

УДК 681.2-2

doi:10.21685/2072-3059-2021-1-7

Особенности технологии изготовления высокотемпературного бесконтактного датчика для системы линейных перемещений

А. В. Гладков¹, Н. В. Недопекин², А. А. Трофимов³, В. Н. Пономарев⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{1,2,3,4}ait@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предметом исследования является технология изготовления высокотемпературного бесконтактного датчика перемещения. Целью работы является определение особенностей технологии изготовления высокотемпературного бесконтактного датчика перемещения за счет использования технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). *Материалы и методы.* Для реализации высокотемпературного бесконтактного датчика перемещения использована МЭМС-технология. Рассмотрены особенности технологической подготовки производства для изготовления металлокерамического корпуса и чувствительного элемента, выполненного в виде многослойной катушки индуктивности на кремневых подложках. *Результаты.* Использование МЭМС-технологии для изготовления высокотемпературного датчика перемещения позволяет получить такие преимущества, как надежность, миниатюризация, многокомпонентность и высокая степень интеграции. В частности, использование металлокерамического корпуса и катушек индуктивности на кремневых подложках предоставляет возможность датчику перемещения работать в условиях воздействия высоких температур – до 600 °С. *Выводы.* Описанные технологические решения для изготовления металлокерамических корпусов и кремневых подложек позволяют удовлетворить современные тенденции развития космической техники, обусловленной экстремальными условиями эксплуатации, а также получить большой технологический задел, необходимый для дальнейшего проведения работ по созданию высокотемпературных датчиков перемещений различных диапазонов измерений.

Ключевые слова: датчик линейных перемещений, технология изготовления, высокотемпературный датчик, металлокерамический корпус

Для цитирования: Гладков А. В., Недопекин Н. В., Трофимов А. А., Пономарев В. Н. Особенности технологии изготовления высокотемпературного бесконтактного датчика для системы линейных перемещений // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 1. С. 76–83. doi:10.21685/2072-3059-2021-1-7

Features of the manufacturing technology of a high-temperature non-contact sensor for a linear motion system

A.V. Gladkov¹, N.V. Nedopekin², A.A. Trofimov³, V.N. Ponomarev⁴

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

^{1,2,3,4}ait@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The subject of research is the technology of manufacturing a high-temperature contactless displacement sensor. The aim of the work is to determine the fea-

© Гладков А. В., Недопекин Н. В., Трофимов А. А., Пономарев В. Н., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

tures of the technology of manufacturing a high-temperature non-contact displacement sensor using technology of microelectromechanical systems (MEMS). *Materials and methods.* To implement a high-temperature non-contact displacement sensor, MEMS technology is used. The features of technological preparation of production for the manufacture of a cermet body and a sensitive element consisting of inductance coils on silicon substrates are considered. *Results.* The use of MEMS technology for the manufacture of a high-temperature displacement transducer provides advantages such as reliability, miniaturization, multicomponent and high degree of integration. In particular, the use of a cermet body and inductors on silicon substrates allows the displacement sensor to operate at high temperatures – up to 600 °C. *Conclusions.* The technological solutions described in the article for the manufacture of cermet bodies and silicon substrates allow satisfying modern trends in the development of space technology due to extreme operating conditions, as well as obtaining a large technological backlog necessary for further work on the creation of high-temperature displacement sensors of various measurement ranges.

Keywords: linear displacement transducer, manufacturing technology, high-temperature transducer, sintered body

For citation: Gladkov A.V., Nedopekin N.V., Trofimov A.A., Ponomarev V.N. Features of the manufacturing technology of a high-temperature non-contact sensor for a linear motion system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;1:76–83. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-1-7

Необходимость обеспечения высокой надежности, точности и безаварийности систем ракетно-космической техники (РКТ), сложных образцов вооружения и военной техники (ВВТ) заставляет разработчиков увеличивать число контролируемых физических параметров и, как следствие, применять большое количество датчиков физических величин, измеряющих и контролирующих эти параметры.

Развитие датчикообразующей аппаратуры (ДПА) [1] стало экономически выгодным и технически обоснованным с развитием нового поколения высокоинтегрированных микромеханических и электронных электрорадиоизделий.

Разработка технологии изготовления ДПА выполняется на основе научного и производственно-технологического заделов, в частности нано- и микроэлектроники, материалов, конструкций, составляющих компонентов и групповых прецизионных процессов.

Анализ мирового и отечественного опыта применения ДПА показывает, что спрос на датчиковую аппаратуру как на основное средство измерения, контроля, диагностики и управления для комплектации образцов ВВТ неизменно растет. Ведущие мировые микроэлектронные фирмы, прежде всего США и Японии, проводят масштабные исследования и разработки в области создания интеллектуальных высокоинтегрированных датчиков физических величин.

При этом увеличивается потребность в датчиках, обладающих широким спектром функциональных возможностей. Это достигается путем «интеллектуализации» ДПА.

Особую значимость приобретает направление создания нового поколения датчиков физических величин, способных не только фиксировать параметры внешней среды и преобразовывать их в электрический сигнал, но и

осуществлять предобработку сигналов, в том числе фильтрацию, компенсацию влияния внешних факторов, случайных погрешностей измерений, а также выполнять функции самоконтроля и обмена данными по системному интерфейсу.

Применение прогрессивных технологических и структурных решений обеспечивает создание комбинированных датчиков, объединяющих на одной подложке чувствительные элементы для регистрации физических величин вместе со схемой предобработки и анализа сигналов. Данное обстоятельство позволит осуществлять наиболее достоверный анализ параметров внешней среды, исключая выполнение ошибочных действий на последующих этапах обработки информации.

Информация с датчиковой аппаратуры поступает в информационно-измерительные системы управления, и ее достоверность зависит от метрологических и эксплуатационных характеристик датчиков в жестких условиях эксплуатации. При этом к датчикам перемещений предъявляются требования, которые часто противоречат друг другу.

Современные тенденции развития военной и космической техники предполагают необходимость применения датчиков как основу информационно-измерительных и управляющих систем РКТ и ВВТ.

По результатам проведенного анализа тенденций совершенствования ДПА отметим следующее [2, 3]:

- выполнение поставленных задач, решаемых ВВТ, РКТ и другими видами специальной техники, зависит от эффективности использования ДПА;

- одним из важнейших направлений развития ДПА является использование технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), являющейся продолжением развития нано- и микроэлектроники. Преимущество МЭМС-технологии состоит в надежности, миниатюризации, многокомпонентности и высокой степени интеграции;

- к общим технологиям производства ДПА относятся полупроводниковые, сверхпроводниковые, цифровые, компьютерные технологии и программы обработки информации;

- наиболее значимой тенденцией развития технологии производства ДПА является твердотельная технология. Можно отметить следующие направления совершенствования ДПА: миниатюризация, повышение точности, снижение массогабаритных показателей, применение интегральной технологии чувствительных элементов датчиков, снижение стоимости ДПА;

- одной из тенденций является одновременное использование большого количества датчиков одного и того же типа, пространственно рассредоточенных и обеспечивающих обработку информации о множестве физических величин [1];

- при снижении габаритных размеров датчиков, снижении энергопотребления и стоимости появится возможность к объединению их в комплексы, входящие в состав распределенных систем.

Примером использования технологии МЭМС может служить разработка датчиков перемещений, функционирующих в условиях воздействия высоких температур [4]. При воздействии температур окружающей среды до 600 °С возникают сложности, связанные с применением материалов и проводов для

изготовления катушек индуктивности [5, 6]. К материалам, выдерживающим такую высокую температуру, относят керамику и ситаллы.

Обработка ситалла и керамики представляет сложную задачу и требует решения многочисленных проблем, связанных с изготовлением деталей датчика. Поэтому при использовании ситалла и керамики конструктивное исполнение деталей должно быть максимально простым. В настоящее время отсутствуют моточные провода, изоляция которых выдерживает нагрев до температуры 600 °С, единственным решением является выполнение катушек индуктивности методом напыления на кремниевые подложки [7].

Для изготовления металлокерамических деталей и кремневых подложек необходима сложная технологическая подготовка производства. Технологическая подготовка производства предшествует началу изготовления аппаратуры на производстве, процесс этот длительный и трудоемкий и, как правило, составляет около 10 % трудоемкости изготовления всей аппаратуры на производстве. Фактически технологическая подготовка производства начинается уже на этапе разработки конструкторской документации, а конкретно в процессе общения конструктора и технолога.

Технологическая подготовка производства решает следующие основные задачи:

- обеспечение производственной технологичности конструкции изделия;
- организация процесса технологической подготовки производства, в том числе с использованием интегральной компьютерной системы управления (CALS-технологии).
- разработка технологических процессов изготовления приборов, сборочных единиц, деталей;
- проектирование и изготовление средств технологического обеспечения, в том числе специальных.

Рассмотрим особенности технологической подготовки производства на примере разработки высокотемпературного датчика линейных перемещений.

При изготовлении корпуса высокотемпературного датчика линейных перемещений проводится формообразование деталей из металла стандартным режущим твердосплавным и быстрорежущим инструментом.

Технологические процессы механической обработки деталей из керамики представляют совокупность последовательного выполнения шлифовальных, доводочных и отмывочных операций.

Формовка деталей датчика перемещений из керамики осуществляется с помощью технологической оснастки и специального инструмента с алмазным напылением. Одной из сложных и трудоемких в изготовлении деталей из керамики является корпус (рис. 1) [7].

На рис. 2 представлена 3D-модель высокотемпературного датчика линейных перемещений.

Керамический корпус изготавливается методом горячего литья под давлением в формах для литья с последующим спеканием в камерной печи в воздушной среде при температуре 1640 °С.

Собирается металлокерамический корпус в специальном приспособлении. Изготовление корпуса осуществляется методом активной пайки керамики с металлом, в качестве композита используется титановая шайба. Пайка

корпуса производится припоем в вакуумной печи при температуре 800 ± 10 °С и вакууме $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Керамическая колодка также изготавливается из керамического материала с применением формы для литья.

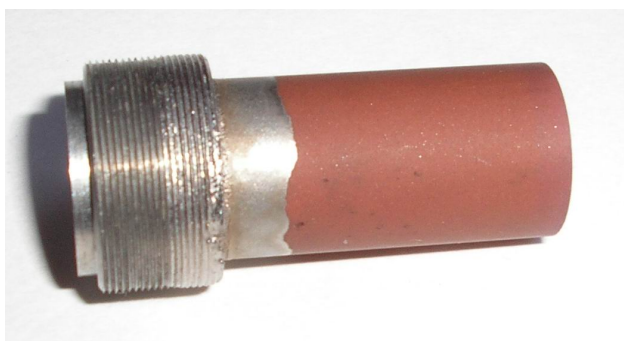


Рис. 1. Металлокерамический корпус датчика линейных перемещений

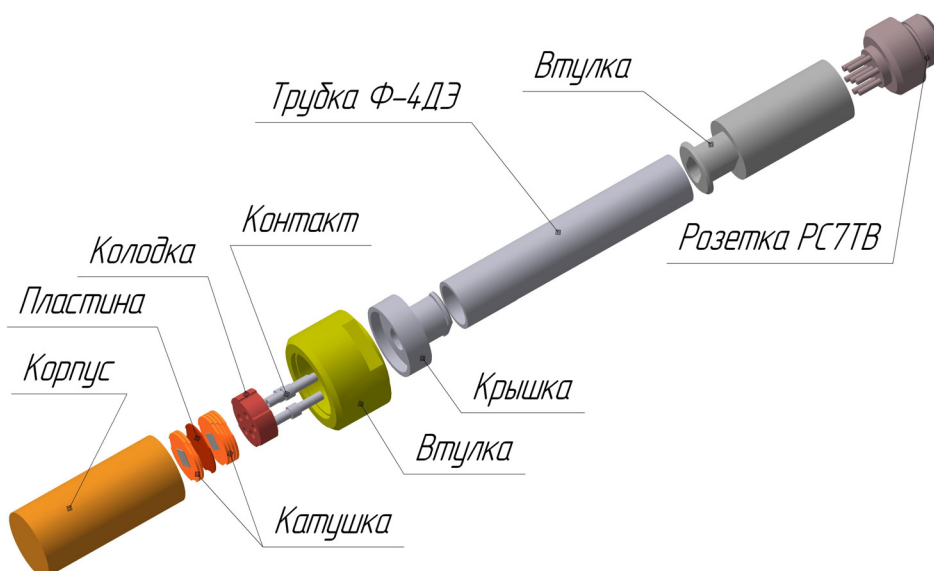


Рис. 2. 3D-модель высокотемпературного датчика линейных перемещений

Катушки индуктивности изготавливаются на пластине из кремния групповым методом с шириной проводящих дорожек и расстоянием между ними 100 мкм (рис. 3).

При изготовлении высокотемпературного датчика перемещений самой трудоемкой задачей является сборка чувствительного элемента.

Чувствительный элемент представляет собой катушку индуктивности, состоящую из четырех пластин, соединенных посредством разварки алюминиевой проволоки диаметром 0,035 мм на контактные площадки пластин. Специальный клей используется для исключения обрыва проволоки в месте

разварки и склеивания пластин между собой. Контроль целостности электрической цепи при соединении пластин осуществляется после технологической операции наложения пластин друг на друга для исключения обрыва проводников [8].

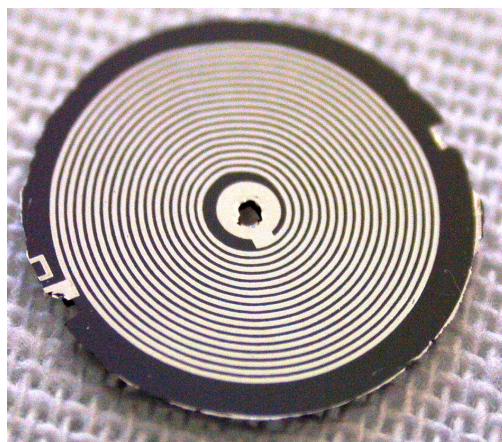


Рис. 3. Катушка индуктивности на кремнии, ширина дорожек 100 мкм, увеличение $\times 15$

Для защиты от коррозии, а также от разрыва проводов в местах спайки чувствительный элемент, расположенный в корпусе, заливается клеем.

Заключение

Проведен анализ технологии изготовления высокотемпературного датчика линейных перемещений с металлокерамическим корпусом, работоспособного в условиях воздействия высоких температур до 600 °С. В результате проведенных исследований получен технологический опыт, необходимый для дальнейшей разработки высокотемпературных датчиков перемещений различных диапазонов измерений для изделий военной и ракетно-космической техники.

Список литературы

1. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Здобнов С. А., Цибизов П. Н. Этапы развития и основные направления совершенствования датчиков физических величин для ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2019. № 12. С. 30–39.
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. С. 4–6.
3. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. А. Высокотемпературный датчик линейных перемещений // Авиация и космонавтика – 2012 : сб. материалов конф. Москва, 2012. С. 141–142.
4. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 24–26.
5. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.

6. Трофимов А. А. Унифицированные электромагнитные датчики перемещений для систем специального назначения : дис. ... д-ра техн. наук. Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. 303 с.
7. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. А. Высокотемпературный датчик линейных перемещений Авиация и космонавтика – 2012 : сб. материалов конференции МАИ. М., 2012. С. 141–142.
8. Труды Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» : монография. М. : Физматлит, 2009. 376 с.

References

1. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Zdobnov S.A., Tsibizov P.N. Stages of development and main directions of improvement of sensors of physical quantities for rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2019;12:30–39. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and, based on them, systems for measuring, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;9:4–6. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Trofimov A.A. High temperature linear encoder. *Aviatsiya i kosmonavtika – 2012: sb. materialov konf. = Aviation and astronautics – 2020: collected articles*. Moscow, 2012:141–142. (In Russ.)
4. Trofimov A. A., Trofimov A. N. Expansion of the temperature range of raster transformer displacement sensors. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2009;6:24–26. (In Russ.)
5. Trofimov A.A., Konakov N.D. Extended range transformer displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;9:8–10. (In Russ.)
6. Trofimov A.A. *Unifitsirovannyye elektromagnitnyye datchiki peremeshcheniy dlya sistem spetsial'nogo naznacheniya: dis. d-ra tekhn. Nauk = Unified electromagnetic displacement sensors for special purpose systems: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences*. Penza: Izd-vo PGU, 2011:303. (In Russ.)
7. Dmitrienko A.G., Trofimov A.A. *Vysokotemperaturnyy datchik lineynykh peremeshcheniy Aviatsiya i kosmonavtika – 2012: sb. materialov konferentsii MAI = High-temperature linear displacement transducer Aviation and astronautics – 2012: proceedings of MAI conference*. Moscow, 2012:141–142. (In Russ.)
8. *Trudy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroeniya i informatsionnykh tekhnologiy»: monografiya = Proceedings of the All-Russian scientific and engineering conference “Actual problems of rocket and space instrumentation and information technology” : monograph*. Moscow: Fizmatlit, 2009:376. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Владимирович Гладков

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная,40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksey V. Gladkov

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Никита Вячеславович Недопекин

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная,40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Nikita V. Nedopekin

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная,40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksey A. Trofimov

Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of information and measuring technology
and metrology, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владислав Николаевич Пономарев

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная,40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Vladislav N. Ponomarev

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 09.10.2020

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.11.2020

Принята к публикации / Accepted 10.12.2020