДАЦ-С-200-1, ООО «Мегавес»), тензодатчик (5) которого изображен на рис. 1. Фиксация вырабатываемого пьезоэлементом из ЦТС-19 электрического заряда осуществлялась с помощью электрометра (6) (Keithley 6514E) через накладные электродконтакты из фольгированного стеклотекстолита (7).

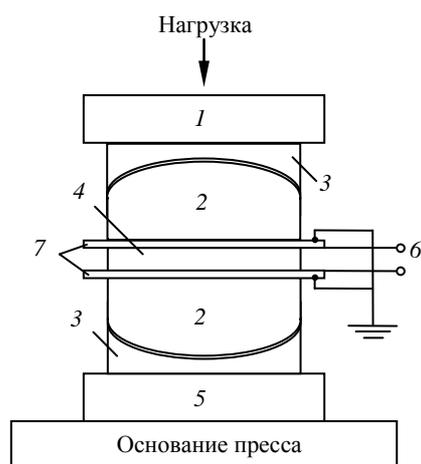


Рис. 1

Измерительная установка, представленная на рис. 1, экранировалась. Для этого использован стакан с минеральным маслом, в котором при измерениях находилась часть элементов системы, а именно – 2–4 и 7.

Экспериментальные результаты. В процессе измерений на образцах из пьезокерамики измерялась зависимость вырабатываемого заряда Q в квазистатическом режиме при изменяемом усилии сжатия σ в диапазоне от 0 до 20 МПа. Все измерения проводились в установившемся режиме для устранения эффектов, связанных с ползучестью пьезокерамики, что и обусловило квазистатичность режимов нагружения и измерения. Относи-

тельная погрешность величины Q не превышала 4.5 %, что было подтверждено дополнительной калибровкой с помощью эталонных мер. Снижение утечек пьезозаряда при этом обеспечивалось благодаря тому, что измерительный усилитель установки, входящий в состав электрометра 6, собран по схеме токового усилителя с малым входным сопротивлением (порядка 10 кОм) без использования буферной (накопительной) емкости. В такой схеме измерения характерное время стока пьезозарядов, образовавшихся в результате механического воздействия с частотой 50 Гц составляет единицы микросекунд, а это обеспечивает точное измерение среднего значения пьезотока на входе усилителя. Исследования были проведены на группе образцов из ЦТС-19 диаметром 36 мм и толщинами $h = 1, 5, 10$ и 15 мм при температуре воздуха 20 °С. Примеры зависимостей изменения заряда Q от механического напряжения σ для толщин пьезоэлементов 1 и 5 мм приведены на рис. 2 и 3.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показал, что зависимости $Q(\sigma)$ имеют максимум при напряжениях порядка 4...6 МПа. Эта особенность может быть связана с малой толщиной пластины. Из рис. 2 видно, что при малых напряжениях происходит нарастание заряда и увеличение продольного пьезоэффекта, при достижении максимума доменные структуры перестраиваются и пьезоэффект меняется на поперечный. В связи с этим на графиках зависимостей $Q(\sigma)$ на участке 0...2 МПа наблюдается интенсивный рост значений Q . При напряжениях около 4 МПа процесс смены доменных структур в основном завершается. Дальнейшее увеличение сжимающих напряжений приводит к уменьшению заряда Q . Такое поведение пьезокерамики можно объяснить тем, что при этих напряжениях уже начинается процесс потери устойчивости доменной структуры, полярные оси наиболее легкоподвижных доменов ориентируются к плоскости, перпендикулярной оси сжатия. Подобная интерпретация снижения величины Q с ростом механических напряжений подтверждена в работе [3], где показано, что уже при небольших уровнях напряжения в структуре керамики возникают легкоподвижные 90-градусные клинья, способствующие релаксации локальных механических напряжений и наблюдается снижение величины Q . Легкоподвижность 90-градусных клиньев при воздействии неболь-

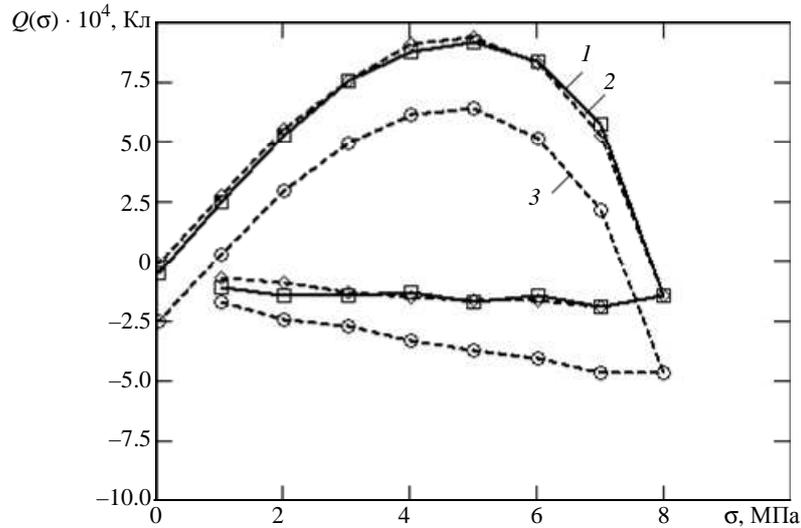


Рис. 2. Зависимости заряда от напряжения сжатия пьезопластины из ЦТС-19 толщиной 1 мм при 1-м (1), 2-м (2) и 3-м (3) циклах нагружения

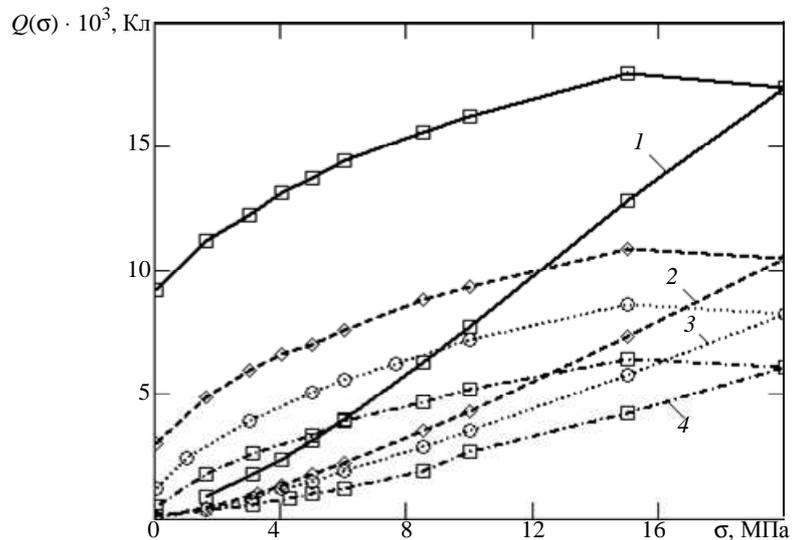


Рис. 3. Зависимости заряда от напряжения сжатия пьезопластины из ЦТС-19 толщиной 5 мм при 1-м (1), 2-м (2), 3-м (3) и 10-м (4) циклах нагружения

ших механических напряжений ранее была доказана также для монокристаллов BaTiO_3 в [10].

На рис. 3 показана зависимость заряда от напряжения сжатия для пьезопластины толщиной 5 мм. При этом тренд, связанный с отпуском образца, всегда соответствует верхней части каждой из зависимостей. Нагружение производилось 10 циклов подряд. После каждого нагрузочного цикла сформировавшийся на пьезопластине заряд фиксировался и «сбрасывался на землю». Можно отметить, что любая кривая на рис. 3 образует половину петли гистерезиса. При этом в каждом

последующем цикле нагружения заряд, оставшийся на пластине после снятия нагрузки, становился все меньше, что говорило о постепенном снижении запаса заряда.

Таким образом, по приведенным зависимостям $Q(\sigma)$ можно выбрать определенные обоснованные значения механического усилия сжатия при измерении пьезоконстант, что немаловажно для практики. Помимо этого стоит отметить, что существует предельная толщина пьезоэлемента, свыше которой смена пьезоэффекта с продольного на поперечный не происходит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопьян В. А. Методика определения пьезоэлектрического модуля d_{33} и исследование границ ее применения // Дефектоскопия. 2003. № 4. С. 29–38.
2. Цаплиев В. М., Аббакумов К. Е., Коновалов Р. С. Нелинейные пьезокерамические материалы и малогабаритные генераторы энергии. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 215 с.
3. Доменные процессы в сегнетокерамике при действии сильного поперечного сжатия. Пьезоэлектрические материалы и преобразователи / В. А. Дорошенко, Э. И. Пикалев, Г. Н. Виталинская и др. // Ростов. гос. ун-т. Ростов, 1976. С. 66–72.
4. Цаплиев В. М. Нелинейная акустоупругость пьезокерамических материалов: в 2 ч. Ч. 2: Акустические методы измерений. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 143 с.
5. Dielectric behavior of single crystals near the $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - (x)\text{PbTiO}_3$ morphotropic phase boundary / T. R. Shrout, Z. Chang, N. Kim, S. Markgraf // Ferroelectr. Lett. Sect. 1990. Vol. 12, iss. 63. P. 63–69.
6. Kuwata J., Uchino K., Nomura S. Dielectric and Piezoelectric Properties of $0.91\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.09\text{PbTiO}_3$ Single Crystals // Jap. J. Appl. Phys. 1982. Pt. 1. Vol. 21, iss. 9. P. 1298–1302.
7. Park S. E., Shrout T. R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. P. 1804–1819.
8. Viehland D., Powers J. Electromechanical coupling coefficient of $\langle 001 \rangle$ -oriented $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$ $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$ crystals: Stress and temperature independence // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78, iss. 2. P. 3112–3121.
9. Effect of uniaxial stress on the large-signal electromechanical properties of electrostrictive and piezoelectric lead magnesium niobate lead titanate ceramics / D. Viehland, J. Li, E. McLaughlin, J. Powers, R. Janus, H. Robinson // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95, iss. 4. P. 1969–1980.
10. Титанат бария / Ростов. гос. ун-т. Ростов, 1971. 216 с.

V. M. Tsaplev, R. S. Konovalov, V. E. Zemskova

Changes in properties of piezoelectric elements with compressive stress

An experimental study of the properties of piezoelectric ceramic elements of CTS-19 as a plate thickness of 1, 5, 10 and 15 mm with compressive stress. All measurements were performed in a laboratory setting, provides a compressive stress to 20 MPa. Rated electric charge that occurs when loading piezo elements. It is shown that for CTS-19, the lower limit of the compressive stress is 2 MPa. The peculiarities in the dependence $Q(\sigma)$, associated with a change in the contact area of the piezoelectric element in the process of measuring and reorientation effects.

Piezoceramic, quasi-static method, compression stress, piezoelectric modulus, loading cycle

УДК 534.232:534.17

А. Н. Неверов

Московский автомобильно-дорожный

государственный технический университет (МАДИ)

Об излучении звука в кавитирующую жидкость

Выполнено теоретическое исследование продольных колебаний стержня, излучающего в жидкость, в которой возможно возникновение кавитации. Приведены условия работы системы стержень-жидкость в режиме триггера. Рассмотрены кавитационные пульсации при синусоидальной амплитудной модуляции возбуждающего электрического сигнала.

Стержень, продольные колебания, кавитация, звуковое давление, модуляция

Повышение добротности колебательных систем неразрывно связано с ростом их импеданс-чувствительности. Л. Д. Розенбергом и М. Г. Си-

ротюком было показано [1], [2], что зависимость эффективного звукового давления в кавитирующей жидкости от амплитуды колебательной ско-