

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2024

- А. А. Трофимов** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология»; Пензенский государственный университет; alex.t1978@mail.ru
- Е. А. Печерская** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника и метрология»; Пензенский государственный университет; peal@list.ru
- С. А. Здобнов** аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология»; Пензенский государственный университет; sa_zdobnov@mail.ru

Разработан датчик давления с пьезоэлектрическим чувствительным элементом для информационно-измерительной системы технического состояния ракетного двигателя. Теоретическим и экспериментальным путём получены основные технические характеристики пьезоэлементов лабораторных образцов. Для анализа микроструктуры материала пьезоэлементов были изготовлены шлифы. При анализе фотографий шлифов установлено, что структура пьезоматериала плотная, поры мелкие, равномерно распределённые по объёму. Разработан и испытан лабораторный макет технологического оборудования для плазменной модификации шихты на основе свинцовых и бессвинцовых компонентов.

Датчик давления; чувствительный элемент; пьезомодуль; пьезокерамический элемент; шихта

Цитирование: Трофимов А.А., Печерская Е.А., Здобнов С.А. Исследование технологии создания чувствительных элементов датчиков давления для системы ракетного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 191-200.
DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-191-200

Датчики давления применяются в промышленных отраслях при автоматизации производственных процессов в автомобильном, авиационном и железнодорожном транспорте, ракетно-космической и авиационной технике [1; 2]. Значительный вес в общем количестве занимают датчики давления с пьезоэлектрическим чувствительным элементом.

Создание пьезокерамических материалов с оптимальными свойствами для датчиков специального назначения [3; 4] является сложной и актуальной материаловедческой задачей. Характеристики пьезоэлементов определяются составом пьезокерамического материала и технологией его изготовления [5].

В настоящее время как в России, так и за рубежом остаются недостаточно исследованными гистерезис, последействие и ползучесть пьезоэлементов. Отсутствуют достоверные математические модели влияния указанных факторов на эксплуатационные характеристики пьезоэлементов, а также математические модели процессов позиционирования и компенсации влияния внешних факторов на различные конструкции. В этой связи отработка и внедрение результатов технологии создания высококачественной пьезокерамической шихты и пьезокерамических материалов на её основе и широкой номенклатуры изделий пьезотроники [6; 7] с целью обеспечения импортозамещения являются своевременными и актуальными.

Для проведения исследований по определению основных характеристик лабораторных образцов пьезоэлементов на основе сегнетомягких, сегнетожестких, высокостабильных пьезокерамических материалов из пьезокерамической шихты на основе свинцовых компонентов, в том числе с применением редкоземельных металлов и методов нанотехнологий, разработан датчик давления, входящий в состав информационно-измерительной системы технического состояния ракетного двигателя при огневых испытаниях. Структурная схема системы приведена на рис. 1. Конструктивная схема датчика представлена на рис. 2.

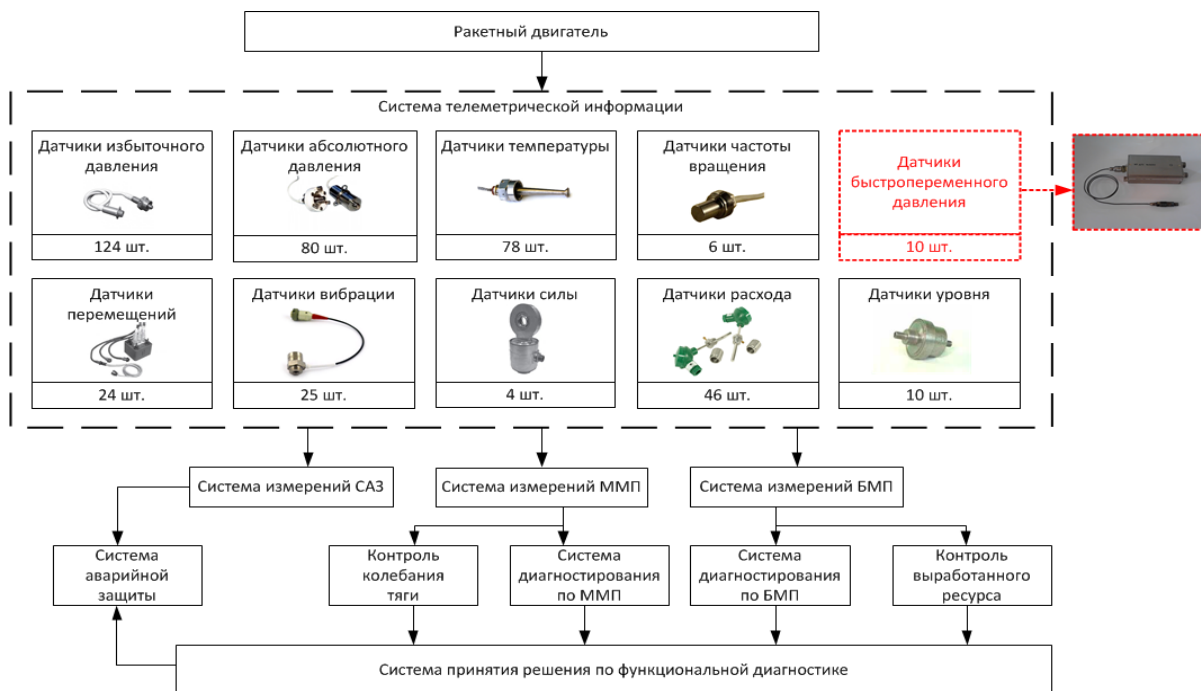


Рис. 1. Информационно-измерительная система технического состояния ракетного двигателя (САЗ – система аварийной защиты; ММП – медленно меняющиеся параметры; БМП – быстро меняющиеся параметры)

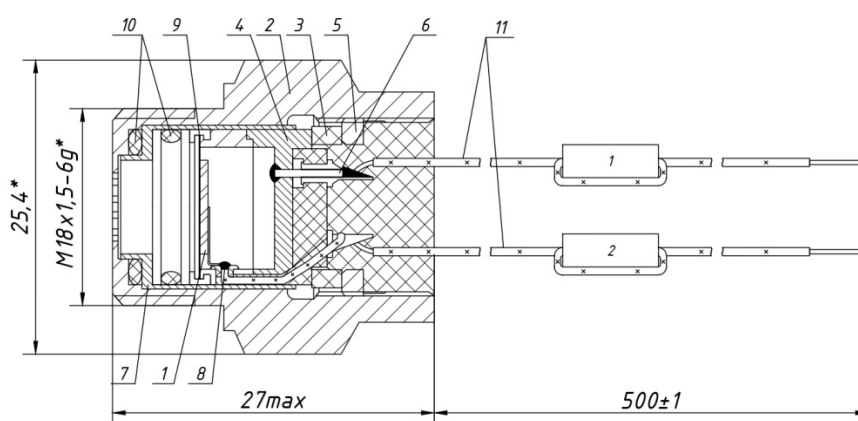


Рис. 2. Конструктивная схема датчика давления

Конструкция датчика состоит из корпуса 2, предназначенного для присоединения датчика к магистрали давления; мембраны 9, осуществляющей защиту пьезоэлемента от агрессивных сред; токосъёмника 8, позволяющего снять заряд с одной стороны пьезоэлемента.

зоэлемента; изолятора 7, изолирующего чувствительный элемент (ЧЭ) от корпуса; колец 10, обеспечивающих герметизацию конструкции датчика; прокладки 3, изолирующей ЧЭ от шайбы; шайбы 5, фиксирующей ЧЭ в корпусе; пьезоэлемента 1, воспринимающего быстропеременное давление; колодки 4 с контактами 6, обеспечивающей снятие выходных характеристик с ЧЭ; и проводов 11. Данная конструкция позволяет исследовать характеристики пьезоэлемента [8].

Задача исследования заключается в определении показателей изменения параметров пьезоэлементов при эксплуатации и хранении. Измерение пьезочувствительности лабораторных образцов пьезоэлементов из высокотемпературного пьезокерамического материала НФИ-90 в составе датчика производилось расчётным путём на основе прямой пропорциональности пьезочувствительности и выходного сигнала датчика.

Процесс изготовления лабораторных пьезоэлементов включал в себя синтез пьезокерамического материала из исходных химических компонентов, спекание керамических заготовок, механическую обработку (шлифования и резание), нанесение электродов (металлизацию) и поляризацию в постоянном электрическом поле с целью формирования у образцов пьезоэлектрических свойств в макроскопическом объёме. Общий вид пьезоэлементов приведён на рис. 3. Различия между лабораторными образцами пьезоэлементов типоразмера «диск» заключаются в составе металлизационной пасты: на образцах пьезоэлементов (рис. 3 слева) нанесён серебряный электрод, на образцах пьезоэлементов (рис. 3 справа) нанесён высокотемпературный серебряный электрод с добавками платины.

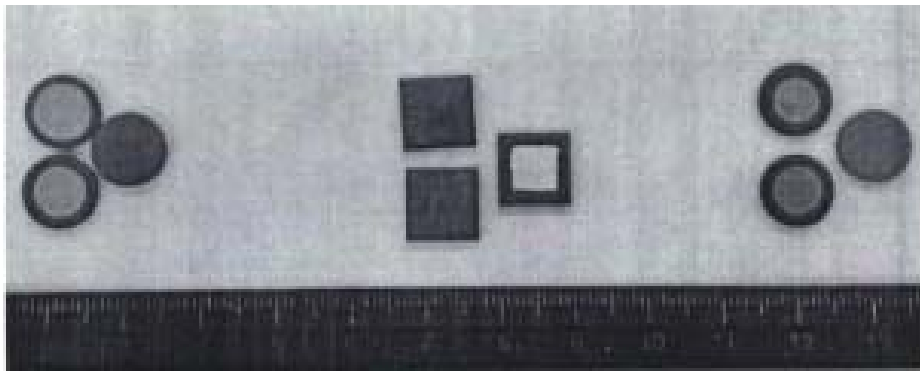


Рис. 3. Фотография чувствительного элемента датчика давления

Для достижения поставленной цели были разработаны программа методики испытаний, включающие в себя:

- определение относительной диэлектрической проницаемости;
- определение пьезочувствительности;
- контроль повторяемости выходного сигнала;
- контроль долговременной стабильности пьезочувствительности.

Определение относительной диэлектрической проницаемости ε проводилось расчётным путём согласно известной формуле [9]:

$$\varepsilon = \frac{C d}{S \varepsilon_0}, \quad (1)$$

где C – ёмкость пьезоэлемента, пФ; d – толщина пьезоэлемента, м; S – площадь поверхности пьезоэлемента, м²; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Среднее значение относительной диэлектрической проницаемости исследованных образцов составило 1230, разброс значений в относительном виде не превышает 1,5%. Полученные значения относительной диэлектрической проницаемости образцов соответствуют требованиям технического задания, поскольку они входят в интервал от 500 до 3500.

Определение пьезочувствительности d_{33} проводилось расчётным путём с использованием следующей формулы [9]:

$$d_{33} = \frac{U_1 (C_{np} + C_n)}{\Delta P S_{м.эф.}}, \quad (2)$$

где U_1 – выходной сигнал с датчика, мкВ; C_{np} – ёмкость датчика, пФ; C_n – ёмкость нагрузки измерительного оборудования, пФ; ΔP – амплитуда динамического давления, Па; $S_{м.эф.}$ – эффективная площадь мембраны, м².

Амплитуда динамического давления составила 4286 Па.

Для расчёта были проведены измерения значения ёмкости нагрузки (измерительного оборудования), составившей 4700 пФ, и значения выходного сигнала с датчиков давления. Результаты измерений представлены в табл. 1, где также приведены результаты расчёта коэффициентов пьезочувствительности.

Оценка долговременной стабильности пьезочувствительности проводилась экспериментально. Результаты испытаний представлены на рис. 4 и в табл. 2. Замеры выходного сигнала U_1 проводились с интервалом в один месяц.

Таблица 1. Результаты измерений пьезочувствительности пьезоэлементов в составе датчиков давления

| Измеряемый параметр | Порядковый номер датчика | | |
|--|--------------------------|--------|--------|
| | №1 | №2 | №3 |
| Выходной сигнал U_1 , мкВ | 112000 | 125000 | 102000 |
| Коэффициент пьезочувствительности d_{33} , пКл/Н | 260 | 291 | 238 |

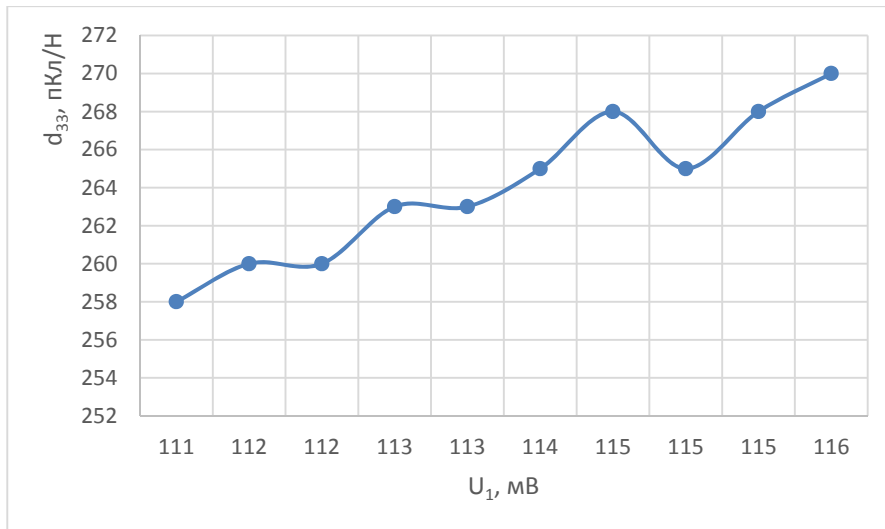
Таблица 2. Показатели долговременной стабильности пьезочувствительности

| Стабильность пьезочувствительности, % | | |
|---------------------------------------|------------|------------|
| Датчик № 1 | Датчик № 2 | Датчик № 3 |
| 0,60 | 0,54 | 0,76 |

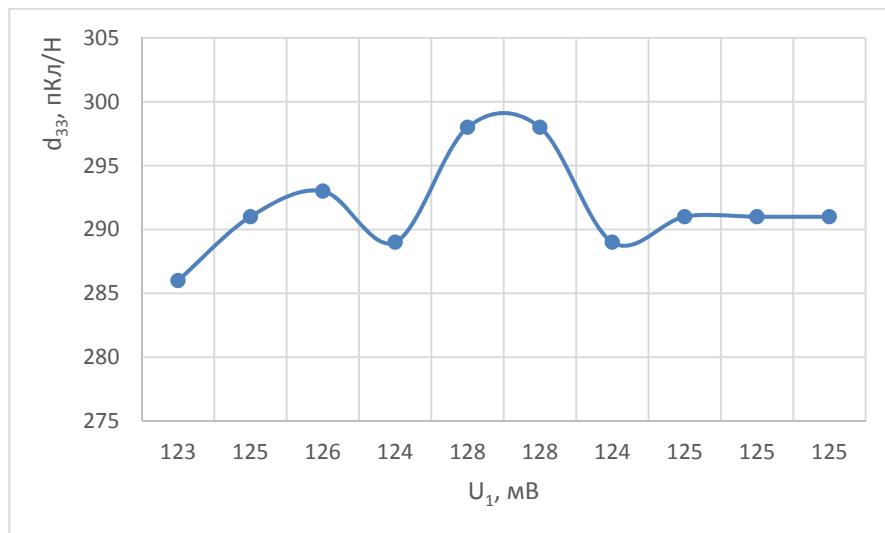
Изменение пьезочувствительности d_{33} керамических пьезоэлектриков во времени описывается логарифмической зависимостью [9; 10]:

$$d_{33}(\tau) = d_{33}(1 - K \lg \tau), \quad (3)$$

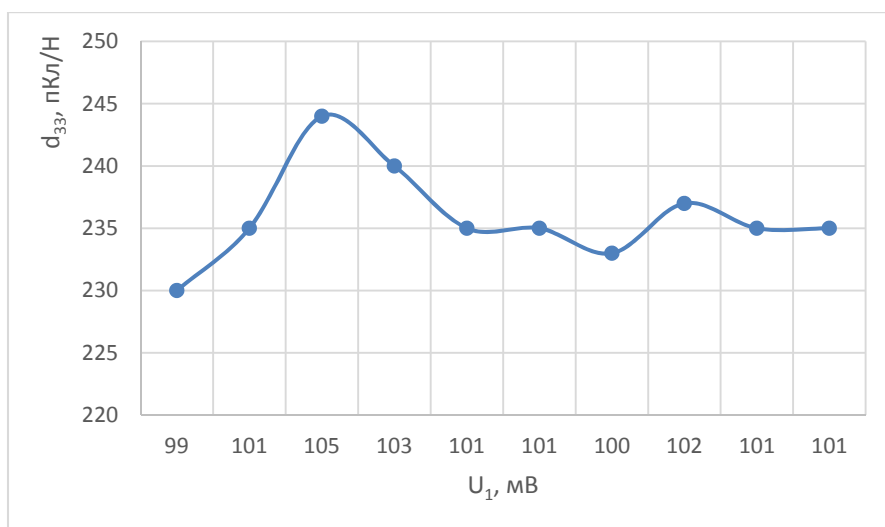
где $d_{33}(\tau)$ – значение пьезочувствительности в момент времени τ , пКл/Н; d_{33} – значение пьезочувствительности после поляризации, пКл/Н; K – коэффициент старения пьезочувствительности за логарифмическую декаду; τ – время, прошедшее после поляризации, суток.



а



б



в

Рис. 4. Результаты проведения испытания по оценке долговременной стабильности пьезочувствительности: а – датчик №1; б – датчик №2; в – датчик №3

На основании полученных результатов прямого измерения получено значение $K = 0,279\%$ за логарифмическую декаду. Следовательно, изменение пьезочувствительности в течение первого года эксплуатации составит $0,72\%$, начиная со второго года эксплуатации и до 18,5 лет (более 16000 ч) эксплуатации изменение пьезочувствительности составило $0,35\%$. Оба полученных значения соответствуют предъявляемым требованиям в части отклонения параметров при эксплуатации (в течение наработки) и хранения, соответствия показателей гамма-процентного ресурса и гамма-процентного срока службы.

Были изготовлены две партии пьезокерамической шихты на основе свинцовых компонентов сегнетомягкого материала НФИ-51 и сегнетожесткого материала НФИ-81. Для анализа микроструктуры материала с использованием элементов первой и второй партии были изготовлены шлифы. Фотографии шлифов представлены на рис. 5 – 8.

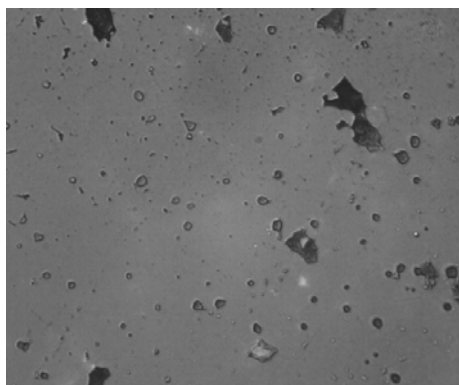


Рис. 5. Фото микроструктуры пьезокерамики из первой партии. Увеличение $400\times$

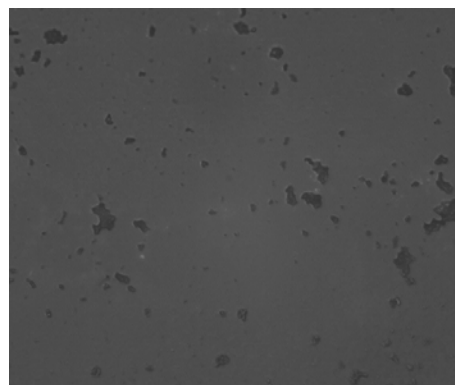


Рис. 6. Фото микроструктуры пьезокерамики из второй партии. Увеличение $400\times$

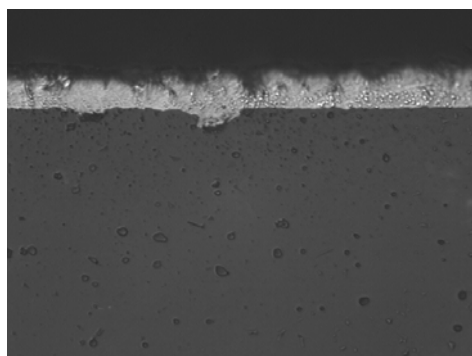


Рис. 7. Фото микроструктуры пьезокерамики из первой партии с серебряными электродами. Увеличение $400\times$

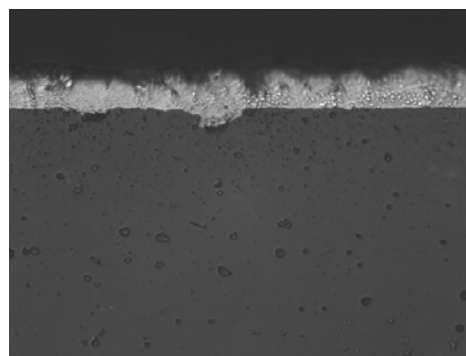


Рис. 8. Фото микроструктуры пьезокерамики из второй партии с серебряными электродами. Увеличение $400\times$

Как видно из представленных фотографий, структура пьезоматериала плотная. Объемная пористость не превышает $5...7\%$ фазового состава материала. Поры мелкие, равномерно распределенные по объему.

В процессе исследования разработан и испытан лабораторный макет технологического оборудования для плазменной модификации шихты на основе свинцовых и бессвинцовых компонентов.

На рис. 9 приведена измерительная схема испытаний.

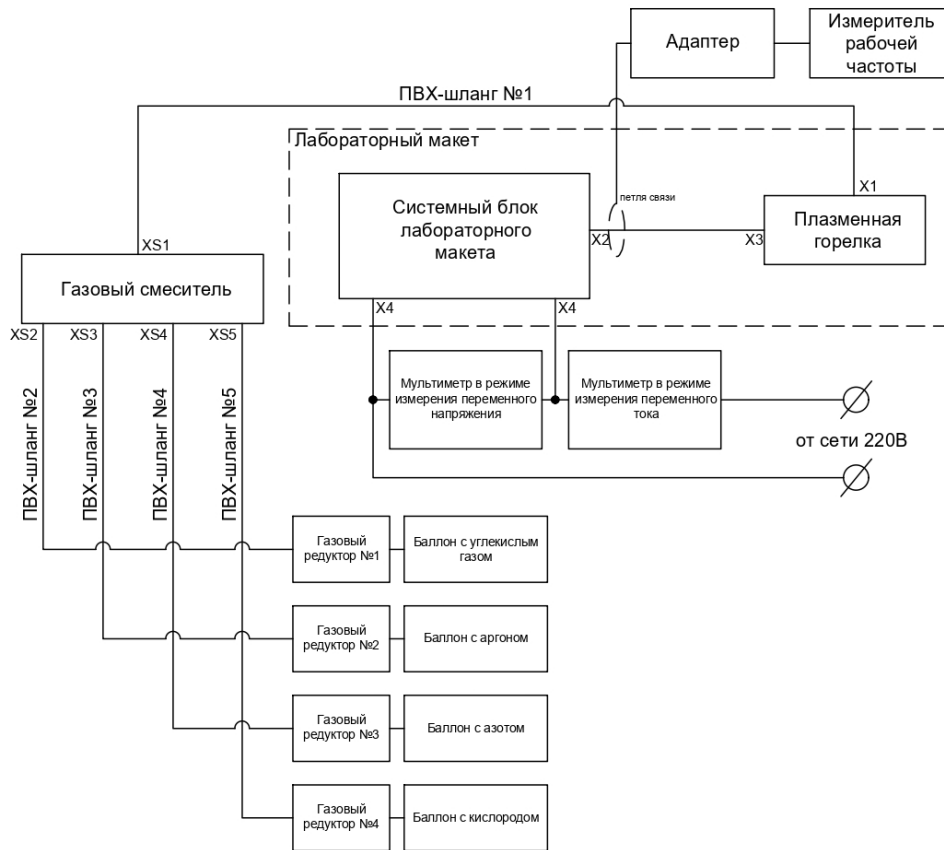


Рис. 9. Измерительная схема испытаний

Испытания проводились в лаборатории по программе и методикам лабораторных испытаний для определения основных параметров лабораторного макета специального технологического оборудования для плазменной модификации шихты на основе свинцовых и бессвинцовых компонентов и подтверждения соответствия основных параметров. Технические характеристики лабораторного макета специального технологического оборудования для плазменной модификации шихты на основе свинцовых и бессвинцовых компонентов соответствуют требованиям технического задания заказчика.

По результатам испытаний доработаны технологические процессы изготовления шихты в двух вариантах: на основе свинцовых и бессвинцовых компонентов, что позволило повысить пьезочувствительность d_{33} пьезокерамических элементов и соответственно расширить диапазон измерений датчиков давления. Разработаны составы и режимы получения пьезокерамических материалов на основе разработанной шихты с применением редкоземельных металлов, необходимых для изготовления высокотемпературных пьезокерамических элементов, которые используются в датчиках давления.

В результате проведённых исследований:

- внедрены технологии изготовления партий пьезокерамической шихты на основе свинцовых и бессвинцовых компонентов;
- внедрены технологии изготовления сегнетомягких, сегнетожестких, высокотемпературных пьезокерамических материалов;
- внедрены технологии изготовления образцов пьезоэлементов из сегнетомягкого, сегнетожесткого, высокостабильного, высокотемпературного пьезокерамических материалов.

Изготовлены макеты пьезоэлементов на основе сегнетомягких, сегнетожестких, высокостабильных пьезокерамических материалов. Изготовлен и испытан лабораторный образец специального технологического оборудования для плазменной модификации шихты.

По результатам исследований установлено:

– структура пьезокерамики из обеих партий плотная, поры мелкие, равномерно распределенные в объёме материала, что является предпосылкой успешной работы пьезокерамических элементов;

– геометрические размеры элементов соответствуют размерам используемых элементов;

– адгезия металлизационного покрытия удовлетворительная. Толщина серебряного покрытия находится в пределах 6...10 мкм, кроме того, покрытие равномерно нанесено по площади элемента;

– элементы, изготовленные из материала первой партии, ведут себя нестабильно: в случае осуществления термотренировки при температуре 100°C электрическая ёмкость возрастает более чем в два раза, затем при остывании до температуры 25°C уменьшается на 30...40% по сравнению с первоначальными значениями, а после проведения следующей термотренировки вновь увеличивается на 10...15% по сравнению с первоначальными значениями;

– элементы, изготовленные из второй партии, имеют стабильные параметры как при проведении термотренировки, так и после стабилизации. Тот факт, что в нормальных климатических условиях элементы из второй группы имеют меньшую ёмкость (порядка 15 нФ), чем указана в существующей конструкторской документации (20 нФ), играет свою положительную роль, т.к. повышается быстродействие пьезоэлектрических блоков при их работе в составе датчиков давления. Поэтому требования к этому параметру могут быть изменены в сторону уменьшения.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Библиографический список

1. Бастрыгин К.И., Трофимов А.А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3 (21). С. 18-25. DOI: 10.21685/2307-5538-2017-3-3

2. Дмитриенко А.Г., Блинов А.В., Трофимов А.Н., Трофимов А.А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9 (160). С. 4-6.

3. Дмитриенко А.Г., Трофимов А.Н., Трофимов А.А. Разработка унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 19-22.

4. Кикот В.В., Данилова Е.А., Трофимов А.А., Жуков Т.О. Исследование влияния повышенной температуры на технические характеристики пьезоэлементов из керамики типа цирконат-титанат свинца // Надёжность и качество сложных систем. 2023. № 3 (43). С. 83-89. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-3-10

5. Fimin A.V., Pecherskaya E.A., Timokhina O.A., Aleksandrov V.S., Volik A.V., Shepeleva A.E. Investigation of the dielectric fatigue on the example of lead titanate films

PbTiO₃ // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2086. DOI: 10.1088/1742-6596/2086/1/012179

6. Трофимов А.А., Кикот В.В., Фокина Е.А., Марков Д.М., Смирнов И.Е. Исследование технологии создания высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов датчиков // Надёжность и качество сложных систем. 2023. № 2 (42). С. 90-95. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-2-10

7. Pecherskaya E.A., Fimin A.V., Alexandrov V.S., Varenik Y.A., Volik A.V., Levin A.I. Metrological analysis of the relationship model between the properties of piezoelectric materials // Materials Science Forum. 2022. V. 1049. P. 305-310. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1049.305

8. Tsy-pin B.V., Pecherskaya E.A., Kikot V.V., Koshkin G.A., Fimin A.V. Study of the composite piezoelectric coatings used in sensing elements // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. V. 16, Iss. 6. P. 1322-1326. DOI: 10.1134/s1027451022060544

9. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. М.: Энергия, 1976. 336 с.

10. Смажевская Е.Г., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Советское радио, 1971. 199 с.

RESEARCH OF THE TECHNOLOGY OF DEVELOPING SENSITIVE ELEMENTS OF ROCKET ENGINE SYSTEM PRESSURE SENSORS

© 2024

A. A. Trofimov Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Information and Measuring Equipment and Metrology; Penza State University, Penza, Russian Federation; alex.t1978@mail.ru

E. A. Pecherskaya Doctor of Science (Engineering), Head of the Department of Information and Measuring Equipment and Metrology; Penza State University, Penza, Russian Federation; peal@list.ru

S. A. Zbodnov Postgraduate Student of the Department of Information and Measuring Equipment and Metrology; Penza State University, Penza, Russian Federation; sa_zdobnov@mail.ru

A pressure sensor with a piezoelectric sensing element was developed for the information and measurement system of the technical condition of a rocket engine. The main technical characteristics of piezoelectric elements of laboratory specimens were obtained theoretically and experimentally. To analyze the microstructure of the piezoelectric element material, slices were made, and when analyzing photos of the cuts, it was found that the piezoelectric material has dense structure and the pores are small, evenly distributed over the volume. A laboratory model of technological equipment for plasma modification of charge based on lead and lead-free components was developed and tested.

Pressure sensor; sensitive element; piezoelectric module; piezoelectric ceramic element; charge

Citation: Trofimov A.A., Pecherskaya E.A., Zbodnov S.A. Research of the technology of developing sensitive elements of rocket engine system pressure sensors. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 4. P. 191-200. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-191-200

References

1. Bastrygin K.I., Trofimov A.A. The measurement system, monitoring, control and diagnostics parameters of the rocket engine. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2017. No. 3 (21). P. 18-25. (In Russ.). DOI: 10.21685/2307-5538-2017-3-3

2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Development trends for sensors, transducers and based on them measuring, monitoring and control systems for technically complex objects of rocket-and-space engineering. *Sensors and Systems*. 2012. No. 9 (160). P. 4-6. (In Russ.)

3. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Development of uniform designs of transducers for prospective measurement and control systems for specially engineered instruments. *Measurement Techniques*. 2011. V. 53, Iss. 10. P. 1107-1112. DOI: 10.1007/s11018-011-9625-z

4. Kikot V.V., Danilova E.A., Trofimov A.A., Zhukov T.O. Investigation of the influence of increased temperature on the technical characteristics of piezo elements from ceramics of the zirconate-titanate lead type. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2023. No. 3 (43). P. 83-89. (In Russ.). DOI: 10.21685/2307-4205-2023-3-10

5. Fimin A.V., Pecherskaya E.A., Timokhina O.A., Aleksandrov V.S., Volik A.V., Shepeleva A.E. Investigation of the dielectric fatigue on the example of lead titanate films PbTiO₃. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2086. DOI: 10.1088/1742-6596/2086/1/012179

6. Trofimov A.A., Kikot V.V., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E. Research of technology for creating high-temperature textured materials for manufacturing multilayer piezo transducer elements. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2023. No. 2 (42). P. 90-95. (In Russ.). DOI: 10.21685/2307-4205-2023-2-10

7. Pecherskaya E.A., Fimin A.V., Alexandrov V.S., Varenik Y.A., Volik A.V., Levin A.I. Metrological analysis of the relationship model between the properties of piezoelectric materials. *Materials Science Forum*. 2022. V. 1049. P. 305-310. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1049.305

8. Tsy-pin B.V., Pecherskaya E.A., Kikot V.V., Koshkin G.A., Fimin A.V. Study of the composite piezoelectric coatings used in sensing elements. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022. V. 16, Iss. 6. P. 1322-1326. DOI: 10.1134/s1027451022060544

9. Okazaki K. Ceramic engineering for dielectrics. Tokio: Gakkensha, 1969. 532 p.

10. Smazhevskaya E.G., Feldman N.B. *P'ezoelektricheskaya keramika* [Piezoelectric ceramics]. Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1971. 199 p.