

*Т. И. Мурашкина, А. В. Мотин, М. М. Чукарева, С. И. Торгашин*

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УСКОРЕНИЯ

*T. I. Murashkina, A. V. Motin, M. M. Chukareva, S. I. Torgashin*

## TECHNOLOGY OF FABRICATION OF SENSITIVE ELEMENT OF THE DIFFERENTIAL FIBER-OPTIC ACCELERATION SENSOR

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** К современной информационно-измерительной технике, в частности к датчикам ускорений (линейных и вибрационных), применяющимся в ракетно-космической и авиационной отраслях, предъявляются строгие требования по метрологическим и эксплуатационным характеристикам, технологичности изготовления, массо-габаритным показателям, возможности работать в жесточайших условиях эксплуатации, например, в условиях сильных электромагнитных полей и достаточно часто искропожаро/взрывопожароопасности. Данным критериям в полной мере отвечают волоконно-оптические датчики ускорений дифференциального типа. В связи с этим разработка чувствительного элемента для данного типа датчиков является важной и актуальной на данный момент. **Материалы и методы.** При разработке чувствительного элемента для дифференциального волоконно-оптического акселерометра использовались базовые принципы построения волоконно-оптических датчиков. Применены материалы, обеспечивающие прецизионность оптической и механической преобразующих систем, в частности сталь 36НХТЮ и кварцевое оптическое стекло. Применены способ изготовления упругого элемента методом анодно-катодного травления и несколько способов соединения упругого и оптического элемента в виде цилиндрической линзы. **Результаты.** Приводятся результаты разработки конструктивно-технологических решений чувствительного элемента в виде пружины с двумя цилиндрическими линзами – базового элемента технических решений волоконно-оптических датчиков ускорений дифференциального типа, используемых в информационно-измерительной технике. **Выводы.** Разработан чувствительный элемент волоконно-оптического датчика ускорения, реализующий дифференциальную схему преобразования оптического сигнала и предназначенный для использования в жестких условиях эксплуатации. Приведены технологические последовательности изготовления и варианты конструктивного исполнения чувствительного элемента, результаты изготовления такого чувствительного элемента для рабочего макетного образца датчика ускорения.

**A b s t r a c t . Background.** To the modern information-measuring technique, in particular to sensors of accelerations (linear and vibration) used in the aerospace and aviation industries, strict requirements on metrological and operational characteristics, manufacturability, mass-dimensional indicators, the opportunity to work in the most severe operating conditions, for example in conditions of strong electromagnetic fields, and, often, intrinsically-fire-explosion and fire hazard. These criteria fully meet the fiber-optic sensors accelerations of the differential type. In this regard, development of a sensitive element of this type of sensors is important and relevant at the moment. **Materials and methods.** When designing a sensing element for differential fiber-optic accelerometer has been used the basic principles of fiber-optic sensors. Applied materials, providing precision optical and mechanical conversion systems, in particular

steel 36НХТЮ quartz and optical glass. Applied to a method of manufacturing the elastic element by the method of anodic-cathodic pickling and several ways of connecting the elastic and the optical element in the form of cylindrical lenses. **Results.** The results of the development of constructive-technological decisions of a sensitive element in the form of a spring with two cylindrical lenses – the basic element of technical solutions in fiber-optic sensors accelerations of the differential type used in information-measuring equipment. **Conclusions.** Developed by the sensitive element of fiber-optic acceleration sensor that implements a differential conversion circuit of the optical signal and designed for use in harsh environments. The technological sequence of manufacture and construction of the sensing element, the results of manufacturing such a sensing element for the working of a model of the acceleration sensor.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** волоконно-оптический датчик ускорения, чувствительный элемент, оптический модулирующий элемент.

**К e y w o r d s:** fiber-optic acceleration sensor, sensing element, optical modulating element.

Важнейшей задачей при построении волоконно-оптических датчиков ускорения является обеспечение высоких метрологических характеристик при низких габаритно-массовых показателях.

В работах [1–4] рассмотрен разработанный авторами волоконно-оптический двухкоординатный акселерометр, предназначенный для измерения ускорения. Главной особенностью указанного датчика является применение двух чувствительных элементов в виде плоскопараллельных пружин Н-образной формы (рис. 1).

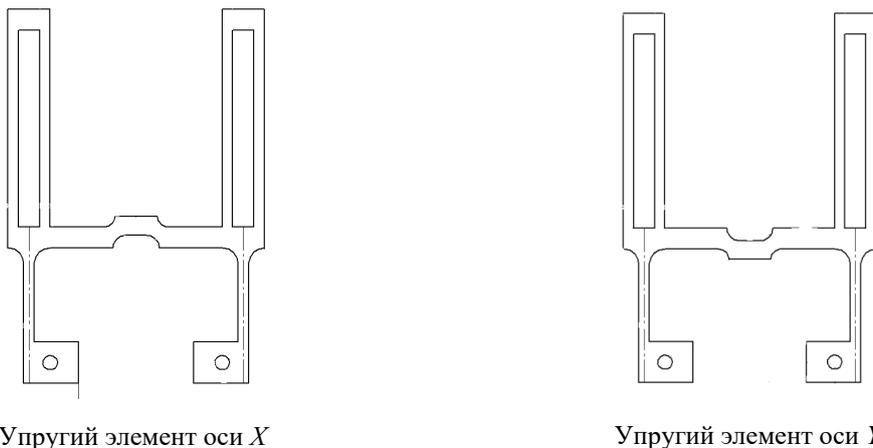


Рис. 1. Конструктивные схемы упругих Н-образных элементов

В двух верхних концах каждой пружины закреплены инерционные массы в виде оптических модулирующих элементов, представляющие собой прозрачные цилиндрические линзы. Ввиду особенностей расположения чувствительных элементов перпендикулярно друг другу они имеют пазы в средней части перемычки для беспрепятственного прохождения сквозь друг друга. Причем на перемычке упругого элемента оси  $X$  паз расположен по центру в нижней части, чтобы реализовать беспрепятственное перемещение упругого элемента оси  $Y$ , в свою очередь, на перемычке упругого элемента оси  $Y$  также выполнен паз, но выполнен он в верхней части. Нижние концы чувствительных элементов закреплены в четырех узлах юстировки и жестко с ними скреплены штифтом с развальцовкой. Узлы юстировки включают цилиндр, разделенный на две части для крепления упругого элемента. Использование упругого элемента разработанной конструкции дает существенные преимущества перед использованием одной плоскопараллельной пружины. Использование Н-образной пружины позволяет уменьшить габариты упругого элемента, а именно, длину и толщину пружины, что, несомненно, приведет к уменьшению габаритов самого датчика и возможности реализации улучшенной дифференци-

альной схемы преобразования оптического сигнала. Если использовать две плоскопараллельные пружины без перемычки, то существует вероятность отклонения их на неодинаковое расстояние при воздействии ускорения из-за погрешности и неточностей изготовления как самих пружин, так и линз. Внедрение перемычки компенсирует погрешности изготовления, улучшая синхронность перемещения оптических элементов, а также ограничивает перемещение линз в плоскости перпендикулярной колебательной, что, в свою очередь, ведет к улучшению метрологических характеристик.

Применение двух цилиндрических линз на одном чувствительном элементе обусловлено особенностью модуляции светового потока для реализации дифференциальной схемы преобразования и конструктивных особенностей расположения оптических волокон, при которых исключаются влияния изгибов оптических волокон и флуктуаций света на полезный сигнал. Линзы изготавливаются из прутка кварцевого стекла и обладают рядом ценных оптических свойств, необходимых для специальных, прецизионных оптических систем по сравнению с линзами из природного кварцевого стекла [5]. Размеры линз рассчитываются и выбираются исходя из конструктивных параметров акселерометра [6]. В конкретной конструкции используется заготовка цилиндрической линзы диаметром 3 мм и длиной 2 мм.

#### *Технологические особенности изготовления чувствительного элемента*

После выбора конструктивных параметров оптического элемента и расчета параметров упругого элемента переходят к этапу изготовления.

Для упругих элементов используется сталь 36НХТЮ.

Изготовление упругих элементов может проводиться двумя способами:

1) методом штамповки изготавливается плоскопараллельная пружина Н-образной конфигурации с заданными размерами.

После штамповки производится визуальный осмотр пружины на наличие дефектов. При наличии рисок, замятий и прочих механических повреждений пружина бракуется;

2) методом анодно-катодного травления.

На лист металла наносится защитная маска с размерами, равными размерам будущего упругого элемента. Затем деталь подключается к одному из контактов и опускается в раствор электролита. Травление производят током 2–3 А/дм<sup>3</sup>. После травления деталь промывают, снимают защитный слой, проводят визуальный осмотр. В случае необходимости производят механическую доводку детали до заданных размеров. При наличии раковин и излишнего бокового подтравливания деталь бракуют.

На рис. 2 показан упругий элемент для рабочего макета датчика ускорения, полученный путем анодно-катодного травления (в данном случае необходимо доведение детали до требуемых размеров).

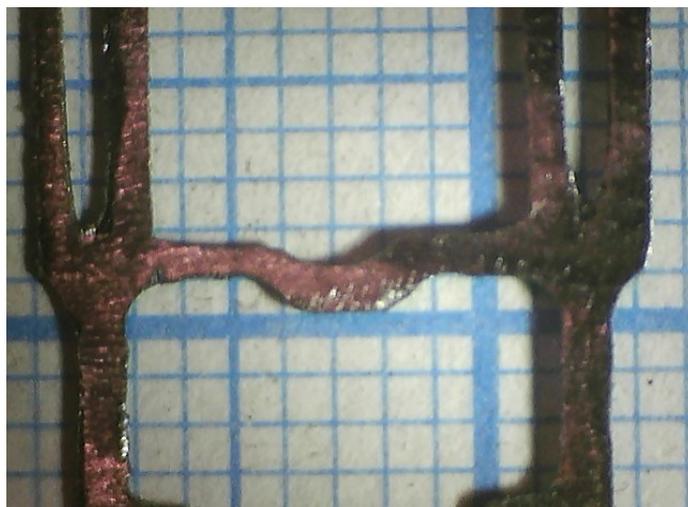


Рис. 2. Упругий элемент для рабочего макета датчика ускорения, полученный путем анодно-катодного травления

Сборку чувствительного элемента следует начать с соединения оптических элементов с упругими элементами. Перед сборкой чувствительного элемента необходимо убедиться, что на оптических и упругих элементах отсутствуют дефекты.

Верхние концы H-образной пружины оборачивают вокруг цилиндрической линзы и сваривают точечно-импульсной сваркой (или пайкой с применением соответствующих паечных флюсов). Так как металл упругого элемента достаточно тонкий, необходимо подобрать значение сварочного тока и время импульса, чтобы добиться надежного соединения и предотвратить прогорание металла.

На одном упругом элементе необходимо разместить два оптических элемента. Очень важно в процессе сборки обеспечить соосность оптических элементов, чтобы предотвратить снижение чувствительности оптической системы. Для этих целей, а также для удобства подвода контактов сварочного аппарата используется специальная технологическая оправка.

Второй этап сборки чувствительного элемента – соединение упругого элемента с узлами юстировки. На нижние части чувствительного элемента с двух сторон устанавливаются половинки узлов юстировки, затем в отверстие устанавливается штифт и развальцовывается с двух сторон. Сделано это для удобства соединения нижних частей упругого элемента с узлом юстировки. Одновременно это снижает стоимость изготовления данных узлов, так как появляется возможность сделать узел юстировки, используя менее точное оборудование.

3D-модель и макетный образец чувствительного элемента, собранного данным методом пайки, приведены на рис. 3.

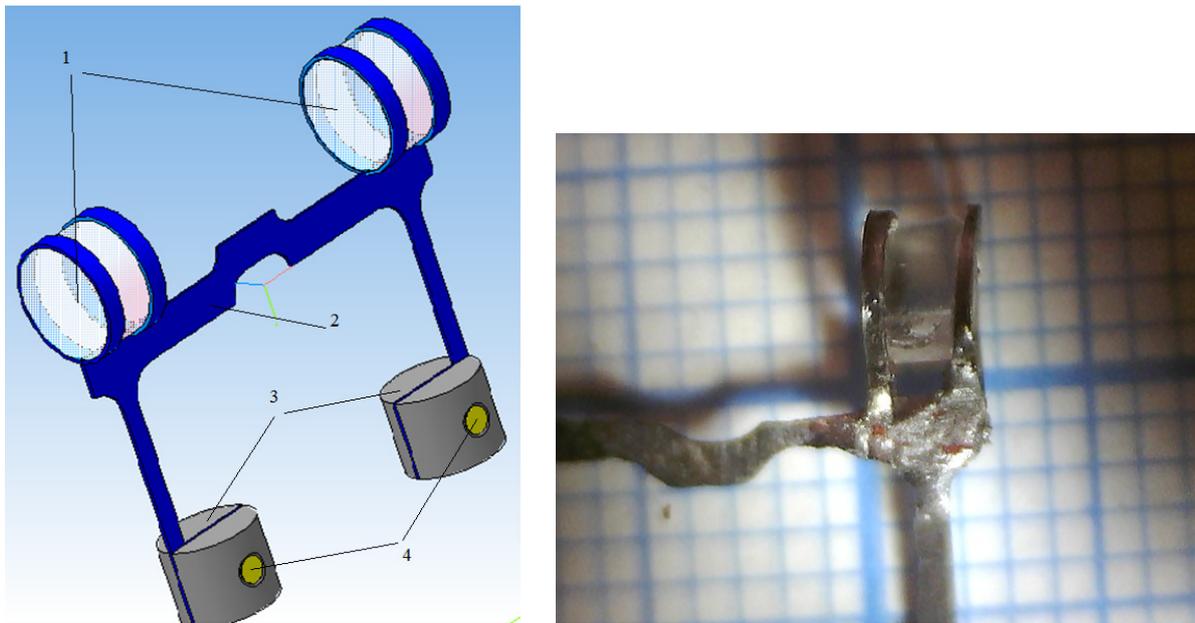


Рис. 3. 3D-модель и макетный образец чувствительного элемента:  
1 – цилиндрические линзы; 2 – упругий элемент; 3 – узлы юстировки; 4 – штифты

Ввиду конструктивных особенностей датчика в зоне измерения задействованы только верхние части оптических элементов, поэтому может применяться альтернативный вариант чувствительного элемента, в котором крепление линзы на нем может осуществляться с применением синтетических (полимерных, эпоксидных) адгезивов.

Для изготовления такого варианта чувствительных элементов используется упрощенная конструкция упругого элемента без верхних концов. Упругие элементы изготавливаются теми же методами. Перед креплением линзы упругий элемент шлифуют, наносят обезжириватель и адгезив. Затем крепят специальные крепежные элементы линзы, выполненные из полимерного материала. После высыхания и проверки правильности установки крепежных элементов на них с помощью специального оптического адгезива закрепляются цилиндрические линзы (рис. 4).

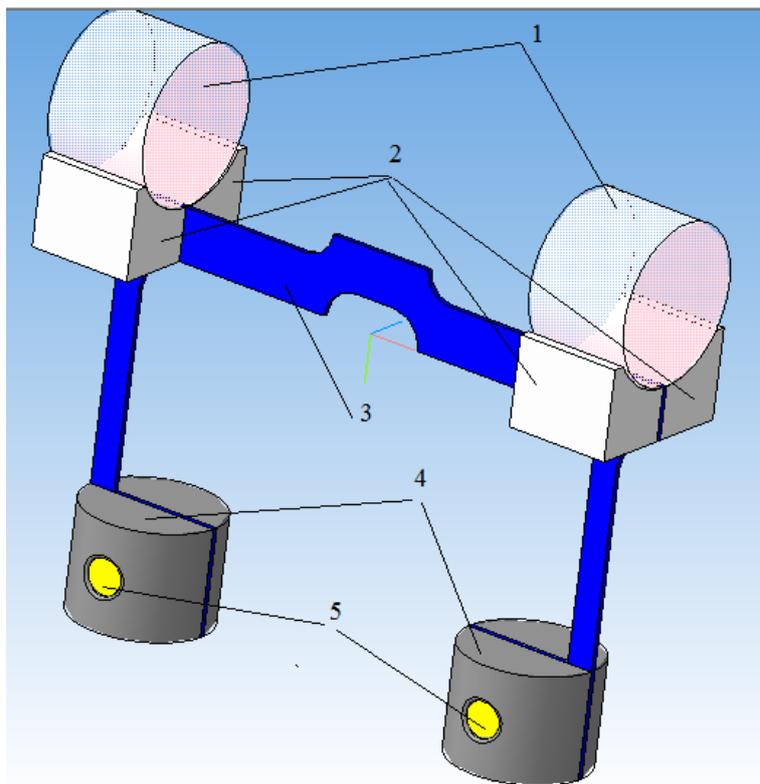


Рис. 4. Альтернативный вариант чувствительного элемента:  
 1 – цилиндрические линзы; 2 – полимерные крепежные элементы линз;  
 3 – упругий элемент; 4 – узлы юстировки; 5 – штифты

Технологический процесс крепления узлов юстировки такой же, как и в предыдущем варианте.

Альтернативный вариант чувствительного элемента имеет упрощенную технологию изготовления, однако имеет ограниченный температурный диапазон использования, обусловленный применением адгезивов.

### *Заключение*

Разработанный чувствительный элемент волоконно-оптического датчика ускорения в полной мере реализует дифференциальную схему преобразования оптического сигнала и предназначен для использования в жестких условиях эксплуатации. Приведенные конструктивно-технологические последовательности изготовления и варианты исполнения чувствительного элемента позволяют изготовить чувствительный элемент с заданными характеристиками с высокой точностью.

### *Библиографический список*

1. Мотин, А. В. Разработка волоконно-оптического акселерометра новой конструкции / А. В. Мотин, Т. И. Мурашкина // Студенческий научный форум : VII Междунар. студ. электрон. науч. конф. – 2015. – URL: <http://www.scienceforum.ru/2015/15/12609>
2. Мотин, А. В. Разработка конструкции волоконно-оптического акселерометра / А. В. Мотин, Т. И. Мурашкина // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шлядинские чтения – 2014» (г. Пенза, 10–12 ноября 2014 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 106–109.
3. Мотин, А. В. Двухкоординатный волоконно-оптический акселерометр / А. В. Мотин, Т. И. Мурашкина // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне (г. Пенза, 19–21 мая 2015 г.). – Пенза, 2015. – С. 246–249.

4. Мотин, А. В. Разработка чувствительного элемента новой конструкции для волоконно-оптического акселерометра / А. В. Мотин, Т. И. Мурашкина // Студенческий научный форум : VII Междунар. студ. электрон. науч. конф. – 2015. – URL: [www.scienceforum.ru/2015/1351/12715](http://www.scienceforum.ru/2015/1351/12715)
5. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.
6. Мурашкина, Т. И. Mathematical simulation of the optical system of a fiber-optic measuring micro motion converter with a cylindrical lens modulation element / Т. И. Мурашкина, А. В. Мотин, Е. А. Бадеева // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2016. – Vol. 803. – URL: <http://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/803/1>
7. Transformation of Signals in the Optic Systems of Differenzial-type Fiber-Optic Transducers / Т. И. Murashkina, Е. А. Badeeva, А. V. Motin [ent.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, iss. 13. – P. 2853–2857. – URL: <https://elibrary.ru/>
8. Технологические основы проектирования волоконно-оптического датчика ускорения / А. С. Щевелев, О. В. Юрова, Т. И. Мурашкина и [др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 8. – С. 39–43.
9. Волоконно-оптические датчики ускорений с цилиндрическими линзами, разработанные в НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева, А. В. Мотин и [др.] // Оптика – 2015 : сб. тр. IX Междунар. конф. молодых ученых и специалистов / под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С. А. Козлова. – СПб. : Университет ИТМО, 2015. – 717 с.
10. Некоторые способы снижения основной погрешности волоконно-оптических датчиков / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева, О. В. Юрова и [др.] // Труды Междунар. симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – 387 с.

**Мурашкина Татьяна Ивановна**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра приборостроения,  
директор НТЦ «Нанотехнологии  
волоконно-оптических систем»,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
e-mail: [timurashkina@mail.ru](mailto:timurashkina@mail.ru)

**Murashkina Tatiana Ivanovna**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of instrument engineering,  
director of the STC «Nano technology  
fiber-optic systems»,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Мотин Андрей Владимирович**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
e-mail: [motin.andrey92@yandex.ru](mailto:motin.andrey92@yandex.ru)

**Motin Andrey Vladimirovich**

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

**Чукарева Мария Михайловна**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [marisavochkina@mail.ru](mailto:marisavochkina@mail.ru)

**Chukareva Maria Mikhailovna**

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

**Торгашин Сергей Иванович**

кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой ракетно-космического  
и авиационного приборостроения,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [rkar@pnzgu.ru](mailto:rkar@pnzgu.ru)

**Torgashin Sergey Ivanovich**

candidate of technical sciences,  
head of syb-department of rocket-space  
and aerospace instrumentation,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.7.08

**Мурашкина, Т. И.**

**Технология изготовления чувствительного элемента дифференциального волоконно-оптического датчика ускорения / Т. И. Мурашкина, А. В. Мотин, М. М. Чукарева, С. И. Торгашин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 38–44. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-6.**