

Перспективы создания пьезоактюаторов для систем измерения, контроля и управления объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры

С. И. Торгашин, к.т.н., info@niifi.ru

АО «Научно исследовательский институт физических измерений», Пенза, Российская Федерация

И. Н. Чебурахин, info@niifi.ru

АО «Научно исследовательский институт физических измерений», Пенза, Российская Федерация

В. Г. Андреев, д.т.н., info@niifi.ru

АО «Научно исследовательский институт физических измерений», Пенза, Российская Федерация

В. В. Кикот, к.т.н., piezo@niifi.ru

АО «Научно исследовательский институт физических измерений», Пенза, Российская Федерация

В. С. Волков, к.т.н., info@niifi.ru

АО «Научно исследовательский институт физических измерений», Пенза, Российская Федерация

Аннотация. Приводится анализ результатов исследований потенциальных технических возможностей и технологических резервов пьезокерамических материалов для изготовления макроволоконных актюаторов. Рассмотрены преимущества применения пьезоэлементов для создания актюаторов в составе систем управления объектов РКТ и НКИ. Рассмотрены конструкции, методы изготовления и технические характеристики пьезоактюаторов на основе макроволоконных компонентов. Сообщается, что сенсоры и актюаторы на основе ЦТС обладают рядом преимуществ: меньшей массой, большей гибкостью и эластичностью; широким диапазоном частот; низким акустическим импедансом; высокой чувствительностью, диэлектрической прочностью, механической и ударостойкостью, температурной стабильностью; возможностью изготовления сенсоров и актюаторов сложной формы с большой площадью поверхности; низкой себестоимостью. Приведен пример конструкции актюатора, изготовленного с использованием пьезопленок. Приведены способы изготовления пьезопленок путем резки пьезопластин, а также с использованием шликерного литья. Отмечено, что принципиальное отличие технологии шликерного литья заключается в том, что будущие пьезозаготовки собираются из «сырых» пьезокерамических пленок толщиной от 10 до 60 мкм, которые состоят из порошка материала и органических веществ (связка, растворитель, пластификатор, ПАВ), обеспечивающих пластичность. Приведены электрофизические параметры изготавливаемых пьезоэлементов, определяющие возможности производства пьезоэлементов, а также технические параметры перспективных конструкций пьезоактюаторов. Отмечено, что имеющийся научно-технический задел позволяет АО «НИИФИ» создавать конструктивно-технологические решения по разработке пьезоактюаторов.

Ключевые слова: актюатор, пьезоэлектрическая керамика, цирконат-титанат свинца, макроволоконный композит, шликерное литье

Prospects for the Creation of Piezoactuators for Measurement and Control Systems of Rocket and Space Technology and Ground Space Infrastructure

S. I. Torgashin, *Cand. Sci. (Engineering)*, info@niifi.ru

Joint-Stock Company "Research institute of physical measurements", Penza, Russian Federation

I. N. Cheburakhin, info@niifi.ru

Joint-Stock Company "Research institute of physical measurements", Penza, Russian Federation

V. G. Andreev, *Dr. Sci. (Engineering)*, info@niifi.ru

Joint-Stock Company "Research institute of physical measurements", Penza, Russian Federation

V. V. Kikot, *Cand. Sci. (Engineering)*, piezo@niifi.ru

Joint-Stock Company "Research institute of physical measurements", Penza, Russian Federation

V. S. Volkov, *Cand. Sci. (Engineering)*, info@niifi.ru

Joint-Stock Company "Research institute of physical measurements", Penza, Russian Federation

Abstract. The paper gives an analysis of the research results of potential technical capabilities and technological reserves of piezoceramic materials for the manufacture of macrofiber actuators. The advantages of using piezoelements to create actuators within the systems of control of rocket and space equipment and ground space infrastructure are considered. The designs, manufacturing methods, and specifications of piezoactuators based on macrofiber components are studied. It is reported that CTS-based sensors and actuators have a number of advantages: less mass, more flexibility and elasticity; wide range of frequencies; low acoustic impedance; high sensitivity, dielectric strength, mechanical and shock resistance, temperature stability; ability to make sensors and actuators of a complex shape with a large surface area; and low cost. An example of the design of the actuator made using piezofilms is presented. The paper gives the methods of making piezofilms by cutting piezoplastics, as well as employing slip casting. It is noted that the fundamental difference of the technology of resurfacing casting is that future piezoworkpieces is collected from "raw" piezoceramic films from 10 to 60 μm thick, which consist of powder material and organic substances (bunch, solvent, plasticizer, and surfactants), providing plasticity. The electrophysical parameters of the manufactured piezocells are given, determining the possibilities of the production of piezonutrient, as well as the technical parameters of the prospective designs of the piezoactuators. It is noted that the existing scientific and technical backlog allows JSC "NIIFI" to create constructive and technological solutions for the development of piezoactuators.

Keywords: actuator, piezoelectric ceramics, lead zirconate-titanate, microfiber composite, slip casting

Использование изделий ракетно-космической техники (РКТ) и объектов наземной космической инфраструктуры (НКИ) в современных условиях определяет повышенные требования к надежности, в частности к обеспечению безотказности. Для обеспечения требуемых показателей безотказности необходимо выполнение двух условий: получение данных о техническом состоянии критически важных узлов и элементов изделий ракетно-космической техники в режиме реального времени и использование этих данных для восстановления и поддержания работоспособности изделий. Решение этих задач требует использования сенсорных компонентов и актюаторов, отвечающих современным требованиям к устройствам в составе информационно-измерительных и управляющих систем в ракетно-космической отрасли и отличающихся высокой надежностью, малой массой и габаритами, низким энергопотреблением, высокой чувствительностью и быстродействием.

Для изготовления датчиков, актюаторов, преобразователей в настоящее время используется пьезоэлектрическая керамика, основными материалами для которой служат сегнето- и антисегнетоэлектрики со структурой типа перовскита. Наиболее распространенная и часто применяемая пьезокерамика на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) является многокомпонентным составом, состоящим из нескольких поликристаллических и аморфных фаз, а также газонаполненных пор.

Сырьем для пьезокерамики являются оксиды свинца, титана, циркония, карбонаты бария, стронция. Эти вещества производятся в России на разных предприятиях и, как правило, поставляемые партии отличаются друг от друга по составу и физико-химическим свойствам, что не позволяет получать пьезоизделия с воспроизводимыми параметрами. Наряду с этим существует проблема технологической зависимости отечественной экономики от иностранных производителей пьезоматериалов и пьезокерамики, основные из которых находятся в Китае (70%), США (15%), Японии (10%), при этом доля России в общем объеме составляет лишь 5%. Важность развития и совершенствования технологий создания номенклатуры отечественных пьезоматериалов и изделий на их основе, максимально удовлетворяющих требованиям

производства пьезотехники и новых областей применения, неоспорима.

Из всех известных пьезоэлектриков наиболее подходящими считаются ферроэлектрические (цирконат-титанат свинца — ЦТС) и полярные (не ферроэлектрические) пьезоэлектрические материалы, такие как нитрид алюминия и оксид цинка.

Достоинствами ЦТС являются:

- большие значения диэлектрической проницаемости и пьезоэлектрических коэффициентов (продольного пьезомодуля и коэффициента поперечного электромеханического напряжения);
- высокие уровни коэффициентов электромеханической связи;
- высокая плотность мощности при большом КПД;
- совместимость с технологией комплементарного металлооксидного полупроводника (КМОП), что позволяет изготавливать более интегрированные многофункциональные преобразователи сигналов различных видов.

ЦТС является универсальным материалом, который обладает пьезоэлектрическими, пироэлектрическими, сегнетоэлектрическими и электрострикционными свойствами. ЦТС-пьезокерамика имеет пьезоэлектрические коэффициенты и коэффициент электромеханической связи на порядок больше по сравнению с неферроэлектрическими пьезоэлектрическими материалами, такими как нитрид алюминия и оксид цинка. Это позволяет использовать более низкие управляющие напряжения, достигая при этом высокой производительности ЦТС-устройств. Сенсоры и актюаторы на основе ЦТС обладают рядом преимуществ: меньшей массой, большей гибкостью и эластичностью; широким диапазоном частот; низким акустическим импедансом; высокой чувствительностью, диэлектрической прочностью, механической и ударостойкостью, температурной стабильностью; возможностью изготовления сенсоров и актюаторов сложной формы с большой площадью поверхности; низкой себестоимостью [1–5].

С применением изделий из ЦТС возможно реализовывать следующие функциональные возможности:

- преобразование измеряемой величины в пропорциональный электрический сигнал и обрат-

- преобразование электрического напряжения в перемещение или силу;
- одновременное измерение нескольких физических величин;
- подавление нежелательных резонансных колебаний, вибраций, шумов управляемым демпфированием;
- адаптацию к условиям эксплуатации;
- создание малогабаритных генераторов электрической энергии, электромеханических реле, переключателей и т. д., характеризующихся высоким быстродействием и малой инерционностью.

За рубежом США являются инициатором и лидером в области разработок, производства и применения пьезоустройств.

Исследовательским центром NASA (NASA Langley Research Center) совместно с компанией «Smart Material Corp» разработан новый тип пьезоактюатора на основе макроволоконного композита (МВК), обладающий относительно большой деформацией и развивающий значительную силу. Первоначально он применялся только как актюатор, но затем было замечено, что он обладает сенсорными свойствами на уровне обычных пьезоэлементов, причем вдобавок может инкорпорироваться в цепь датчика и использоваться для совместного управления структурой. Поэтому он был применен в качестве «умного» датчика, способного определять уровень вибрации, и при превышении ее порога обеспечивать виброкомпенсацию [6–8].

По сравнению с традиционными компонентами измерительных и управляющих систем МВК обладают следующими преимуществами:

- возможностью создания маломощных устройств с низким уровнем шума и широким динамическим диапазоном;
- возможностью использования для генерации электрической энергии в случае размещения на вибрирующем теле или поверхности с последующим использованием электроэнергии для питания беспроводных датчиков с низким энергопотреблением;
- обеспечением существенно большей плотности энергии, чем электростатические приводы;

- возможностью совершения значительного перемещения и полезной работы при малых размерах самой пьезоструктуры (до нескольких нанометров).

Типовые характеристики МВК-пьезоактюаторов зарубежного производства приведены в таблице 1 [1–9].

Таблица 1. Характеристики МВК-пьезоактюаторов производства компании Smart Materials Inc. (США)

Максимальная блокирующая сила, кН	От 1 до 28 в зависимости от ширины МВК
Максимальное напряжение питания, В	От –500 В до +1500 В
Максимальная рабочая частота, кГц	Актюаторы: 10 Датчики и генераторы: 3000
Типовая электрическая емкость, нФ	от 2 нФ до 200 нФ
Типовая толщина, мкм	300 мкм
Режимы работы МВК	Удлинение, изгиб, кручение

На сегодняшний день в США разработаны и внедрены системы непрерывного управления закрылками несущего винта вертолета при помощи МВК (Управление транспортных технологий исследовательской лаборатории армии США); гашения ударных вибраций нижнего киля истребителя F-16 с использованием пьезоэлектрических актюаторов на основе МВК (Технологический институт ВВС США) [4].

МВК содержит пару интегрированных электродов со встречно-штыревой структурой для осуществления поляризации и обеспечения активации внутренних слоев пьезокерамических волокон, изготовленных методом машинной обработки, заделанных в защитную матрицу из полимерного материала (рис. 1) [1–8]. Пьезокерамические волокна изготавливаются из монолитных пьезокерамических тонких пластин методом резки.

Основой для изготовления волокон является пьезокерамика системы ЦТС.

С помощью встречно-штыревой структуры электродов, которые располагаются на пьезокерамических волокнах и крепятся на каптоновой пленке (на рисунке пленка не показана), обеспечивается

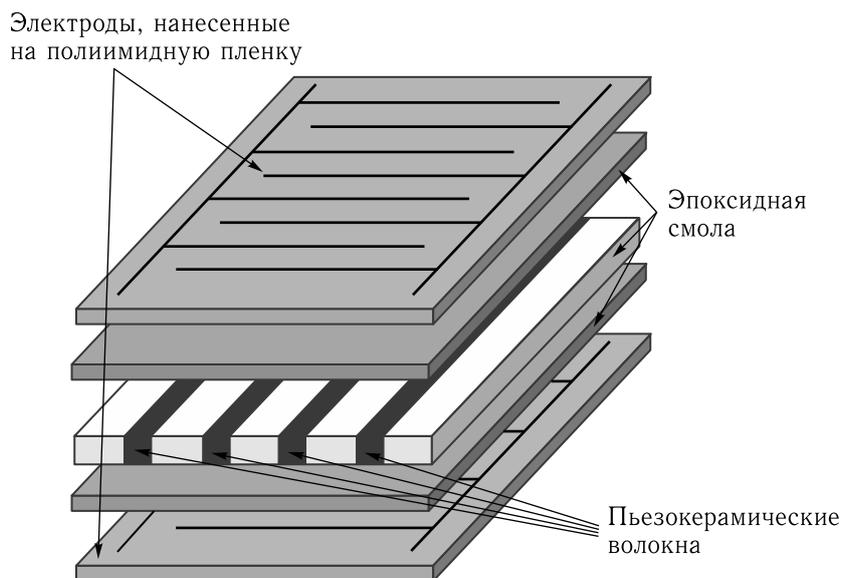


Рис. 1. Структура МВК

поляризация пьезокерамического материала, а также прикладывается управляющее электрическое поле по оси волокон. Структура металлических встречно-тыревых электродов изготавливается либо стандартным методом фоторезистивного травления, либо путем осаждения на полиимидной пленке и накладывается на пьезокерамическую структуру, формируя, таким образом, верхнюю и нижнюю защитные поверхности устройства.

В результате пьезокерамический пакет получается более гибким по сравнению с актюаторами, изготовленными из тонких сплошных пьезокерамических пластин. Это позволяет легко встраивать такие элементы в композитные структуры, используя обычную технологию производства композитов.

Процесс изготовления макроволоконных композитов включает в себя три основные фазы:

- формирование макроволоконного пьезокерамического пакета;
- вулканизацию под давлением;
- поляризацию.

Для изготовления макроволокон используется технология, аналогичная технологии резки пластин кремния. В серийном производстве МВК для резки пластин используются пилы с алмазной кромкой толщиной от 25 до 76 мкм.

В серийном производстве изготовление макроволокон осуществляется из тонких монолитных

неполяризованных пластин ЦТС-пьезокерамики толщиной от 0,127 мм до 0,230 мм. Для облегчения операций с их переноской, установкой и позиционированием, а также обеспечения прецизионной нарезки макроволокон пьезокерамические пластины фиксируются на подложке из самоклеящейся полимерной пленки толщиной 0,0762 мм, которая закрепляется в палцах. Такие заготовки устанавливаются, разрезаются прецизионной пилой с водяным охлаждением и с компьютерным управлением [1–8].

Технология изготовления ЦТС-пластин, используемых в качестве заготовок для изготовления МВК, показана на рис. 2.

Дальнейшее совершенствование технологий изготовления пьезоактюаторов может быть осуществлено за счет применения пьезоэлектрических пленок, изготовленных методом шликерного литья [4].

Принципиальное отличие пленочной технологии заключается в том, что будущие пьезозаготовки собираются из «сырых» пьезокерамических пленок толщиной от 10 до 60 мкм, которые состоят из порошка материала и органических веществ (связка, растворитель, пластификатор, ПАВ), обеспечивающих пластичность.

В качестве материала для изготовления пьезопленок используется сегнетомягкая керамика марки ЦТС-46, основные характеристики которой представлены в табл. 2.

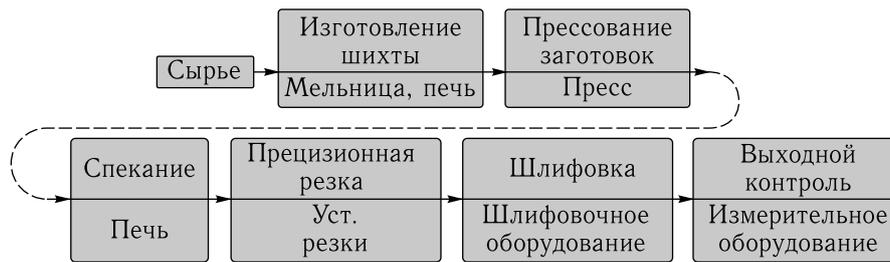


Рис. 2. Укрупненная структурная схема технологического процесса производства ЦТС-пластин

Таблица 2. Характеристики материала ЦТС-46

Характеристики	Единица измер.	Значение
Температура Кюри T_K	°С	260
Относительная д/э проницаемость $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	—	2350
Тангенс угла д/э потерь $\operatorname{tg} \delta$ (при $E = 25$ кВ/м)	%	1,8
Коэффициент электро-механической связи k_p	—	0,6
Пьезомодуль d_{31}	10^{-12} Кл/Н	200
Пьезомодуль d_{33}	10^{-12} Кл/Н	500
Плотность ρ	10^3 кг/м ³	7,4

Выбор данного материала в первую очередь обусловлен тем, что ЦТС-46 обладает низкой температурой спекания (950 °С). Данный фактор позволяет использовать в качестве внутренних электродов металлизационную пасту, содержащую серебро и палладий в соотношении 70/30 и обеспечивает одновременное проведение операций спекания керамики и вжигания металлизационной пасты.

Перечень технологических операций изготовления пьезоактюатора методом шликерного литья представлен в табл. 3.

Синтезированный материал системы ЦТС проходит операцию тонкого помола. Измельчение (увеличение удельной поверхности) порошка позволяет снизить температуру спекания пьезокерамики, а главное — обеспечивает устойчивость литьевого шликера к расслоению.

После помола и сушки контролируется размер частиц порошка. Из синтезированного пьезокера-

Таблица 3. Перечень технологических операций изготовления пьезопленок

№	Наименование операции	№	Наименование операции
1	Приготовление литьевого шликера	6	Утильный обжиг для выжигания органики
2	Литье пьезокерамической пленки	7	Высокотемпературный обжиг
3	Сборка группового пакета	8	Нанесение контактной металлизации
4	Гидростатическое прессование	9	Поляризация
5	Рубка пакета	10	Измерение электрофизических параметров

мического материала далее изготавливают предварительный и окончательный шликеры.

Литье пьезокерамической пленки происходит на автоматизированной машине. В ходе данной операции происходит литье пленки на майларовую ленту, с последующей предварительной сушкой.

Также в процессе литья пьезокерамической пленки автоматизированная машина проводит измерение толщины в продольном и поперечном сечениях пленки и в случае ее отклонения от заданного значения более 3 мкм сектор помечается и отбраковывается. Пластичная пленка «сырой» пьезокерамики на носителе наматывается на приемную бобину.

После литья приемную бобину с рулоном «сырой» пьезокерамической пленки устанавливают в машину для сборки группового пакета. После подпрессовки пленок «сырой» керамики паллеты перемещаются к блоку трафаретной печати.

После печати необходимо удалить растворитель из металлизационной пасты, для чего паллеты перемещаются в сушильный блок, где при температуре 70–80 °С из пасты удаляется растворитель.

После этого паллеты опять попадают в блок подпрессовки, где наносится последующий слой керамики, и т. д. Данная технология позволяет производить сборку группового пакета в едином цикле, тем самым снижая вероятность попадания загрязнений между слоями и возникновения дефектов после спекания заготовок. Таким образом, для пьезопленок на палетах собирают подложки из слоев керамики общей толщиной 300 мкм. Далее на них последовательно наносится 2 пьезокерамических слоя с чередующимися слоями металлизации, образуя тем самым многослойную структуру на подложке.

Металлизация наносится со смещением по одной из осей относительно предыдущего и последующего слоя электродов, а на поверхность последнего слоя «сырой» керамики по краям группового пакета наносят технологические метки, по которым в дальнейшем пакет будет разрублен на отдельные заготовки.

После этого пластины в пакетах помещают в установку гидростатического прессования. Данная операция позволяет снизить вероятность возникновения микродефектов в многослойных структурах из-за неплотного прилегания слоев керамики на стадии сборки групповых пакетов. Далее производятся обжиг, нанесение контактной металлизации, поляризация пакета и измерение электрофизических параметров.

Полученные таким образом пьезоактюаторы обладают меньшей толщиной по сравнению с МВК и актюаторами, полученными по технологии традиционной объемной пьезокерамики, а также меньшим управляющим напряжением порядка 100 В (у МВК минимальное управляющее напряжение составляет 500 В).

Наличие пьезопроизводства позволяет АО «НИИФИ» изготавливать пьезоэлементы системы ЦТС, ТНВ со следующими характеристиками:

- относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$, — 100–3000;
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, не более 0,08;

- пьезомодуль d_{33} , пКл/Н, 8–700;
- температура точки Кюри, °С, до 920;
- плотность, г/см³, 7,5;
- механическая добротность, Q_m , 20–1500.

На основе ЦТС-пьезокерамики могут быть изготовлены пьезоактюаторы со следующими характеристиками:

- разрешение по перемещению, мкм, 0,001;
- скорость срабатывания, мс, 0,001;
- относительная деформация, %, 0,2;
- генерируемая сила, кН/см², 10;
- максимальная рабочая частота, кГц, 20.

Имеющийся научно-технический задел позволяет АО «НИИФИ» создавать конструктивно-технологические решения по разработке пьезоактюаторов с применением современных технологий, в том числе макрволоконных композитов и шликерного литья.

Список литературы

1. *Carazo A. V.* Revolutionary Innovations in Piezoelectric Actuators and Transformers at FACE Department of R&D Engineering, Face Electronics, LC 427 W. 35th Street, Norfolk, Virginia 23508, USA. JUN 2003.
2. *Mouhanned Brahim.* Modeling and Position Control of Piezoelectric Motors. Automatic. Université. Paris-Saclay, 2017. English. NNT : 2017SACLS296. Submitted on 22 Jan 2018.
3. *Uchino K.* Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers. International Center for Actuators and Transducers, Penn State University. University Park, PA 16802. JUN 2003.
4. Research Team of Prof. Mario Rosario Chiarelli — Dept. of Civil and Industrial Engineering, Aerospace Unit, University of Pisa, Italy, Dr. Aniello Cozzolino — Piaggio Aero Industries SPA, Italy, Dr. Jan Kunzmann — Smart Material GmbH, Germany, Dr. Luca Lanzi — iChrome Ltd.: “7th Framework Programme AERONAUTICS and AIR TRANSPORT — Feasibility of the integration of MFC into the primary structures of aircrafts and definition of control system requirements”, 22 October 2013.
5. *Wilkie W. K.* U.S. Army Research Laboratory, *Robert G. Bryant, James W. High, Robert L. Fox, Richard F. Hellbaum, Antony Jalink, Jr., Bruce D. Little,*

- and Paul H. Mirick* — NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681-2199: “Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications”, 2000.
6. *Sodano H.* Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University: “Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation”, July 28, 2003.
 7. *Werlink R., Bryant R.* Langley Research Center, Hampton, Virginia; *Manos D.* College of William and Mary, Williamsburg, Virginia: “Macro Fiber Piezocomposite Actuator Poling Study”, NASA/TM-2002-211434.
 8. *Williams R. B.* Graduate Research Assistant*, Gyuhae Park Research Assistant, Daniel J. Inman G.R. Goodson Professor and Director — Center for Intelligent Material Systems and Structures, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, W. Keats Wilkie — Research Scientist, Structural Dynamics Branch, NASA Langley Research Center: “An overview of composite actuators with piezoceramic fibers”.
 9. *Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В.* Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб ГУ ИТМО, 2011. 131 с.