

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 681.586.773.001.63

## К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДАТЧИКА ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

К. И. Бастрыгин

Значительный прогресс в совершенствовании датчиков динамических давлений связан с переходом на современные технологии конструирования и изготовления, но и в этом случае основным конструктивным элементом датчика является чувствительный элемент, определяющий общее техническое совершенство датчика [1–3].

Использование современных конструкционных материалов и методов стабилизации узлов в чувствительном элементе и в датчике в целом позволит обеспечить работоспособность конструкции при температуре 700 °С без принудительного охлаждения.

Материалы, применяемые в датчиках, должны обладать большим числом специальных свойств, что позволяет применять самые различные сплавы металлов, полимерные материалы, керамику, специальные стекла, сапфир, кварц кристаллический, кристаллы лантангаллиевого силиката и многие другие материалы.

Основными показателями при выборе материалов являются:

- работоспособность при воздействии температур от криогенных до сверхвысоких без изменения основных характеристик материала;
- согласование коэффициентов теплового расширения материалов, из которых выполняются соприкасающиеся между собой детали, с целью уменьшения температурной погрешности конструкции;
- технологичность;
- высокая прочность и изоляционные свойства;
- стабильность характеристик.

Высокие метрологические характеристики пьезоэлектрических датчиков динамических давлений обеспечиваются уникальными физическими свойствами кристаллического кварца. Однако верхняя граница рабочего диапазона температур этого пьезоматериала, как известно, теоретически ограничена температурой фазового перехода  $\alpha \rightarrow \beta$  кварц, которая равна 573 °С, а кварцевые чувствительные элементы устойчиво работают при еще более низких температурах [4]. Вместе с тем существует большое количество новых пьезоэлектрических кристаллов, применение которых может расширить функциональные возможности и позволить конструировать высокотемпературные пьезоэлектрические датчики.

Проведены исследования ряда перспективных пьезокристаллов для построения чувствительных элементов высокотемпературных датчиков. К ним относятся такие кристаллы, как галлосиликат лантана (лангасит – ЛГС)  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , лантагаллиевый танталат (лангатат – ЛГТ)

$\text{La}_3\text{Ga}_5\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ , фосфат галлия  $\text{GaPO}_4$ , танталат лития  $\text{LiTaO}_3$  и некоторые другие. Эти кристаллы обладают высокой стабильностью электрофизических характеристик, достаточной механической прочностью, химической стойкостью и технологичностью в обработке и применении, имеют достаточно высокую температуру плавления, не изменяют электрофизические свойства, химический состав и кристаллическую структуру в рабочем диапазоне температур, в них также отсутствуют побочные сегнето-, пиро- или другие эффекты, вносящие помехи в полезный сигнал.

Наибольший интерес для построения высокотемпературных чувствительных элементов датчиков представляют кристаллы лангасита и лангатата.

Лангасит  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  (ЛГС) – синтетический монокристалл, выращивается из расплава методом Чохральского при температуре  $1470 \pm 20$  °С [5]. Важной особенностью этих кристаллов является отсутствие в них пиро- и сегнетоэлектрических свойств, приводящих к разбросу временной и температурной нестабильности электромеханических параметров. Кристаллы обладают большей, чем у кварца, акустической добротностью, большим коэффициентом связи и не имеют фазовых переходов ниже температуры плавления, что позволяет применять данный кристалл для высокотемпературных датчиков [6].

В табл. 1 представлены основные пьезоэлектрические свойства различных кристаллов.

Таблица 1

## Сравнительные характеристики лангасита с другими пьезоэлектрическими материалами

Характеристика кристалла	Наименование кристалла				
	$\alpha$ -Кварц $\text{SiO}_2$	Фосфат галлия $\text{GaPO}_4$	Лангасит $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$	Танталат лития $\text{LiTaO}_3$	Тетраборат лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$
Постоянные элементарной ячейки, Å:					
a	4,9138	4,901	8,162	5,154	9,479
c	5,4052	11,048	5,087	13,784	10,280
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,649	–	5,754	7,454	2,451
Пьезоконстанты, Кл/м <sup>2</sup> :					
$e_{11}$	0,171	–	0,45	–0,38	0,290
$e_{14}$	–0,0407	–	–0,07	1,09	0,928
КТЛР, 10 <sup>-6</sup> :					
$\alpha_{11}$	13,71	–	5,11	16,2	11,1
$\alpha_{33}$	7,48	–	3,61	4,1	–3,74
Диэлектрическая проницаемость:					
$\epsilon_{S11}/\epsilon_0$	4,58	–	18,87	42,58	8,90
$\epsilon_{S33}/\epsilon_0$	4,70	–	49,32	42,81	8,07
$\epsilon_{T11}/\epsilon_0$	4,50	5,2	18,99	53,55	10,97
$\epsilon_{T33}/\epsilon_0$	4,63	5,1	49,32	43,39	61,58
Твердость (по Моосу)	7	–	6,5	6,7	–
t фазового перехода, °С	573,5	933	Нет	660	Нет
t плавления, °С	1710	–	1470	1650	917

Из таблицы видно, что кристалл лангасит по некоторым своим физическим свойствам занимает промежуточное положение между кварцем и танталатом лития. По плотности и твердости этот материал сравним с кварцем, пьезомодули  $d_{11}$  примерно в 3 раза, а пьезомодуль  $d_{14}$  в 6 раз больше, чем у кварца.

Высокотемпературные исследования амплитудно-частотных характеристик термочувствительных элементов из лангасита с частотой 5 МГц проводились в диапазоне температур от –80 до + 1000 °С. Измерения крутизны ТЧХ проведены до температуры 800 °С. При более высоких температурах пьезоактивность элементов уменьшалась практически до нуля, однако даже после нагревания до + 1000 °С и последующего охлаждения пьезоэлементы сохраняли работоспособность [6].

Результаты проведенных исследований пьезоматериала лангасит позволяют создать из этого кристалла высокоэффективные высокотемпературные пьезопреобразователи, работающие в широком диапазоне температур (рис. 1).

Лангатат  $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$  (ЛГТ) – кристалл лантагаллиевого тангалата – имеет следующие преимущества по сравнению с традиционными материалами (пьезокерамикой и кварцем), применяемыми в датчиках физических величин:

- отсутствие у кристаллов ЛГТ фазовых переходов вплоть до температуры плавления 1450 °С;
- отсутствие у кристаллов ЛГТ пирозлектрического эффекта;
- отсутствие у кристаллов ЛГТ гистерезиса физических свойств;
- высокий  $K_{ЭМС}$  у кристаллов ЛГТ, более чем в два раза превышающий  $K_{ЭМС}$  кварца;
- постоянный в диапазоне температур до 700 °С пьезомодуль  $d_{11}$ ;
- высокое удельное сопротивление (не менее  $10^8$  Ом·при температуре 540 °С) [6].

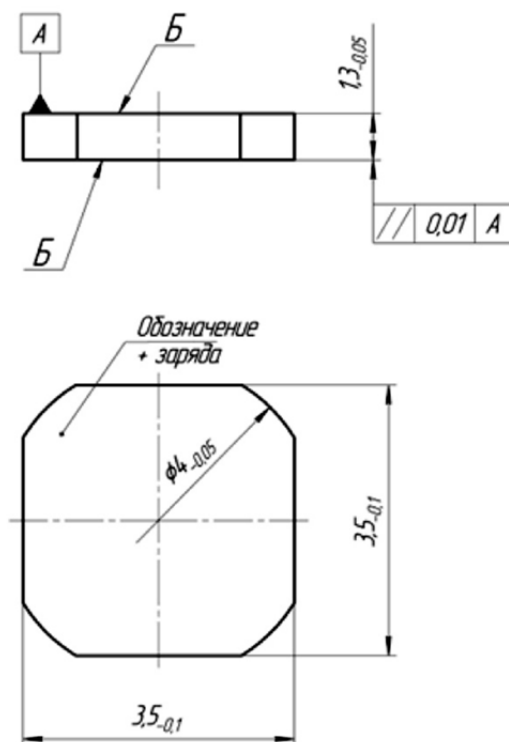


Рис. 1. Конструкция пьезопреобразователя на основе высокотемпературных пьезоматериалов лангасит и лангатат

Эти кристаллы обладают высокой стабильностью электрофизических характеристик, достаточной механической прочностью, химической стойкостью и технологичностью в обработке и применении, имеют достаточно высокую температуру плавления, не изменяют электрофизические свойства, химический состав и кристаллическую структуру в рабочем диапазоне температур, в них также отсутствуют побочные сегнето-, пиро- или другие эффекты, вносящие помехи в полезный сигнал [7–9].

Элементом составной части, определяющим конструкцию чувствительного элемента, является пьезоэлектрический элемент (элемент блока измерительного), от которого зависит работоспособность чувствительного элемента при воздействии высоких давлений и температур.

Нами рассмотрены конструктивные решения блока измерительного для вновь создаваемого высокотемпературного чувствительного элемента. Сложность решения этой задачи заключается в выборе оптимального способа крепления пьезопреобразователя с деталями блока измерительного. Выбранный способ должен обеспечивать высокую степень изоляции, а также прочность в условиях давлений, вибраций и ударов.

Учитывая, что в настоящее время отсутствуют токопроводящие клеи, работоспособные при температурах 600...700 °С, рассматривались способы крепления с помощью высокотемпературных сереброзаменяющих припоев и сварки. Однако применение сереброзаменяющих припоев усложняет конструкцию узла за счет обязательного введения дополнительных деталей и усложняет техпроцесс сборки блока измерительного.

Рассмотрим сварную конструкцию чувствительного элемента (рис. 2).

На рис. 2,а представлена конструкция измерительного блока на основе двух пьезопреобразователей, позволяющая увеличить чувствительность чувствительного элемента и тем самым расширить его диапазон измерения в область малых уровней давлений.

На рис. 2,б представлена конструкция измерительного блока на основе одного пьезопреобразователя, у которой чувствительность вдвое ниже, чем у конструкции на рис. 2,а, однако этот вариант чувствительного элемента наиболее предпочтителен при воздействии высоких давлений и температур, так как обеспечивает более высокое сопротивление изоляции и прочность.

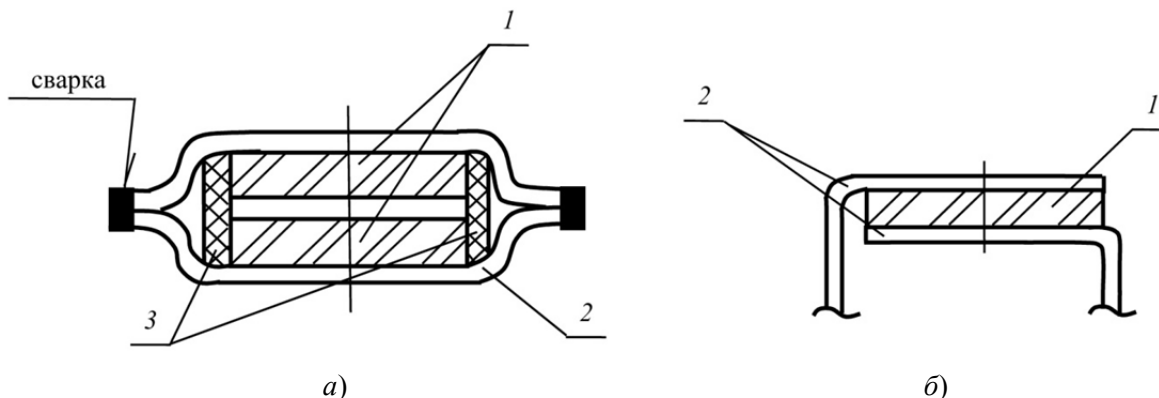


Рис. 2. Элемент блока измерительного чувствительного элемента

Блок измерительный содержит 1 – пьезопреобразователи из монокристаллических материалов (лангасит или лангатат); 2 – токоъемники из стальной ленты 0,05 мм и изолятор 3 из высокотемпературной пленки (сланоды). Пьезопреобразователи стягиваются токоъемниками, которые свариваются между собой и с токоведущими жилами кабеля.

График результатов исследований пьезопреобразователей представлен на рис. 3.

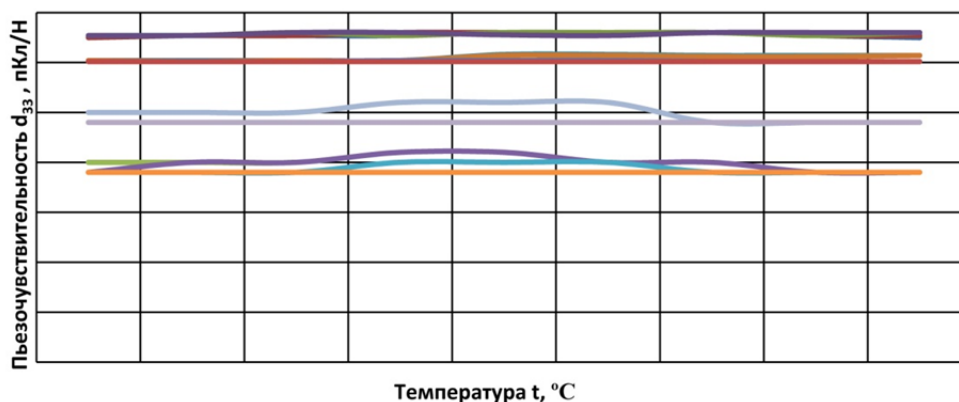


Рис. 3. Результаты проверки изменения пьезоэлектрической чувствительности и гистерезиса высокотемпературных пьезопреобразователей от температуры

Результаты исследований показали, что пьезопреобразователи из высокотемпературных кристаллов лангасита и лангатата характеризуются абсолютной стабильностью характеристик пьезочувствительности во всем рабочем диапазоне температур, отсутствием гистерезиса и работоспособны при температуре 800 °С.

На рис. 4 представлена базовая конструкция чувствительного элемента датчика динамических давлений, который состоит из корпуса 1, блока измерительного 2, механически закрепленного на основании 5, установочной втулки с резьбой 4, кабеля 3. Корпус выполнен как одно целое с мембраной из жаропрочного сплава. Кабель содержит два провода, размещенных в металлическом кожухе и изолированных минеральной засыпкой из периклаза. Кабель проходит по центру основания и образует с ним на нескольких участках герметичный высокотемпературный спай на

основе стекла и стеклокерамики, в результате чего сопротивление изоляции чувствительного элемента остается постоянным в течение длительного периода работы.

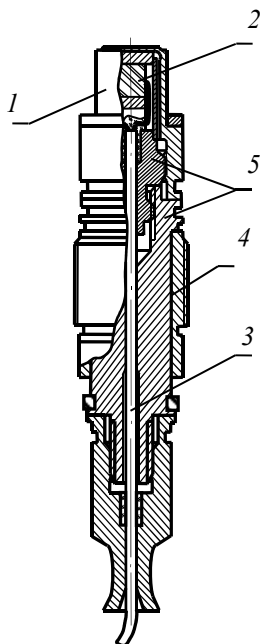


Рис. 4. Базовая конструкция чувствительного элемента датчика динамического давления

Работоспособность конструкции чувствительного элемента при рабочих температурах до 700 °С определяется тем, что чувствительный элемент выполнен из высокоэффективного стабильного пьезокристалла, а также тем, что разработана специальная технология сборки высокотемпературных конструкций.

Проведенные исследования высокотемпературного чувствительного элемента для пьезоэлектрических датчиков давления обеспечивают решение следующих задач:

- расширения рабочего диапазона температур до 700 °С за счет применения новых высокотемпературных кристаллов лантангаллиевого силиката;
- повышения надежности за счет выбора оптимальных решений конструкции блока измерительного на основе высокотемпературного пьезокристалла;
- повышения точности и стабильности характеристик во всех температурных диапазонах.

#### Список литературы

1. РМГ 29-99 «Метрология». Основные термины и определения. – М., 2000.
2. Дивеев, А. И. Синтез оптимального закона управления потоками транспорта в сети автодорог на основе генетического алгоритма / А. И. Дивеев, Н. А. Северцев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 3. – С. 87.
3. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
4. Третьяков, Ю. Д. Химия твердого тела. Теория и приложения : в 2 ч. Ч. 1: Вест-А / Ю. Д. Третьяков. – М. : Мир, 1988. – 206 с.
5. Зеленка, И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применения : пер. с чешск. / И. Зеленка. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
6. Тюнина, Е. А. Лангатат и лангасит: состав, строение, свойство : дис. ... канд. хим. наук / Тюнина Е. А. – М., 2008. – 156 с.
7. Бальшева, О. Л. Материалы для акустоэлектронных устройств : учеб. пособие / О. Л. Бальшева. – СПб., 2005. – 244 с.
8. Лысенко, А. В. Способ снижения величины вибрационных нагрузок в несущих конструкциях ЭС и методика, его реализующая / А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 41–44.

9. Северцев, Н. А. К вопросу об утрате работоспособности систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. М. Самокутяев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 268–270.

**Бастрыгин Кирилл Игоревич**

аспирант,  
начальник отдела,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8)  
79875016845  
E-mail: nik2@niifi.ru

**Аннотация.** Проведены исследования ряда перспективных пьезокристаллов. Рассмотрены конструктивные решения блока измерительного для высокотемпературного чувствительного элемента. Представлена базовая конструкция чувствительного элемента датчика динамического давления.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический датчик, пьезокристалл, динамическое давление, пьезоматериал, чувствительный элемент.

**Bastrygin Kirill Igorevich**

postgraduate student,  
head of department,  
Research Institute of Physical Measurement  
(440026, 8 Volodarsky street, Penza, Russia)

**Abstract.** Investigations of a number of promising p'ezokristallov. Considered constructive solutions unit of measurement for high temperature sensing element. Shows the basic design of the sensitive element dynamic pressure sensor.

**Key words:** piezoelectric sensor, p'ezokristall, dynamic pressure, p'ezomaterial, sensitive element.

УДК 681.586.773.001.63

**Бастрыгин, К. И.**

**К вопросу исследования и проектирования высокотемпературного датчика динамического давления / К. И. Бастрыгин // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 85–90.**